

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



*Istraživanje puteva energetske tranzicije -  
međuviznost "power-to-X" tehnologija,  
tehnologija odgovora potrošnje i povezivanja tržišta  
energijom – INTERENERGY*

*D2.1 – Modul za simulaciju različitih odgovora  
potrošnje i „power-to-x“ tehnologija u energetske  
sustavu -H2RES*

Zagreb, 2022. godina

Projektni tim:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Prof. dr. sc. Ingo Stadler

Prof. dr. sc. Henrik Lund

Izv. prof. dr. sc. Iva Ridjan Skov

Prof. dr. sc. Fei Wang

Dr. sc. Felipe Feijoo

Antun Pfeifer, mag. ing. mech.

Luka Herc, mag. ing. mech.

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	2
2. H2RES MODEL.....	4
3. SEKTOR PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	6
3.1. Bilance potrošnje i proizvodnje energije .....	8
3.2. Varijanta bilance električne energije uz mogućnost simulacije više susjednih energetskih sustava .....	10
3.3. Fleksibilna potrošnja električne energije (demand side flexibility).....	12
3.4. Akumulacijske hidroelektrane .....	13
3.5. Modeliranje reverzibilnih hidroelektrana.....	14
3.6. Ograničenja rada proizvodnih postrojenja .....	15
4. SEKTOR INDUSTRIJE .....	18
4.1. Alternativni modul industrije .....	19
5. SEKTOR TRANSPORTA.....	23
5.1. Pohrana energije u baterijama električnih vozila .....	26
6. VODIK I SINTETSKA GORIVA.....	28
6.1. Proizvodnja i skladištenje vodika .....	28
6.2. Proizvodnja elektrogoriva .....	30
7. POHRANA ENERGIJE .....	35
7.1. Stacionarni sustavi pohrane .....	35
8. SUSTAVI GRIJANJA I HLAĐENJA.....	37
8.1. Kogeneracijski sustavi i pohrana energije .....	37
8.2. Bilanca toplinskih i rashladnih potreba.....	38
8.3. Dizalice topline i električni grijači.....	39
9. Emisije CO <sub>2</sub> .....	43
10. FUNKCIJA CILJA .....	44
11. STRUKTURA I UNOS PODATAKA .....	49
a) Genco_dat .....	51

b)	Demand_dat .....	54
c)	Fuel_price_dat.....	55
d)	Avl_factor_plant_dat .....	55
e)	Inflows_dat.....	56
f)	Import_export.....	56
g)	Heat_demand_dat.....	57
h)	Cooling_demand_dat .....	58
i)	Ev_transload_dat.....	58
j)	H2_demand_dat .....	59
k)	Flex_tech_dat .....	59
l)	Transp_FCEV .....	60
m)	Transp_ICE .....	60
n)	Transp_EV .....	61
o)	Flex_tech.....	61
i.	Thermal_tech .....	61
ii.	DistrictHeating .....	62
iii.	Tech_cost_years.....	62
iv.	Transp_max_inv_year.....	62
v.	Industry .....	63
vi.	COP_HP.....	63
vii.	Industry_ironsteel .....	64
viii.	Industry_manufacturing .....	64
ix.	Industry_wood .....	65
x.	Industry_paper .....	65
xi.	Industry_food.....	65
12.	REFERENCE .....	66

---

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz H2RES modela .....	5
Slika 2. Sektor industrije .....	18
Slika 3. Alternativni modul industrije .....	19
Slika 4. Podaci o simulaciji .....	49
Slika 5. Ograničenja odjela OIE i emisija CO <sub>2</sub> .....	50
Slika 6. Ulazne datoteke .....	50
Slika 7. Primjer definicije korištenih sata i godina u modelu .....	51
Slika 8. Primjer definicije ne korištenja podataka prikazanih na slici .....	51
Slika 9. Uzorak podataka iz demand_dat datoteke .....	55
Slika 10. Struktura podataka .....	56
Slika 11. Podaci o pritocima .....	56
Slika 12. Podaci o uvozu i izvozu električne energije u sustav .....	57
Slika 13. Podaci o toplinskim potrebama .....	58
Slika 14. Podaci o potrebama za hlađenje .....	58
Slika 15. Podaci o dostupnosti električnih vozila i potražnji za energijom .....	59
Slika 16. Potrebe za vodikom .....	59
Slika 17. Podaci o vozilima na vodik .....	60
Slika 18. Podaci o vozilima s motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem .....	60
Slika 19. Podaci o baterijsko električnim vozilima .....	61
Slika 20. Ulazni podaci za tehnologije fleksibilnosti .....	61
Slika 21. Podaci o kotlovima u individualnim sustavima .....	62
Slika 22. Podaci o kotlovima i dizalicama topline u početnoj godini u centraliziranim toplinskim sustavima .....	62
Slika 23. Podaci o cijenama opreme .....	62
Slika 24. Ograničenja investicije u različite vrste vozila .....	63
Slika 25. Podaci o industriji .....	63
Slika 26. Podaci o učinkovitosti dizalica topline .....	64
Slika 27. Podaci o industriji željeza i čelika .....	64
Slika 28. Podaci o proizvodnoj industriji .....	65
Slika 29. Podaci o drvoprerađivačkoj industriji .....	65

---

Slika 30. Podaci o industriji proizvodnje papira .....	65
Slika 31. Podaci o prehrambenoj industriji .....	65

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Alati energetskeg modeliranja .....	2
Tablica 2. Opis parametra .....	49
Tablica 3. Osnovne informacije o instaliranim kapacitetima.....	51

## 1. UVOD

Razvoj energetskeg sustava se može modelirati provođenjem niza simulacija kako bi se razmotrile i testirale sve moguće opcije razvoja. Nakon provedenih simulacija se dobiveni rezultati moraju pratiti u provedbi što je detaljnije moguće kako bi se osigurala tranzicija sustava na obnovljive izvore energije te kako bi se osiguralo planirano smanjenje emisija kao i smanjenje troškova sustava.

Postoje dva načina provedbe simulacija energetskeg sustava. Prvi omogućuje osnovno modeliranje i usmjeren je na optimizaciju samog rada elektrana. Primjer ove vrste modela je Dispa-SET. Neki modeli također nude više strategija prema kojim se optimira rad sustava. Primjerice, za minimizaciju emisija CO<sub>2</sub> ili ukupnih troškova sustava. EnergyPLAN je jedan od poznatijih alata u ovoj kategoriji. Bavi se simulacijom energetskeg sustava na satnoj razini tijekom jedne godine. U ovom modelu se kapaciteti elektrana i potražnja za energijom različitih sektora ne mijenjaju se tijekom cijele simulacije. To znači da se sustav u EnergyPLAN-u simulira u konfiguraciji koju je postavio korisnik. Program je u tom slučaju konfiguriran s ciljevima simulacije koji mogu diktirati kada i hoće li se koristiti neka od tehnologija. Dodatni korak naprijed u usporedbi s pristupom primijenjenim u programima poput EnergyPLAN-a je uključivanje duljeg horizonta planiranja i mogućnosti ulaganja u nove kapacitete postrojenja kao i njihove dekomisije. Uz uključivanje ovih opcija, moguće je modelirati razvitak energetskeg sustava tijekom niza godina. Modeli koji nude ovu funkcionalnost općenito su složeniji i stoga su razvijeni za korištenje u komercijalne svrhe. Neki od principa modeliranja su preuzeti iz EnergyPLAN-a i implementirani u H2RES kao što je primjerice modeliranje električnih vozila u sektoru transporta.

Ostali poznati modeli za energetske planiranje su prikazani u sljedećoj tablici. Kao što je vidljivo, neki pripadaju samo kategoriji modela simulacije, dok neki omogućuju i planiranje razvoja sustava uz primjenu optimizacije.

Tablica 1. Alati energetskeg modeliranja

Model	Namjena	Pristup	Metoda	Rezolucija	Vremenski okvir	Geografsko područje
Dispa-SET	ODS, S, PSAT	BU	MILP	15 minutna	50+ godina	Lokalni do globalnog



EnergyPlan	S, IDS	BU	S	Satna	1 godina	Lokalni	do kontinentalnog
energyPro	I & ODS	BU	AO <sup>e</sup>	Minutna	Maksimalno 40 godina	Lokalni	do regionalnog
HOMER	I & ODS	BU	S & O	Minutna	Više godina	Lokalni	
LEAP	S	H	S & LP	Godina	Uobičajeno 20–50 godina	Lokalni	do globalnog
MARKAL	S	BU	LP/MIP, PE	Više godina	Dugoročno (UD)	Lokalni	do regionalnog
OSeMOSYS	IDS	BU	LP	UD (intra-annual)	Dugoročno (10–100 god)	Lokalni	do kontinentalnog
PLEXOS	I & ODS, S, PSAT	BU	f	Do 1 minute (najčešće 1 sat)	Dugoročno (1 dan do 50 + godina)	Lokalni	do globalnog
RETScreen	IDS, S	H	S	Godina/mjesec/dan	Maksimalno 100 godina	Lokalni	do globalnog
TIMES	I & ODS	H/BU	LP/MIP, PE	Više godina	Dugoročno (UD)	Lokalni	do globalnog
TRNSYS18	PSAT	BU	S & L/NLP	0.01 sekunda do 1 sata	Nekoliko godina	Lokalni	

Kratice korištene u tablici na engleskom jeziku:

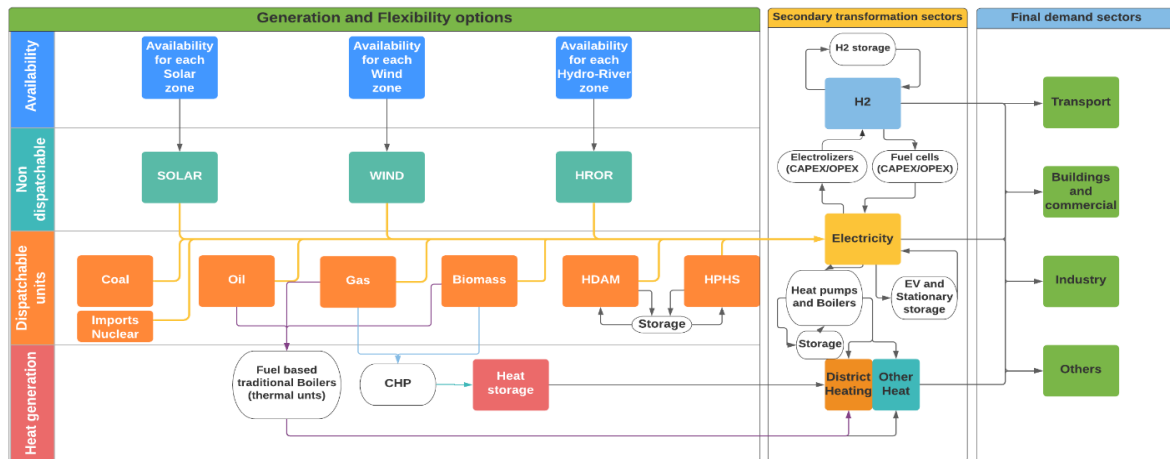
- Namjena: IDS –Investment Decision Support, ODS –Operation Decision Support, S – Scenario, PSAT –Power System Analysis Tool, A –Analysis;
- Pristup: BU –Bottom-up, TD –Top-down, H –Hybrid;
- Metoda: S –Simulation, LP –Linear Programming, MIP –Mixed Integer Programming, PE –Partial Equilibrium, A- Accounting, ABS –Agent-based Simulation, MIQCP –Mixed Integer Quadratically Constrained Programming, CGE –Computable General Equilibrium, E –Equilibrium, CMA-ES –Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, HO –Heuristic Optimisation, ECE –Economic Computable Equilibrium, SDDP –Stochastic Dual Dynamic Programming;
- Vremenska rezolucija – broj godina
- Geografsko područje: UD –user-defined, NL –No limitations.

## 2. H2RES MODEL

U sklopu INTERENERGY projekta, izrađen je model energetskeg sustava H2RES. H2RES provodi energetske modeliranje, razvoj sustava te optimizaciju pogona pojedinih dijelova. Značajni dijelovi programa su posvećeni „power-to-X“ tehnologijama te njihovom utjecaju na rad energetskeg sustava.

Novi H2RES model je usporediv je s OSeMOSYS modelom. OSeMOSYS model je razvijen kao alat energetskeg modeliranja otvorenog koda te replicira funkcionalnosti softvera kao što je MARKAL. OSeMOSYS također posjeduje mogućnost proširenja kapaciteta i optimizacije rada energetskeg sustava. Ipak, ovaj model koristi pristup modeliranja energetskeg sustava samo putem nekoliko vremenskih isječaka koji predstavljaju karakteristične dane u godini. Drugi usporedivi softver otvorenog koda je EnergyScope koji provodi optimizaciju proširenja kapaciteta i samog rada sustava. Model obuhvaća sektore proizvodnje električne energije, sustava grijanja i transporta dok sektor industrije nije modeliran. Ovaj model, kao i OSeMOSYS, koristi vremenske odsječke, a ne cijele godine za potrebe simulacija. Pristup sa korištenjem vremenskih odsječaka omogućuje programu rješavanje složenih zadataka, ali žrtvuje točnost. PLEXOS, kao i H2RES, posjeduju mogućnost modeliranja sustava bez korištenja vremenskih isječaka. Ipak, PLEXOS je komercijalni i dobro poznat softver za energetske modeliranje, optimizaciju i razvoj sustava.

U suprotnosti, H2RES je model otvorenog koda što znači da ga svatko može razviti za svoje potrebe. Softver otvorenog koda potiče razvojne zajednice. Zbog same strukture i dostupnosti koda što pristup otvorenog koda omogućava, stvara se prilika za pokretanjem zajednice oko softvera otvorenog koda što opet znači da se novi razvoji koda mogu brzo dogoditi. Mogućnost brzog razvoja i prilagodbe problemima je vrlo tražena karakteristika kada se radi o dinamičnim problemima kao što je razvitak energetskeg sustava. Dodatna prednost korištenja softvera otvorenog koda je da se model ne smatra "crnom kutijom". Sve jednadžbe korištene u modelu dostupne su svim korisnicima i svatko ih može provjeriti i modificirati.



Slika 1. Shematski prikaz H2RES modela

Model uključuje tehnologije pohrane energije kao što su stacionarni baterijski sustavi, pohrana u obliku vodika, pohrana u baterijama električnih vozila, te pohrana toplinske energije u sustavima individualnog i daljinskog grijanja. Uvođenje tehnologija s pohranom energije također uključuje i uvođenje fleksibilne potrošnje. Tehnologija s pohranom može raditi drugačijim načinom od trenutnih zahtjeva na strani potrošnje zbog mogućnosti akumulacije energije. Drugim riječima, može sudjelovati na tržištu te davati usluge balansiranja mreže. U sljedećim je poglavljima dan pregled pojedinih dijelova modela uz prezentaciju korištenih jednadžba. Također, dan je prikaz strukture ulaznih podataka u model.

### 3. SEKTOR PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

U sektoru proizvodnje električne energije se koriste postojeći izvori energije te se u modelu dozvoljavaju investicije u dodatne kapacitete. Dodatni kapaciteti u koje model može investirati su kapaciteti vjetra i fotonaponskih sustava, dok stariji i postojeći izlaze iz pogona prema kraju radnog vijeka.

Ovaj set jednadžba daje usporedbu između nazivnih veličina snage generatora i ostvarenih veličina unutar modela. Ograničava se snaga na nazivnu snagu. Maksimalna snaga se modificira uslijed dekomisije i izgradnje novih kapaciteta. Kod varijabilnih obnovljivih sustava, ovaj uvjet se modificira na satnoj razini uslijed varijabilnosti u dostupnosti resursa. Varijabilnost dostupnosti resursa se vadi iz zasebnih tablica koje definiraju dostupnost resursa prema regijama. Model koristi nekoliko različitih setova podataka za proizvodnju energije iz energije vjetra te energija sunca. Različiti setovi su definirani prema različitim potencijalnim lokacijama instalacija te uslijed toga različitim maksimalnim kapacitetima i dostupnih satnim krivuljama.

$$\begin{aligned}
 & Generation_{genco,period,year} \\
 & \leq Max\_load_{genco} * Cap\_factor_{genco} \\
 & * \left( (1 - decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_old_{genco}-1,year-years[0])-(Decom\_start\_old_{genco}-1))} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} Cap\_inv_{genco,index} * Cap\_factor_{genco} \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_new_{genco}-1,year-index)-(Decom\_start\_new_{genco}-1))} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 & Generation_{genco,period,year} \\
 & = (max\_load_{genco} \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_old_{genco-1},year-years[0])-(Decom\_start\_old_{genco-1}))} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} Cap\_inv_{genco,index} \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_new_{genco-1},year-index)-(Decom\_start\_new_{genco-1}))} \right) \\
 & * Aval\_factor\_plant_{genco,period,year}
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 & Generation_{genco,period,year} \\
 & \leq Max\_load_{genco} * Cap\_factor_{genco} \\
 & * \left( (1 - decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_old_{genco-1},year-years[0])-(Decom\_start\_old_{genco-1}))} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} Cap\_inv_{genco,index} * Cap\_factor_{genco} \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_new_{genco-1},year-index)-(Decom\_start\_new_{genco-1}))} \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 & Generation_{genco,period,year} \\
 & \leq Max\_load_{genco} * Cap\_factor_{genco} \\
 & * \left( (1 - decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_old_{genco-1},year-years[0])-(Decom\_start\_old_{genco-1}))} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} Cap\_inv_{genco,index} * Cap\_factor_{genco} \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_new_{genco-1},year-index)-(Decom\_start\_new_{genco-1}))} \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 & Generation_{genco,period,year} \\
 & = (max\_load_{genco} \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_old_{genco-1,year-years[0]})-(Decom\_start\_old_{genco-1}))} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} Cap\_inv_{genco,index} \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate_{genco})^{(Max(Decom\_start\_new_{genco-1,year-index})-(Decom\_start\_new_{genco-1}))} \right) \\
 & * Aval\_factor\_plant_{genco,period,year}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$Cap\_inv_{genco,year} \leq max\_inv\_period_{genco} \tag{6}$$

Gdje je:

- $Generation_{genco,period,year}$  – proizvodnja određenog generatora u satu i godini
- $Max\_load_{genco}$  – maksimalno opterećenje generatora
- $Cap\_factor_{genco}$  – maksimalna dostupnost generatora kao postotak njegove snage
- $decom\_rate_{genco}$  – brzina dekomisije
- $Decom\_start\_old_{genco}$  – vrijeme početka dekomisije starih kapaciteta
- $Decom\_start\_new_{genco}$  – vrijeme dekomisije novih kapaciteta
- $Cap\_inv_{genco,index}$  – investicija u nove kapacitete generatora
- $Aval\_factor\_plant_{genco,period,year}$  – faktor opterećenja
- $Cap\_inv_{genco,year}$  – investicija u kapacitet
- $max\_inv\_period_{genco}$  – maksimalna investicija u jednoj godini u kapacitet

### 3.1. Bilance potrošnje i proizvodnje energije

Set jednačica unutar ovog podmodula definira bilance energije, tj. povezuje stranu proizvodnje i stranu potrošnje električne energije. Osim proizvodnje unutar sustava, dovodi se u vezu i uvoz energije na strani proizvodnje, dok se na strani potrošnje uvode „Power to x“ tehnologije kao što su P2H, električna vozila, P2G, sustavi pohrane energije te CEEP. CEEP je uključen ovdje na strani potražnje, ali nema definirani iznos. Njegov iznos se definira kao rezultat preostale energije koja nije utrošena ostalim dijelovima sustava.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{genco \in fossil\_units} (Generation_{genco,period,year}) + \sum_{genco \in hphs\_units} (Generation_{genco,period,year}) \\
 & + \sum_{genco \in hdam\_units} (Generation_{genco,period,year}) \\
 & + \sum_{genco \in hror\_units} (Generation_{genco,period,year}) \\
 & + \sum_{genco \in FC\_units} (Generation_{FC_{genco,period,year}}) \\
 & + \sum_{genco \in nondisp\_units} (Generation_{genco,period,year}) + Imports_{period,year} + Ev\_Grid\_eff \\
 & * Ev\_sto\_out_{period,year} \\
 & + \sum_{unit \in Stat\_storage\_unit} (Stat\_sto\_out_{unit,period,year} * Sta\_sto\_eff_{unit}) \\
 & = \sum_{sector \in demand\_sectors} (Demand_{sector,period,year}) \\
 & + \sum_{unit \in Stat\_storage\_unit} (Stat\_sto\_in_{unit,period,year}) + Ev\_sto\_in_{period,year} \\
 & + Power\_to\_h2_{period,year} + ResToHeat_{period,year} + CEEP_{period,year}
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{period \in periods} (CEEP_{period,year}) \\
 & \leq Ceep\_parameter \\
 & * \left( \sum_{sector \in demand\_sectors} \sum_{period \in periods} (Demand_{sector,period,year}) \right. \\
 & + \sum_{unit \in Stat\_storage\_unit} \sum_{period \in periods} (Stat\_sto\_in_{unit,period,year}) \\
 & + \sum_{period \in periods} (ResToHeat_{period,year}) + \sum_{period \in periods} (Power\_to\_h2_{period,year}) \\
 & \left. + \sum_{period \in periods} (Ev\_sto\_in_{period,year}) \right)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Gdje je:

