

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Aljaž Blažič

**OCENJEVAJE TEMPERATURE
TALINE V ELEKTROOBLOČNI PEČI
Z UPORABO MEHKEGA
MODELIRANJA**

Magistrsko delo

Magistrski študijski program druge stopnje Elektrotehnika

Mentor: doc. dr. Vito Logar

Somentor: prof. dr. Igor Škrjanc

Ljubljana, 2020

Zahvala

Najprej bi se rad iskreno zahvalil mentorju doc. dr. Vitu Logarju, ki je s hitrimi odzivi in izčrpnimi komentarji poskrbel, da je delo na magistrski nalogi potekalo brez zapletov. Zahvaljujem se tudi somentorju prof. dr. Igorju Škrjancu za predlog teme magistrske naloge na izredno zanimivem področju ter za vse nasvete in usmeritve pri soočanju s problemi naloge.

Zahvalil bi se rad tudi družini in prijateljem, ki so mi tekom celotnega študija nudili podporo in me spodbijali k doseganju svojih ciljev.

Povzetek

Elektroobločne peči so namenjene reciklaži jeklenega odpadka. Pri procesu reciklaže predstavlja končna temperatura taline eno od pomembnejših veličin. Narava procesa taljenja onemogoča sprotno merjenje temperature taline, zato se meritve izvajajo le pred odlivanjem taline, s čimer se preveri ali se temperatura taline nahaja v predpisanemu intervalu. Za opravljanje meritev se uporabljajo merilne sonde za enkratno uporabo. Med potekom merjenja temperature je potrebno peč ugasniti, kar prispeva k daljšemu trajanju reciklaže, nepotrebnih izgubam energije ter posledično nižji učinkovitosti.

Delo predstavlja razvoj modela temperature taline v elektroobločni peči z uporabo mehkega pristopa. Model vključuje vse vplivne dejavnike, ki se merijo na elektroobločni peči. Predlagani model temperature taline je namenjen implementaciji na elektroobločni peči, kjer bo deloval sočasno s procesom reciklaže ter nudil podporo operaterjem elektroobločne peči o vrednosti temperature jekla. Tako bo zmanjšano potrebno število meritev temperature taline, kar skrajša čas reciklaže jekla in posledično poveča produktivnost obrata. Mehki model temperature se je izkazal kot zanesljiv in primeren za uporabo na elektroobločni peči pod dvema pogojevoma, in sicer da je prva meritev temperature pravilna in da je do prve meritve temperature taline vložek jekla v celoti staljen.

Predpostavljeni model temperature ni vezan na specifične lastnosti elektroobločne peči, ampak zgolj na meritve, ki se zajemajo na peči. To mu omogoča hitro in enostavno prenosljivost tudi na druge dizajne peči. Pristop k mehki modeliranju, nakazan v delu, ni omejen zgolj na ocenjevanje temperature taline, saj ga je mogoče enostavno razširiti tudi na druga področja.

Ključne besede: elektroobločna peč, mehko modeliranje, rojenje Gustafson-Kessel, optimizacija z roji delcev, ocena temperature

Abstract

Electric arc furnaces are intended for the recycling of steel scrap. In the recycling process, the final melt temperature is one of the most important quantities. Due to the nature of the melting process, continuous measurement of the melt temperature is impossible and is performed only before the melt is tapped, in order to check whether the melt temperature is within the prescribed interval. Disposable measuring probes are used to perform the measurements. During the temperature measurement, the furnace must be switched off, which contributes to a longer recycling time, unnecessary energy losses and consequently lower efficiency.

The thesis presents the development of a melt temperature model in an electric arc furnace using a fuzzy approach. The model includes all influencing factors measured on an electric arc furnace. The proposed melt temperature model is intended for implementation on an electric arc furnace, where it will operate in parallel with the recycling process and offer support to electric arc furnace operators on steel temperature. This will reduce the required number of melt temperature measurements, which shortens the recycling time of steel and consequently increases plant productivity. The fuzzy temperature model has proven to be reliable and suitable for use on an electric arc furnace provided that the first temperature measurement is correct and that the steel scrap is completely melted by the first melt temperature measurement.

The fuzzy temperature model is not tied to the specific properties of the electric arc furnace, but only to the measurements performed on the furnace. This allows it to be quickly and easily transferred to other furnace designs. The approaches to fuzzy modelling indicated in the thesis are not limited to estimating melt temperature, as it can be easily extended to other areas.

Key words: electric arc furnace, fuzzy modeling, Gustafson-Kessel clustering, particle swarm optimization, temperature estimation

Vsebina

1	Uvod	1
2	Elektroobločna peč	5
2.1	Meritve	7
3	Teoretični okvir	15
3.1	Mehki model Takagi-Sugeno	15
3.2	Deljenje prostora	17
3.2.1	Mehko rojenje s c -središči	17
3.2.2	Mehko rojenje Gustafson-Kessel	20
3.3	Struktura modela	22
3.4	Energija kemijskih reakcij	25
3.5	Optimizacija z roji delcev	29
4	Model temperature taline	35
4.1	Uporabljeni podatki	35
4.2	Tipi modelov temperature taline	36

4.2.1	Model TS prve vrste	36
4.2.2	Model moči TS	37
4.2.3	Model treh moči TS	39
4.3	Odstranjevanje neustreznih meritev	40
4.3.1	Odstranjevanje neustreznih meritev - Prvi del	42
4.3.2	Odstranjevanje neustreznih meritev - Drugi del	46
4.4	Optimiranje posledičnih parametrov modelov TS	47
5	Rezultati in diskusija	51
5.1	Vrednotenje modelov	51
5.2	Rezultati	52
5.2.1	Primerjava mehkega modela s teoretičnim	58
5.3	Diskusija	59
6	Zaključek	61
	Literatura	63

Seznam slik

2.1	Primer zajema meritev na EOP pri procesu rafinacije.	8
2.2	Normirani histogram mase vložka odpadnega jekla m_{vl} . Širina posameznega intervala znaša eno tono.	9
2.3	Normirani histogram meritev moči na transformatorju P_{tr} pri procesu rafinacije. Širina posameznega intervala znaša 2,5 MW. . . .	10
2.4	Normiran histogram meritev volumskega pretoka kisika $\dot{V}_{O_2}$ pri procesu rafinacije. Širina posameznega intervala znaša 200 Nm ³ /h. . . .	11
2.5	Normiran histogram meritev masnega pretoka ogljika $\dot{m}_C$ pri procesu rafinacije. Širina posameznega intervala znaša 5 kg/min. . . .	12
2.6	Normirani histogram meritev temperature taline v EOP. Širina posameznega intervala znaša 10 °C. Rdeča črta predstavlja tališče jekla.	13
2.7	Normirani histogram števila meritev temperature taline na šaržo.	14
3.1	Shematična razdelitev elektroobločne peči na območja.	22
4.1	Primer šarže z neustreznimi meritvami temperature taline.	41
4.2	Primer detekcije neustreznih meritev v šarži s simulacijo teoretičnega modela spodnje in zgornje meje v negativni časovni smeri.	45

4.3	Primer detekcije neustrezne začetne meritve temperature taline s pomočjo enostavnega modela temperature taline.	47
5.1	Primer razporeditve rojev z metodo GK v prostoru meritev masnega pretoka ogljika in kisika.	53
5.2	Prikaz pripadnostnih funkcij rojev v prostoru meritev masnega pretoka ogljika in kisika.	53
5.3	Primer optimizacije z metodo PSO. Zgornji graf prikazuje spreminjanje ključnih vrednosti kriterijskih funkcij delcev. Spodnji graf pa prikazuje spreminjanje mutacije.	54
5.4	Histogram napake e_{par} na učni množici in napake $e_{sarža}$ na testni množici za model temperature taline $\hat{T}_1$ (model TS prvega reda). .	56
5.5	Histogram napake e_{par} na učni množici in napake $e_{sarža}$ na testni množici za model temperature taline $\hat{T}_2$ (model moči TS).	57
5.6	Histogram napake e_{par} na učni množici in napake $e_{sarža}$ na testni množici za model temperature taline $\hat{T}_3$ (model treh moči TS). . .	57
5.7	Primer simulacije modela temperature taline $\hat{T}_3$ na testnih podatkih. Prikaz dobrega in nekoliko slabšega ujemanja modela.	58
5.8	Primerjava med teoretičnim modelom EOP in mehkim modelom $\hat{T}_3$. Leva stran prikazuje primer dobrega ujemanja, desna stran pa primer nekoliko slabšega ujemanja.	60

Seznam tabel

3.1	Molske mase spojin in elementov.	25
3.2	Standardne tvorbene entalpije spojin in elementov.	28
3.3	Specifične toplote spojin in elementov.	29
4.1	Konstante deležev razdelitve množine kisika in ogljika med reakcijami v EOP	44
5.1	Rezultati večkratnega učenja modelov temperature taline z metodo PSO z mutacijo. Prikaz povprečja in standardnega odklona vektorja kriterijskih funkcij $\mathbf{J}_{učna}$ in $\mathbf{J}_{testna}$	55
5.2	Rezultati učenja modela temperature taline, kjer je vrednost kriterijske funkcije J_{testna} oz. $\bar{e}_{sarža}$ najnižja. Za vsak model temperature je prikazana povprečna napaka in standardni odklon napake.	56
5.3	Primerjava modela temperature taline $\hat{T}_3$ in teoretičnega modela EOP na delu testne množice. Za oba modela je prikazana povprečna napaka in standardni odklon napake vektorja $\mathbf{e}_{sarž}$	59

Seznam uporabljenih simbolov

V pričujočem zaključnem delu so uporabljene naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
čas	t	sekunda	s
masa	m	kilogram	kg
tlak	p	Pascal	Pa
temperatura	T	Kelvin	K
moč	P	vat	W
gostota	ρ	-	kg/m ³
volumski pretok	$\dot{V}$	-	m ³ /s
masni pretok	$\dot{m}$	-	kg/s
množina snovi	n	mol	mol
molska masa	M	-	kg/mol
entalpija	H	-	kJ/mol
specifična toplota	C_P	-	kJ/(mol K)
pripadnost	μ	-	-

Natančnejši pomen simbolov ter njihovih indeksov je razviden iz ustreznih slik ali pa je pojasnjen v spremljajočem besedilu, kjer je simbol uporabljen. Vektorje in matrike zapisujemo s poudarjeno pisavo.