- $Generation_{genco,period,year}$  – proizvodnja električne energije iz generatora
- $Generation_{FC_{genco,period,year}}$  – proizvodnja električne energije iz gorivih članaka
- $Imports_{period,year}$  – uvoz električne energije
- $Ev\_Grid\_eff$  – gubitci u mreži
- $Stat\_sto\_out_{unit,period,year}$  – učinkovitost pražnjenja pohrane energije
- $Stat\_sto\_in_{unit,period,year}$  – učinkovitost punjenja pohrane energije
- $Sta\_sto\_eff_{unit}$  – učinkovitost pohrane energije
- $Ev\_sto\_in_{period,year}$  – učinkovitost pohrane energije u električna vozila
- $Demand_{sector,period,year}$  – potražnja električne energije
- $Power\_to\_h2_{period,year}$  – električna energija potrebna za proizvodnju vodika

- $ResToHeat_{period,year}$  – električna energija korištena u sustavima grijanja
- $CEEP_{period,year}$  –prekomjerna proizvodnja električne energije
- $CEEP_{parameter}$  – CEEP parametar – omjer prekomjerne proizvodnje električne energije i ukupne potražnje

### 3.2. Varijanta bilance električne energije uz mogućnost simulacije više susjednih energetske sustava

U sklopu razvoja modela, razvijen je modul koji omogućava provedbu istovrsnih simulacija na nekoliko međupovezanih ili susjednih regija. U toj varijanti modela, svaka od veličina poprima dodatnu definiciju „System“ koja označava njenu lokaciju dok je ostatak jednadžba istovrstan kao i u modelu sa samo jednim sustavom. Modeliranje više regija zahtjeva unos višestruko više podataka u model. Jedini dio koji je značajno modificiran za potrebe provedbe ovog module je modul balansiranja potreba i proizvodnje električne energije. Prvo se provodi balansiranje ukupne proizvodnje i potrošnje električne energije. Ukupna količina proizvedene energije uključujući uvoz iz sustava koji nisu simulirani mora biti jednaka potrošnji uključujući CEEP. Nakon ovog koraka se provodi sumiranje potreba i proizvodnje po pojedinim sustavima. Razlika između proizvodnje i potrošnje unutar pojedinog sustava označava uvoz ili izvoz u susjedni sustav. Količina prevezene energije između sustava se može ograničiti maksimalnim kapacitetima prijenosa kao i zadavanjem uvjeta na količinu prenesene energije unutar nekog vremenskog razdoblja.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{genco \in fossil\_units} (Generation_{genco,period,year,system}) + \sum_{genco \in hphs\_units} (Generation_{genco,period,year,system}) \\
 & + \sum_{genco \in hdam\_units} (Generation_{genco,period,year,system}) \\
 & + \sum_{genco \in hror\_units} (Generation_{genco,period,year,system}) \\
 & + \sum_{genco \in FC\_units} (Generation\_FC_{genco,period,year,system}) \\
 & + \sum_{genco \in nondisp\_units} (Generation_{genco,period,year,system}) + Imports_{period,year,system} \\
 & + Ev\_Grid\_eff * Ev\_sto\_out_{period,year,system} \\
 & + \sum_{unit \in Stat\_storage\_unit} (Stat\_sto\_out_{unit,period,year,system} * Sta\_sto\_eff_{unit}) \\
 & = Generation_{period,year,system}
 \end{aligned} \tag{9}$$



$$\begin{aligned}
 & \sum_{sector \in demand\_sectors} (Demand_{sector,period,ye ar,system}) \\
 & + \sum_{unit \in Stat\_storage\_unit} (Stat\_sto\_in_{unit,period,ye ar,system}) + Ev\_sto\_in_{period,ye ar,system} \\
 & + Power\_to\_h2_{period,ye ar,system} + ResToHeat_{period,ye ar,system} + CEEP_{period,ye ar,system} \\
 & = Demand_{period,ye ar,system}
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{sector \in demand\_sectors} \left[ \sum_{genco \in fossil\_units} (Generation_{genco,period,ye ar,system}) \right. \\
 & + \sum_{genco \in hphs\_units} (Generation_{genco,period,ye ar,system}) \\
 & + \sum_{genco \in hdam\_units} (Generation_{genco,period,ye ar,system}) \\
 & + \sum_{genco \in hror\_units} (Generation_{genco,period,ye ar,system}) \\
 & + \sum_{genco \in FC\_units} (Generation\_FC_{genco,period,ye ar,system}) \\
 & + \sum_{genco \in nondisp\_units} (Generation_{genco,period,ye ar,system}) + Imports_{period,ye ar,system} \\
 & + Ev\_Grid\_eff * Ev\_sto\_out_{period,ye ar,system} \\
 & \left. + \sum_{unit \in Stat\_storage\_unit} (Stat\_sto\_out_{unit,period,ye ar,system} * Sta\_sto\_eff_{unit}) \right] \\
 & = Generation\_total_{period,ye ar}
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{sector \in demand\_sectors} \left[ \sum_{sector \in demand\_sectors} (Demand_{sector,period,ye ar,system}) \right. \\
 & + \sum_{unit \in Stat\_storage\_unit} (Stat\_sto\_in_{unit,period,ye ar,system}) + Ev\_sto\_in_{period,ye ar,system} \\
 & + Power\_to\_h2_{period,ye ar,system} + ResToHeat_{period,ye ar,system} \\
 & \left. + CEEP_{period,ye ar,system} \right] = Demand\_total_{period,ye ar}
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$Generation\_total_{period,ye ar} = Demand\_total_{period,ye ar} \tag{13}$$

$$Demand_{period,ye ar,system} - Generation_{period,ye ar,system} = Imp\_exp_{period,ye ar,system} \tag{14}$$

$$|Imp\_exp_{period,ye ar,system}| \leq Imp\_exp\_limit_{ye ar,system} \tag{15}$$

Gdje je:

- $Generation_{genco,period,year,system}$  – proizvodnja električne energije iz generatora
- $Generation_{FC,genco,period,year,system}$  – proizvodnja električne energije iz gorivih članaka
- $Imports_{period,year,system}$  – uvoz električne energije
- $Ev_{Grid\_eff}$  – gubici u mreži
- $Ev_{sto\_out}_{period,year,system}$  – pražnjenje baterija električnih vozila
- $Stat_{sto\_out}_{unit,period,year,system}$  – učinkovitost pražnjenja pohrane energije
- $Stat_{sto\_in}_{unit,period,year,system}$  – učinkovitost punjenja pohrane energije
- $Sta_{sto\_eff}_{unit}$  – učinkovitost pohrane energije
- $Ev_{sto\_in}_{period,year,system}$  – učinkovitost pohrane energije u električna vozila
- $Demand_{sector,period,year,system}$  – potražnja električne energije
- $Power_{to\_h2}_{period,year,system}$  – električna energija potrebna za proizvodnju vodika
- $ResToHeat_{period,year,system}$  – električna energija korištena u sustavima grijanja
- $CEEP_{period,year,system}$  – prekomjerna proizvodnja električne energije
- $Generation_{period,year,system}$  – ukupna proizvodnja u sustavu
- $Demand_{period,year,system}$  – ukupna potrošnja u sustavu
- $Generation_{total}_{period,year}$  – ukupna proizvodnja u svim razmatranim sustavima
- $Demand_{total}_{period,year}$  – ukupna potrošnja u svim razmatranim sustavima
- $Imp\_exp_{period,year,system}$  – uvoz/izvoz između razmatranih sustava
- $Imp\_exp\_limit_{year,system}$  – ograničenje transmisije između razmatranih sustava

### 3.3. Fleksibilna potrošnja električne energije (demand side flexibility)

Model posjeduje mogućnost preraspodjele osnovnog električnog opterećenja kao odgovor potrošnje. Izmicanje potrošnje u H2RES modelu je moguće unutar 24 satnog vremenskog okvira, tjednog okvira te mjesečnog okvira. Time se definira da ukupno ostvareno opterećenje svakog dana između 0 i 24 sata mora biti jednako energiji definiranoj u ulaznim podacima. Model zatim raspoređuje potrebe unutar tog vremenskog okvira kako bi se u većoj mjeri iskoristili dostupni varijabilni obnovljivi izvori. Postavlja se ograničenje na udio opterećenja koliko se u pojedinom satu može modificirati. Ograničenje je definirano kao postotak koliko se opterećenje može smanjiti ili povećati u odnosu na referentnu vrijednost iz ulaznih podataka. Faktori  $factor\_up$  i  $factor\_down$  definiraju granični odnos ostvarene veličine i granične vrijednosti.

$$\sum_{periods \in periods\ n*0}^{periods \in n*23} Demand\_flex_{period,year,system} = Demand\_day_{day,year,system} \quad (16)$$

$$Demand\_flex_{period,year,system} \leq factor\_up \cdot Demand\_period_{period,year,system} \quad (17)$$

$$Demand\_flex_{period,year,system} \geq factor\_down \cdot Demand\_period_{period,year,system} \quad (18)$$

Gdje je:

- $\sum_{periods \in n \times 23}^{periods \in periods \ n \times 0} Demand\_flex_{period,year,system}$  – suma ostvarenog opterećenja između 0 i 24 sata
- $Demand\_day_{day,year,system}$  – suma zadanog opterećenja između 0 i 24 sata
- $factor_{up}$  – faktor koji ograničava mogućnost modifikacije opterećenja u smjeru povećanja
- $factor_{down}$  – faktor koji ograničava mogućnost modifikacije opterećenja u smjeru smanjenja
- $Demand\_period_{period,year,system}$  – zadana vrijednost opterećenja u određenom satu, godini i sustavu

### 3.4. Akumulacijske hidroelektrane

Akumulacijske hidroelektrane su definirane instaliranim kapacitetima, kapacitetima pohrane te dostupnosti pritoka. Stoga je potrebno modelirati samu akumulaciju vode u akumulacijskim jezerima. Pritoci u jezera su definirani ulaznim satnim krivuljama dotoka vode. Izlaz iz zapreme je definiran putem proizvodnje električne energije koja može varirati unutar dostupnih kapaciteta proizvodnje, ali je ograničen donjim vrijednostima zapremnine. Inicijalna napunjenost akumulacije je modelirana na jednak način kao i ostali sustavi pohrane. Sustav započinje sa 50% napunjenosti.

$$Storage\_level_{genco,period,year} \geq 0.5 * Hdam\_max\_storage_{genco} \quad (19)$$

$$Storage\_level_{genco,period,year} \leq Hdam\_max\_storage_{genco} \quad (20)$$

$$Storage\_level_{genco,Last\_period,year} \geq 0.5 * Hdam\_max\_storage_{genco} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} Storage\_level_{genco,1,year} &= 0.5 * Hdam\_max\_storage_{genco} + Hdam\_inflow_{genco,1,year} * Max\_load_{genco} \\ &* Hdam\_efficiency_{genco} - \frac{Generation_{genco,1,year}}{Hdam\_efficiency_{genco}} - Sto\_out\_flow_{genco,1,year} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} Storage\_level_{genco,period,year} &= Storage\_level_{genco,period-1,year} + Hdam\_inflow_{genco,period,year} * Max\_load_{genco} \\ &* Hdam\_efficiency_{genco} - \frac{Generation_{genco,period,year}}{Hdam\_efficiency_{genco}} - Sto\_out\_flow_{genco,period,year} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{Generation_{genco,period,year}}{Hdam\_efficiency_{genco}} + Sto\_out\_flow_{genco,period,year} &\leq Storage\_level_{genco,period,year} + Hdam\_inflow_{genco,period,year} * Max\_load_{genco} \\ &* Hdam\_efficiency_{genco} \end{aligned} \quad (24)$$

Gdje je:

- $Storage\_level_{genco,period,year}$  – razina napunjenosti akumulacije u određenom satu u godini
- $Storage\_level_{genco,Last\_period,year}$  – razina napunjenosti akumulacije u satu prije promatranog sata
- $Storage\_level_{genco,1,year}$  – razina napunjenosti akumulacije u prvom satu u godini
- $Hdam\_inflow_{genco,1,year}$  – prtok u akumulaciju u prvom satu u godini
- $Hdam\_inflow_{genco,period,year}$  – prtok u akumulaciju u određenom satu u godini
- $Max\_load_{genco}$  – maksimalno opterećenje postrojenja
- $Generation_{genco,1,year}$  – proizvodnja u prvom satu u godini
- $Hdam\_efficiency_{genco}$  – učinkovitost postrojenja
- $Hdam\_max\_storage_{genco}$  – zapremnina akumulacije
- $Sto\_out\_flow_{genco,1,year}$  – izlaz iz akumulacije u prvom satu u godini
- $Sto\_out\_flow_{genco,period,year}$  – izlaz iz akumulacije u određenom satu u godini

### 3.5. Modeliranje reverzibilnih hidroelektrana

Reverzibilne hidroelektrane su modelirane u velikoj mjeri kao i akumulacijske hidroelektrane. Dodatni set jednadžba u ovom slučaju opisuje sustav povrata energije u akumulaciju uz korištenje pumpnog režima rada postrojenja za što je potrebno obračunati učinkovitost postrojenja te gubitak energije. Ova vrsta postrojenja također posjeduje akumulaciju zajedno sa definicijom pritoka.

$$Storage\_level_{genco,period,year} \geq 0.5 * Hphs\_max\_storage_{genco} \quad (25)$$

$$Storage\_level_{genco,period,year} \leq Hphs\_max\_storage_{genco} \quad (26)$$

$$Storage\_level_{genco,Last\_periods,year} \geq 0.5 * hphs\_max\_storage_{genco} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} &Storage\_level_{genco,1,year} \\ &= 0.5 * Hphs\_max\_storage_{genco} + Hphs\_inflow_{genco,1,year} * Max\_load_{genco} \\ &* Hphs\_efficiency_{genco} - \frac{Generation_{genco,1,year}}{Hphs\_efficiency_{genco}} - Sto\_out\_flow_{genco,1,year} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} &Storage\_level_{genco,period,year} \\ &= Storage\_level_{genco,period-1,year} + Hphs\_inflow_{genco,period,year} * Max\_load_{genco} \\ &* Hphs\_efficiency_{genco} - \frac{Generation_{genco,period,year}}{Hphs\_efficiency_{genco}} - Sto\_out\_flow_{genco,period,year} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} &\frac{Generation_{genco,period,year}}{Hphs\_efficiency_{genco}} + Sto\_out\_flow_{genco,period,year} \\ &\leq Storage\_level_{genco,period,year} + Hphs\_inflow_{genco,period,year} * Max\_load_{genco} \\ &* Hphs\_efficiency_{genco} \end{aligned} \quad (30)$$

Gdje je:

- $Storage\_level_{genco,period,year}$  – stanje napunjenosti akumulacije u određenom satu u godini
- $Storage\_level_{genco,Last\_periods,year}$  – stanje napunjenosti akumulacije u satu prije razmatranog sata
- $Storage\_level_{genco,1,year}$  – razina pohrane u prvom satu u godini
- $Generation_{genco,1,year}$  – proizvodnja u prvom satu u godini
- $Generation_{genco,period,year}$  – proizvodnja u određenom satu u godini
- $Hphs\_max\_storage_{genco}$  – kapacitet akumulacije
- $Hphs\_inflow_{genco,1,year}$  – ulaz u akumulaciju u prvom satu u godini
- $Hphs\_inflow_{genco,period,year}$  – ulaz u akumulaciju u određenom satu u godini
- $Max\_load_{genco}$  – maksimalno opterećenje postrojenja
- $Hphs\_efficiency_{genco}$  – učinkovitost postrojenja
- $Sto\_out\_flow_{genco,1,year}$  – izlaz iz akumulacije u prvom satu u godini
- $Sto\_out\_flow_{genco,period,year}$  – izlaz iz akumulacije u određenom satu u godini

### 3.6. Ograničenja rada proizvodnih postrojenja

Proizvodna postrojenja su ograničena u radu putem maksimalnih brzina promjena snage definiranih kao postotak u odnosu na nazivnu snagu postrojenja. Različite vrste postrojenja imaju različite pogonske karakteristike. U ovoj fazi razvitka modela nije uključena mogućnost poboljšanja navedenih karakteristika, što je jedan od ciljeva razvoja modela u budućnosti. Također, nije korišteno ograničenje minimalne pogonske snage prije prestanka rada samog postrojenja.

$$\begin{aligned}
 & Generation_{genco,period,year} \\
 & \leq Generation_{genco,period-1,year} + Ramp\_up\_rate_{genco} \\
 & * \left( Max\_load_{genco} \right. \\
 & * \left( \left( 1 \right. \right. \\
 & \left. \left. - Decom\_rate_{genco} \right)^{\left( \max(Decom\_start\_old_{genco-1,year} - years[0]) - (Decom\_start\_old_{genco-1}) \right)} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} Cap\_inv_{genco,index} \\
 & * \left( \left( 1 \right. \right. \\
 & \left. \left. - Decom\_rate_{genco} \right)^{\left( \max(Decom\_start\_new_{genco-1,year} - index) - (Decom\_start\_new_{genco-1}) \right)} \right) \left. \right) \quad (31)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & Generation_{genco,period,year} \\
 & \geq Generation_{genco,period-1,year} - Ramp\_down\_rate_{genco} \\
 & * \left( Max\_load_{genco} \right. \\
 & * \left( 1 \right. \\
 & \left. - Decom\_rate_{genco} \right)^{\left( \max(Decom\_start\_old_{genco}-1,year-years[0])-(Decom\_start\_old_{genco}-1) \right)} \\
 & + \sum_{index \in years} Cap\_inv_{genco,index} \\
 & * \left( 1 \right. \\
 & \left. - Decom\_rate_{genco} \right)^{\left( \max(Decom\_start\_new_{genco}-1,year-index)-(Decom\_start\_new_{genco}-1) \right)} \left. \right)
 \end{aligned} \tag{32}$$

$$Imports_{period,year} \leq Import\_ntc_{period} \tag{33}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{genco \in nondisp\_units} \sum_{period \in periods} Generation_{genco,period,year} \\
 & + \sum_{genco \in biomass\_units} \sum_{period \in periods} Generation_{genco,period,year} \\
 & + \sum_{genco \in hydro\_units} \sum_{period \in periods} Generation_{genco,period,year} \\
 & \geq Rps_{year} \\
 & * \left( \sum_{genco \in fossil\_units} \sum_{period \in periods} Generation_{genco,period,year} \right. \\
 & + \sum_{genco \in hphs\_units} \sum_{period \in periods} Generation_{genco,period,year} \\
 & + \sum_{genco \in hdam\_units} \sum_{period \in periods} Generation_{genco,period,year} \\
 & + \sum_{genco \in hror\_units} \sum_{period \in periods} Generation_{genco,period,year} \\
 & + \sum_{genco \in nondisp\_units} \sum_{period \in periods} Generation_{genco,period,year} \\
 & \left. + \sum_{period \in periods} Imports_{period,year} \right)
 \end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}
 & Rampup\_cost_{genco,period,year} \\
 & \geq Ramp\_cost_{genco} * (Generation_{genco,period,year} - Generation_{genco,period-1,year})
 \end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned}
 & Rampdown\_cost_{genco,period,year} \\
 & \geq Ramp\_cost_{genco} * (-Generation_{genco,period,year} + Generation_{genco,period-1,year})
 \end{aligned} \tag{36}$$

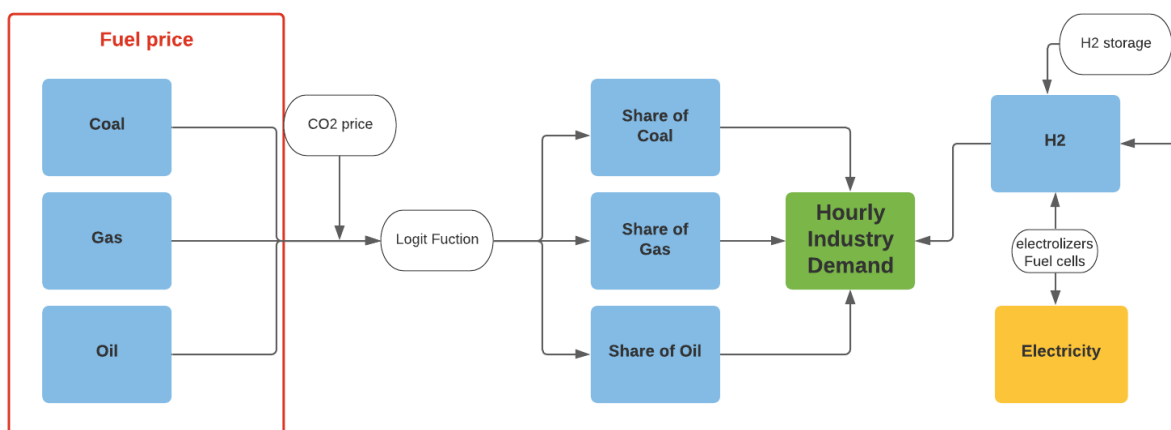
Gdje je:

- $Generation_{genco,period,year}$  – proizvodnja u određenom satu u godini
- $Generation_{genco,period-1,year}$  – proizvodnja u prethodnom satu
- $Ramp\_up\_rate_{genco}$  – brzina povećanja snage
- $Ramp\_down\_rate_{genco}$  – brzina smanjenja snage
- $Max\_load_{genco}$  – maksimalno opterećenje generatora
- $Decom\_rate_{genco}$  – brzina dekomisije generatora
- $Decom\_start\_old_{genco}$  – početak dekomisije starih kapaciteta
- $Decom\_start\_new_{genco}$  – početak dekomisije novih kapaciteta
- $Ramp\_cost_{genco}$  – trošak promjene snage generatora
- $Cap\_inv_{genco,index}$  – investicija u nove kapacitete
- $Imports_{period,year}$  – uvoz električne energije u određenom satu u godini
- $Import\_ntc_{period}$  – transmisijski kapacitet u određenom satu
- $Rps_{year}$  – udio obnovljive energije u proizvodnji električne energije

## 4. SEKTOR INDUSTRIJE

Sektor industrije se modelira putem „logit“ prilaza. Kao i ostale vrste potražnje, industrija je također modelirana putem satne distribucije. U osnovnoj verziji, više različitih podvrsta industrije je grupirano zajedno što kao posljedicu predstavlja nemogućnost razlikovanja pojedinih grana industrije i njihovih specifičnih potreba kao što je potreba za visoko temperaturnom toplinom.

Korištenje „logit“ funkcije se očituje u korištenju razlika u cijeni goriva, varijabilnih troškova te razine emisija kao funkcije koja određuje maksimalne razine udjela pojedine vrste goriva. Razmatrana su goriva prirodni plin, nafta, ugljen i biomasa unutar „logit“ funkcije. Zasebno se, izvan „logit“ funkcije, izravno u modelu koriste električna energija i vodik.



Slika 2. Sektor industrije

$$\begin{aligned}
 Fuel\_ind_{fuel,period,year} & \\
 & \leq Fuel\_share\_max_{period,year,fuel} \\
 & * (Industry\_HT\_demand_{period,year} - H2tInd_{period,year} - ElInd_{period,year})
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{fuel \in industry\_fuels} (Fuel\_ind_{fuel,period,year}) + H2tInd_{period,year} + ElInd_{period,year} & \\
 = Industry\_HT\_demand_{period,year} &
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

Gdje je:

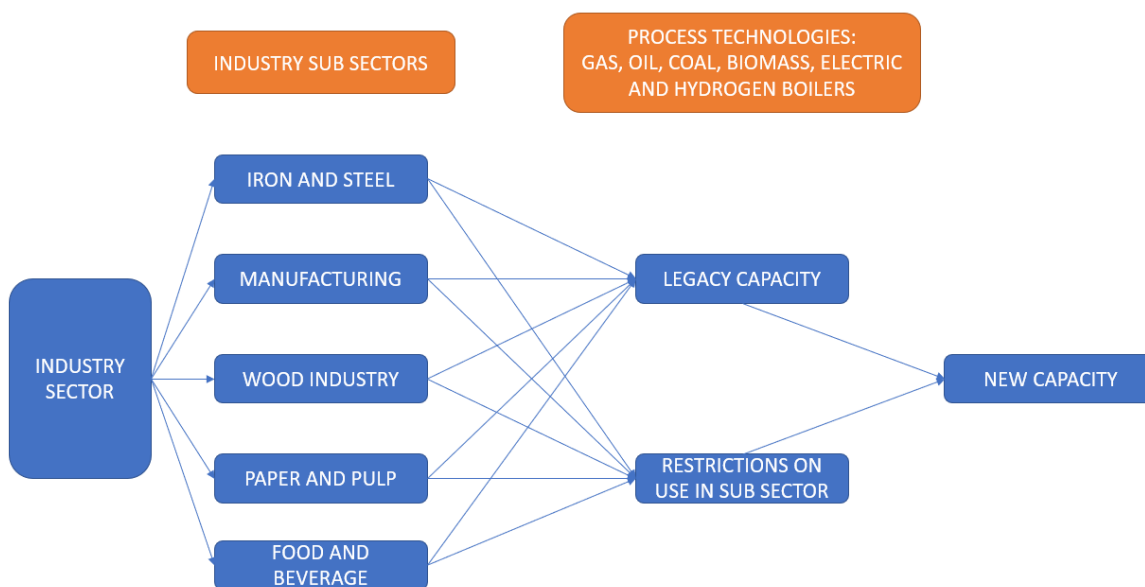
- $Fuel\_ind_{fuel,period,year}$  – potrošnja goriva u satu i godini
- $Fuel\_share\_max_{period,year,fuel}$  – maksimalni udio goriva u satu i godini kao rezultat logit funkcije



- $Industry_{HT\_demand_{period,year}}$  – satna distribucija potražnje u sektoru industrije
- $H2tInd_{period,year}$  - dio potražnje za energijom pokriven od strane vodika
- $ElInd_{period,year}$  - dio potražnje za energijom pokriven od strane električne energije

#### 4.1. Alternativni modul industrije

Razvijen je i alternativni modul industrije. Ovaj modul zamjenjuje logit pristup sa pristupom modeliranja pojedinih grana industrije kao potražnje za energijom. Time je sektor industrije podijeljen na sektor proizvodnje čelika i željeza, proizvodnu industriju, drvoprerađivačku, papirnu i prehrambenu. Svaka od ovih podvrsta industrija ima dodijeljene tehničke specifikacije korištene opreme i mogućnosti proširenja kapaciteta. Podsektori se razlikuju s obzirom na vrstu opreme koja je primjenjiva. Također, svaka podvrsta ima svoju distribuciju potrebe za energijom izrađenu prema literaturi ili dobavljenim podacima iz industrije. Slika 3. prikazuje alternativni modul industrije. Kako bi se održala konzistentnost u svim satima u godini, uvodi se ograničenje jednakih udjela izvora energije u opskrbi potrošnje tijekom cijele godine. Time se eliminira mogućnost potpunog prevladavanja jednog izvora energije kao npr. električne energije u satima prekomjerne proizvodnje.



Slika 3. Alternativni modul industrije

$boiler\_ironsteel\_generation_{boiler,period,year}$

$$\begin{aligned}
 &\leq \left( Thermal\_init\_cap\_ironsteel \right. \\
 &* \left( (1 - Decom\_rate) (\max(Decom\_start\_old_{boiler-1,year-years[0]} - (Decom\_start\_old_{boiler-1})) \right) \\
 &+ \sum_{index \in years} boiler\_ironsteel\_cap\_inv_{boiler,period,year} \\
 &* \left( (1 \right. \\
 &\left. - Decom\_rate_{boiler}) (\max(Decom\_start\_new_{boiler-1,year-index} - (Decom\_start\_new_{boiler-1})) \right) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{39}$$

$boiler\_manufacturing\_generation_{boiler,period,year}$

$$\begin{aligned}
 &\leq \left( Thermal\_init\_cap\_manufacturing \right. \\
 &* \left( (1 - Decom\_rate) (\max(Decom\_start\_old_{boiler-1,year-years[0]} - (Decom\_start\_old_{boiler-1})) \right) \\
 &+ \sum_{index \in years} boiler\_manufacturing\_cap\_inv_{boiler,period,year} \\
 &* \left( (1 \right. \\
 &\left. - Decom\_rate_{boiler}) (\max(Decom\_start\_new_{boiler-1,year-index} - (Decom\_start\_new_{boiler-1})) \right) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{40}$$

$boiler\_wood\_generation_{boiler,period,year}$

$$\begin{aligned}
 &\leq \left( Thermal\_init\_cap\_wood \right. \\
 &* \left( (1 - Decom\_rate) (\max(Decom\_start\_old_{boiler-1,year-years[0]} - (Decom\_start\_old_{boiler-1})) \right) \\
 &+ \sum_{index \in years} boiler\_wood\_cap\_inv_{boiler,period,year} \\
 &* \left( (1 \right. \\
 &\left. - Decom\_rate_{boiler}) (\max(Decom\_start\_new_{boiler-1,year-index} - (Decom\_start\_new_{boiler-1})) \right) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
 & boiler\_paper\_generation_{boiler,period,year} \\
 & \leq \left( Thermal\_init\_cap\_paper \right. \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate) (\max(Decom\_start\_old_{boiler-1,year-years[0]} - (Decom\_start\_old_{boiler-1})) \right. \\
 & + \sum_{index \in years} boiler\_paper\_cap\_inv_{boiler,period,year} \\
 & * \left( (1 \right. \\
 & \left. \left. - Decom\_rate_{boiler} (\max(Decom\_start\_new_{boiler-1,year-index} - (Decom\_start\_new_{boiler-1})) \right) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{42}$$

$$\begin{aligned}
 & boiler\_food\_generation_{boiler,period,year} \\
 & \leq \left( Thermal\_init\_cap\_food \right. \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate) (\max(Decom\_start\_old_{boiler-1,year-years[0]} - (Decom\_start\_old_{boiler-1})) \right. \\
 & + \sum_{index \in years} boiler\_food\_cap\_inv_{boiler,period,year} \\
 & * \left( (1 \right. \\
 & \left. \left. - Decom\_rate_{boiler} (\max(Decom\_start\_new_{boiler-1,year-index} - (Decom\_start\_new_{boiler-1})) \right) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{43}$$

$$industry\_gas\_dem_{period,year} = egas\_ind_{period,year} + industry\_fgas_{period,year} \tag{44}$$

$$industry\_oil\_dem_{period,year} = eliq\_ind_{period,year} + industry\_foil_{period,year} \tag{45}$$

Gdje je:

- $boiler\_ironsteel\_generation_{boiler,period,year}$  – potrošnja u sektoru čelika i željeza prema korištenom gorivu u određenom satu i godini
- $boiler\_manufacturing\_generation_{boiler,period,year}$  – potrošnja u sektoru opće proizvodnje prema korištenom gorivu u određenom satu i godini
- $boiler\_wood\_generation_{boiler,period,year}$  – potrošnja u sektoru drvoprerađivačke industrije prema korištenom gorivu u određenom satu i godini
- $boiler\_paper\_generation_{boiler,period,year}$  – potrošnja u sektoru industrije papira prema korištenom gorivu u određenom satu i godini
- $boiler\_food\_generation_{boiler,period,year}$  – potrošnja u sektoru prehrambene industrije prema korištenom gorivu u određenom satu i godini
- $boiler\_ironsteel\_cap\_inv_{boiler,period,year}$  – investicija u kapacitet u određenoj godini prema vrsti goriva u sektoru industrije čelika i željeza

- 
- $boiler\_manufacturing\_cap\_inv_{boiler,period,year}$  – investicija u kapacitet u određenoj godini prema vrsti goriva u sektoru proizvodne industrije
  - $boiler\_wood\_cap\_inv_{boiler,period,year}$  – investicija u kapacitet u određenoj godini prema vrsti goriva u sektoru drvoprerađivačke industrije
  - $boiler\_paper\_cap\_inv_{boiler,period,year}$  – investicija u kapacitet u određenoj godini prema vrsti goriva u sektoru industrije papira
  - $boiler\_food\_cap\_inv_{boiler,period,year}$  – investicija u kapacitet u određenoj godini prema vrsti goriva u sektoru prehrambene industrije
  - $Thermal\_init\_cap\_ironsteel$  – početni kapaciteti u industriji čelika i željeza
  - $Thermal\_init\_cap\_manufacturing$  – početni kapaciteti u industriji opće proizvodnje
  - $Thermal\_init\_cap\_wood$  – početni kapaciteti u drvoprerađivačkoj industriji
  - $Thermal\_init\_cap\_paper$  – početni kapaciteti u industriji papira
  - $Thermal\_init\_cap\_food$  – početni kapaciteti u prehrambenoj industriji
  - $Decom\_rate_{boiler}$  – dekomisija proizvodnih kapaciteta
  - $Decom\_start\_old_{boiler}$  – vrijeme dekomisije starih proizvodnih kapaciteta
  - $Decom\_start\_new_{boiler}$  – vrijeme dekomisije novih proizvodnih kapaciteta
  - $industry\_gas\_dem_{period,year}$  – potrošnja plinovitih goriva u industriji u određenom satu u godini
  - $egas\_ind_{period,year}$  potrošnja sintetskog plina u određenom satu u godini
  - $industry\_fgas_{period,year}$  – potrošnja fosilnog goriva u određenom satu u godini
  - $industry\_oil\_dem_{period,year}$  – potrošnja tekućih goriva u industriji u određenom satu u godini
  - $eliq\_ind_{period,year}$  potrošnja tekućeg sintetskog goriva u određenom satu u godini
  - $industry\_foil_{period,year}$  potrošnja fosilnog tekućeg goriva u određenom satu u godini

## 5. SEKTOR TRANSPORTA

Sektor transporta je modeliran na sličan način kao i sektor grijanja. Cijeli sektor je definiran preko potražnje za proputovanom udaljenosti na godišnjoj razini koja mora biti zadovoljena. U trenutnoj verziji se modelira samo cestovni prijevoz kao najveći izvor emisija. Modelirane su različite vrste vozila s obzirom na pogon. Stoga su modelirana klasična vozila s motorima s unutrašnjim sagorijevanjem, baterijsko električna vozila i vozila na gorivim člancima. Ukupan broj vozila i prosječna proputovana udaljenost su smatrane konstantnim vrijednostima i ne mijenjaju se tokom simulacija. Svaka od ovih vrsta ima različite podatke o učinkovitosti pogona u vidu omjera potreban energije za proputovanu udaljenost. Također, na različite se načine dobavlja sama energija potrebna za putovanje unutar vozila. Opskrba vozila s motorima na unutrašnje izgaranje gorivom nije modelirana osim uključivanja potrošnje goriva u bilance energije i emisija. S druge strane, opskrba električnih vozila energijom je modelirana. U tu svrhu se koriste dvije krivulje, raspodjela za potražnjom energije te raspodjela dostupnosti vozila za punjenje. Također, modelirane su same baterije električnih vozila kao i njihova veza s ostatkom energetskeg sustava. Kako bi se omogućilo modeliranje baterijskih sustava u vozilima, bilo je potrebno definirati priključne kapacitete kao i kapacitete pohrane. Model koristi priključni kapacitet od 7 kW i kapacitet pohrane od 50 kWh po jednom vozilu. Punjenje baterija je optimirano te se koristi tehnologija pametnog punjenja „smart charge“. Također, dostupna je, ali uz dodatnu naplatu reverzibilna tehnologija povrata energije u mrežu – „vehicle to grid“. Posljednja vrsta vozila HFCEV (hydrogen fuel cell electric vehicle) kombinira pristup ranije objašnjenih modela. Kao i kod ICE vozila, sama pohrana energije unutar vozila nije modelirana, ali se modelira lanac dobave energije opisan u prethodnom poglavlju.

Modeliranje počinje zadavanjem početnog stanja u vidu broja pojedine vrste vozila. Zatim model na temelju emisija, troškova te integracije u sustav odlučuje o investiciji u pojedinu vrstu vozila. Investicija je također ograničena maksimalnom investicijom u određenom periodu kao odraz ograničenja industrije u opskrbi novom tehnologijom. Sve modelirane vrste vozila podilaze dekomisiji na kraju radnog vijeka opreme.

$$Total\_km_{year} = EV\_km_{year} + HFCEV\_km_{year} + ICE\_km_{year} \quad (46)$$

$$EV\_en_{year} = EV\_km_{year} \cdot EV\_eff_{year} \quad (47)$$

$$HFCEV_{en_{year}} = HFCEV_{km_{year}} \cdot HFCEV_{eff_{year}} \quad (48)$$

$$ICE_{en_{year}} = ICE_{km_{year}} \cdot ICE_{eff_{year}} \quad (49)$$

$$EV_{num_{year}} = \frac{EV_{km_{year}}}{Transp_{km_{year}}} \cdot veh_{num_{year}} \quad (50)$$

$$HFCEV_{num_{year}} = \frac{HFCEV_{km_{year}}}{Transp_{km_{year}}} \cdot veh_{num_{year}} \quad (51)$$

$$ICE_{num_{year}} = \frac{ICE_{km_{year}}}{Transp_{km_{year}}} \cdot veh_{num_{year}} \quad (52)$$

$$EV_{num_{year}} \leq \left( EV_{init_{num}} \right. \\ \left. * ((1 - Decom_{rate})^{(\max(Decom_{start_{old}} - 1, year - years[0]) - (Decom_{start_{old}} - 1))}) \right. \\ \left. + \sum_{index \in years} EV_{inv_{year}} \right. \\ \left. * \left( (1 - Decom_{rate_{genco}})^{(\max(Decom_{start_{new_{genco}} - 1, year - index}) - (Decom_{start_{new}} - 1))} \right) \right) \quad (53)$$

$$HFCEV_{num_{year}} \leq \left( HFCEV_{init_{num}} \right. \\ \left. * ((1 - Decom_{rate})^{(\max(Decom_{start_{old}} - 1, year - years[0]) - (Decom_{start_{old}} - 1))}) \right. \\ \left. + \sum_{index \in years} HFCEV_{inv_{year}} \right. \\ \left. * \left( (1 - Decom_{rate_{genco}})^{(\max(Decom_{start_{new_{genco}} - 1, year - index}) - (Decom_{start_{new}} - 1))} \right) \right) \quad (54)$$

$$\begin{aligned}
 ICE\_num_{year} \leq & \left( ICE\_init\_num \right. \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate)^{\max(Decom\_start\_old - 1, year - years[0]) - (Decom\_start\_old - 1)} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} ICE\_inv_{year} \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate_{genco})^{\max(Decom\_start\_new_{genco} - 1, year - index) - (Decom\_start\_new - 1)} \right) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{55}$$

Razvijena je varijanta modela koja omogućuje korištenje elektrogoriva. Time se u sektoru transporta omogućuje zadržavanje ICE vozila uz promjenu korištenog goriva. U tu svrhu je dodana jednadžba koja dijeli energiju utrošenu u ICE vozilima na dva djela od kojih jedan pripada fosilnim gorivima, a drugi elektrogorivima.

$$ICE\_en_{year} = ICE\_fossil\_en_{year} + ICE\_efuel\_en_{year} \tag{56}$$

Gdje je:

- $Total\_km_{year}$  – ukupni godišnji prijeđeni kilometri
- $EV\_km_{year}$  – prijeđeni godišnji kilometri
- $HFCEV\_km_{year}$  – prijeđeni godišnji kilometri električnih vozila na vodikove gorivne članke
- $ICE\_km_{year}$  – prijeđeni godišnji kilometri vozila s unutarnjim izgaranjem
- $EV\_en_{year}$  – godišnja utrošena energija u električnim vozilima
- $EV\_eff_{year}$  – učinkovitost električnih vozila
- $HFCEV\_en_{year}$  – godišnja utrošena energija u električnim vozilima na vodikove gorivne članke
- $HFCEV\_eff_{year}$  – učinkovitost električnih vozila na vodikove gorive članke
- $ICE\_en_{year}$  – godišnja utrošena energija u vozilima s unutarnjim izgaranjem
- $ICE\_eff_{year}$  – učinkovitost vozila s unutarnjim izgaranjem
- $EV\_num_{year}$  – godišnji broj električnih vozila
- $Transp\_km_{year}$  – broj prevaljenih kilometara godišnje
- $veh\_num_{year}$  – broj ukupnih vozila
- $HFCEV\_num_{year}$  – godišnji broj električnih vozila na vodikove gorivne članke
- $ICE\_num_{year}$  – godišnji broj vozila s unutarnjim izgaranjem
- $EV\_init\_num$  – inicijalni broj električnih vozila
- $Decom\_rate_{genco}$  – stopa dekomisije
- $Decom\_start\_old$  – početak dekomisije starih vozila
- $EV\_inv_{year}$  – godišnje investicije u električna vozila
- $Decom\_start\_new_{genco}$  početak dekomisije novih vozila

- $HFCEV\_init\_num$  – inicijalni broj električnih vozila na vodikove gorivne članke
- $HFCEV\_inv\_year$  – godišnje investicije u električna vozila na vodikove gorivne članke
- $ICE\_init\_num$  – inicijalni broj vozila s unutarnjim izgaranjem
- $ICE\_inv\_year$  – godišnje investicije u vozila s unutarnjim izgaranjem
- $ICE\_fossil\_en\_year$  – utrošena energija u vozilima s unutarnjim izgaranjem na fosilna goriva
- $ICE\_efuel\_en\_year$  – utrošena energija u vozilima s unutarnjim izgaranjem na sintetska tekuća goriva

### 5.1. Pohrana energije u baterijama električnih vozila

Električna vozila imaju definirane karakteristike baterija i pripadajućih priključaka sa energetskim sustavom. H2RES koristi fiksni odnos kapaciteta konekcije između mreže i vozila kao i kapacitet pohrane baterije. Koristi se priključak snage 7 kW te prosječni kapacitet baterije od 50 kWh. Pretpostavlja se pretežito korištenje kućnih punjača snage 3.7 kW s udjelom 85 %, brzih punjača snage 50 kW s udjelom 10 % i super brzih punjača snage 300 kW s udjelom od 5 %. Sustav može koristiti proces punjenja i pražnjenja baterija vozila kao način pružanja fleksibilnosti. Kod punjenja, uz variranje ulazne snage se mogu postići učinci na energetski sustav uz istovremeno zadovoljavanje potreba za punjenjem samih baterija. Moguća je primjena i suprotnog režima rada uz povrat spremljene energije u baterijama natrag u mrežu, ali uz dodatnu naplatu zbog negativnog utjecaja na baterije. Potražnja za energijom je zadovoljena svaki sat, a interakcija između vozila i mreže se osigurava uz primjenu krivulja dostupnosti vozila na punjačima dobivenim statističkom analizom mjerenih GPS podataka.