1 Uvod

Jeklo predstavlja eno izmed osnovnih surovin, brez katere si ne moremo predstavljati sodobne civilizacije. Uporablja se v najrazličnejše gradbene in konstrukcijske namene, pri izdelavi karoserije avtomobilov in raznih aparatov ter na še mnogih drugih področjih. Svetovne razmere v preteklih letih prikazujejo konstantno porast proizvodnje jekla [1]. Pri tem je spodbudno dejstvo, da je 30 % novo proizvedenega jekla recikliranega [2]. Jeklo je mogoče reciklirati znova in znova brez izgube njegovih lastnosti, kar pripomore k zmanjševanju obremenitve zemeljskih virov.

Reciklaža odpadnega jekla poteka v več korakih, od zbiranja, ločevanja, taljenja, rafinacije in nazadnje ohlajevanja recikliranega jekla. Pri poteku reciklaže predstavlja elektoobločna peč (v nadaljevanju EOP) ključno enoto, kjer poteka taljenje in rafinacija odpadnega jekla. EOP dodaja energijo v jeklo preko električnih in termokemijskih procesov. Električna energija se dodaja preko grafitnih elektrod in običajno predstavlja največji delež dodane energije pri postopku taljenja [3]. Poleg tega potekajo v EOP številne kemijske reakcije, pri katerih se sprošča energija. Ko se odpadno jeklo stali, se pomeri temperatura taline in vzamejo vzorci jekla. Z doseženo predpisano kemijsko sestavo in temperaturo jekla se odpre prebodna odprtina. Kotel se nagne in staljeno jeklo se odlije v pripravljeno livno ponev, s katero se ga transportira do naslednje postaje za procesiranje jekla [4], [5].

Optimizacija proizvodnih procesov z namenom višje produktivnosti s čim manjšo porabo energetskih virov je cilj vsake industrije. Jeklarska industrija si prizadeva proizvodnjo jekla v največji možni meri optimizirati, zato išče rešitve, s katerimi bi učinkoviteje uporabljali energetske vire. Digitalizacija industrije od-

pira vrata optimizaciji proizvodnje z velikimi količinami podatkov, katere pa je potrebno ustrezno obdelati in uporabiti za izboljšanje proizvodnih procesov. Magistrska naloga predstavlja uporabo pridobljenih podatkov iz EOP za ocenjevanje temperature taline pri procesu rafinacije. Cilj dela je zgraditi model temperature taline jekla, ki bo lahko deloval sočasno s procesom reciklaže na EOP. Model bo simuliral spreminjanje temperature taline med procesom rafinacije jekla in bil s tem v pomoč operaterjem EOP. Tako bomo zmanjšali potrebno število meritev temperature taline, kar skrajša čas reciklaže jekla in posledično poveča produktivnost obrata.

Področje modeliranja procesov v EOP je zahtevno zaradi prepletajočih se masnih, toplotnih in kemijskih procesov. Temperaturo taline v EOP je mogoče oceniti na različne načine z različno uspešnostjo. Logar v delih [6] in [7] predstavi celovit deterministični model EOP, ki temelji na osnovnih fizikalnih zakonih. Teoretični model EOP opisuje procese od zalaganja odpadnega jekla pa vse do izliva taline. V literaturi smo zasledili pristope k modeliranju temperature taline jekla na osnovi nevro-mehkih mrež [8]. Za ocenjevanje temperature taline so bili narejeni tudi poskusi uporabe linearne regresije (LR) in metode podpor-nih vektorjev (SVM) [9]. V magistrskem delu se osredotočimo na ocenjevanje temperature taline na osnovi mehkih modelov.

Magistrska naloga temelji na mehkem modeliranju z modeli Takagi-Sugeno [10]. Bistvena prednost omenjenih modelov je v njihovi večji interpretabilnosti v primerjavi z vsemi ostalimi splošnimi aproksimatorji [11]. V delu načrtamo tri modele temperature taline, kjer postopno nadgrajujemo strukturo modelov z znanjem o procesu. Model temperature se inicializira s prvo meritvijo temperature taline in glede na spreminjanje vplivnih veličin, ki se na EOP merijo, korigira oceno temperature taline. Pri modeliranju smo omejeni z majhnim številom meritev temperature taline, ki se pojavljajo asinhrono. Poglavitna predpostavka modela je popolna staljenost odpadnega jekla ob prvi meritvi temperature. Iz tega razloga predlagamo dvostopenjsko strategijo, s katero odstranimo neustrezne meritve temperature, z namenom boljšega učenja modelov temperature taline. Za določanje rojev je uporabljena iterativna metoda mehkega rojenja Gustafson-Kessel [12], ki za vsak roj najde med vzorci razporeditve hipereliptičnih oblik. Parametre v posledičnem delu določimo z optimizacijo z roji delcev, ki spada v družino stohastičnih optimizacijskih tehnik [13]. Mehke

modele temperature taline ovrednotimo in jih primerjamo s teoretičnim modelom EOP.

V poglavju 2 bomo opisali delovanje EOP in predstavili razpoložljive podatke, ki se zajemajo med procesom rafinacije. Nato bo v poglavju 3 predstavljena uporabljena teorijo, na kateri sloni razvoj modelov temperature taline. Konstrukcija različnih modelov temperature taline bo opisana v poglavju 4. Sledi poglavje 5, kjer bomo navedli rezultate dela. Nazadnje v zaključku navedemo ugotovitve in povzamemo celotno delo.

2 Elektroobločna peč

V poglavju začnemo s predstavitvijo elektroobločne peči (v nadaljevanju EOP) in postopka reciklaže odpadnega jekla. Sledi podpoglavje 2.1, kjer opišemo razpoložljive meritve, ki se zajemajo na EOP in jih potrebujemo za izgradnjo modela temperature taline.

Primarno se jeklo proizvaja v visoki peči z redukcijo železove rude s kisikovim postopkom. Alternativo predstavlja reciklaža odpadnega jekla v EOP. Pri procesu reciklaže se jekleni odpadki segreje preko točke stalitve vse do predpisane končne temperature. EOP dovaja v jeklo toploto preko fenomena električnega oblaka, ki se ustvarja med grafitnimi elektrodami in jeklom. Električni oblok se s pridom izkorišča za segrevanje jekla, saj prevodni kanali dosegajo temperature preko 4000 K. Električni procesi pa niso edini viri energije, saj v EOP potekajo številne kemijske reakcije, pri katerih se sprošča energija [14]. V grobem lahko proces predelave odpadnega jekla razdelimo na štiri dele:

1. zalaganje peči z jeklenim odpadkom,
2. taljenje odpadnega jekla,
3. rafinacija taline jekla,
4. izlitje taline jekla in njegova nadaljnja obdelava.

Pri postopku reciklaže se v EOP postopno doda dve do tri košare odpadnega jekla. Cilj je čim hitreje staliti prvo košaro, ker talina jekla omogoča stabilnejše formiranje električnega oblaka. Temu sledi postopno dodajanje ostalih košar. S tem dosežemo manjšo obremenitev omrežja in hitrejšo stalitev, kot v primeru

enkratnega zalaganja. Kompozicija dodanega jeklenega odpadka je poglavitno določena glede na izbrano končno kvaliteto jekla in na ceno odpadnega jekla na tržišču [4], [5].

Proces taljenja se začne s formacijo električnega obloka, ki nastane ob kratkem stiku med grafitnimi elektrodami in jeklom. Poleg električne se precejšen del celokupne energije dovede s termokemijski procesi. Oksidacija zemeljskega plina predstavlja velik del energije iz naslova kemijskih reakcij. Z naraščanjem temperature v EOP pa začne izkoristek oksidacije metana padati, zato se ga v končnih fazah taljenja preneha dodajati. V EOP potekajo tudi oksidacije železa, ogljika, ogljikovega monoksida in še mnogih drugih reaktantov, pri katerih se sproščajo nezanemarljive količine energije. Na količino teh reakcij vplivamo z dodajanjem reaktantov, kot so ogljik in kisik [5].

Proces rafinacije v EOP vključuje odstranjevanje fosforja, žvepla, aluminija, silicija, mangana in ogljika iz jekla. Vse večjo pozornost se posveča tudi raztopljenim plinom v jeklu, zlasti vodiku in dušiku. Proces rafinacije se v modernih EOP vse bolj prekriva s procesom taljenja, zaradi stalne težnje po krajših časih od preboda do preboda. Vbrizgavanje kisika se začne že zgodaj v procesu taljenja jekla. Večina elementov, ki jih je potrebno odstraniti med rafinacijo, ima visoko afiniteto do kisika v primerjavi z ogljikom. Tako kisik prednostno reagira s temi elementi, ki tvorijo okside, kateri priplavajo iz jekla v žlindro [3]. Kisik reagira tudi z železom, kar ima za posledico nižji izplen vložka. Ko se dodano odpadno jeklo stali, se pomeri temperatura taline in vzamejo vzorci jekla. Ciljna kvaliteta jekla določa potrebno končno temperaturo taline ob njenem izlitju, zato je poznavanje temperature taline ključnega pomena. Ko talina doseže predpisano kemijsko sestavo in temperaturo, se najprej odlije žlindra (postopek odžlindranja). Sledi izlitje taline jekla v pripravljeno livno ponev, ki je namenjena prevozu do naslednje postaje za obdelavo taline [4].