$$Ev\_sto\_soc_{1,year} = \theta * Ev\_sto\_max_{year} - Ev\_transp\_load_{1,year} * Ev\_Demand_{year} - Ev\_sto\_out_{1,year} + Ev\_Grid\_eff * Ev\_sto\_in_{1,year} \quad (57)$$

$$Ev\_sto\_soc_{period,year} = Ev\_sto\_soc_{period-1,year} - Ev\_transp\_load_{period,year} * Ev\_Demand_{year} - Ev\_sto\_out_{period,year} + Ev\_Grid\_eff * Ev\_sto\_in_{period,year} \quad (58)$$

$$Ev\_sto\_soc_{period,year} \leq Ev\_sto\_max_{year} \quad (59)$$

$$Ev\_sto\_soc_{period,year} \geq Ev\_sto\_min * Ev\_sto\_max_{year} \quad (60)$$

$$Ev\_sto\_out_{period,year} \leq Ev\_Grid\_P\_max_{year} * Ev\_availability_{period,year} \quad (61)$$

$$Ev\_sto\_in_{period,year} \leq Ev\_Grid\_P\_max_{year} * Ev\_availability_{period,year} \quad (62)$$



Gdje je:

- $Ev\_sto\_soc_{1,year}$  – stanje napunjenosti pohrane energije u baterijama električnih vozila u prvom satu svake godine
- $Ev\_sto\_max_{year}$  – maksimalno stanje napunjenosti baterija električnih vozila
- $Ev\_transp\_load_{1,year}$  – potražnja električnih vozila u prvom satu u godini
- $Ev\_Demand_{year}$  – godišnja potražnja električnih vozila
- $Ev\_sto\_out_{1,year}$  – izlaz iz baterija električnih vozila u prvom satu u godini
- $Ev\_Grid\_eff$  - učinkovitost prijenosa električne energije iz električnih vozila na mrežu
- $Ev\_sto\_in_{1,year}$  - ulaz iz baterija električnih vozila u prvom satu u godini
- $Ev\_sto\_soc_{period,year}$  – stanje napunjenosti baterija električnih vozila u određenom satu u godini
- $Ev\_sto\_soc_{period-1,year}$  – stanje napunjenosti baterija električnih vozila u prethodnom satu u godini
- $Ev\_transp\_load_{period,year}$  – satna godišnja potražnja električnih vozila
- $Ev\_sto\_out_{period,year}$  – izlaz iz baterija električnih vozila u određenom satu u godini
- $Ev\_sto\_in_{period,year}$  – ulaz iz baterija električnih vozila u određenom satu u godini
- $Ev\_sto\_min$  – minimalno stanje napunjenosti baterija električnih vozila
- $Ev\_Grid\_P\_max_{year}$  – maksimalna snaga prijenosa električne energije s električnih vozila na mrežu
- $Ev\_availability_{period,year}$  – električna vozila spojena na mrežu u određenom satu u godini

## 6. VODIK I SINTETSKA GORIVA

### 6.1. Proizvodnja i skladištenje vodika

Model posjeduje mogućnost transformacije električne energije u kemijsku energiju u obliku vodika. Kako bi se omogućio rad ovih sustava, potrebno je simulirati rad elektrolizatora koji proizvode sam vodik, modelirati spremište vodika te mjesta potrošnje. Vodik se troši u sustavima pretvorbe natrag u električnu energiju putem gorivih članaka. Također, moguća je potrošnja u sektoru prometa u vozilima pogonjenim vodikom. Veliki dio modela je posvećen modeliranju potrošnje vodika u sektoru industrije te u procesima prerade samog vodika u tekuća ili plinovita sintetska goriva. Sljedeće jednadžbe opisuju proces proizvodnje i balansiranje pohrane vodika.

$$\sum_{flex\_unit \in Elec\_h2\_units} \frac{Generation\_H2_{flex\_unit,period,year}}{H2\_eff_{flex\_unit}} = Power\_to\_h2_{period,year} \quad (63)$$

$$Generation\_H2_{flex\_unit,period,year} \leq H2\_init\_cap_{flex\_unit} + \sum_{index \in years} H2\_electrolysis\_max\_cap_{flex\_unit,index} \quad (64)$$

$$H2\_sto\_soc_{sto\_unit,1,year} = \alpha * H2\_sto\_soc_{sto\_unit,1,year} - H2\_sto\_out_{sto\_unit,1,year} + \sum_{flex\_unit \in Elec\_h2\_units} Generation\_H2_{flex\_unit,1,year} \quad (65)$$

$$H2\_sto\_soc_{sto\_unit,period,year} = H2\_sto\_soc_{sto\_unit,period-1,year} - H2\_sto\_out_{sto\_unit,period,year} + \sum_{flex\_unit \in Elec\_h2\_units} Generation\_H2_{flex\_unit,period,year} \quad (66)$$

$$H2\_sto\_soc_{sto\_unit,period,year} \leq H2\_sto\_init_{sto\_unit} + \sum_{index \in years} H2\_sto\_max\_cap_{sto\_unit,index} \quad (67)$$

$$H2\_sto\_soc_{sto\_unit,period,year} \geq \beta * \left( H2\_sto\_init_{sto\_unit} + \sum_{index \in years} (H2\_sto\_max\_cap_{sto\_unit,index}) \right) \quad (68)$$

$$H2\_sto\_soc_{sto\_unit,last\_period,year} \leq \gamma * \left( H2\_sto\_init_{sto\_unit} + \sum_{index \in years} H2\_sto\_max\_cap_{sto\_unit,index} \right) \quad (69)$$

$$Generation\_FC_{genco,period,year} \leq FC\_init\_cap_{genco} + \sum_{index \in years} Cap\_inv\_FC_{genco,index} \quad (70)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{genco \in H2\_storage\_unit} H2\_sto\_out_{genco,period,year} \\ &= \sum_{sector \in demand\_sectors} (H2\_demand_{sector,period,year}) \\ &+ \sum_{genco\_FC\_units} \left( \frac{Generation\_FC_{genco,period,year}}{FC\_eff_{genco}} \right) + H2tInd_{period,year} \end{aligned} \quad (71)$$

$$\sum_{year \in years} Cap\_inv\_FC_{flex\_unit,year} \leq FC\_max\_cap_{flex\_unit} \quad (72)$$

$$\sum_{year \in years} H2\_sto\_max\_cap_{flex\_unit,year} \leq H2\_sto\_max\_cap_{flex\_unit} \quad (73)$$

$$\sum_{year \in years} H2\_electrolysis\_max\_cap_{flex\_unit,year} \leq H2\_max\_cap_{flex\_unit} \quad (74)$$

Gdje je:

- $Generation\_H2_{flex\_unit,period,year}$  - proizvodnja vodika u pojedinoj vrsti elektrolizatora u određenom satu i godini
- $H2\_eff_{flex\_unit}$  - učinkovitost pojedinih vrsta elektrolozatora
- $Power\_to\_h2_{period,year}$  - potrošnja električne energije za proizvodnju vodika
- $Generation\_H2_{flex\_unit,period,year}$  - proizvodnja vodika
- $H2\_init\_cap_{flex\_unit}$  - inicijalni kapacitet elektrolzatora, gorivih članaka i sustava pohrane vodika
- $H2\_electrolysis\_max\_cap_{flex\_unit,index}$  -
- $H2\_sto\_soc_{sto\_unit,1,year}$  - stanje napunjenosti pohrane vodika u prvom satu u godini - uvjet inicijalizacije simulacije
- $H2\_sto\_out_{sto\_unit,1,year}$  - izlaz iz pohrane u prvom satu u godini
- $Generation\_H2_{flex\_unit,1,year}$  - proizvodnja vodika i punjenje pohrane u prvom satu u godini
- $H2\_sto\_soc_{sto\_unit,period,year}$  - stanje napunjenosti pohrane vodika u određenom satu u godini - uvjet inicijalizacije simulacije
- $H2\_sto\_soc_{sto\_unit,last\_period,year}$  - razina napunjenosti pohrane vodika u posljednjem satu
- $H2\_sto\_soc_{sto\_unit,period-1,year}$  - razina napunjenosti pohrane vodika u satu prije sata koji se promatra
- $H2\_sto\_out_{sto\_unit,period,year}$  - izlaz iz pohrane u određenom satu u godini
- $H2\_sto\_init_{sto\_unit}$  - inicijalni kapacitet pohrane vodika
- $H2\_sto\_max\_cap_{sto\_unit,index}$  - kapacitet pohrane vodika u određenoj godini

- $Generation_{FC_{genco,period,year}}$  – proizvodnja električne energije putem gorivih članaka u određenom satu u godini
- $FC_{init\_cap_{genco}}$  – inicijalni kapacitet gorivih članaka
- $Cap_{inv\_FC_{genco,index}}$  – investicija u gorive članke
- $H2_{sto\_out_{genco,period,year}}$  – izlaz vodika iz pohrane vodika u određenom satu u godini
- $H2_{demand_{sector,period,year}}$  – potrošnja vodika u određenom sektoru, u satu i godini
- $FC_{eff_{genco}}$  – učinkovitost gorivih članaka
- $H2tInd_{period,year}$  – potreba za vodikom u industriji u određenom satu u godini
- $Cap_{inv\_FC_{flex\_unit,year}}$  – investicija u gorive članke u određenoj godini
- $FC_{max\_cap_{flex\_unit}}$  – kapacitet gorivih članaka
- $H2_{sto\_max\_cap_{flex\_unit,year}}$  – kapacitet pohrane vodika

## 6.2. Proizvodnja elektrogoriva

Razvijena je varijanta modela koja omogućuje detaljniju dekarbonizaciju uz korištenje sintetskih tekućih i plinovitih goriva. Proizvodnja ovih goriva se nastavlja na modul proizvodnje vodika te se dodaju varijable koje uvrštavaju potrebu za vodikom koji se koristi u daljnjoj obradi u jednadžbe opisane u prethodnom odlomku.

Odnos potrošnje električne energije u procesu hidrogenacije za proizvodnju plinovitog i tekućeg goriva u odnosu na sadržanu energiju u generiranom gorivu je dan putem sljedećih jednadžba.

$$\sum_{flex\_unit \in flex\_units} \frac{gen\_e\_liq_{flex\_unit,period,year}}{efuel\_eff_{flex\_unit,system}} = power\_to\_efuel_{period,year} \quad (75)$$

$$\sum_{flex\_unit \in flex\_units} \frac{gen\_e\_gas_{flex\_unit,period,year}}{egas\_eff_{flex\_unit,system}} = power\_to\_egas_{period,year} \quad (76)$$

Proizvodni kapacitet tekućeg i plinovitog elektrogoriva je ograničen putem trenutnih instaliranih kapaciteta proizvodnih jedinica. Proizvodni kapaciteti su također podložni dekomisiji i uvođenju novih kapaciteta u pogon. Detaljniji opis ovog djela modela i definicije kapaciteta kao i parametara vezanih uz dekomisiju je dan u poglavlju

$$\begin{aligned}
 gen\_eliq_{year} \leq & \left( eliq\_init\_cap \right. \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate)^{\max(Decom\_start\_old - 1, year - years[0]) - (Decom\_start\_old - 1)} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} eliq\_inv_{year} \\
 & * \left( (1 \right. \\
 & \left. - Decom\_rate_{genco})^{\max(Decom\_start\_new_{genco} - 1, year - index) - (Decom\_start\_new - 1)} \right) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{77}$$

$$\begin{aligned}
 gen\_egas_{year} \leq & \left( egas\_init\_cap \right. \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate)^{\max(Decom\_start\_old - 1, year - years[0]) - (Decom\_start\_old - 1)} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} egas\_inv_{year} \\
 & * \left( (1 \right. \\
 & \left. - Decom\_rate_{genco})^{\max(Decom\_start\_new_{genco} - 1, year - index) - (Decom\_start\_new - 1)} \right) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{78}$$

$$\begin{aligned}
 eliq\_sto\_SOC_{sto\_unit,1,year} \\
 = & \alpha * eliq\_sto\_SOC_{sto\_unit,1,year} - eliq\_sto\_out_{sto\_unit,1,year} \\
 + & \sum_{flex\_unit \in liqefuel\_units} Generation\_eliq_{flex\_unit,1,year}
 \end{aligned} \tag{79}$$

$$\begin{aligned}
 eliq\_sto\_SOC_{sto\_unit,period,year} \\
 = & eliq\_sto\_SOC_{sto\_unit,period-1,year} - eliq\_sto\_out_{sto\_unit,period,year} \\
 + & \sum_{flex\_unit \in liqefuel\_units} Generation\_eliq_{flex\_unit,period,year}
 \end{aligned} \tag{80}$$

$$\begin{aligned}
 egas\_sto\_SOC_{sto\_unit,1,year} \\
 = & \alpha * egas\_sto\_SOC_{sto\_unit,1,year} - egas\_sto\_out_{sto\_unit,1,year} \\
 + & \sum_{flex\_unit \in gasfuel\_units} Generation\_egas_{flex\_unit,1,year}
 \end{aligned} \tag{81}$$

$$\begin{aligned}
 &egas\_sto\_soc_{sto\_unit,period,year} \\
 &= egas\_sto\_soc_{sto\_unit,period-1,year} - egas\_sto\_out_{sto\_unit,period,year} \\
 &+ \sum_{flex\_unit \in gasfuel\_units} Generation\_egas_{flex\_unit,period,year}
 \end{aligned} \tag{82}$$

$$\sum_{sto\_unit \in liqefuel\_stor\_units} eliq\_sto\_out_{sto\_unit,period,year} = eliq\_outfow_{period,year} \tag{83}$$

$$\sum_{sto\_unit \in gasefuel\_stor\_units} egas\_sto\_out_{sto\_unit,period,year} = egas\_outfow_{period,year} \tag{84}$$

$$eliq_{outfow}_{sto\_unit,period,year} = eliq_{ind}_{period,year} + ICE_{efuel\_energy}_{period,year} \tag{85}$$

$$egas_{outfow}_{sto\_unit,period,year} = egas_{ind}_{period,year} \tag{86}$$

$$\begin{aligned}
 eliq\_sto\_soc_{year} \leq & \left( eliq\_sto\_init\_cap \right. \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate)^{\max(Decom\_start\_old - 1, year - years[0]) - (Decom\_start\_old - 1)} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} eliq\_sto\_inv_{year} \\
 & * \left( 1 \right. \\
 & \left. - Decom\_rate_{genco}^{\max(Decom\_start\_new_{genco} - 1, year - index) - (Decom\_start\_new - 1)} \right) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{87}$$

$$\begin{aligned}
 &egas\_sto\_soc_{period,year} \\
 &\leq \left( egas\_sto\_init\_cap \right. \\
 &* \left( (1 - Decom\_rate)^{\max(Decom\_start\_old - 1, year - years[0]) - (Decom\_start\_old - 1)} \right) \\
 &+ \sum_{index \in years} egas\_sto\_inv_{year} \\
 &* \left( 1 \right. \\
 &\left. - Decom\_rate_{genco}^{\max(Decom\_start\_new_{genco} - 1, year - index) - (Decom\_start\_new - 1)} \right) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{88}$$

$$\begin{aligned}
 & eliq\_sto\_soc_{period,year} \\
 & \leq \left( eliq\_sto\_init\_cap \right. \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate)^{\max(Decom\_start\_old - 1, year - years[0]) - (Decom\_start\_old - 1)} \right) \\
 & + \sum_{index \in years} eliq\_sto\_inv_{year} \\
 & * \left( (1 - Decom\_rate_{genco})^{\max(Decom\_start\_new_{genco} - 1, year - index) - (Decom\_start\_new - 1)} \right) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{89}$$

$$eliqu\_sto\_soc_{period,year} \geq 0 \tag{90}$$

$$egas\_sto\_soc_{period,year} \geq 0 \tag{91}$$

$$cap\_inv\_eliqu\_flex\_unit,year \leq efuel\_max\_cap\_flex\_unit,year \tag{92}$$

$$cap\_inv\_egas\_flex\_unit,year \leq egas\_max\_cap\_flex\_unit,year \tag{93}$$

$$efuel\_stor\_max\_cap\_flex\_unit,year \leq Efuel\_stor\_max\_cap\_flex\_unit,year \tag{94}$$

$$egas\_stor\_max\_cap\_flex\_unit,year \leq Egas\_stor\_max\_cap\_flex\_unit,year \tag{95}$$

Gdje je:

- $gen\_e\_liq_{flex\_unit,period,year}$  – proizvodnja sintetskih tekućih goriva u određenom satu u godini
- $efuel\_eff_{flex\_unit,system}$  – učinkovitost sustava za proizvodnju sintetskih tekućih goriva
- $power\_to\_efuel_{period,year}$  – potrošnja električne energije za proizvodnju sintetskih tekućih goriva u određenom satu u godini
- $gen\_e\_gas_{flex\_unit,period,year}$  – proizvodnja sintetskih plinovitih goriva u određenom satu u godini
- $egas\_eff_{flex\_unit,system}$  – učinkovitost sustava za proizvodnju sintetskih plinovitih goriva
- $power\_to\_egas_{period,year}$  – potrošnja električne energije za proizvodnju sintetskih plinovitih goriva u određenom satu u godini
- $gen\_eliqu_{year}$  – godišnja proizvodnja sintetskih tekućih goriva
- $eliqu\_init\_cap$  – inicijalni instalirani kapaciteti proizvodnih jedinica za proizvodnju sintetskih tekućih goriva
- $Decom\_start\_old$  - početak dekomisije starih kapaciteta
- $eliqu\_inv_{year}$  – godišnje investicije u kapacitete proizvodnih jedinica za proizvodnju sintetskih tekućih goriva

- 
- $Decom\_rate_{genco}$  – postotak dekomisije proizvodnih kapaciteta
  - $Decom\_start\_new_{genco}$  – početak dekomisije novih proizvodnih kapaciteta
  - $gen\_egas_{year}$  – godišnja proizvodnja sintetskih tekućih goriva
  - $egas\_init\_cap$  – inicijalni instalirani kapaciteti proizvodnih jedinica za proizvodnju sintetskih plinovitih goriva
  - $egas\_inv_{year}$  – godišnje investicije u kapacitete proizvodnih jedinica za proizvodnju sintetskih plinovitih goriva
  - $eliq\_sto\_soc_{sto\_unit,1,year}$  – stanje napunjenosti spremnika sintetskih tekućih goriva u prvom satu u godini
  - $eliq\_sto\_out_{sto\_unit,1,year}$  – izlaz spremnika sintetskih tekućih goriva u prvom satu u godini
  - $Generation\_eliq_{flex\_unit,1,year}$  – proizvodnja proizvodnih jedinica sintetskih tekućih goriva u prvom satu u godini
  - $eliq\_sto\_soc_{sto\_unit,period,year}$  – stanje napunjenosti spremnika sintetskih tekućih goriva u određenom satu u godini
  - $eliq\_sto\_soc_{sto\_unit,period-1,year}$  – stanje napunjenosti spremnika sintetskih tekućih goriva u prethodnom satu u godini
  - $eliq\_sto\_out_{sto\_unit,period,year}$  – izlaz spremnika sintetskih tekućih goriva u određenom satu u godini
  - $Generation\_eliq_{flex\_unit,period,year}$  – proizvodnja proizvodnih jedinica sintetskih tekućih goriva u određenom satu u godini
  - $egas\_sto\_soc_{sto\_unit,1,year}$  – stanje napunjenosti spremnika sintetskih plinovitih goriva u prvom satu u godini
  - $egas\_sto\_out_{sto\_unit,1,year}$  – izlaz spremnika sintetskih plinovitih goriva u prvom satu u godini
  - $Generation\_egas_{flex\_unit,1,year}$  – proizvodnja proizvodnih jedinica sintetskih plinovitih goriva u prvom satu u godini
  - $egas\_sto\_soc_{sto\_unit,period,year}$  – stanje napunjenosti spremnika sintetskih plinovitih goriva u određenom satu u godini
  - $egas\_sto\_soc_{sto\_unit,period-1,year}$  – stanje napunjenosti spremnika sintetskih plinovitih goriva u prvom satu u godini
  - $egas\_sto\_out_{sto\_unit,period,year}$  – izlaz spremnika sintetskih plinovitih goriva u prvom satu u godini
  - $Generation\_egas_{flex\_unit,period,year}$  – proizvodnja proizvodnih jedinica sintetskih tekućih goriva u određenom satu u godini
  - $eliq\_outfow_{period,year}$  – izlaz tekućeg sintetskog goriva iz spremišta u satu u godini
  - $egas\_outfow_{period,year}$  – izlaz plinovitog sintetskog goriva iz spremišta u satu u godini
  - $eliq\_ind_{period,year}$  – potrošnja tekućeg sintetskog goriva u industriji u satu u godini
  - $ICE\_efuel\_energy_{period,year}$  – potrošnja tekućeg sintetskog goriva u transportu u satu u godini
  - $egas\_ind_{period,year}$  – potrošnja plinovitog sintetskog goriva u industriji u satu u godini
  - $eliq\_sto\_init\_cap$  – inicijalni kapaciteti spremnika sintetskih tekućih goriva
  - $eliq\_sto\_inv_{year}$  – godišnje investicije u kapacitete spremnika sintetskih tekućih goriva
  - $egas\_sto\_init\_cap$  – inicijalni kapaciteti spremnika sintetskih plinovitih goriva
  - $egas\_sto\_inv_{year}$  – godišnje investicije u kapacitete spremnika sintetskih plinovitih goriva
  - $cap\_inv\_eliq_{flex\_unit,year}$  – godišnje investicije u kapacitete proizvodnih jedinica sintetskih tekućih goriva
  - $efuel\_max\_cap_{flex\_unit,year}$  – godišnji maksimalni kapacitet proizvodnih jedinica sintetskih tekućih goriva
  - $cap\_inv\_egas_{flex\_unit,year}$  – godišnje investicije u kapacitete proizvodnih jedinica sintetskih plinovitih goriva
  - $egas\_max\_cap_{flex\_unit,year}$  – godišnji maksimalni kapacitet proizvodnih jedinica sintetskih plinovitih goriva
  - $efuel\_stor\_max\_cap_{flex\_unit,year}$  – godišnji maksimalni kapacitet spremnika sintetskih plinovitih goriva
  - $Efuel\_stor\_max\_cap_{flex\_unit,year}$  – maksimalni kapacitet pohrane tekućeg sintetskog goriva u godini
  - $egas\_stor\_max\_cap_{flex\_unit,year}$  – godišnji maksimalni kapacitet spremnika sintetskih plinovitih goriva
  - $Egas\_stor\_max\_cap_{flex\_unit,year}$  – maksimalni kapacitet pohrane plinovitog sintetskog goriva u godini