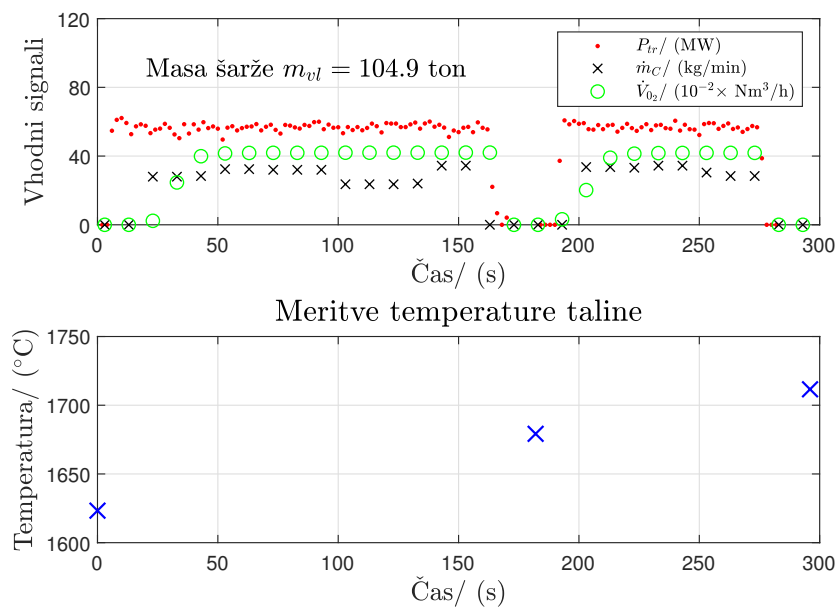
V naslednjem podpoglavju bomo predstavili lastnosti obravnavane EOP ter opisali meritve, ki se zajemajo na EOP pri procesu rafinacije.

2.1 Meritve

Delo obravnava EOP s trifaznim sistemom, ki za tvorjenje oblaka uporablja tri grafitne elektrode. Navidezna moč transformatorja EOP znaša 80 MVA, kapaciteta EOP pa približno 100 ton. Obratovalne podatke EOP za obdobje petih mesecev nam je priskrbel ena od slovenskih jeklarn. Za vsako šaržo se beleži količina dodanega jeklenega odpadka. Meritve moči se izvajajo na transformatorski postaji, ki napaja grafitne elektrode. V EOP se vpihuje kisik in injektira ogljik, zato se spremlja tudi masni pretok ogljika ter volumski pretok kisika. Temperatura taline se v času rafinacije nekajkrat pomeni z merilno sondo, ko operater želi informacijo o temperaturi taline.

Slika 2.1 prikazuje primer zajema meritev v času rafinacije za eno od šarž. Z rdečimi pikami so prikazane meritve moči na transformatorju P_{tr} . Čas vzorčenja meritev moči je enak dvema sekundama. Črni križci prikazujejo meritve masnega pretoka ogljika $\dot{m}_C$, zeleni krogi pa meritve volumskega pretoka kisika $\dot{V}_{O_2}$. Čas vzorčenja meritev obeh pretokov je enak desetim sekundam. Meritve temperature taline se nahajajo na spodnjem grafu slike 2.1 in so prikazane z odebeljenimi modrimi križci. Meritve se pojavljajo asinhrono, ko se operater odloči, da potrebuje informacijo o temperaturi taline. Na sliki 2.1 lahko opazimo, da so ob vsaki meritvi temperature vhodni signali postavljeni na nič, kar pomeni, da je potrebno ob vsaki meritvi temperature prekiniti vzbujanje elektrod in ustaviti dodajanje reaktantov v EOP. Vsaka dodatna meritev temperature taline podaljša čase od preboda do preboda (čase T/T), kar niža produktivnost EOP in zvišuje porabo energije.

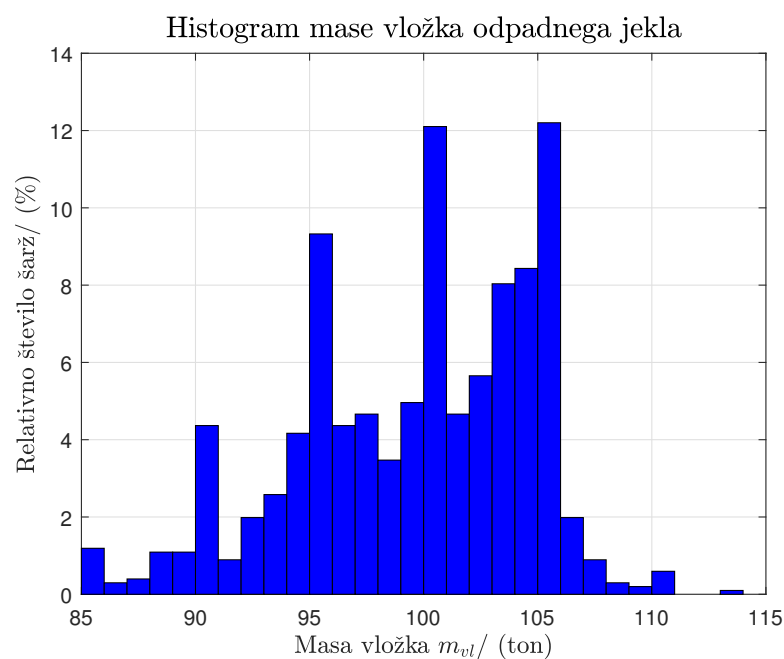
Primer meritev v času rafinacije



Slika 2.1: Primer zajema meritev na EOP pri procesu rafinacije.

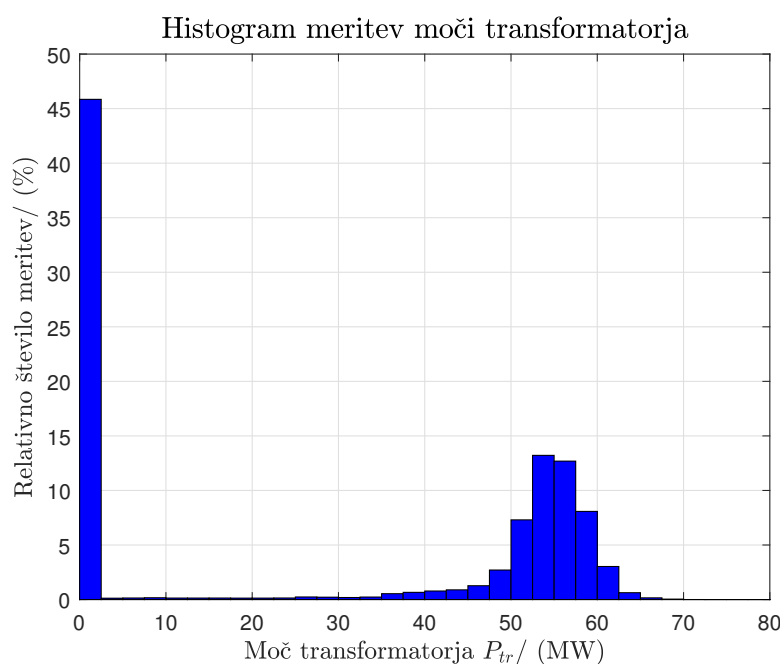
Histogrami v nadaljevanju prikazujejo porazdelitev vseh merjenih veličin, ki jih uporabimo za identifikacijo modela temperature taline. Histogrami so normirani, tako da je vsota vseh intervalov enaka ena.

Mase šarž. Histogram 2.2 prikazuje porazdelitev mase vložka odpadnega jekla m_{vl} za vse šarže. S histograma lahko razberemo, da se razpon mas nahaja na intervalu od 85 ton do 115 ton.



Slika 2.2: Normirani histogram mase vložka odpadnega jekla m_{vl} . Širina posameznega intervala znaša eno tono.

Meritve moči transformatorja. Histogram 2.3 prikazuje porazdelitev meritev moči transformatorja P_{tr} pri procesu rafinacije za vse šarže. S histograma razberemo, da se razpon moči na transformatorju nahaja na intervalu od 0 MW do 80 MW. Opazimo, da elektrode skoraj polovico časa niso vzbujanje. V primeru, da je med elektrodami in jeklom prisoten električni oblok, se najpogosteje pomeri moč transformatorja med 50 MW in 60 MW.

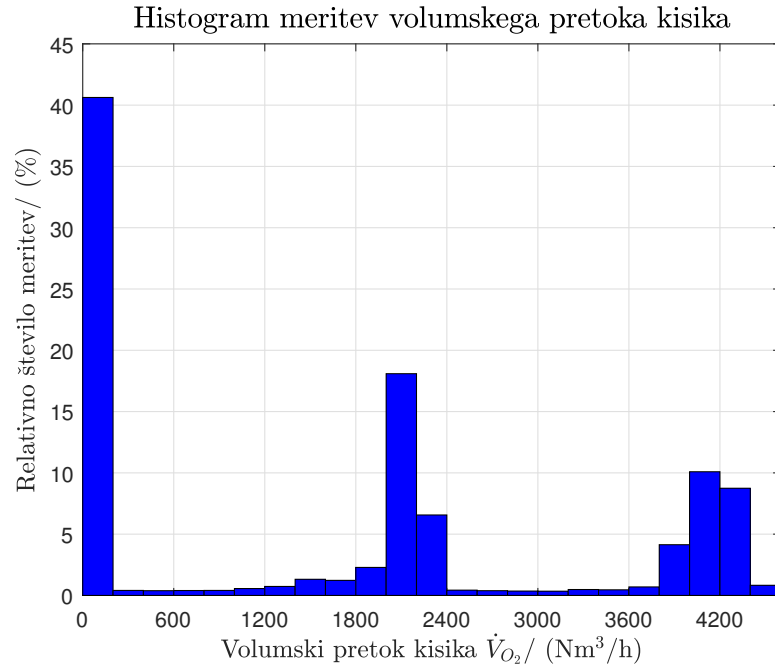


Slika 2.3: Normirani histogram meritev moči na transformatorju P_{tr} pri procesu rafinacije. Širina posameznega intervala znaša 2,5 MW.

Meritve volumskega pretoka kisika. Histogram 2.4 prikazuje porazdelitev meritev volumskega pretoka kisika $\dot{V}_{O_2}$ pri procesu rafinacije za vse šarže. S histograma razberemo, da se razpon volumskega pretoka kisika nahaja na intervalu od 0 Nm³/h do 4600 Nm³/h. Opazimo lahko tri pogoste načine delovanja. Najpogostejši način je, ko se kisika ne vpahuje v EOP. V ostalih dveh primerih, ko pa se kisik vpahuje, sta značilna volumska pretoka okoli 2000 Nm³/h in 4000 Nm³/h. Volumski pretok kisika $\dot{V}_{O_2}$ se meri v enoti Nm³/h. Enota Nm³ predstavlja normalni kubični meter izmerjen pri temperaturi $T = 0\text{ °C}$ in tlaku $p = 1.01325\text{ bar}$. Volumski pretok kisika $\dot{V}_{O_2}$ pretvorimo v masni pretok $\dot{m}_{O_2}$ z enačbo:

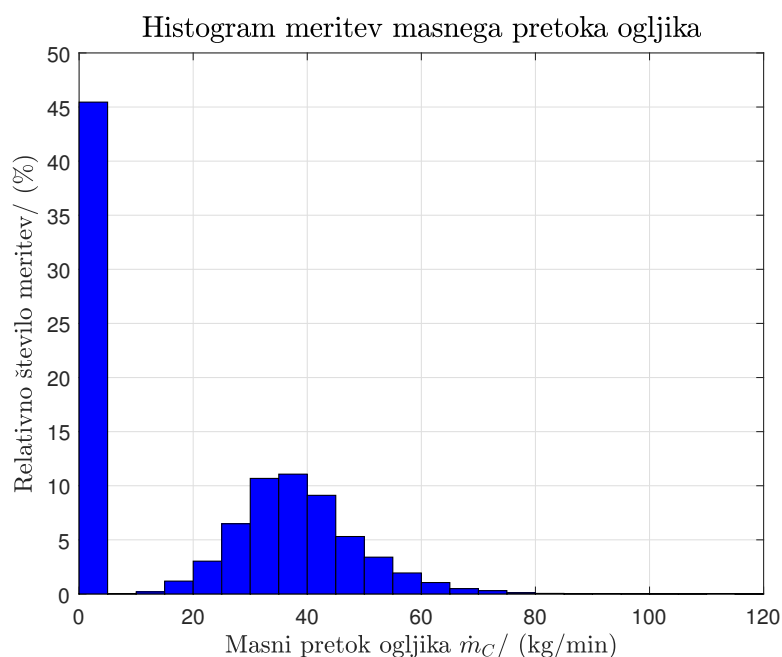
$$\dot{m}_{O_2} = \rho_{O_2} \dot{V}_{O_2} \quad (2.1)$$

pri čemer $\rho_{O_2} = 1,43\text{ kg/m}^3$ predstavlja gostoto kisika pri temperaturi $T = 0\text{ °C}$ in tlaku $p = 1.01325\text{ bar}$ [15]. Pri izračunu masnega pretoka kisika poskrbimo, da so enote zapisane po mednarodnem sistemu SI enot. V enoti volumskega pretoka kisika $\dot{V}_{O_2}$ enoto ure (h) pretvorimo v enoto sekunde (s).



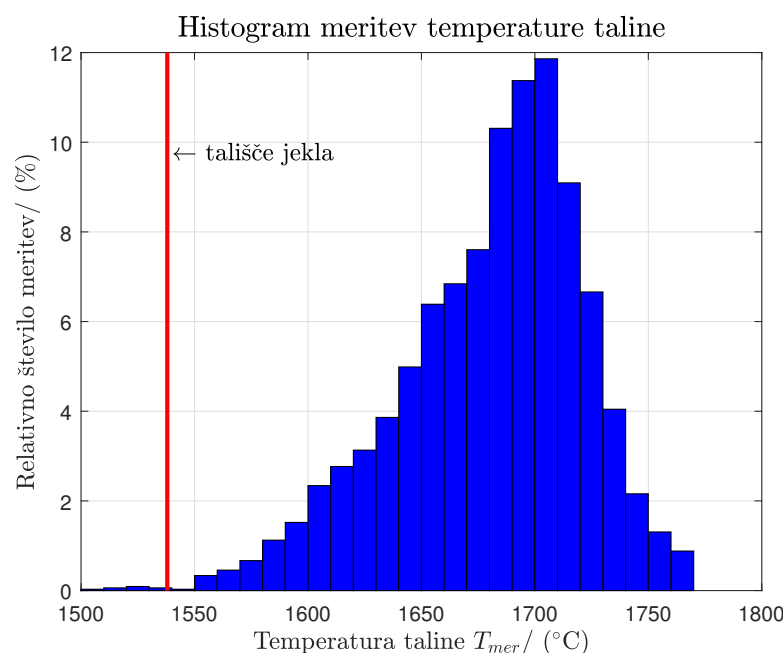
Slika 2.4: Normiran histogram meritev volumskega pretoka kisika $\dot{V}_{O_2}$ pri procesu rafinacije. Širina posameznega intervala znaša 200 Nm³/h.

Meritve dodajanja ogljika. Histogram 2.5 prikazuje porazdelitev meritev masnega pretoka ogljika $\dot{m}_C$ pri procesu rafinacije za vse šarže. S histograma razberemo, da se razpon masnega pretoka ogljika nahaja na intervalu od 0 kg/min do 120 kg/min. Opazimo, da se v 45 % časa ogljik ne injektira v talino. V primeru injektiranja ogljika v talino, pa se najpogosteje nahaja masni pretok na intervalu od 20 kg/min do 60 kg/min. Masni pretok ogljika $\dot{m}_C$ se meri v enoti kg/min. Podobno kot pri izračunu masnega pretoka kisika, tokrat pri masnem pretoku ogljika poskrbimo, da so enote zapisane po mednarodnem sistemu SI enot. V enoti masnega pretoka ogljika $\dot{m}_C$ enoto minute (min) pretvorimo v enoto sekunde (s).

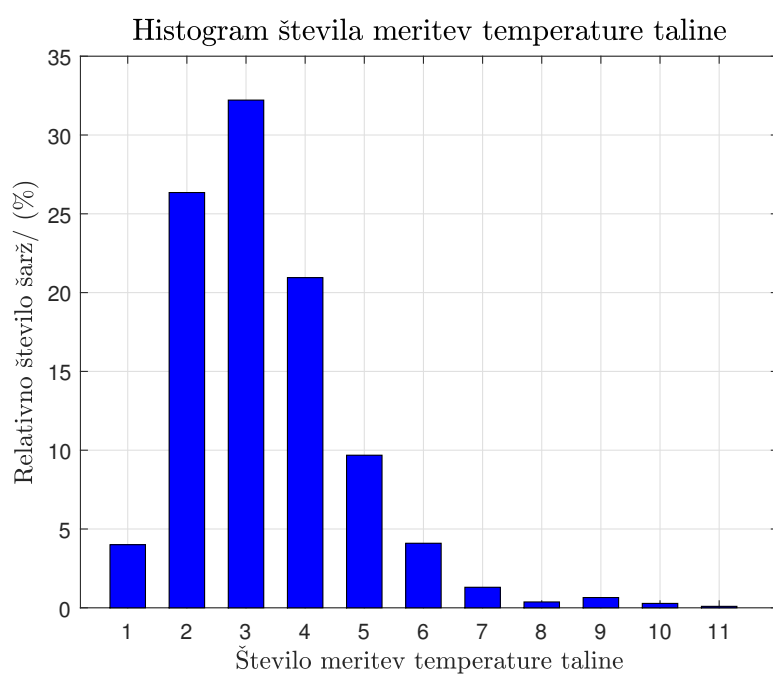


Slika 2.5: Normiran histogram meritev masnega pretoka ogljika $\dot{m}_C$ pri procesu rafinacije. Širina posameznega intervala znaša 5 kg/min.

Meritve temperature taline. Histogram 2.6 prikazuje porazdelitev meritev temperature taline T_{mer} za vse šarže. Z rdečo črto je označeno tališče jekla. Predpostavimo, da je tališče jekla enako tališču železa, ki znaša $T_{tal} = 1538^{\circ}\text{C}$. Nekaj meritev se nahaja pod tališčem jekla, kar je najverjetneje napaka v meritvi temperature taline. Pri opazovanju histograma 2.6 vidimo, da tik nad tališčem jekla primanjkuje meritev temperature. Iz tega razloga, lahko pričakujemo v tem območju nekoliko slabšo kakovost modela. Omenimo še, da so meritve temperature taline podvržene šumu relativno velikih amplitud, ki izvira iz nehomogenosti temperature taline. Histogram 2.7 prikazuje porazdelitev, koliko meritev temperature taline se izvede na šaržo. Opazimo, da operaterji najpogosteje opravijo od dve do pet meritev na šaržo.



Slika 2.6: Normirani histogram meritev temperature taline v EOP. Širina posameznega intervala znaša 10°C . Rdeča črta predstavlja tališče jekla.



Slika 2.7: Normirani histogram števila meritev temperature taline na šaržo.

3 Teoretični okvir

V tem poglavju je razložena uporabljena teorija, na osnovi katere je zgrajen model temperature taline v EOP. Prvo poglavje 3.1 opiše mehki model Takagi-Sugeno. Sledi poglavje 3.2, kjer je opisan koncept deljenja prostora po metodi mehkega rojenja s c -središči ter nato nadgradnja na metodo mehkega rojenja Gustafson-Kessel. Poglavje 3.3 predstavi izpeljavo strukture modela temperature v EOP pri procesu rafinacije. Predzadnje poglavje 3.4 se osredotoča na ocenjevanje energije kemijskih reakcij v EOP. Zadnje poglavje 3.5 pa opiše metodo optimizacije s pomočjo rojev delcev.

3.1 Mehki model Takagi-Sugeno

Mehka logika je bila razvita kot razširitev klasične (Boolove) logike. Prvi jo je predstavil Lofti A. Zadeh leta 1965. Namesto da izjave delimo na “pravilne” in “napačne”, jim določimo vmesno vrednost, oziroma delno pravilnost. Medtem ko ima lahko pripadnostna funkcija ostre množice (ang. crisp sets) zalogo vrednosti $\{0, 1\}$, ima pripadnostna funkcija mehke množice (ang. fuzzy sets) zalogo vrednosti znotraj intervala $[0, 1]$. Razlog za to lahko najdemo v opazovanju načina človekovega razmišljanja, ki se odloča na zelo približnih ocenah raznih dejstev, ki si jih predstavi v obliki pravil [11].