## 7. POHRANA ENERGIJE

### 7.1. Stacionarni sustavi pohrane

Osim pohrane energije u baterijama vozila, moguće je koristiti iste te baterije u svrhu stacionarne pohrane energije. Ovaj podmodul je definiran setom jednačba koje opisuju inicijalno stanje sustava pohrane, investicije te dekomisiju.

$$\begin{aligned} Stat\_sto\_soc_{unit,1,year} \\ = 0.0 * Sta\_sto\_max\_cap_{unit} - Stat\_sto\_out_{unit,1,year} + Stat\_sto\_in_{unit,1,year} \\ * Sta\_sto\_eff_{unit} \end{aligned} \quad (96)$$

$$\begin{aligned} Stat\_sto\_soc_{unit,period,year} \\ = Stat\_sto\_soc_{unit,period-1,year} - Stat\_sto\_out_{unit,period,year} \\ + Stat\_sto\_in_{unit,period,year} * Sta\_sto\_eff_{unit} \end{aligned} \quad (97)$$

$$\begin{aligned} Stat\_sto\_soc_{unit,period,year} \\ \leq Sta\_sto\_init\_cap_{unit} * StaSto\_Decom\_ind_{year} \\ + \sum_{index \in years} (Stat\_sto\_cap\_inv_{unit,index} \\ * ((1 - Sta\_sto\_decom\_rate_{unit})^{(max(Sta\_sto\_decom\_start\_new_{unit-1,year}-index)-(Sta\_sto\_decom\_start\_new_{unit-1}))} \end{aligned} \quad (98)$$

$$\sum_{year \in years} Stat\_sto\_cap\_inv_{unit,year} \leq Sta\_sto\_max\_cap_{unit} \quad (99)$$

$$Stat\_sto\_soc_{unit,last\_periods,year} \leq \gamma * Sta\_sto\_max\_cap_{unit} \quad (100)$$

Gdje je:

- $Stat\_sto\_soc_{unit,1,year}$  – stanje napunjenosti stacionarnog spremnika u prvom satu u godini
- $Sta\_sto\_max\_cap_{unit}$  – maksimalni kapacitet stacionarnog spremnika
- $Stat\_sto\_out_{unit,1,year}$  – izlaz stacionarnog spremnika u prvom satu u godini
- $Stat\_sto\_in_{unit,1,year}$  – ulaz stacionarnog spremnika u prvom satu u godini
- $Sta\_sto\_eff_{unit}$  – učinkovitost stacionarnog spremnika
- $Stat\_sto\_soc_{unit,period,year}$  – stanje napunjenosti stacionarnog spremnika u određenom satu u godini
- $Stat\_sto\_soc_{unit,period-1,year}$  – stanje napunjenosti stacionarnog spremnika u prethodnom satu
- $Stat\_sto\_out_{unit,period,year}$  – izlaz stacionarnog spremnika u određenom satu u godini
- $Stat\_sto\_in_{unit,period,year}$  – ulaz stacionarnog spremnika u određenom satu u godini
- $Sta\_sto\_init\_cap_{unit}$  – inicijalni kapacitet stacionarnog spremnika
- $StaSto\_Decom\_ind_{year}$  – godišnja dekomisija stacionarnih spremnika u industriji
- $Sta\_sto\_decom\_rate_{unit}$  – stopa dekomisije stacionarnih spremnika

- *Sta\_sto\_decom\_start\_new<sub>unit</sub>* – početak dekomisije novih stacionarnih spremnika
- *Stat\_sto\_cap\_inv<sub>unit,year</sub>* – investicije u kapacitet stacionarnog spremnika u godini
- *Stat\_sto\_soc<sub>unit,last\_periods,year</sub>* – stanje napunjenosti stacionarnog spremnika u zadnjem satu

## 8. SUSTAVI GRIJANJA I HLAĐENJA

### 8.1. Kogeneracijski sustavi i pohrana energije

Kogeneracijski sustavi se baziraju na kogeneracijskim elektranama. Stoga je potrebno u ulaznim podacima flote proizvodnih kapaciteta definirati koja postrojenja sudjeluju u proizvodnji električne i toplinske energije. Također, potrebno je definirati omjer toplinske i električne energije kako bi se mogao definirati toplinski kapacitet. U trenutnom raspisu modela, pohrana toplinske energije u centraliziranim toplinskim sustavima je vezana uz pohranu energije definiranu pojedinom termoelektranom koja ga opskrbljuje. Također, u trenutnoj verziji nije omogućeno kombiniranje proizvodnje toplinske energije iz više termoenergetskih postrojenja i njihov ulazak u zajednički sustav daljinskog grijanja. Stoga se u sustavima koje opskrbljuje dvije ili više postrojenja, potrebe dijele na odgovarajući broj dijelova i tretiraju toplinski odvojenim sustavima. Centralizirani toplinski sustavi su također opskrbljivani tradicionalnim kotlovima i dizalicama topline čiji su kapaciteti definirani u nultoj godini te se modificiraju u sljedećim godinama pod utjecajem dekomisije i izgradnje novih kapaciteta. Sustav pohrane energije se u prvom periodu inicira sa rubnim uvjetom napunjenosti 50 % nazivnog kapaciteta. U sljedećim periodima se razina napunjenosti sustava modificira pod utjecajem ulaska energije iz kogeneracijskog postrojenja, kotlova i dizalica topline.

$$Heat\_input_{genco,period,year} * CHPPowerToHeat_{genco} \leq Generation_{genco,period,year} \quad (101)$$

$$\begin{aligned} Generation_{genco,period,year} \\ \leq Max\_load_{genco} * Cap\_factor_{genco} - Heat\_input_{genco,period,year} \\ * CHPPowerLossFactor_{genco} \end{aligned} \quad (102)$$

$$Generation_{genco,period,year} \geq Min\_load_{genco} - Heat\_input_{genco,period,year} * CHPPowerLossFactor_{genco} \quad (103)$$

$$\begin{aligned} Heat\_sto\_level_{genco,1,year} \\ = 0.5 * STOCapacity\_heat_{genco} + Heat\_input_{genco,1,year} - Heat\_gen_{genco,1,year} \end{aligned} \quad (104)$$

$$\begin{aligned}
 &Heat\_sto\_level_{genco,period,year} \\
 &= Heat\_sto\_level_{genco,period-1,year} + Heat\_input_{genco,period,year} \\
 &+ \sum_{HPUnit \in HeatPump\_units} Heat\_pump\_dh_{HPUnit,genco,period,year} \\
 &+ \sum_{boiler \in thermal\_units} (Boiler\_dh\_generation_{boiler,genco,period,year}) \\
 &- Heat\_gen_{genco,period,year}
 \end{aligned} \tag{105}$$

$$Heat\_sto\_level_{genco,period,year} \leq STOCapacity\_heat_{genco} \tag{106}$$

$$Heat\_gen_{genco,period,year} \leq CHPMaxHeat_{genco} \tag{107}$$

Gdje je:

- $Heat\_input_{genco,period,year}$  – ulaz toplinske energije u pohranu energije u sustavu, u satu u godini
- $CHPPowerToHeat_{genco}$  – omjer proizvodnje toplinske i električne energije
- $Generation_{genco,period,year}$  – proizvodnja u određenom satu u godini
- $Max\_load_{genco}$  – maksimalno opterećenje
- $Cap\_factor_{genco}$  – faktor kapaciteta
- $CHPPowerLossFactor_{genco}$  – gubitak proizvodnje električne energije u kogeneracijskom režimu rada
- $Min\_load_{genco}$  – minimalno opterećenje
- $Heat\_sto\_level_{genco,1,year}$  – razina toplinskog spremnika u prvom satu u godini
- $STOCapacity\_heat_{genco}$  – kapacitet toplinskog spremnika
- $Heat\_input_{genco,1,year}$  – ulaz toplinske energije u pohranu energije u sustavu, u prvom satu u godini
- $Heat\_gen_{genco,1,year}$  – proizvodnja topline u prvom satu u godini
- $Heat\_sto\_level_{genco,period,year}$  – razina toplinskog spremnika u određenom satu u godini
- $Heat\_sto\_level_{genco,period-1,year}$  – razina toplinskog spremnika u prethodnom satu u godini
- $Heat\_pump\_dh_{HPUnit,genco,period,year}$  – toplinske pumpe za daljinsko grijanje u određenom satu u godini
- $Boiler\_dh\_generation_{boiler,genco,period,year}$  – proizvodnja tradicionalnih kotlova u daljinskom grijanju u određenom satu u godini
- $Heat\_gen_{genco,period,year}$  – proizvodnja topline u određenom satu u godini
- $CHPMaxHeat_{genco}$  – maksimalni kapacitet ispusta topline iz pohrane toplinske energije

## 8.2. Bilanca toplinskih i rashladnih potreba

Toplinske potrebe su podijeljene na dvije glavne vrste: individualni sustavi i centralizirani toplinski sustavi. Svaki od ovih sustava ima definiranu satnu distribuciju.

$$Heat\_gen_{genco,period,year} = Heat\_demand_{genco,period,year} \tag{108}$$

$$\sum_{genco \in \text{HeatPump\_units}} \text{Heat\_pump\_out}_{genco,period,year} + \sum_{boiler \in \text{thermal\_units}} \text{Boiler\_ind\_generation}_{boiler,period,year} = \text{Heat\_demand}_{\text{general\_demand},period,year} \quad (109)$$

$$\sum_{genco \in \text{HeatPump\_units}} \text{Cooling\_pump\_ind}_{genco,period,year} = \text{Cooling\_demand}_{\text{general\_cooling},period,year} \quad (110)$$

$$\sum_{genco \in \text{HeatPump\_units}} \text{Cooling\_pump\_dh}_{genco,chp\_market,period,year} = \text{Cooling\_demand}_{chp\_market,period,year} \quad (111)$$

Gdje je:

- $\text{Heat\_gen}_{genco,period,year}$  – proizvodnja toplinske energije u određenom satu u godini
- $\text{Heat\_demand}_{genco,period,year}$  – satna godišnja distribucija potražnje toplinske energije
- $\text{Heat\_pump\_out}_{genco,period,year}$  – izlaz toplinskih pumpi u određenom satu u godini
- $\text{Boiler\_ind\_generation}_{boiler,period,year}$  – proizvodnja tradicionalnih kotlova za industriju u određenom satu u godini
- $\text{Heat\_demand}_{\text{general\_demand},period,year}$  - satna godišnja distribucija potražnje toplinske energije za opću potrošnju
- $\text{Cooling\_pump\_ind}_{genco,period,year}$  - proizvodnja rashladne energije toplinskih pumpi za zone industriju u određenom satu u godini
- $\text{Cooling\_demand}_{\text{general\_cooling},period,year}$  - satna godišnja distribucija potražnje rashladne energije za opću potrošnju
- $\text{Cooling\_pump\_dh}_{genco,chp\_market,period,year}$  – proizvodnja rashladne energije toplinskih pumpi za zone daljinskog grijanja u određenom satu u godini
- $\text{Cooling\_demand}_{chp\_market,period,year}$  - satna godišnja distribucija potražnje rashladne energije za zone daljinskog grijanja

### 8.3. Dizalice topline i električni grijači

Ovaj dio modela opisuje rad dizalica topline i električnih kotlova. Ovi sustavi su definirani inicijalnim kapacitetima, tehničkim karakteristikama kao i ograničenima u vidu investicija i dekomisije. Glavni parametar koji opisuje rad dizalice topline je COP faktor. COP faktor daje odnos između isporučene toplinske energije i utrošene električne energije. Potrošnja električne energije se dalje koristi u bilanci energije, dok se proizvodnja toplinske energije koristi u bilanci toplinskih potreba kako kod individualnih sustava, tako i kod centraliziranih toplinskih sustava. Kako bi se omogućilo aktivno sudjelovanje na tržištu električne energije, ovi sustavi imaju predviđenu ugradnju pohrane toplinske energije.

$$\sum_{genco \in \text{HeatPump\_units}} \sum_{chp\_market \in \text{chp\_units}} \frac{\text{Heat\_pump\_dh}_{genco,chp\_market,period,year} + \text{Cooling\_pump\_dh}_{genco,chp\_market,period,year}}{\text{HP\_COP\_period}_{genco,period,year}} + \sum_{genco \in \text{HeatPump\_units}} \frac{\text{Heat\_pump\_ind}_{genco,period,year}}{\text{HP\_COP\_period}_{genco,period,year}} = \text{ResToHeat}_{period,year} \quad (112)$$

$$\begin{aligned} & \text{Heat\_pump\_dh}_{genco,chp\_market,period,year} + \text{Cooling\_pump\_dh}_{genco,chp\_market,period,year} \\ & \leq \text{HP\_Boiler\_dh\_init\_cap}_{genco,chp\_market} * \text{HP\_Decom\_ind}_{year} \\ & + \sum_{index \in \text{years}} \text{Heat\_pump\_dh\_cap}_{genco,chp\_market,index} \\ & * \left( \left( 1 - \text{int}(\text{HP\_decom\_rate}_{genco}) \right)^{\left( \text{Max}(\text{HP\_decom\_start\_new}_{genco-1,year-index}) - (\text{HP\_decom\_start\_new}_{genco-1}) \right)} \right) \end{aligned} \quad (113)$$

$$\begin{aligned} & \text{Heat\_pump\_ind}_{genco,period,year} \\ & \leq \text{HP\_ind\_init\_cap}_{genco} * \text{HP\_Decom\_ind}_{year} + \sum_{index \in \text{years}} \text{Heat\_pump\_ind\_cap}_{genco,index} \\ & * \left( \left( 1 - \text{int}(\text{HP\_decom\_rate}_{genco}) \right)^{\left( \text{Max}(\text{HP\_decom\_start\_new}_{genco-1,year-index}) - (\text{HP\_decom\_start\_new}_{genco-1}) \right)} \right) \end{aligned} \quad (114)$$

$$\begin{aligned} & \text{Heat\_pump\_sto\_soc}_{genco,period,year} \\ & = \text{Heat\_pump\_sto\_soc}_{genco,period-1,year} + \text{Heat\_pump\_ind}_{genco,period,year} \\ & - \text{Heat\_pump\_out}_{genco,period,year} - \text{Cooling\_pump\_ind}_{genco,period,year} \end{aligned} \quad (115)$$

$$\begin{aligned} & \text{Heat\_pump\_sto\_soc}_{genco,1,year} \\ & = \text{Heat\_pump\_ind}_{genco,1,year} - \text{Heat\_pump\_out}_{genco,1,year} \\ & - \text{Cooling\_pump\_ind}_{genco,1,year} \end{aligned} \quad (116)$$

$$\text{Heat\_pump\_sto\_soc}_{genco,period,year} \leq \text{HP\_sto\_init}_{genco} \quad (117)$$

$$\text{Heat\_pump\_sto\_soc}_{genco,Last\_periods,year} \leq 0.2 * \text{HP\_sto\_init}_{genco} \quad (118)$$

$$\begin{aligned} & \text{Boiler\_dh\_generation}_{boiler,chp\_market,period,year} \\ & \leq \text{HP\_Boiler\_dh\_init\_cap}_{boiler,chp\_market} * \text{Thermal\_Decom\_DH}_{year} \\ & + \sum_{index \in \text{years}} \text{Trad\_boiler\_dh\_cap\_inv}_{boiler,chp\_market,index} \\ & * \left( \left( 1 - \text{int}(\text{Boiler\_decom\_rate}_{boiler}) \right)^{\left( \text{Max}(\text{Boiler\_decom\_start\_new}_{boiler-1,year-index}) - (\text{Boiler\_decom\_start\_new}_{boiler-1}) \right)} \right) \end{aligned} \quad (119)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Boiler\_ind\_generation}_{\text{boiler,period,year}} \\
 & \leq \text{Thermal\_ind\_init\_cap}_{\text{boiler}} * \text{Thermal\_Decom\_ind}_{\text{year}} \\
 & + \sum_{\text{index} \in \text{years}} \text{Trad\_boiler\_ind\_cap\_inv}_{\text{boiler,index}} \\
 & * \left( (1 - \text{int}(\text{Boiler\_decom\_rate}_{\text{boiler}}))^{\text{Max}(\text{Boiler\_decom\_start\_new}_{\text{boiler}-1,\text{year}-\text{index}}) - (\text{Boiler\_decom\_start\_new}_{\text{boiler}-1})} \right)
 \end{aligned} \tag{120}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{\text{year} \in \text{years}} \text{Trad\_boiler\_ind\_cap\_inv}_{\text{boiler,year}} \\
 & + \sum_{\text{year} \in \text{years}} \sum_{\text{chp\_market} \in \text{chp\_units}} \text{Trad\_boiler\_dh\_cap\_inv}_{\text{boiler,chp\_market,year}} \\
 & \leq \text{Thermal\_max\_cap}_{\text{boiler}}
 \end{aligned} \tag{121}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{\text{year} \in \text{years}} \text{Heat\_pump\_ind\_cap}_{\text{hpUnit,year}} \\
 & + \sum_{\text{year} \in \text{years}} \sum_{\text{chp\_market} \in \text{chp\_units}} \text{Heat\_pump\_dh\_cap}_{\text{hpUnit,chp\_market,year}} \\
 & \leq \text{HP\_max\_cap}_{\text{hpUnit}}
 \end{aligned} \tag{122}$$

Gdje je:

- $\text{Heat\_pump\_dh}_{\text{genco,chp\_market,period,year}}$  – proizvodnja iz dizalica topline u CTSu u određenom toplinskom sustavu, u satu i u godini
- $\text{Cooling\_pump\_dh}_{\text{genco,chp\_market,period,year}}$  – proizvodnja iz dizalica topline u CTSu u određenom toplinskom sustavu, u satu i u godini
- $\text{HP\_COP\_period}_{\text{genco,period,year}}$  – COP faktor dizalica topline u CTSu u određenom toplinskom sustavu, u satu i u godini
- $\text{Heat\_pump\_ind}_{\text{genco,period,year}}$  – proizvodnja iz dizalica topline u individualnim toplinskim sustavima u satu i u godini
- $\text{ResToHeat}_{\text{period,year}}$  – korištena električna energija za pogon električnih sustava grijanja u satu u godini
- $\text{HP\_Boiler\_dh\_init\_cap}_{\text{genco,chp\_market}}$  – početni kapacitet dizalica topline i kotlova u CTSu
- $\text{HP\_Decom\_ind}_{\text{year}}$  – dekomisija dizalica topline u individualnim sustavima
- $\text{Heat\_pump\_dh\_cap}_{\text{genco,chp\_market,index}}$  – kapacitet dizalica topline u CTSu
- $\text{HP\_decom\_rate}_{\text{genco}}$  – dekomisija dizalica topline
- $\text{HP\_decom\_start\_new}_{\text{genco}}$  – početak dekomisije novih kapaciteta dizalica topline
- $\text{HP\_ind\_init\_cap}_{\text{genco}}$  – početni kapacitet dizalica topline u individualnim sustavima
- $\text{HP\_Decom\_ind}_{\text{year}}$  – dekomisija dizalica topline u individualnim sustavima grijanja
- $\text{Heat\_pump\_sto\_soc}_{\text{genco,period,year}}$  – razina pohrane u pohrani povezanoj sa dizalicama topline u satu u godini
- $\text{Heat\_pump\_sto\_soc}_{\text{genco,period-1,year}}$  – razina pohrane u pohrani povezanoj sa dizalicama topline u prethodnom satu u godini
- $\text{Cooling\_pump\_ind}_{\text{genco,period,year}}$  – rad dizalice topline u sustavu hlađenja kod individualnih sustava u satu u godini
- $\text{Heat\_pump\_sto\_soc}_{\text{genco,1,year}}$  – razina pohrane u pohrani energije povezanoj sa dizalicom topline u prvom satu u godini
- $\text{Boiler\_dh\_generation}_{\text{boiler,chp\_market,period,year}}$  – proizvodnja iz kotlova u CTSu u određenom satu u godini