V poglavju predstavimo metodo opisovanja nelinearnih sistemov, ki temelji na mehki logiki. Leta 1985 sta Takagi in Sugeno predstavila nov tip mehkega sistema, imenovanega model Takagi-Sugeno [10] (v nadaljevanju model TS). Ideja modelov TS je opisati nelinearni sistem z več lokalnimi modeli, ki sistem dobro opišejo v svoji okolici. Izhodi lokalnih modelov se nato zlijejo v skupni izhod, ob

upoštevanju pripadnosti vzorca lokalnim modelom. Vzorec ima vse višjo pripadnost, bližje kot je lokalnemu modelu glede na definirano razdaljo.

Pri mehkih modelih je potrebno določiti veliko število različnih parametrov. Problem določanja parametrov lahko razdelimo na tri dele [11]:

1. **Določanje posledičnih parametrov:** Parametri posledičnega dela mehkega modela ustrezajo utežem lokalnih modelov. V delu določimo njihove vrednosti z optimizacijo z roji delcev, predstavljeno v poglavju 3.5.
2. **Določanje parametrov premise:** Parametri v premisi pravil so tisti, ki definirajo pripadnostne funkcije, njihove položaje in širino. S pripadnostnimi funkcijami določimo vrednosti pripadnosti vzorca do vseh lokalnih modelov. Postopek njihove določitve je prikazan v poglavju 3.2.
3. **Določanje strukture pravil:** Določitev ustrezne strukture pravil je zelo pomembna, ker na ta način lahko zmanjšamo problem dimenzij. V poglavju 3.3 poskušamo znanje o procesu vključiti v strukturo pravil.

Mehki sistem TS zapisuje pravila mehkega sistema v naslednji obliki:

$$R_i : \text{IF } x_{p1} = A_{i1} \text{ AND } x_{p2} = A_{i2} \text{ AND } \dots x_{pd} = A_{id} \text{ THEN } \hat{y}_i = f_i(\mathbf{x}_p) \quad (3.1)$$

pri čemer $\mathbf{x}_p = [x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pd}]^T$ predstavlja vektor vhodov v mehki sistem, $\hat{y}_i$ pa izhod lokalnega modela. Lokalni model je definiran s poljubno funkcijo f_i , ki preslika vhodni vektor $\mathbf{x}_p$ v realno število, $f_i(\mathbf{x}_p) : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$. Vse vrednosti vhodnega vektorja $\mathbf{x}_p$ v premisi morda niso vedno zastopane v posledičnem delu [10]. Oznaka R_i predstavlja i -to pravilo, kjer gre indeks $i = 1, \dots, c$ preko vseh c pravil, A_{ij} pa mehko množico za spremenljivko x_{pj} v pravilu i . Enačba (3.2) prikazuje izračun izhoda modela TS, kjer seštejemo doprinose vseh lokalnih modelov, ki so oteženi z vrednostmi pripadnostnih funkcij μ_i .

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^c \mu_i(\mathbf{x}_p) \hat{y}_i(\mathbf{x}_p) \quad (3.2)$$

Vsi možni vektorji vhodov v mehki sistem sestavljajo prostor $A_p \in \mathbb{R}^d$. Okolico veljavnosti lokalnega modela definiramo v prostoru A_p s pripadnostno funkcijo $\mu_i : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, 1]$. Pripadnosti μ_i morajo biti ustrezno normirane, tako da vedno velja pogoj $\sum_{i=1}^c \mu_i(\mathbf{x}_p) = 1$.

3.2 Deljenje prostora

Pri deljenju prostora se išče najboljšo razdelitev dane množice podatkov, glede na izbrani kriterij. V poglavju 3.2.1 predstavimo metodo mehkega rojenja s c -središči. Omenjena metoda predstavlja izhodišče za poglavje 3.2.2, kjer predstavimo metodo mehkega rojenja Gustafson-Kessel.

3.2.1 Mehko rojenje s c -središči

Metoda mehkega rojenja s c -središči (ang. Fuzzy C-Means, FCM) spada med enostavne metode iskanja rojev s točkastimi središči. Metoda razdeli prostor podatkov $\mathbf{X}$ na vnaprej določeno število rojev c . Vsak roj je opisan s središčem oz. s centrom roja $\mathbf{v}_i$, kjer je $i = 1, \dots, c$. S faktorjem mehкости η je definirana mehkost prehodov iz ene v drugo množico. Algoritem FCM temelji na minimizaciji razdalj med vzorci podatkov in središči rojev.

Privzamemo matematični zapis predstavljen v [11]. Predpostavimo, da imamo n vzorcev oz. meritev $\mathbf{x}(k)$. Vsako meritev predstavimo kot d -dimenzionalen vektor $\mathbf{x}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_d(k)]^T$, $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{R}^d$, kjer z $x_d(k)$ označimo k -to meritev na d -tem senzorju. Vse meritve so združene v eno matriko $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}^T \mid k = 1, 2, \dots, n\}$, $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{n \times d}$, kjer je matrika $\mathbf{X}$ razpisana po komponentah prikazana v enačbi (3.3).

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \dots & x_d(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \dots & x_d(2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1(n) & x_2(n) & \dots & x_d(n) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Glavni cilj rojenja je v razdelitvi množice podatkov na podmnožice podatkov, ki vsebujejo elemente, ki so si med seboj bolj podobni, kot so si podobni s tistimi iz drugih rojev. Vsakemu vzorcu $\mathbf{x}(k)$ oz. vrstici matrike (3.3) določimo pripadnost $\mu_i(k)$ k i -temu roju. Pripadnosti za vse roje in za vse meritve so združene v matriki mehkih pripadnosti $\mathbf{U} = [\mu_i(k)]$, $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{n \times c}$. Matrika $\mathbf{U}$ razpisana po

komponentah je prikazana v enačbi (3.4).

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mu_1(1) & \mu_2(1) & \dots & \mu_c(1) \\ \mu_1(2) & \mu_2(2) & \dots & \mu_c(2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mu_1(n) & \mu_2(n) & \dots & \mu_c(n) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Za matriko pripadnosti $\mathbf{U}$ morajo veljati naslednje lastnosti:

- mere pripadnosti so realna števila na zaprtem intervalu $[0, 1]$:

$$\mu_i(k) \in [0, 1], \quad i = 1, \dots, c \text{ in } k = 1, \dots, n, \quad (3.5)$$

- vsota vseh pripadnosti posamezne meritve je enaka ena ali drugače povedano vsota vsake vrstice matrike (3.4) je enaka ena:

$$\sum_{i=1}^c \mu_i(k) = 1, \quad k = 1, \dots, n, \quad (3.6)$$

- nobena mehka množica ni prazna in nobena ne vsebuje vseh podatkov:

$$0 < \sum_{k=1}^n \mu_i(k) < n, \quad i = 1, \dots, c. \quad (3.7)$$

Algoritem FCM premika pozicije središč rojev z namenom minimizacije kriterijske funkcije (3.8), ob upoštevanju pogoja (3.6). Z $d(\mathbf{x}(k), \mathbf{v}_i)$ označimo normo razdalje med središčem i -tega roja in k -to meritvijo. Matrika $\mathbf{V}$ vsebuje vektorje središč vseh rojev $\mathbf{v}_i = [v_{1i}, v_{2i}, \dots, v_{di}]^T$, $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_c]^T$. Faktor mehkosti η definira mehkost prehodov med množicami. V limitnem primeru $\eta \rightarrow 1$ pomeni popolnoma ločene podmnožice, medtem ko $\eta \rightarrow \infty$ pomeni popolnoma mehke podmnožice.

$$I(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (\mu_i(k))^\eta d^2(\mathbf{x}(k), \mathbf{v}_i) \quad (3.8)$$

Minimizacijo kriterijske funkcije (3.8) implementiramo z iterativnim postopkom premikanja rojev $\mathbf{v}_i^{(r)}$, izračunom razdalj $d_i^{(r)}(k)$ med središči rojev in vzorcev ter posodobitvijo pripadnosti $\mu_i^{(r)}(k)$. S spremenljivko r nakažemo, da gre za r -to iteracijo algoritma.

Enačba (3.9) prikazuje posodobitev središča i -te mehke množice:

$$\mathbf{v}_i^{(r)} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_i^{(r-1)}(k)^\eta \mathbf{x}(k)}{\sum_{k=1}^n \mu_i^{(r-1)}(k)^\eta}. \quad (3.9)$$

Enačba (3.10) prikazuje izračun razdalje od i -tega središča roja do k -tega vzorca. Za mero razdalje smo izbrali Mahalanobisovo normo, ker smo uporabljali nenormalizirane podatke. Enačba (3.11) prikazuje izračun kovariančne matrike vzorcev.

$$d_i^{(r)}(k) = \sqrt{(\mathbf{x}(k) - \mathbf{v}_i^{(r)})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x}(k) - \mathbf{v}_i^{(r)})}, \quad (3.10)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{x}})^T, \quad (3.11)$$

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mathbf{x}(k). \quad (3.12)$$

Enačba (3.13) prikazuje izračun pripadnosti i -te mehke množice za k -ti vzorec:

$$\mu_i^{(r)}(k) = \left(d_i^{(r)}(k)^{\frac{2}{\eta-1}} \sum_{j=1}^c d_j^{(r)}(k)^{\frac{-2}{\eta-1}} \right)^{-1}. \quad (3.13)$$

Psevdokoda metode FCM je podana v algoritmu 1. Najpomembnejši parameter metode je izbira števila rojev. Z večkratnim zaganjanjem algoritma, lahko določimo ustrezno število rojev c , kot tudi primerno vrednost faktorja mehкости η . Pred začetkom iterativnega dela nastavimo matriko pripadnosti $\mathbf{U}^{(0)}$ na naključne vrednosti ob upoštevanju omejitev (3.5), (3.6) in (3.7). V iterativnem delu popravljamo središča rojev vse dokler ni izpolnjen zaustavitveni pogoj. Metodo navzgor omejimo na maksimalno število iteracij r_{max} , lahko pa algoritem tudi predčasno prekinemo, če so razlike med prejšnjo in trenutno iteracijo majhne. Enačba (3.14) prikazuje Čebiševo normo razlike pripadnostnih matrik, s katero preverimo, ali je sprememba manjša od izbrane min_{impro} .

$$\|\mathbf{U}^{(r)} - \mathbf{U}^{(r-1)}\|_\infty < min_{impro} \quad (3.14)$$

Algoritem 1: Rojenje FCM

- 1: Nastavi število rojev c in faktor mehкости η
 - 2: Inicializiraj matriko pripadnosti $\mathbf{U}^{(0)}$
 - 3: $r = 0$
 - 4: **ponavljaj**
 - 5: $r = r + 1$
 - 6: Določi središča rojev $\mathbf{v}_i^{(r)}$
 - 7: Izračunaj razdalje $d_i^{(r)}(k)$
 - 8: Določi matriko pripadnosti $\mathbf{U}^{(r)}$
 - 9: **dokler** ni izpolnjen zaustavitveni pogoj
-

Slabost metode FCM je v tem, da imajo vsi roji enako obliko. V našem primeru smo obliko rojev definirali s kovariančno matriko vzorcev (3.11). V naslednjem poglavju predstavimo metodo, ki vsakemu roju dodeli svojo kovariančno matriko in na ta način omogoči unikatno obliko vsakega roja.