- $HP\_Boiler\_dh\_init\_cap_{boiler, chp\_market}$  – početni kapacitet kotlova i dizalica topline u CTSu
- $Thermal\_Decom\_DH_{year}$  – dekomisija dizalica topline
- $Boiler\_decom\_rate_{boiler}$  – dekomisija kotlova
- $Boiler\_decom\_start\_new_{boiler}$  – dekomisija novoinstaliranih kotlova
- $Boiler\_ind\_generation_{boiler, period, year}$  – proizvodnja iz kotlova u individualnim sustavima u satu u godini
- $Thermal\_ind\_init\_cap_{boiler}$  – početni kapaciteti u individualnim sustavima grijanja
- $Thermal\_Decom\_ind_{year}$  – dekomisija u individualnim sustavima grijanja
- $Trad\_boiler\_ind\_cap\_inv_{boiler, year}$  – investicija u kotlove u individualnim sustavima grijanja u određenoj godini
- $Trad\_boiler\_dh\_cap\_inv_{boiler, chp\_market, year}$  – investicija u kotlove u CTSu u određenoj godini i sustavu
- $Thermal\_max\_cap_{boiler}$  – maksimalni kapacitet kotlova
- $Heat\_pump\_ind\_cap_{hpUnit, year}$  – kapacitet dizalica topline u individualnim sustavima grijanja u određenoj godini
- $Heat\_pump\_dh\_cap_{hpUnit, chp\_market, year}$  – kapacitet dizalica topline u CTSu u određenoj godini
- $HP\_max\_cap_{hpUnit}$  – maksimalni kapacitet dizalica topline



## 9. Emisije CO<sub>2</sub>

Model sumira emisije CO<sub>2</sub> iz cijelog sustava i uspoređuje ih sa zadanim maksimalnim vrijednostima u pojedinoj godini.

$$CO2_{total_{year}} + CO2_{total_{heat_{year}}} + CO2_{total_{industry_{year}}} + CO2_{total_{transport_{year}}} \leq CO2_{limit_{year}} \quad (123)$$

$$\sum_{genco \in fossil\_units} \sum_{period \in periods} CO2_{factor_{genco}} * Generation_{genco,period,year} = CO2_{total_{year}} \quad (124)$$

$$\begin{aligned} \sum_{genco \in thermal\_units} \sum_{period \in periods} Thermal\_CO2_{genco} * Boiler\_ind\_generation_{genco,period,year} \\ + \sum_{genco \in thermal\_units} \sum_{chp\_market} \sum_{chp\_units} \sum_{period \in periods} Thermal\_CO2_{genco} \\ * Boiler\_dh\_generation_{genco,chp\_market,period,year} = CO2_{total_{heat_{year}}} \end{aligned} \quad (125)$$

$$\sum_{fuel \in industry\_fuels} \sum_{period \in periods} Fuel\_CO2_{fuel} * Fuel\_ind_{fuel,period,year} = CO2_{total_{industry_{year}}} \quad (126)$$

$$\begin{aligned} \sum_{fuel \in transport\_fuels} \sum_{period \in periods} Fuel\_CO2_{fuel} * Transport\_energy\_ICE_{fuel,period,year} \\ = CO2_{total_{transport_{year}}} \end{aligned} \quad (127)$$

Gdje je:

- $Generation_{genco,period,year}$  - proizvodnja u određenom satu u godini
- $Generation_{genco,period-1,year}$  - proizvodnja u prethodnom satu u godini
- $CO2_{total_{year}}$  – ukupne godišnje emisije CO<sub>2</sub> iz elektroenergetskog sektora
- $CO2_{total_{heat_{year}}}$  – ukupne godišnje emisije CO<sub>2</sub> iz toplinskog sektora
- $CO2_{total_{industry_{year}}}$  – ukupne godišnje emisije CO<sub>2</sub> iz sektora industrije
- $CO2_{total_{transport_{year}}}$  – ukupne godišnje emisije CO<sub>2</sub> iz sektora transporta
- $CO2_{limit_{year}}$  – godišnja granica emisija CO<sub>2</sub>
- $CO2_{factor_{genco}}$  – faktor emisija CO<sub>2</sub> proizvodnih jedinica
- $Boiler\_ind\_generation_{genco,period,year}$  – proizvodnja
- $Thermal\_CO2_{genco}$  – faktor emisija CO<sub>2</sub> toplinskih proizvodnih jedinica
- $Fuel\_CO2_{fuel}$  – emisije CO<sub>2</sub> u gorivu
- $Transport\_energy\_ICE_{fuel,period,year}$  – dio energije u sektoru transporta pokriven putem fosilnih goriva u određenom satu i godini

## 10.FUNKCIJA CILJA

Funkcija cilja modela je bazirana na troškovima sustava. Model minimizira sumu ukupnih troškova kako bi postigao ekonomski optimalni scenarij. Sljedeće jednadžbe prikazuju postupak izračuna ukupnih troškova te njihovo diskontiranje na baznu godinu.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } OF = & \text{Per\_mw} + \text{Import\_cost} + \text{Inv\_cost} + \text{Inv\_cost\_fossil} + \text{Ramp\_up\_cost\_var} \\
 & + \text{Ramp\_down\_cost\_var} + \text{Heat\_pump\_cap\_cost} + \text{ResToHeat\_cost} \\
 & + \text{Boiler\_gen\_cost} + \text{Inv\_cost\_boiler} + \text{CO2\_emissions\_cost} + \text{EvToPowert\_cost} \\
 & + \text{StatToPowert\_cost} + \text{StatCapInvCost} + \text{H2\_storage\_cost} + \text{H2\_CAPEX\_cost} \\
 & + \text{H2\_OPEX\_cost} + \text{Inv\_cost\_FuelCell} + \text{Per\_mw\_FC} + \text{Industry\_fuel\_cost}
 \end{aligned} \quad (128)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Per\_mw} = & \sum_{\text{genco} \in \text{units}} \sum_{\text{period} \in \text{periods}} \sum_{\text{year} \in \text{years}} \text{NPV}_{\text{year}} * \text{var\_cost}_{\text{genco,period,year}} \\
 & * \text{Generation}_{\text{genco,period,year}}
 \end{aligned} \quad (129)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Import\_cost} = & \sum_{\text{period} \in \text{periods}} \sum_{\text{year} \in \text{years}} \text{NPV}_{\text{year}} * \text{Imports}_{\text{period,year}} * \text{Import\_Price} \\
 & * \left(1 + \frac{\text{Imp\_price\_inc}}{100}\right)^{(\text{year} - \text{years}[0])}
 \end{aligned} \quad (130)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Inv\_cost} = & \sum_{\text{genco} \in \text{nondisp\_units}} \sum_{\text{year} \in \text{years}} \text{NPV}_{\text{year}} * \text{Cap\_inv}_{\text{genco,year}} * \text{Cap\_inv\_cost}_{\text{genco}} \\
 & * \text{TechChange}_{\text{genco,year}}
 \end{aligned} \quad (131)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Inv\_cost\_fossil} = & \sum_{\text{genco} \in \text{Fossil\_hydro}} \sum_{\text{year} \in \text{years}} \text{NPV}_{\text{year}} * \text{Cap\_inv}_{\text{genco,year}} * \text{Cap\_inv\_cost}_{\text{genco}}
 \end{aligned} \quad (132)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ramp\_up\_cost\_var} = & \sum_{\text{genco} \in \text{disp\_units}} \sum_{\text{period} \in \text{periods}[1:]} \sum_{\text{year} \in \text{years}} \text{NPV}_{\text{year}} * \text{Rampup\_cost}_{\text{genco,period,year}}
 \end{aligned} \quad (133)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ramp\_down\_cost\_var} \\
 = & \sum_{\text{genco} \in \text{disp\_units}} \sum_{\text{period} \in \text{periods}[1:]} \sum_{\text{year} \in \text{years}} \text{NPV}_{\text{year}} * \text{Rampdown\_cost}_{\text{genco,period,year}}
 \end{aligned} \quad (134)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Heat\_pump\_cap\_cost} \\
 &= \sum_{genco \in \text{HeatPump\_units}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} * \text{Heat\_pump\_ind\_cap}_{genco,year} \\
 & * \text{HP\_cap\_costs\_years}_{genco,year} \quad (135)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \sum_{genco \in \text{HeatPump\_units}} \sum_{chp\_market \in \text{chp\_units}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} \\
 & * \text{Heat\_pump\_dh\_cap}_{genco,chp\_market,year} * \text{HP\_cap\_costs\_years}_{genco,year}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{ResToHeat\_cost} = \sum_{genco \in \text{HeatPump\_units}} \sum_{period \in \text{periods}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} \\
 & * \text{Heat\_pump\_ind}_{genco,period,year} * \text{HP\_var\_cost}_{genco} \quad (136) \\
 &+ \sum_{genco \in \text{HeatPump\_units}} \sum_{chp\_market \in \text{chp\_units}} \sum_{period \in \text{periods}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} \\
 & * \text{Heat\_pump\_dh}_{genco,chp\_market,period,year} * \text{HP\_var\_cost}_{genco}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Boiler\_gen\_cost} = \sum_{genco \in \text{thermal\_units}} \sum_{period \in \text{periods}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} \\
 & * \text{Boiler\_ind\_generation}_{genco,period,year} * \text{Heat\_var\_cost}_{genco,period,year} \quad (137) \\
 &+ \sum_{genco \in \text{thermal\_units}} \sum_{chp\_market \in \text{chp\_units}} \sum_{period \in \text{periods}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} \\
 & * \text{Boiler\_dh\_generation}_{genco,chp\_market,period,year} * \text{Heat\_var\_cost}_{genco,period,year}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Inv\_cost\_boiler} = \sum_{genco \in \text{thermal\_units}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} * \text{Trad\_boiler\_ind\_cap\_inv}_{genco,year} \\
 & * \text{Boiler\_cap\_costs\_years}_{genco,year} \quad (138) \\
 &+ \sum_{genco \in \text{thermal\_units}} \sum_{chp\_market \in \text{chp\_units}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} \\
 & * \text{Trad\_boiler\_dh\_cap\_inv}_{genco,chp\_market,year} * \text{Boiler\_cap\_costs\_years}_{genco,year}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{CO2\_emissions\_cost} \\
 &= \sum_{genco \in \text{fossil\_units}} \sum_{period \in \text{periods}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} * \text{CO2\_price}_{year} * \text{CO2\_factor}_{genco} \quad (139) \\
 & * \text{Generation}_{genco,period,year}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{EvToPower\_cost} = \sum_{period \in \text{periods}} \sum_{year \in \text{years}} NPV_{year} * \text{Ev\_sto\_out}_{period,year} * \text{V2G\_cost} \quad (140)
 \end{aligned}$$

*StatToPowert\_cost*

$$= \sum_{unit \in Stat\_storage\_unit} \sum_{period \in periods} \sum_{year \in years} NPV_{year} \quad (141)$$

$$* (Stat\_sto\_out_{unit,period,year} + Stat\_sto\_in_{unit,period,year}) * Sta\_sto\_var\_cost_{unit}$$

$$StatCapInvCost = \sum_{unit \in Stat\_storage\_unit} \sum_{year \in years} NPV_{year} * Stat\_sto\_cap\_inv_{unit,year} \quad (142)$$

$$* Battery\_costs\_years_{unit,year}$$

$$H2\_storage\_cost = \sum_{genco \in H2\_storage\_unit} \sum_{year \in years} NPV_{year} * H2\_sto\_max\_cap_{genco,year} \quad (143)$$

$$* H2sto\_costs\_years_{genco,year}$$

$$H2\_CAPEX\_cost = \sum_{genco \in Elec\_h2\_units} \sum_{year \in years} NPV_{year} * H2\_electrolysis\_max\_cap_{genco,year} \quad (144)$$

$$* Elec\_cap\_costs\_years_{genco,year}$$

$$H2\_OPEX\_cost = \sum_{genco \in Elec\_h2\_units} \sum_{period \in periods} \sum_{year \in years} NPV_{year} * Generation\_H2_{genco,period,year} \quad (145)$$

$$* H2\_var\_cost_{genco}$$

$$Inv\_cost\_FuelCell = \sum_{genco \in FC\_units} \sum_{year \in years} NPV_{year} * Cap\_inv\_FC_{genco,year} \quad (146)$$

$$* FC\_cap\_costs\_years_{genco,year}$$

$$Per\_mw\_FC = \sum_{genco \in FC\_units} \sum_{period \in periods} \sum_{year \in years} NPV_{year} * FC\_var\_cost_{genco} \quad (147)$$

$$* Generation\_FC_{genco,period,year}$$

*Industry\_fuel\_cost*

$$= \sum_{period \in periods} \sum_{year \in years} \sum_{fuel \in industry\_fuels} NPV_{year} * Fuel\_ind_{fuel,period,year} \quad (148)$$

$$* Industry\_fuels\_price_{period,year,fuel}$$

Gdje je:

- *Per\_mw* – trošak rada
- *Import\_cost* – trošak uvoza električne energije
- *Inv\_cost* – trošak investicije
- *Inv\_cost\_fossil* – investicijski trošak u fosilne izvore

- *Ramp\_up\_cost\_var* – varijabilni trošak povećanja snage u normalnom načinu rada
- *Ramp\_down\_cost\_var* – varijabilni trošak spuštanja snage u normalnom načinu rada
- *Heat\_pump\_cap\_cost* – trošak investicija u toplinske pumpe
- *ResToHeat\_cost* – trošak potrošnje električne energije iz OIE za proizvodnju toplinske energije
- *Boiler\_gen\_cost* – trošak proizvodnje tradicionalnih kotlova
- *Inv\_cost\_boiler* – trošak investicija u tradicionalne kotlove
- *CO2\_emissions\_cost* – trošak emisija CO<sub>2</sub>
- *EvToPower\_t\_cost* – trošak prijenosa električne energije iz električnih vozila na mrežu
- *StatToPower\_t\_cost* – trošak prijenosa električne energije iz stacionarnih spremnika na mrežu
- *StatCapInvCost* – investicijski trošak u stacionarne sustave pohrane
- *H2\_storage\_cost* – trošak spremnika vodika
- *H2\_CAPEX\_cost* – trošak kapitalnih izdataka
- *H2\_OPEX\_cost* – trošak operativnih izdataka
- *Inv\_cost\_FuelCell* – trošak investicije za gorivne ćelije
- *Per\_mw\_FC* – trošak investicije u gorive ćelije
- *Industry\_fuel\_cost* – trošak fosilnih goriva za industriju
- *NPV<sub>year</sub>* – godišnja neto sadašnja vrijednost
- *var\_cost<sub>genco,period,year</sub>* – varijabilni trošak proizvodnih jedinica u određenom satu u godini
- *Generation<sub>genco,period,year</sub>* – proizvodnja u određenom satu u godini
- *Imports<sub>period,year</sub>* – uvoz u određenom satu u godini
- *Import\_Price* – cijena uvoza električne energije
- *Imp\_price\_inc* – modifikacija cijene uvoza električne energije
- *Cap\_inv<sub>genco,year</sub>* – godišnje investicije u kapacitete proizvodnih jedinica
- *Cap\_inv\_cost<sub>genco</sub>* – trošak investicije u kapacitete proizvodnih jedinica
- *TechChange<sub>genco,year</sub>* – godišnja promjena fiksnog troška proizvodnih jedinica
- *Rampup\_cost<sub>genco,period,year</sub>* – trošak povećanja snage proizvodnih jedinica u normalnom načinu rada u određenom periodu u godini
- *Rampdown\_cost<sub>genco,period,year</sub>* – trošak spuštanja snage proizvodnih jedinica u normalnom načinu rada u određenom periodu u godini
- *Heat\_pump\_ind\_cap<sub>genco,year</sub>* – godišnji trošak investicija u kapacitete toplinskih pumpi u industriji
- *HP\_cap\_costs\_years<sub>genco,year</sub>* –
- *Heat\_pump\_dh\_cap<sub>genco,chp\_market,year</sub>* – godišnji trošak investicija u kapacitete toplinskih pumpi za daljinsko grijanje
- *Heat\_pump\_ind<sub>genco,period,year</sub>* – proizvodnja toplinskih pumpi u industriji u određenom satu u godini
- *HP\_var\_cost<sub>genco</sub>* – varijabilni trošak proizvodnje toplinskih pumpi
- *Heat\_pump\_dh<sub>genco,chp\_market,period,year</sub>* – proizvodnja toplinskih pumpi u daljinskom grijanju u određenom satu u godini
- *Boiler\_ind\_generation<sub>genco,period,year</sub>* – proizvodnja tradicionalnih kotlova u industriji u određenom satu u godini
- *Heat\_var\_cost<sub>genco,period,year</sub>* – varijabilni trošak toplinske energije u određenom satu u godini
- *Boiler\_dh\_generation<sub>genco,chp\_market,period,year</sub>* – proizvodnja tradicionalnih kotlova u daljinskom grijanju u određenom satu u godini
- *Trad\_boiler\_ind\_cap\_inv<sub>genco,year</sub>* – godišnje investicije u kapacitete tradicionalnih kotlova za industriju
- *Trad\_boiler\_dh\_cap\_inv<sub>genco,chp\_market,year</sub>* – godišnje investicije u kapacitete tradicionalnih kotlova za daljinsko grijanje
- *Boiler\_cap\_costs\_years<sub>genco,year</sub>* – investicijski troškovi kotlova
- *CO2\_price<sub>year</sub>* – godišnji trošak emisija CO<sub>2</sub>
- *CO2\_factor<sub>genco</sub>* – faktor emisija CO<sub>2</sub> proizvodnih jedinica
- *Ev\_sto\_out<sub>period,year</sub>* – izlaz spremnika električnih vozila u određenom satu u godini
- *V2G\_cost* – trošak koncepta V2G
- *Stat\_sto\_out<sub>unit,period,year</sub>* – izlaz stacionarnih spremnika u određenom satu u godini
- *Stat\_sto\_in<sub>unit,period,year</sub>* – ulaz stacionarnih spremnika u određenom satu u godini
- *Sta\_sto\_var\_cost<sub>unit</sub>* – varijabilni trošak stacionarnih spremnika

- 
- $Stat\_sto\_cap\_inv_{unit,year}$  – godišnje investicije u kapacitete stacionarnih spremnika
  - $Battery\_costs\_years_{unit,year}$  – investicijski troškovi baterijskog sustava pohrane
  - $H2\_sto\_max\_cap_{genco,year}$  – maksimalni godišnji kapacitet spremnika vodika
  - $H2sto\_costs\_years_{genco,year}$  – investicijski troškovi sustava pohrane vodika
  - $H2\_electrolysis\_max\_cap_{genco,year}$  – maksimalni godišnji kapacitet elektrolizatora
  - $Elec\_cap\_costs\_years_{genco,year}$  – investicijski troškovi elektrolizatora
  - $Generation\_H2_{genco,period,year}$  – proizvodnja vodika u svakom satu u godini
  - $H2\_var\_cost_{genco}$  – varijabilni trošak proizvodnje vodika
  - $Cap\_inv\_FC_{genco,year}$  – godišnje investicije u kapacitete gorivih članaka
  - $FC\_cap\_costs\_years_{genco,year}$  – investicijski trošak gorivih članaka
  - $FC\_var\_cost_{genco}$  – varijabilni trošak proizvodnje gorivnih članaka
  - $Generation\_FC_{genco,period,year}$  – proizvodnja gorivih članaka u određenom satu u godini
  - $Fuel\_ind_{fuel,period,year}$  – potrošnja goriva u određenom satu u godini
  - $Industry\_fuels\_price_{period,year,fuel}$  – cijena goriva u industriji u određenom satu u godini

H2RES model može simulirati razvoj energetskog sustava uz korištenje nekoliko različitih pristupa u pogledu godina koje se simuliraju.

Implementirana je također varijacija funkcije cilja kako bi se poboljšala mogućnost analize u slučaju simulacije uz preskakanje godina. Naime, funkcija cilja kao prikazana gore sumira investicijske troškove i operativne troškove u svakoj godini koja je simulirana. Problem se javlja kad se model pokreće na način da se određene godine preskaču kako bi se smanjilo hardversko opterećenje računala. U tom slučaju, investicijski troškovi sudjeluju kao i u stvarnosti, ali operativni troškovi se pojavljuju svake simulirane godine. Time se umanjuje utjecaj operativnih troškova. Kako bi se korigirao ovaj problem, uvodi se mogućnost izračuna pogonskih troškova u godinama između godina  $X$  i  $X+m*n$  gdje je  $X$  bazna godina,  $m$  razmak između simuliranih godina, a  $n$  redni broj godine koja se simulira.