3.2.2 Mehko rojenje Gustafson-Kessel

V delih [11] in [12] je predstavljena iterativna metoda mehkega rojenja Gustafson-Kessel (v nadaljevanju GK). Gre za razširitev metode rojenja FCM, kjer omogočimo različne oblike rojev v isti množici podatkov. Izračun središča rojev $\mathbf{v}_i$ in pripadnosti k -tega vzorca i -temu rojem $\mu_i(k)$ ostane nespremenjen. Razlika med metodama se pojavi pri izračunu razdalje $d_i(k)$ med vzorcem $\mathbf{x}(k)$ in središčem roja $\mathbf{v}_i$.

Metoda rojenja GK je, enako kot metoda rojenja FCM, iterativni algoritem. Vrednost iteracije določa spremenljivka r . Z enačbo (3.15) definiramo za vsak roj kovariančno matriko Σ_i .

$$\Sigma_i^{(r)} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\mathbf{x}(k) - \mathbf{v}_i^{(r)}) (\mathbf{x}(k) - \mathbf{v}_i^{(r)})^T \quad (3.15)$$

Iz inverza kovariančne matrike izračunamo matriko notranjega produkta $\mathbf{F}_i$ z enačbo (3.16). Determinanta kovariančne matrike je prikazana kot $|\Sigma_i^{(r)}|$. S spremenljivko ρ_i , ki jo definira enačba (3.17), omogočimo detekcijo rojev različnih

volumnov. Pri izračunu inverza kovariančne matrike se lahko pojavijo numerične težave, če je matrika blizu singularnosti. Numeričnim težavam se lahko v določeni meri izognemo z dobro inicializacijo. Na podatkih najprej uporabimo metodo rojenja FCM, ki je bistveno robustnejša. S pridobljeno matriko mehkih pripadnosti $\mathbf{U}$ nato inicializiramo metodo rojenja GK.

$$\mathbf{F}_i^{(r)} = (\rho_i^{(r-1)} |\boldsymbol{\Sigma}_i^{(r)}|)^{\frac{1}{d}} (\boldsymbol{\Sigma}_i^{(r)})^{-1} \quad (3.16)$$

$$\rho_i^{(r)} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \mu_i^{(r)}(k)} \quad (3.17)$$

Z enačbo (3.18) določimo razdaljo med vzorcem $\mathbf{x}(k)$ in središčem roja $\mathbf{v}_i$:

$$d_i^{(r)}(k) = \sqrt{(\mathbf{x}(k) - \mathbf{v}_i^{(r)})^T \mathbf{F}_i^{(r)} (\mathbf{x}(k) - \mathbf{v}_i^{(r)})}. \quad (3.18)$$

Psevdokoda iterativnega postopka metode rojenja GK je prikazana v algoritmu 2. Po končanem iterativnem postopku shranimo končna središča $\mathbf{v}_i$, matrike notranjega produkta $\mathbf{F}_i$ vseh rojev in faktor mehkosti η . Za poljubni vzorec lahko izračunamo pripadnosti do vseh rojev s pomočjo enačbe (3.13). Vrednosti razdalj v enačbi (3.13) pa določimo z enačbo (3.18).

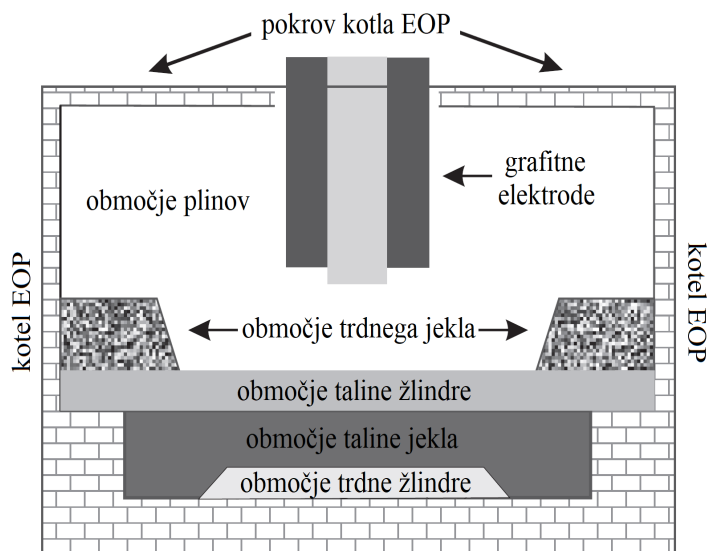
Algoritem 2: Rojenje GK

- 1: Nastavi število rojev c in faktor mehkosti η
 - 2: Inicializiraj matriko pripadnosti $\mathbf{U}^{(0)}$ iz metode rojenja FCM
 - 3: $r = 0$
 - 4: **ponavljaj**
 - 5: $r = r + 1$
 - 6: Določi središča rojev $\mathbf{v}_i^{(r)}$
 - 7: Določi kovariančne matrike $\boldsymbol{\Sigma}_i^{(r)}$
 - 8: Določi matrike notranjega produkta $\mathbf{F}_i^{(r)}$
 - 9: Izračunaj razdalje $d_i^{(r)}(k)$
 - 10: Določi matriko pripadnosti $\mathbf{U}^{(r)}$
 - 11: **dokler** ni izpolnjen zaustavitveni pogoj
-

3.3 Struktura modela

V poglavju predstavimo strukturo modela temperature taline. Izhajamo iz dognanj člankov [6] in [7], ki matematično opisujeta toplotni in masni pretok ter termokemijske procese, ki potekajo v EOP. Naša študija se osredotoča na proces rafinacije, ko je odpadno jeklo že v celoti staljeno, zato lahko kompleksen matematični model EOP precej poenostavimo.

V članku [6] je predpostavljena razdelitev EOP na več območij, kot je prikazano na sliki 3.1. EOP je z okolico ločena s kotlom in s pokrovom kotla. V sredini pokrova kotla se nahaja odprtina za vhod elektrod v delovni prostor. Vsebinsko peči delimo na območje trdnega jekla, na območje trdne žlindre, na območje taline jekla, na območje taline žlindre in nazadnje na območje plinov. V delu se osredotočamo na območje taline jekla, za katero želimo oceniti temperaturo pri procesu rafinacije.



Slika 3.1: Shematična razdelitev elektroobločne peči na območja.

Najprej naštejemo nekaj predpostavk, ki jih upoštevamo pri izpeljavi strukture modela temperature taline:

1. vložek odpadnega jekla je v celoti staljen,
2. zanemarimo območje trdne žlindre,
3. območje taline žlindre pridružimo območju taline jekla. Predpostavimo, da je masa taline jekla enaka masi začetnega vložka odpadnega jekla m_{vl} ,
4. temperatura taline jekla je na celotnem območju homogena,
5. temperatura taline jekla je višja od temperature ostalih območij.

Kot smo omenili, se osredotočamo zgolj na območje taline jekla. Iz članka [6] privzamemo diferencialno enačbo prvega reda (3.19), s katero opišemo hitrost spremembe temperature taline:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{m_{vl}C_{P,tal}}P(t), \quad (3.19)$$

pri čemer m_{vl} predstavlja maso vložka odpadnega jekla in $C_{P,tal}$ specifično toploto taline jekla. Moč, s katero se dovaja energija talini, je predstavljena s spremenljivko P . Moč P lahko razdelimo na moč iz električnega obloka P_{el} , na moč kemijskih reakcij P_{kem} in na moč izgub območja taline jekla P_{iz} . Moč segrevanja taline jekla razpišemo z naslednjo enačbo:

$$P(t) = P_{el}(t) + P_{kem}(t) + P_{iz}(t). \quad (3.20)$$

Moč iz električnega obloka P_{el} je neposredno odvisna od moči na transformatorju P_{tr} , ki napaja elektrode. Kakšen delež energije električnega obloka se porabi za segrevanje taline je odvisno tudi od višine taline. Informacije o višini taline nimamo, je pa ta odvisna od mase vložka odpadnega jekla. Enačba (3.21) prikazuje nelinearno preslikavo f_{el} , ki preslika moč transformatorja in maso vložka odpadnega jekla v moč iz električnega obloka.

$$P_{el}(t) = f_{el}(P_{tr}(t), m_{vl}) \quad (3.21)$$

V EOP potekajo številne kemijske reakcije, ob katerih se sprošča ali porablja energija, ki vpliva na temperaturo taline. Kemijske reakcije potekajo, če so

koncentracije reaktantov in produktov izven ravnovesnih vrednosti. Z dodajanjem ogljika in kisika v EOP se vpliva na njihove koncentracije. Enačba (3.22) prikazuje nelinearno preslikavo f_{kem} , ki preslika masni pretok ogljika in kisika v moč kemijskih reakcij. Izračun energije kemijskih reakcij v EOP je podrobneje predstavljen v naslednjem poglavju 3.4.

$$P_{kem}(t) = f_{kem}(\dot{m}_C(t), \dot{m}_{O_2}(t)) \quad (3.22)$$

Izračun moči izgub območja taline jekla P_{iz} je težaven, saj bi morali upoštevati številne dejavnike, o katerih pa nimamo informacij. Predpostavili smo, da je temperatura območja taline višja od ostalih območij. Zato se toplota prevaja v ostala območja in s tem niža temperaturo taline. Predpostavimo, da je moč izgub odvisna od mase vložka odpadnega jekla m_{vl} in trenutne temperature taline jekla $T(t)$, kar prikazuje enačba (3.23). Funkcija f_{iz} predstavlja nelinearno preslikavo temperature taline jekla in mase vložka v moč izgub.

$$P_{iz}(t) = f_{iz}(T(t), m_{vl}) \quad (3.23)$$

Diferencialno enačbo (3.19) pretvorimo v diferenčno z uporabo Eulerjeve metode. Zvezno neodvisno spremenljivko časa t diskretiziramo v diskretnih trenutkih s časom vzorčenja t_s . Enačba (3.24) prikazuje izračun temperature taline jekla v naslednjem časovnem trenutku:

$$T(k+1) = T(k) + \frac{t_s}{m_{vl}C_{P,tal}}P(k) \quad (3.24)$$

pri čemer označimo s $T(k)$ vrednost temperature taline ob času $t = kt_s$.