## 11. STRUKTURA I UNOS PODATAKA

Glavno sučelje modela je skripta main.py unutar koje se definiraju osnovni podaci o simulaciji koja će se pokrenuti. Dio podataka putem kojih se definira simulacija prikazuje Slika 4.

```
scen = 'crossborder_09'
rps_inv      = True      # Options: True / False
carbonLimit  = True      # Options: True / False
res_inv      = True      # Options: True / False
hydro_storage = True     # Options: True / False
exports_dat  = False     # Options: True / False
save_csv     = True      # Options: True / False
ceep_limit   = True      # Options: True / False
NoResToHeatInv = False   # Options: True / False
PrimaryReserve = False   # Options: True / False
SecondaryReserve = False # Options: True / False
```

Slika 4. Podaci o simulaciji

Tablica 2. Opis parametra

Parametar	Opis
Scen	Naziv scenarija – H2RES će kreirati folder s ovim imenom te će pohraniti izlazne datoteke u taj folder
carbonLimit	Poštivanje ograničenja emisija CO <sub>2</sub>
Res_inv	Omogućavanje investicija u obnovljive izvore
Hydro_storage	Modeliranje akumulacije energije u akumulacijama hidroelektrana
Exports_dat	Ispis podataka o uvozu i izvozu električne energije
Save_csv	Ispis podataka u folder
Ceep_limit	Poštivanje ograničenja veličine CEEPa
NoResToHeatInv	Model ne investira u dizalice topline
PrimaryReserve	Model simulira pružanje primarne rezerve

SecondaryReserve	Model simulira pružanje sekundarne rezerve
------------------	--

Podaci o ograničenjima udjela OIE i emisija CO<sub>2</sub> se uvrštavaju prema godinama na koje se odnose. Kao što je vidljivo, sam upis ne sadržava odrednice godine jer se godine iščitavaju iz dokumenta o podacima električnog opterećenja. Ukoliko se povećava broj godina simulacije, potrebno je modificirati i unos podataka o ograničenjima. Slika 5 prikazuje podatke o ograničenjima emisija CO<sub>2</sub> i udjela OIE.

```
#Policy Parameters
HR = list(['HR', 'HR', 'HR', 'HR', 'HR', 'HR', 'HR'])
rps_HR = list([0.4, 0.5, 0.60, 0.7, 0.8, 0.9, 1])
CO2_limit_HR = list([13261480, 10941433, 8673469, 6457589, 4293793, 2182079, 0])
```

Slika 5. Ograničenja odjela OIE i emisija CO<sub>2</sub>

Model koristi nekoliko ulaznih datoteka s podacima kao što prikazuje Slika 6. Detaljni opis svake od datoteka je dan u sljedećem poglavlju.

```
genco_dat = './data/genco_data_HR_sdewes6.csv'
demand_dat = './data/demand_2020_2050_sdewes1.csv'
fuel_price_dat = './data/fuel_cost_2020_2050_sdewes_1.csv'
avl_factor_plant_dat = './data/ncre_aval_factor_HR_2020_2050_sdewes.csv'
inflows_dat = './data/scaled_inflows_HR_2020_2050_sdewes.csv'
import_export = './data/import_export_HR_2020_2050_sdewes1.csv'
heat_demand_dat = './data/heat_demand_HR_2020_2050_sdewes.csv'
cooling_demand_dat = './data/cooling_demand_HR_2020_2050_sdewes.csv'
ev_transload_dat = './data/ev_transp_Load.csv'
h2_demand_dat = './data/demand_H2_2020_2050_sdewes2.csv'
flex_tech_dat = './data/flex_tech_HR_2020_2050_sdewes1.xlsx'
```

Slika 6. Ulazne datoteke

Također, dio podataka o samom pokretanju simulacija se definira putem build\_model.py skripte. U toj skripti se može definirati pokretanje modela sa samo dijelom vremenskog obzora. Primjerice, mogu se odabrati samo neke godine ili raspon sati unutar godine koji će se simulirati. Parametar „periods“ označuje raspon rednih brojeva sata u godini koji su uključeni u simulaciju. U većini slučajeva je potrebno odabrati raspon koji počinje sa prvim satom „1“



zbog uvjeta inicijalizacije jednadžba koje opisuju stanje napunjenost spremnika energije. U budućim verzijama modela se planira redefiniranje inicijalnog sata spremišta tako da odgovara prvom korištenom satu, a ne prvom satu u godini. Druga varijabla, „years“ označava popis godina koje se koriste. Potrebno je napomenuti da se mogu upisati samo godine za koje su definirani podaci unutar „demand\_dat“ datoteke. Slika 7 prikazuje primjer definicije podataka o korištenim satima i godinama. U prikazanom primjeru, model će koristiti sate u rasponu od 1 do 100, a godine u rasponu od 2020 do 2025. ukoliko ne postoje definirane godine sa vrijednostima između 2020 i 2025, tj. nema definicije godina 2021, 2022, 2023 i 2024, tad će model koristiti samo granične godine 2020 i 2025. Ukoliko se ne želi koristiti ova mogućnost definiranja i korištenja samo djela vremenskog razdoblja, potrebno je staviti znak „#“ ispred linija koje sadržavaju informacije o korištenim satima i godinama. Primjer sučelja u ovom slučaju prikazuje Slika 8. općenito, ukoliko je stavljen znak „#“ ispred određene linije koda, tad python neće čitati tu liniju. U ovom slučaju koristi defaultne vrijednosti.

```
periods = list(range(1,100))
years = list([2020,2025])
```

Slika 7. Primjer definicije korištenih sata i godina u modelu

```
# periods = list(range(1,100))
# years = list([2020,2025])
```

Slika 8. Primjer definicije ne korištenja podataka prikazanih na slici

#### a) Genco\_dat

Osnovne informacije o instaliranim kapacitetima su sadržane unutar datoteke genco\_dat.csv

Tablica 3. Osnovne informacije o instaliranim kapacitetima

Naziv	Opis
unit_name	Svaki generator ima dodijeljeno ime prema kojem ga model identificira. Svako ime mora biti jedinstveno
cap_mw	Ova varijabla definira nazivni kapacitet generatora u nultoj godini

fuel_type	Vrsta goriva koju generator koristi je definirana putem ove varijable. Potrebno je odabrati varijablu iz popisa: Hydro, Biomass, Gas, Oil, Nuclear, Coal, Wind, Solar
decom_start_existing_cap	Broj godina nakon početne godine simulacije kad se započinje dekomisija postojećih kapaciteta. Dekomisija slijedi logaritamsku krivulju postepene dekomisije.
life_time	Životni vijek opreme
decom_start_new	Broj godina nakon početka simulacija kad započinje dekomisija novih kapaciteta
final_life_cap	Udio instalirane vrijednosti koji ostaje u pogonu po isteku životnog vijeka. Dio opreme se pretpostavlja da ostaje raditi uz pojačano održavanje kako bi joj se produžio životni vijek.
max_inv_period	Ograničenje maksimalne investicije u opremu u pojedinoj godini. Sustav smije instalirati maksimalno ovaj kapacitet opreme.
max_cap_gen	Maksimalni ukupni kapacitet opreme. Ovime se ograničava rapidna investicija u kratkom vremenu u opremu.
cap_factor	Maksimalna dostupnost opreme. Trenutno se ne koristi ova veličina jer su faktori opterećenja varijabilnih obnovljivih izvora definirani putem krivulja dostupnosti resursa
efficiency	Učinkovitost postrojenja. Koristi se kod termoenergetskih postrojenja kako bi se izračunala potrošnja goriva te emisije.
cap_inv_cost	Investicijski trošak u proširenje kapaciteta.
RampingCost	Trošak promijene izlazne snage termoenergetskog postrojenja
CO2Intensity	Specifične emisije CO <sub>2</sub> pojedinog postrojenja
technology	Vrsta postrojenja. Osim goriva, potrebna je dodatna definicija kako bi model znao koje se jednadžbe mogu primijeniti. Primjerice, sva hidroenergetska postrojenja koriste istu

	kategoriju goriva „hydro“, ali se razlikuju prema vrsti. Dije se na akumulacijske, reverzibilne i protočne
RampUpRate	Ograničenje brzine povećanja izlazne snage. Ova veličina ograničava primjenu proizvodnih kapaciteta za balansiranje varijabilnosti u proizvodnji iz obnovljivih izvora energije.
RampDownRate	Ograničenje brzine smanjenja snage.
PrimaryReserve	Varijabla koja označava sudjeluje li postrojenje u primarnoj regulaciji. Potrebno je uvrstiti oznaku „Y“ za pozitivan odgovor i „N“ za negativan.
SecondaryReserve	Varijabla koja označava sudjeluje li postrojenje u sekundarnoj regulaciji. Potrebno je uvrstiti oznaku „Y“ za pozitivan odgovor i „N“ za negativan.
CHPType	Varijabla koja označava sudjeluje li postrojenje u proizvodnji energije u sustavima daljinskog grijanja. Potrebno je uvrstiti oznaku „Y“ za pozitivan odgovor i „N“ za negativan.
STOCapacity	Ovom se varijablom definiraju veličine pohrane iskazane u MWh. Ista veličina se odnosi na veličinu akumulacije u hidroenergetskim postrojenjima kao i na veličinu toplinske pohrane u termoenergetskim postrojenjima spojenim na sustav daljinskog grijanja.
STOSelfDischarge	Gubitak energije iz pohrane energije
STOMaxChargingPower	Ovom se varijablom definira maksimalna snaga „MW“ kojom se može puniti pohrana energije. Drugim riječima, ovo je maksimalna snaga rada reverzibilne hidroelektrane u pumpnom načinu rada ili maksimalna snaga kojom se može puniti sustav toplinske pohrane u CTSu. Ova veličina se ne smije zamijeniti maksimalnom toplinskom snagom koju termoenergetsko postrojenje može isporučiti.
STOChargingEfficiency	Učinkovitost postupka punjenja pohrane

CHPPowerToHeat	Omjer toplinske i električne snage kogeneracijskog postrojenja. Ovom varijablom se definira maksimalna toplinska snaga kogeneracijskog postrojenja. Ona je u svakom trenutku povezana sa električnom snagom.
CHPPowerLossFactor	
CHPMaxHeat	Maksimalna snaga koju sustav toplinske pohrane u CTSu može isporučiti. Ova veličina mora uvijek biti minimalno jednake veličine kao i vršno opterećenje sustava daljinskog grijanja.
System	Ovo je naknadno uvedena veličina, a odnosi se na definiciju sustava u kojem se pojedino postrojenje nalazi. Ova veličina se koristi kod simulacije modela sa više međupovezanih energetskekih sustava.

### b) Demand\_dat

Osnovne potrebe za električnom energijom su definirane putem ove datoteke. Uzorak unesenih podataka u ovu datoteku je prikazan na Slika 9. Potrebno je definirati nekoliko stupaca koji određuju vrijeme, godinu, dan, sat i lokaciju određene potražnje za energijom. Time su definirani stupci „year“ koji predstavlja godinu i „period“ koji predstavlja sat u godini. Sljedeći stupac „power“ se odnosi na potražnju u određenom satu u godini. Stupac „system“ daje odrednicu na koji se sustav odnosi prikazana potrošnja. Stupac „day“ daje prikaz dana na koji se pojedini podatak odnosi, a stupac „hour“ sat unutar tog dana. Konačno, stupac „sum24“ daje podatak o ukupnoj količini energije koja je tražena unutar svakog dana, a on je suma svakih 24 redaka unutar stupca „Power“. Suma potreba unutar 24 sata je uvrštena zbog potrebe za implementacijom odziva potrošnje na strani korisnika što je detaljnije opisano u poglavlju s prikazom pojedinih modula i pripadajućih jednadžba.

year	period	Power	System	day	sum24	hour
2020	1	1719	HR	1	45025	1
2020	2	1733	HR	1	45025	2
2020	3	1739	HR	1	45025	3
2020	4	1727	HR	1	45025	4
2020	5	1720	HR	1	45025	5
2020	6	1670	HR	1	45025	6
2020	7	1510	HR	1	45025	7
2020	8	1584	HR	1	45025	8
2020	9	1740	HR	1	45025	9
2020	10	1881	HR	1	45025	10
2020	11	1990	HR	1	45025	11
2020	12	2007	HR	1	45025	12
2020	13	1931	HR	1	45025	13
2020	14	1870	HR	1	45025	14
2020	15	1870	HR	1	45025	15
2020	16	2027	HR	1	45025	16
2020	17	2127	HR	1	45025	17
2020	18	2150	HR	1	45025	18
2020	19	2172	HR	1	45025	19
2020	20	2152	HR	1	45025	20
2020	21	2148	HR	1	45025	21
2020	22	2049	HR	1	45025	22
2020	23	1855	HR	1	45025	23
2020	24	1654	HR	1	45025	24
2020	25	1512	HR	2	50605	1

Slika 9. Uzorak podataka iz demand\_dat datoteke

### c) Fuel\_price\_dat

Model zahtjeva također i definiciju troškova goriva. Ova datoteka također zahtjeva definiciju veličina za svaki sat u godini. Mogu se koristiti također i fiksne veličine.

### d) Avl\_factor\_plant\_dat

Varijabilnost proizvodnje energije iz varijabilnih obnovljivih izvora energije je definirana putem datoteke avl\_factor\_plant\_dat. Kao što prikazuje Slika 10, svaki od generatora ima svoju krivulju dostupnosti resursa. U Ovom prikazu su prikazane krivulje za protočne hidroelektrane te nekoliko potencijalnih regija za instalaciju fotonaponskih elektrana i vjetroelektrana. Koristi se nekoliko različitih distribucija koje predstavljaju različite lokacije instalacije.

year	period	HR_SolarPP	HR_WindPP	HEKraljevac	HEDale	HEVarazdin	HEDubrava	HECakovec	HEGojak	HELesce	HERijeka	HEMijacka	mHEHrvatska	HROR	HR_SolarHigh	HR_WindPP1	HR_WindPP2	HR_WindPP3
2020	1	0	0.012	0.181171012	0.498702644	0.398292662	0.46549198	0.372621	0.264299	0.147635	0.066446	1	0.354166	0.361602	0	0.097	0.045	0.442
2020	2	0	0.011	0.180892333	0.497935537	0.397533275	0.465461827	0.372621	0.263662	0.14728	0.066267	1	0.353822	0.361251	0	0.133	0.03	0.389
2020	3	0	0.012	0.180613655	0.49716843	0.396773887	0.465431673	0.372621	0.263026	0.146924	0.066087	1	0.353479	0.3609	0	0.2	0.059	0.429
2020	4	0	0.014	0.180334977	0.496401323	0.3960145	0.46540152	0.372621	0.26239	0.146569	0.065907	1	0.353135	0.360549	0	0.261	0.061	0.487
2020	5	0	0.02	0.180056299	0.495634216	0.395255113	0.465371366	0.372621	0.261753	0.146213	0.065727	1	0.352792	0.360199	0	0.375	0.019	0.508
2020	6	0	0.025	0.179777621	0.494867109	0.394495726	0.465341213	0.372621	0.261117	0.145858	0.065547	1	0.352448	0.359848	0.013	0.308	0.059	0.491
2020	7	0.001	0.024	0.179498942	0.494100002	0.393736339	0.465311059	0.230555	0.260481	0.145503	0.065368	1	0.330309	0.337244	0.061	0.309	0.09	0.472
2020	8	0.065	0.019	0.179220264	0.493332895	0.392976951	0.465280906	0.2143	0.259845	0.145147	0.065188	1	0.327471	0.334347	0.135	0.43	0.068	0.506
2020	9	0.146	0.008	0.178941586	0.492565788	0.392217564	0.465250753	0.213023	0.259208	0.144792	0.065008	1	0.326932	0.333796	0.241	0.386	0.052	0.488
2020	10	0.213	0.002	0.178662908	0.491798681	0.391458177	0.465220599	0.213812	0.258572	0.144436	0.064828	1	0.326709	0.333569	0.369	0.336	0.098	0.501
2020	11	0.254	0.006	0.17838423	0.491031574	0.39069879	0.465190446	0.213847	0.257936	0.144081	0.064648	1	0.326371	0.333223	0.507	0.407	0.104	0.552

Slika 10. Struktura podataka

### e) Inflows\_dat

Podaci o pritocima u akumulacije akumulacijskih hidroelektrana su definirani putem podataka iz datoteke inflows\_dat. Također, koriste se satne distribucije kao što prikazuje Slika 11.

year	period	HEZakucac	HESenj	HEDubrovnik_HR	HEVinodol	HEPeruca	HESklope	RHEVelebit	RHEOrlovac	RHEVinodol
2020	1	0.765737111	2.515287006	0.862130919	0.423792	0.634141411	2.021748791	2.05144171	0.585115069	0.1271376
2020	2	0.766354641	2.511771284	0.865159993	0.424418574	0.630733519	2.035069793	2.048077886	0.587042651	0.128219865
2020	3	0.766972171	2.508255562	0.868189068	0.425045148	0.627325626	2.048390795	2.044714061	0.588970234	0.129302129
2020	4	0.767589701	2.50473984	0.871218143	0.425671723	0.623917733	2.061711798	2.041350237	0.590897817	0.130384394
2020	5	0.768207231	2.501224118	0.874247218	0.426298297	0.62050984	2.0750328	2.037986413	0.592825399	0.131466658
2020	6	0.768824761	2.497708396	0.877276292	0.426924871	0.617101948	2.088353802	2.034622589	0.594752982	0.132548923
2020	7	0.769442291	2.494192674	0.880305367	0.427551445	0.613694055	2.101674804	2.031258764	0.596680565	0.133631187
2020	8	0.770059821	2.490676952	0.883334442	0.428178019	0.610286162	2.114995806	2.02789494	0.598608147	0.134713452
2020	9	0.770677351	2.48716123	0.886363517	0.428804594	0.606878269	2.128316808	2.024531116	0.60053573	0.135795716
2020	10	0.77129488	2.483645508	0.889392591	0.429431168	0.603470377	2.141637811	2.021167291	0.602463313	0.136877981
2020	11	0.77191241	2.480129786	0.892421666	0.430057742	0.600062484	2.154958813	2.017803467	0.604390895	0.137960245
2020	12	0.77252994	2.476614064	0.895450741	0.430684316	0.596654591	2.168279815	2.014439643	0.606318478	0.13904251
2020	13	0.77314747	2.473098342	0.898479816	0.43131089	0.593246698	2.181600817	2.011075819	0.608246061	0.140124774

Slika 11. Podaci o pritocima

### f) Import\_export

Svaki energetski sustav modeliran u H2RESu mora imati definirane dostupne kapacitete uvoza i izvoza električne energije. Također, postoji mogućnost definiranja nametnutog uvoza ili izvoza. Primjerice, u prvoj godini sustav može imati nametnute podatke kojima se pobliže definira stanje sustava prije provedbe dodatnih instalacija. Kao i kod ostalih ulaznih datoteka, i ovdje je potrebno definirati godinu, sat u godini i sustav na koji se podaci odnose. U ovom slučaju je nešto drugačije označena godina. Definirana je rednim brojem u sustavu. ipak, ovo ne mijenja rezultate jer se u ovom slučaju gleda samo redni broj godine iz popisa godina iz datoteke o električnom opterećenju. Model dozvoljava specificiranje različitih transmisijskih kapaciteta u svakom satu što omogućuje simulaciju zagušenja mreže uslijed velikih opterećenja

i visokih temperatura čime se smanjuje kapacitet prijenosa vodiča kao funkcija temperature. Primjer import\_export datoteke prikazuje Slika 12.

year	period	Import_capacity	export_capacity	total_imports	total_exports	System
1	1	1600	1300	0	160	HR
1	2	1600	1300	0	163	HR
1	3	1600	1300	0	255	HR
1	4	1600	1300	0	413	HR
1	5	1600	1300	0	439	HR
1	6	1600	1300	0	419	HR
1	7	1600	1300	0	450	HR
1	8	1600	1300	0	519	HR
1	9	1600	1300	0	543	HR
1	10	1600	1300	0	583	HR
1	11	1600	1300	0	505	HR
1	12	1600	1300	0	539	HR
1	13	1600	1300	0	562	HR
1	14	1600	1300	0	593	HR

Slika 12. Podaci o uvozu i izvozu električne energije u sustav

#### g) Heat\_demand\_dat

Toplinska opterećenja sustava su definirana putem heat\_demand\_dat datoteke. Datoteka predstavlja satne distribucije toplinskih potreba u pojedinim mrežama centraliziranih toplinskih sustava te u individualnim sustavima grijanja. Osnovni parametri koji određuju godinu, sad u godini te pripadajući sustav su također sadržani i u ovoj datoteci. Prvi dio datoteke je posvećen definiciji toplinskih potreba u centraliziranim toplinskim sustavima. Imena distribucija su jednaka imenima sustava na koje se distribucija odnosi. Sljedeći dio tablice „general\_demand“ opisuje toplinske potrebe individualnih sustava grijanja. U ovom slučaju se koristi jedna distribucija za opis svih individualnih sustava, ali je moguće uz manje modifikacije podijeliti potrebe na više distribucija od kojih bi svaka pripadala drugačijoj klimatskoj zoni. Potreba za energijom u industriji je također definirana u ovoj datoteci. Osnovni način modeliranja industrije je uz korištenje distribucije pod oznakom „Industry\_HT“. Alternativno, moguće je detaljnije modeliranje uz korištenje različitih potreba u pojedinim granama industrije kao što prikazuje Slika 13.



year	period	TE-TOZagreb	EL-TOZagreb	TE-TOOsijek	general_demand	Industry_HT	Iron_steel	Manufacturing	Wood	Paper	Food	System
2020	1	5.19	3.94	1.17	128.62	1246.95	447.93	307.02	73.81	193.25	156.20	HR
2020	2	3.54	2.69	0.80	87.79	1245.95	447.93	310.19	73.81	193.76	148.40	HR
2020	3	3.13	2.38	0.71	77.58	1184.62	450.22	315.35	73.81	195.37	13.66	HR
2020	4	2.06	1.56	0.46	51.04	1265.49	457.08	320.51	73.81	195.52	137.48	HR
2020	5	359.67	272.99	81.06	5826.72	1126.85	365.66	339.60	73.81	193.78	131.25	HR
2020	6	357.95	271.69	80.67	5773.20	1076.68	319.95	372.26	73.81	191.32	127.23	HR
2020	7	372.35	282.62	83.91	6036.80	1041.14	251.39	459.80	72.02	191.95	129.24	HR
2020	8	382.01	289.95	86.09	6360.69	1352.57	415.94	505.19	72.02	193.26	125.45	HR
2020	9	353.27	268.14	79.61	5981.30	1216.41	397.66	505.16	72.02	1.90	125.23	HR
2020	10	314.02	238.35	70.77	5499.44	1321.93	383.94	522.66	72.02	195.90	135.70	HR
2020	11	285.77	216.90	64.40	5268.99	1308.72	383.94	503.56	72.02	195.48	143.28	HR
2020	12	266.52	202.29	60.06	5034.50	1324.35	390.80	504.33	72.02	197.13	148.40	HR
2020	13	260.20	197.49	58.64	4959.99	1336.37	393.08	512.29	73.21	196.69	149.74	HR
2020	14	269.21	204.33	60.67	5102.87	1313.40	388.51	492.36	73.81	195.93	154.20	HR