3.4 Energija kemijskih reakcij

Nezanemarljiv del dodane energije v EOP izvira iz kemijskih reakcij. Določiti želimo teoretične vrednosti energije, ki se sproščajo oz. porabljajo pri reakcijah v EOP, v katerih nastopata ogljik in kisik. Iz članka [7] smo izbrali nekaj kemijskih reakcij, ki imajo v času rafinacije največji vpliv na temperaturo taline jekla:



Tabela 3.1 prikazuje molske mase elementov in spojin [16], ki jih potrebujemo pri izračunih.

Tabela 3.1: Molske mase spojin in elementov.

Molska masa	M/ (kg/mol)
M_{C}	0,0120
M_{CO}	0,0280
M_{O_2}	0,0320
M_{CO_2}	0,0440
M_{Fe}	0,0599
M_{FeO}	0,0718

Enačbi (3.29) in (3.30) prikazujeta izračun ocene množine dodanega ogljika $n_{\text{C}}(k)$ in kisika $n_{\text{O}_2}(k)$ med časovnima trenutkoma $[(k-1)t_s, kt_s]$:

$$n_{\text{C}}(k) = \frac{1}{M_{\text{C}}} \int_{(k-1)t_s}^{kt_s} \dot{m}_{\text{C}}(t) dt \doteq \frac{\dot{m}_{\text{C}}(k-1)t_s}{M_{\text{C}}}, \quad (3.29)$$

$$n_{\text{O}_2}(k) = \frac{1}{M_{\text{O}_2}} \int_{(k-1)t_s}^{kt_s} \dot{m}_{\text{O}_2}(t) dt \doteq \frac{\dot{m}_{\text{O}_2}(k-1)t_s}{M_{\text{O}_2}}. \quad (3.30)$$

Pri poteku kemijskih reakcij predpostavimo:

1. dodana množina ogljika n_C in kisika n_{O_2} se v celoti porabi,
2. količina potrebnih reaktantov železa Fe in železovega oksida FeO je pri reakcijah neomejena,
3. vse kemijske reakcije potečejo hipno in do konca v desno.

Izhajamo iz navedenih kemijskih reakcij (3.25) – (3.28). Najprej definiramo, kako se množina ogljika in kisika porazdeli med omenjene štiri kemijske reakcije. Predpostavimo statične razmere, kjer se delež K_{O_2-CO} kisika porabi pri oksidaciji ogljika v ogljikov monoksid, delež $K_{O_2-CO_2}$ kisika porabi pri oksidaciji ogljika v ogljikov dioksid in delež K_{O_2-FeO} kisika porabi pri oksidaciji železa v železov oksid. Skupno znaša seštevek vseh treh faktorjev ena. Podobno predpostavimo porabo ogljika. Faktor K_{C-CO} predstavlja delež porabe ogljika pri oksidaciji v ogljikov monoksid, K_{C-CO_2} predstavlja delež porabe ogljika pri oksidaciji v ogljikov dioksid in K_{C-Fe} predstavlja delež porabe ogljika pri redukciji železovega oksida v železo in ogljikov monoksid. Skupno znaša seštevek vseh treh faktorjev ena. Ob tem je potrebno še upoštevati, da ohranimo razmerje med množinami produktov in reaktantov enako razmerju reakcijskih koeficientov. Predpostavimo, da se preostanek množine ogljika porabi pri reakciji redukcije železovega oksida. Za preostalo množino kisika pa predpostavimo, da se porabi pri reakciji oksidacije železa. Enačbe v nadaljevanju prikazujejo izračun množin produktov iz vrednosti množin ogljika in kisika.

Enačba (3.31) prikazuje izračun nastale množine ogljikovega oksida pri reakciji (3.27):

$$n_{CO}(k) = \min \{ K_{C-CO} n_C(k), 2K_{O_2-CO} n_{O_2}(k) \}, \quad (3.31)$$

pri čemer min predstavlja operator, ki vrne manjšo vrednost.

Enačba (3.32) prikazuje izračun nastale množine ogljikovega dioksida pri reakciji (3.28):

$$n_{CO_2}(k) = \min \{ K_{C-CO_2} n_C(k), K_{O_2-CO_2} n_{O_2}(k) \}. \quad (3.32)$$

Enačba (3.33) prikazuje izračun nastale množine železa pri reakciji (3.26):

$$\begin{aligned}
 n_{C_{ost}-CO}(k) &= \begin{cases} K_{C-CO}n_C(k) - n_{CO}, & K_{C-CO}n_C(k) \neq n_{CO} \\ 0, & \text{sicer} \end{cases} \\
 n_{C_{ost}-CO_2}(k) &= \begin{cases} K_{C-CO_2}n_C(k) - n_{CO_2}, & K_{C-CO_2}n_C(k) \neq n_{CO_2} \\ 0, & \text{sicer} \end{cases} \\
 n_{Fe}(k) &= K_{C-Fe}n_C(k) + n_{C_{ost}-CO}(k) + n_{C_{ost}-CO_2}(k) \quad (3.33)
 \end{aligned}$$

pri čemer $n_{C_{ost}-CO}$ predstavlja množino preostalega ogljika pri reakciji (3.27) in $n_{C_{ost}-CO_2}$ množino preostalega ogljika pri reakciji (3.28). Množino preostalega ogljika smo dodali, da zagotovimo porabo vse množine ogljika n_C .

Enačba (3.34) prikazuje izračun nastale množine železovega oksida pri reakciji (3.25):

$$\begin{aligned}
 n_{O_{2,ost}-CO}(k) &= \begin{cases} K_{O_2-CO}n_{O_2}(k) - \frac{1}{2}n_{CO}, & K_{O_2-CO}n_{O_2}(k) \neq \frac{1}{2}n_{CO} \\ 0, & \text{sicer} \end{cases} \\
 n_{O_{2,ost}-CO_2}(k) &= \begin{cases} K_{O_2-CO_2}n_{O_2}(k) - n_{CO_2}, & K_{O_2-CO_2}n_{O_2}(k) \neq n_{CO_2} \\ 0, & \text{sicer} \end{cases} \\
 n_{FeO}(k) &= 2[K_{O_2-FeO}n_{O_2}(k) + n_{O_{2,ost}-CO}(k) + n_{O_{2,ost}-CO_2}(k)] \quad (3.34)
 \end{aligned}$$

pri čemer $n_{O_{2,ost}-CO}$ predstavlja množino preostalega kisika pri reakciji (3.27) in $n_{O_{2,ost}-CO_2}$ množino preostalega kisika pri reakciji (3.28). Množino preostalega kisika smo dodali, da zagotovimo porabo vse množine kisika n_{O_2} .

Kemijske reakcije delimo na eksotermne in endotermne. Pri slednjih se toplota porablja, kar rezultira v ohladitvi okolice. Njeno nasprotje so eksotermne reakcije, pri katerih se toplota sprošča in zato segreva okolico. Pri izobarnih procesih lahko iz prvega zakona termodinamike določimo, da je toplota Q_{P_0} pri stalnem tlaku enaka spremembi entalpije ΔH , kar prikazuje naslednja enačba:

$$Q_{P_0} = \Delta H. \quad (3.35)$$

Entalpijo kemijske reakcije izračunamo tako, da od vsote entalpij produktov odštejemo vsoto entalpij reaktantov. Enačba (3.36) prikazuje izračun spremembe

entalpije pri poteku kemijske reakcije:

$$\Delta H_r = \sum_j n_{\text{prod}_j} H(\text{prod}_j) - \sum_i n_{\text{reakt}_i} H(\text{reakt}_i) \quad (3.36)$$

pri čemer n_{prod_j} predstavlja množine produktov, n_{reakt_i} pa množine reaktantov. Razmerje med množinami produktov in reaktantov mora biti enako razmerju reakcijskih koeficientov. $H(\text{prod}_j)$ in $H(\text{reakt}_i)$ sta entalpiji produkta j in reaktanta i pri dani temperaturi in tlaku. Slabost enačbe (3.36) je, da absolutnih vrednosti entalpij ne poznamo, poleg tega pa se spreminjajo še s temperaturo in tlakom [17].

V termokemiji se je uveljavila standardna tvorbeni entalpija spojine, ki je enaka entalpiji reakcije nastanka 1 mol spojine neposredno iz elementov pri standardnih pogojih. Po dogovoru je standardna entalpija najstabilnejše alotropne modifikacije elementa enaka nič. Standardni pogoji tlaka in temperature pa po dogovoru znašata 1 bar in 25 °C oz. 298 K. Standardno reakcijsko entalpijo ΔH_r° izračunamo z naslednjo enačbo:

$$\Delta H_r^\circ = \sum_j n_{\text{prod}_j} \Delta H_{\text{tv}}^\circ(\text{prod}_j) - \sum_i n_{\text{reakt}_i} \Delta H_{\text{tv}}^\circ(\text{reakt}_i), \quad (3.37)$$

pri čemer $\Delta H_{\text{tv}}^\circ$ predstavlja standardne tvorbeni entalpije reaktantov in produktov [17]. Tabela 3.2 prikazuje standardne tvorbeni entalpije spojin in elementov [7], ki jih potrebujemo za izračune reakcijskih entalpij.