Slika 13. Podaci o toplinskim potrebama

### h) Cooling\_demand\_dat

Potrebe za hlađenjem slijede jednak princip pri unosu podataka kao i potrebe za grijanjem. Strukturu podataka prikazuje Slika 14.

year	period	TE-TOZagreb	EL-TOZagreb	TE-TOOsijek	general_cooling	System
2020	1	0	0	0	0.065519253	HR
2020	2	0	0	0	0.065275324	HR
2020	3	0	0	0	0.065519253	HR
2020	4	0	0	0	0.065885146	HR
2020	5	0	0	0	0.06515336	HR
2020	6	0	0	0	0.066275432	HR
2020	7	0	0	0	0.065885146	HR
2020	8	0	0	0	0.066397396	HR
2020	9	0	0	0	0.06795854	HR
2020	10	0	0	0	0.073007865	HR
2020	11	0	0	0	0.072154114	HR
2020	12	0	0	0	0.069836791	HR

Slika 14. Podaci o potrebama za hlađenje

### i) Ev\_transpload\_dat

Modeliranje elektrificiranog transporta zahtjeva definiranje potreba za energijom u satnoj distribuciji kao i određivanje dostupnosti vozila za punjenje. Prikazane distribucije su dobivene statističkom obradom mjerenih podataka iz vozila opremljenih GPS lokatorima. Primjer ulaznih podataka prikazuje Slika 15. potražnja za energijom „ev\_transp\_load“ je dimenzionirana tako da ukupna godišnja suma odgovara 1 MWh. Time je omogućeno daljnje množenje ukupnom traženom energijom kako bi se dobila stvarna distribucija na godišnjoj razini.



year	period	ev_availability	ev_transp_load	System
2020	1	1	0	HR
2020	2	1	0	HR
2020	3	1	0	HR
2020	4	1	0	HR
2020	5	1	0	HR
2020	6	0.978	5.25E-07	HR
2020	7	0.858	0.000139547	HR
2020	8	0.759	0.000719381	HR
2020	9	0.765	0.00040521	HR
2020	10	0.827	3.96E-05	HR
2020	11	0.893	3.67E-06	HR
2020	12	0.948	3.70E-05	HR
2020	13	0.954	1.59E-06	HR
2020	14	0.95	4.97E-06	HR

Slika 15. Podaci o dostupnosti električnih vozila i potražnji za energijom

#### j) H2\_demand\_dat

Potražnja za vodikom se samo djelomično zadaje putem H2\_demand\_dat tablice. Jedini stupac koji se koristi je stupac „Transport“. U taj stupac je stavljena u početnoj verziji osnovna potražnja za energijom dobivena za modeliranje električnih vozila. Slično kao i kod električnih vozila, distribucija se množi traženom energijom te se time dobiva konačna distribucija. Potražnja za vodikom u svrhu proizvodnje elektrogoriva ili za potrošnju u industriji je modelirana zasebno i nema doticaj s tablicom koju prikazuje Slika 16.

year	period	Industry	Buildings	Transport	Power	System
2020	1	0	0	0	0	HR
2020	2	0	0	0	0	HR
2020	3	0	0	0	0	HR
2020	4	0	0	0	0	HR
2020	5	0	0	0	0	HR
2020	6	0	0	5.26E-07	0	HR
2020	7	0	0	0.00014	0	HR
2020	8	0	0	0.000721	0	HR
2020	9	0	0	0.000406	0	HR
2020	10	0	0	3.97E-05	0	HR
2020	11	0	0	3.68E-06	0	HR
2020	12	0	0	3.71E-05	0	HR

Slika 16. Potrebe za vodikom

#### k) Flex\_tech\_dat

Glavnina podataka potrebnih za modeliranje sustava proizvodnje toplinske energije, dizalica topline, transporta, i industrije je definirana putem datoteke flex\_tech\_dat.

Datoteka sadržava više listova posvećenih pojedinom djelu ulaznih podataka u model.

### l) Transp\_FCEV

Transp\_FCEV je posvećen podacima o vozilima na vodik. Stupac „unit\_name“ specificira grupu vozila. Time je omogućeno proširenje modula uz dodavanje vozila sa drugačijim karakteristikama. Stupac „number“ označava trenutno postojeći broj vozila, dok „max\_number“ označava maksimalni broj vozila ove vrste u svakoj godini. Vozila su također podređena dekomisiji uz primjenu logaritamske funkcije. Time je potrebno definirati broj godina nakon koje počinje dekomisija postojećih vozila i životni vijek. Broj godina između uvođenja novih vozila i početka njihove dekomisije je prikazan varijablom „decom\_start\_new“, dok je udio preostalog kapaciteta prikazan sa varijablom „final\_life\_cap“. Potrebno je također definirati i podatke o investicijskim troškovima samih vozila i prateće infrastrukture u početnoj godini. Troškovi su podložni promjenama te se zbog toka uvodi množitelj koji modificira trošak u početnoj godini i daje trošak u sljedećim godinama. Primjer ulaznih podataka prikazuje Slika 17.

unit_name	number	max_number	decom_start_existing_cap	life_time	decom_start_new	decom_start_new	inv_cost_2020	inv_cost_ch	System
FCEV1	0	5000000	10	15	12	12	45000	50000	HR

Slika 17. Podaci o vozilima na vodik

### m) Transp\_ICE

Podaci o vozilima s motorima na unutrašnje sagorijevanje prate sličan pristup kao i prethodni set podataka. Jedina razlika u ovom slučaju je nedostatak potrebe za specificiranjem troškova infrastrukture.

unit_name	number	max_number	decom_start_existing_cap	life_time	decom_start_new	final_life_cap	inv_cost_2020	System
ICE1	2307280	10000000	10	10	8	0.1	27000	HR

Slika 18. Podaci o vozilima s motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem

## n) Transp\_EV

Podaci o električnim vozilima, slično kao i o vozilima na vodik specificiraju trošak prateće infrastrukture. U ovom slučaju je trošak podijeljen između nekoliko različitih vrsta punionica električnih vozila. Koriste se kućni punjači snage 7 kW, brze punionice snage 50 kW te super brze punionice snage 200 kW.

unit_name	number	max_number	decom_start_existing_cap	life_time	decom_start_new	final_life_cap	inv_cost_2020	inv_cost_200kW	inv_cost_50kW	inv_cost_7kW	max_inv_2020	System
EV1	5000	5000000	10	15	12	0.1	34000	50000	20000	1500	10000	HR

Slika 19. Podaci o baterijsko električnim vozilima

## o) Flex\_tech

Tablica „flex\_tech“ daje opis korištenih tehnologija dizalica topline, električnih grijača, proizvodnje i pohrane vodika, baterijskih sustava pohrane te sustava proizvodnje i pohrane elektrogoriva. Također je potrebno definirati imena tehnologija, kapacitete, maksimalne kapacitete, učinkovitosti, podatke o životnom vijeku i dekomisiji te prisustvovanja na tržištu primarne i sekundarne regulacije. Primjer ulaznih podataka prikazuje Slika 20.

unit_name	cap_mw	max_cap	var_cost	efficiency	CO2Intensity	life_time	decom_start_new	final_life_cap	PrimaryReserve	SecondaryReserve	heat_storage_cap	System	Tech_type
H2_storage_tank	10	100000	20	0.7	0	15	10	0.1	N	N	400	HR	H2 Storage
Ulion_storage	5	100000	20	0.9	0	15	10	0.1	N	N	10	HR	Stationary Elect Storage
ATW_HP	95	100000	1	3.282	0	15	10	0.1	Y	Y	100	HR	Heat pumps
geothermal_HP	5	100000	1	4.621	0	15	10	0.1	Y	Y	100	HR	Heat pumps
PEMFC_CHP	0	100000	1	0.5	0	15	10	0.1	Y	Y		HR	Fuel cell
SOFC_CHP	0	100000	1	0.6	0	15	10	0.1	Y	Y		HR	Fuel cell
electric_boiler	826	100000	1	1	0	15	10	0.1	Y	Y	100	HR	Heat pumps
PEM_elec	10	100000	20	0.64	0	15	10	0.1	Y	Y		HR	Electrolizer
SOEC_elec	10	100000	20	0.8	0	15	10	0.1	Y	Y		HR	Electrolizer
Alkaline_EC	10	100000	20	0.72	0	15	10	0.1	Y	Y		HR	Electrolizer
E_fuel_gen	10	100000	20	0.7	0	15	10	0.1	Y	Y		HR	Efuel
E_gas_gen	10	100000	20	0.7	0	15	10	0.1	Y	Y		HR	Egas
E_fuel_storage	10	100000	20	0.7	0	15	10	0.1	Y	Y		HR	Efuel_stor
E_gas_storage	10	100000	20	0.7	0	15	10	0.1	Y	Y		HR	Egas_stor

Slika 20. Ulazni podaci za tehnologije fleksibilnosti

## i. Thermal\_tech

Podatke o kotlovima u individualnim kućanstvima prikazuje Slika 21. Model koristi 4 vrste kotlova koji koriste gorivo. To su kotlovi na plin, biomasu, tekuća goriva i ugljen. Potrebno je napomenuti da kotlovi na plin mogu koristiti i prirodni plin kao i generirana sintetska plinovita goriva. Također i kotlovi na tekuća goriva mogu koristiti fosilna goriva kao i sintetska tekuća goriva.

unit_name	fuel_type	efficiency	cap_mw	max_cap	CO2Intensity	decom_start_existing_cap	life_time	decom_start_new	final_life_cap	System
gas_boilers	Gas	0.9	6488.35	10000	0.23	5	15	10	0.1	HR
bio_boilers	Biomass	0.8	4419.05	10000	0	5	15	10	0.1	HR
oil_boilers	Oil	0.9	2059.05	10000	0.4	5	15	10	0.1	HR
coal_boilers	Coal	0.8	0	10000	0.38	5	15	10	0.1	HR

Slika 21. Podaci o kotlovima u individualnim sustavima

### ii. DistrictHeating

Centralizirani toplinski sustav osim kogeneracijskih postrojenja koristi kotlove i dizalice topline. Početne kapacitete je potrebno definirati u tablici „districtHeating“ kao što prikazuje Slika 22.

unit	TE-TOZagreb	EL-TOZagreb	TE-TOOsijek	System
gas_boilers	0	0	0	HR
bio_boilers	0	0	0	HR
oil_boilers	0	0	0	HR
coal_boilers	0	0	0	HR
ATW_HP	0	0	0	HR
geothermal_HP	0	0	0	HR
electric_boiler	0	0	0	HR

Slika 22. Podaci o kotlovima i dizalicama topline u početnoj godini u centraliziranim toplinskim sustavima

### iii. Tech\_cost\_years

Potrebno je također definirati krivulje cijena opreme kroz godine. Primjer ulaznih troškova opreme u sustavima grijanja, elektrolizatora, gorivih članaka, pohrane vodika te opreme za proizvodnju i skladištenje sintetskih goriva prikazuje Slika 23.

ATW_HP	geothermal_HP	PEMFC_CHP	SOFC_CHP	electric_boiler	PEM_elec	SOEC_elec	Alkaline_EC	gas_boilers	bio_boilers	oil_boilers	coal_boilers	H2_storage_tank	Lilion_storage	hydrogen_boilers	E_fuel_gen	E_gas_gen	E_fuel_storage	E_gas_storage	System
120000	1932000	1300000	3300000	890000	1437500	5625000	902778	278000	470000	278000	470000	57000	1042000	278000	1437500	1437500	57000	57000	HR
1138000	1884000	1200000	2650000	870000	1226563	4000000	763889	271500	458500	271500	458500	45000	832100	271500	1226563	1226563	45000	45000	HR
1076000	1836000	1100000	2000000	850000	1015625	2375000	625000	265000	447000	265000	447000	27000	622200	265000	1015625	1015625	27000	27000	HR
1046000	1788000	1025000	1700000	830000	859375	2000000	520834	258500	436000	258500	436000	21000	508100	258500	859375	859375	21000	21000	HR
1016000	1740000	950000	1400000	810000	703125	1625000	416667	252000	425000	252000	425000	21000	394000	252000	703125	703125	21000	21000	HR
986000	1693000	875000	1100000	790000	664063	1300000	381945	246000	414500	246000	414500	21000	324500	246000	664063	664063	21000	21000	HR
956000	1566000	800000	800000	770000	625000	975000	347222	240000	404000	240000	404000	21000	255000	240000	625000	625000	21000	21000	HR

Slika 23. Podaci o cijenama opreme

### iv. Transp\_max\_inv\_year

Investicije u različite vrste vozila su ograničene kao što prikazuje Slika 24. Ograničenja su uspostavljena kao refleksija inertnosti tržišta i proizvodnih kapaciteta za opskrbom nove tehnologije kao što su električna vozila. Također, proizvodni kapacitet vozila s motorima s

unutrašnjim sagorijevanjem se smanjuje kao rezultat transformacije pogona prema proizvodnji električnih vozila.

year	EV1	FCEV1	ICE1	System
2020	40000	10000	2000000	HR
2025	100000	20000	2000000	HR
2030	1000000	100000	2000000	HR
2035	2600000	400000	2000000	HR
2040	3600000	800000	1000000	HR
2045	4000000	1400000	0	HR
2050	4000000	1600000	0	HR

Slika 24. Ograničenja investicije u različite vrste vozila

#### v. *Industry*

U osnovnoj verziji modula industrije, potrebno je definirati udjele pojedine vrste goriva. Udio je definiran putem stupca „Industry\_HT“ kao što prikazuje Slika 25. Suma udjela mora biti jednaka 1. Također je potrebno definirati CO2 faktore kao odnos emisija, učinkovitosti te pripadajući sustav.

Fuel_source	Industry_HT	CO2_factor	efficiency	System
Gas	0.41	0.22	0.95	HR
Coal	0.06	0.90	0.85	HR
Oil	0.46	0.40	0.85	HR
Biomass	0.07	-	0.70	HR

Slika 25. Podaci o industriji

#### vi. *COP\_HP*

Rad dizalica topline je u vezi sa vremenskim uvjetima zbog povezanosti vanjskih temperatura i temperatura unutar grijanog prostora. Povezanost temperatura sa učinkovitosti se iskazuje putem faktora pretvorbe COP. Slika 26 prikazuje primjer ulaznih podataka. Moguće je dodati dodatne jedinice dizalica topline koje odgovaraju pojedinim klimatskim regijama kako bi se detaljnije modeliralo korištenje dizalica topline.

year	period	electric_boiler	ATW_HP	geothermal_HP	System
2020	1	1	2.48	3.41	HR
2020	2	1	2.48	3.4	HR
2020	3	1	2.48	3.4	HR
2020	4	1	2.41	3.32	HR
2020	5	1	2.41	3.32	HR
2020	6	1	2.41	3.32	HR
2020	7	1	2.41	3.32	HR
2020	8	1	2.41	3.32	HR
2020	9	1	2.41	3.33	HR
2020	10	1	2.42	3.33	HR
2020	11	1	2.42	3.33	HR
2020	12	1	2.42	3.33	HR

Slika 26. Podaci o učinkovitosti dizalica topline

### vii. *Industry\_ironsteel*

Ovaj list Excel tablice daje podatke o tehnologijama koje se koriste u industriji čelika i željeza. Zadane su vrste opreme koja se koristi. potrebno je obratiti pažnju da se koristi samo jedna vrsta kotlova na plin kao i jedna vrsta kotlova na tekuća goriva. Stoga se fosilna kao i sintetska goriva mogu koristiti u istoj opremi. U ovom slučaju je samo predstavljena kotlovima, ali može predstavljati više vrsta opreme specifične pojedinoj grani industrije. Također, ograničuju se maksimalni kapaciteti, a time i sama primjena tehnologija u pojedinoj grani industrije. Ograničenjima kapaciteta se replicira ograničenje same primjene u postrojenju. Primjer podataka o industriji željeza i čelika prikazuje Slika 27.

unit_name	fuel_type	efficiency	cap_mw	max_cap	CO2Intensity	decom_start_existing_cap	life_time	decom_start_new	final_life_cap	System
gas_boilers	Gas	0.9	262.63	1000	0.23	5	15	12	0.1	HR
bio_boilers	Biomass	0.8	13.22	200	0	5	15	12	0.1	HR
oil_boilers	Oil	0.9	246.97	1000	0.4	5	15	12	0.1	HR
coal_boilers	Coal	0.8	264.60	1000	0.38	5	15	12	0.1	HR
hydrogen_boilers	Hydrogen	0.95	0.00	1000	0	5	15	12	0.1	HR
electric_boiler	Electricity	1	226.36	500	0	5	15	12	0.1	HR

Slika 27. Podaci o industriji željeza i čelika

### viii. *Industry\_manufacturing*

Podatke o proizvodnoj industriji prikazuje Slika 28.

unit_name	fuel_type	efficiency	cap_mw	max_cap	CO2Intensity	decom_start_existing_cap	life_time	decom_start_new	final_life_cap	System
gas_boilers	Gas	0.9	73.04	1000	0.23	5	15	12	0.1	HR
bio_boilers	Biomass	0.8	18.85	200	0	5	15	12	0.1	HR
oil_boilers	Oil	0.9	274.60	1000	0.4	5	15	12	0.1	HR
coal_boilers	Coal	0.8	0.00	1000	0.38	5	15	12	0.1	HR
hydrogen_boilers	Hydrogen	0.95	0.00	1000	0	5	15	12	0.1	HR
electric_boiler	Electricity	1	180.14	300	0	5	15	12	0.1	HR

Slika 28. Podaci o proizvodnoj industriji

### ix. Industry\_wood

Podatke o drvoprerađivačkoj industriji prikazuje Slika 29.

unit_name	fuel_type	efficiency	cap_mw	max_cap	CO2Intensity	decom_start_existing_cap	life_time	decom_start_new	final_life_cap	System
gas_boilers	Gas	0.9	3.26	5000	0.23	5	15	12	0.1	HR
bio_boilers	Biomass	0.8	19.46	50	0	5	15	12	0.1	HR
oil_boilers	Oil	0.9	3.45	5000	0.4	5	15	12	0.1	HR
coal_boilers	Coal	0.8	0.00	5000	0.38	5	15	12	0.1	HR
hydrogen_boilers	Hydrogen	0.95	0.00	5000	0	5	15	12	0.1	HR
electric_boiler	Electricity	1	47.63	50	0	5	15	12	0.1	HR

Slika 29. Podaci o drvoprerađivačkoj industriji

### x. Industry\_paper

Podatke o industriji papira prikazuje Slika 30.

unit_name	fuel_type	efficiency	cap_mw	max_cap	CO2Intensity	decom_start_existing_cap	life_time	decom_start_new	final_life_cap	System
gas_boilers	Gas	0.9	122.94	5000	0.23	5	15	12	0.1	HR
bio_boilers	Biomass	0.8	11.31	100	0	5	15	12	0.1	HR
oil_boilers	Oil	0.9	8.00	5000	0.4	5	15	12	0.1	HR
coal_boilers	Coal	0.8	0.00	5000	0.38	5	15	12	0.1	HR
hydrogen_boilers	Hydrogen	0.95	0.00	5000	0	5	15	12	0.1	HR
electric_boiler	Electricity	1	92.76	100	0	5	15	12	0.1	HR

Slika 30. Podaci o industriji proizvodnje papira

### xi. Industry\_food

Podatke o prehrambenoj industriji prikazuje Slika 31.

unit_name	fuel_type	efficiency	cap_mw	max_cap	CO2Intensity	decom_start_existing_cap	life_time	decom_start_new	final_life_cap	System
gas_boilers	Gas	0.9	541.80	1000	0.23	5	15	12	0.1	HR
bio_boilers	Biomass	0.8	18.65	200	0	5	15	12	0.1	HR
oil_boilers	Oil	0.9	45.70	1000	0.4	5	15	12	0.1	HR
coal_boilers	Coal	0.8	15.67	1000	0.38	5	15	12	0.1	HR
hydrogen_boilers	Hydrogen	0.95	0.00	1000	0	5	15	12	0.1	HR
electric_boiler	Electricity	1	220.70	400	0	5	15	12	0.1	HR

Slika 31. Podaci o prehrambenoj industriji

## 12. REFERENCE

- [1] EnergyPLAN, dostupno na: <https://www.energyplan.eu/>, pristupljeno 14.6.2022.
- [2] Ringkjøb H. K. Haugan P. M., Solbrekke I. M., A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 96, 2018, Pages 440-459, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.002>.
- [3] H2RES model, dostupno na: <https://h2res.org/>, pristupljeno 14.6.2022.
- [4] Howells M.; Rogner H.; Strachan N.; Heaps C.; Huntington H.; Kypreos S.; Hughes A.; Silveira S.; DeCarolis J.; Bazillian M.; Roehr A.; OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development, Energy Policy, Volume 39, Issue 10, 2011, Pages 5850-5870, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.033>.
- [5] EnergyScope, dostupno na: <https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/EnergyScope>, pristupljeno 14.6.2022.
- [6] PLEXOS Energy Exemplar, dostupno na: <https://energyexemplar.com/solutions/plexos/>, pristupljeno 14.6.2022.