Tabela 3.2: Standardne tvorbeni entalpije spojin in elementov.

Standardna tvorbeni entalpija	$\Delta H_{\text{tv}}^\circ$ / (kJ/mol)
$\Delta H_{\text{tv}}^\circ(\text{C})$	-27
$\Delta H_{\text{tv}}^\circ(\text{CO})$	-117
$\Delta H_{\text{tv}}^\circ(\text{O}_2)$	0
$\Delta H_{\text{tv}}^\circ(\text{CO}_2)$	-396
$\Delta H_{\text{tv}}^\circ(\text{Fe})$	0
$\Delta H_{\text{tv}}^\circ(\text{FeO})$	-243

Pri reakcijah v EOP predpostavimo, da je tlak enak 1 bar. Ne moremo pa predpostaviti, da je v peči 25 °C, saj je tališče jekla precej nad standardno temperaturo. Iz tega razloga nadgradimo enačbo (3.37) za izračun reakcijske entalpije

tako, da upoštevamo temperaturo reaktantov in produktov. Enačba (3.38) prikazuje izračun reakcijske entalpije pri tlaku 1 bar in poljubni temperaturi T :

$$\Delta H_r(T) = \Delta H_r^\circ + \Delta H_{segr}^\circ(T), \quad (3.38)$$

$$\Delta H_{segr}^\circ(T) = \sum_j \left[n_{\text{prod}_j} \int_{298}^T C_{P,(\text{prod}_j)} dT \right] - \sum_i \left[n_{\text{reakt}_i} \int_{298}^T C_{P,(\text{reakt}_i)} dT \right], \quad (3.39)$$

pri čemer C_P predstavlja specifično toploto reaktantov ali produktov. Tabela 3.3 prikazuje specifične toplote obravnavanih elementov in spojin [16]. Specifične toplote se običajno spreminjajo s temperaturo, vendar smo v našem delu uporabili konstantne vrednosti. Ob predpostavki, da specifične toplote niso odvisne od temperature, lahko integrale v enačbi (3.39) poenostavimo:

$$\Delta H_{segr}^\circ(T) = \left(\sum_j n_{\text{prod}_j} C_{P,(\text{prod}_j)} - \sum_i n_{\text{reakt}_i} C_{P,(\text{reakt}_i)} \right) (T - 298). \quad (3.40)$$

Tabela 3.3: Specifične toplote spojin in elementov.

Specifična toplota	$C_P / (\text{kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$	$C_P / (\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1})$
$C_{P,(C)}$	0,0085	0,708
$C_{P,(CO)}$	0,0291	1,039
$C_{P,(O_2)}$	0,0294	0,919
$C_{P,(CO_2)}$	0,0381	0,866
$C_{P,(Fe)}$	0,0251	0,449
$C_{P,(FeO)}$	0,0480	0,669
$C_{P,(tal)}$	0,0480	0,840

3.5 Optimizacija z roji delcev

V poglavju predstavimo koncept optimizacije nelinearnih funkcij z uporabo metode rojev delcev (ang. Particle Swarm Optimization, PSO). Leta 1995 sta metodo PSO predlagala Kennedy in Eberhart [13]. Družbeno vedenje organizmov, kot so zbiranje ptic in rib v jate, sta ju motivirala, da sta začela opazovati učinke sodelovanja vrst pri doseganju njihovih ciljev kot skupina. Leta študija o dinamiki

ptičjih jat je povzročila možnosti uporabe tega vedenja kot orodje za optimizacijo. Pri metodi PSO več-kandidatne rešitve sočasno obstajajo in sodelujejo. Kandidati, imenovan tudi delci, letijo v problemskem prostoru in iščejo optimum izbrane kriterijske funkcije. Analogno bi lahko v živalskem svetu videli iskanje optimuma v postopku iskanja hrane roja ptic. Delec s časom prilagaja svoj položaj glede na lastne izkušnje, pa tudi v skladu z izkušnjami celotne skupine [18].

Privzamemo matematični zapis metode PSO, ki sta ga predlagala Kennedy in Eherhart [13]. Dimenzija prostora, kjer iščemo rešitve je enaka d . Posamezen i -ti delec je predstavljen z vektorjem $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T$, kar lahko razumemo kot njegovo pozicijo v d -dimenzionalnem prostoru. Vsak delec ima tudi hitrost, ki je definirana z vektorjem $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})^T$. Definirati je potrebno kriterijsko funkcijo, s katero lahko določimo uspešnost pozicije vsakega delca. Delec tekom optimizacije hrani svojo dosedanje najboljšo pozicijo v vektorju $\mathbf{pb}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})^T$. Najboljša pozicija celotnega roja pa je shranjena v vektorju $\mathbf{gb} = (g_1, g_2, \dots, g_d)^T$.

Enačbi (3.41) in (3.42) prikazujeta adaptacijo hitrosti in pozicije i -tega delca v r -ti iteraciji:

$$\mathbf{v}_i^{(r)} = \mathbf{v}_i^{(r-1)} + c_1 \mathbf{rnd} \circ (\mathbf{pb}_i^{(r-1)} - \mathbf{x}_i^{(r-1)}) + c_2 \mathbf{rnd} \circ (\mathbf{gb}^{(r-1)} - \mathbf{x}_i^{(r-1)}), \quad (3.41)$$

$$\mathbf{x}_i^{(r)} = \mathbf{x}_i^{(r-1)} + \mathbf{v}_i^{(r)}, \quad (3.42)$$

pri čemer c_1 predstavlja kognitivno konstanto, c_2 pa konstanto socialnega obnašanja ali zaupanja v roj. Koeficient c_1 uteži stohastično privlačnost k delčevi najboljši poziciji $\mathbf{pb}_i$, kar lahko razumemo kot utež lokalnega iskanja. Koeficient c_2 uteži stohastično privlačnost k najboljši poziciji roja $\mathbf{gb}$, kar pa lahko razumemo kot utež globalnega iskanja. Kennedy in Eherhart [13] predlagata, da konstanti c_1 in c_2 nastavimo enako, in sicer na vrednost 2. Stolpčni vektor naključnih števil $\mathbf{rnd}$ je velikosti d . Vektor se ob vsaki uporabi naključno generira iz enakomerne distribucije na intervalu $(0 - 1)$. Z matematično operacijo “ $\circ$ ” je označen Hadamardov produkt, ki je drugače znan kot množenje po komponentah.

Psevdokoda metode PSO je podana v algoritmu 3. Načrtovalec določi maksimalno število iteracij r_{max} in število delcev v roju n . Določiti je potrebno razpon problemskega prostora z vektorjema $\mathbf{x}_{min} = (x_{min,1}, x_{min,2}, \dots, x_{min,d})^T$ in

$\mathbf{x}_{max} = (x_{max,1}, x_{max,2}, \dots, x_{max,d})^T$. Na ta način preprečimo tavanje delcev v problemskem prostoru, kjer vemo, da rešitev ne obstaja. Bolje kot lahko skrčimo problemski prostor, hitrejšo konvergenco metode PSO lahko pričakujemo. Z vektorjem $\mathbf{v}_{max} = (v_{max,1}, v_{max,2}, \dots, v_{max,d})^T$ omejimo absolutno hitrost delcev po posameznih dimenzijah prostora. Paziti moramo, da omogočimo delcem tudi negativne hitrosti, saj v nasprotnem primeru dovolimo premikanje le v pozitivni smeri. Pred začetkom optimizacije vse delce naključno razporedimo po prostoru in jim določimo naključne hitrosti ob upoštevanju izbranih omejitev pozicije in hitrosti. Nadaljujemo z iterativnim delom, vse dokler ne izpolnimo zaustavitvenega pogoja. Navadno ustavimo optimizacijo, ko doseže maksimalno število iteracij r_{max} . Algoritem pa se lahko ustavi tudi predčasno, ko doseže rešitev predpisano natančnost. Rezultat algoritma je delec z najboljšo pozicijo, glede na izbrano kriterijsko funkcijo.

Algoritem 3: PSO

- 1: Nastavi parametre r_{max} , n , $\mathbf{x}_{min}$, $\mathbf{x}_{max}$ in $\mathbf{v}_{max}$
 - 2: Inicializiraj začetne pozicije $\mathbf{x}_i^{(0)}$ in hitrosti $\mathbf{v}_i^{(0)}$
 - 3: $r = 0$
 - 4: **ponavljaj**
 - 5: $r = r + 1$
 - 6: Ovrednoti kriterijsko funkcijo za vse delce
 - 7: Posodobi najboljše pozicije delcev $\mathbf{pb}_i^{(r)}$ in roja $\mathbf{gb}^{(r)}$
 - 8: Izračunaj hitrosti $\mathbf{v}_i^{(r)}$ in pozicije $\mathbf{x}_i^{(r)}$
 - 9: Popravi hitrosti $\mathbf{v}_i^{(r)}$ in pozicije $\mathbf{x}_i^{(r)}$
 - 10: **dokler** ni izpolnjen zaustavitveni pogoj
-

Metoda PSO se je razvila iz poskusov simuliranja družbenih sistemov, zato je bila poglobljena matematična podlaga za metodologijo podana nekoliko kasneje. Enačba (3.43) prikazuje modificiran izraz za izračun hitrosti delca z namenom zagotovitve konvergence algoritma PSO. Dodan je omejitveni faktor κ (enačba (3.44)), s katerim preprečimo, da bi se hitrost delca povečala čez vse meje. Iz tega vidika metoda ne potrebuje več omejitve hitrosti. Kljub temu pa se je izkazalo, da je omejitev vsaj na velikost območja posamezne spremenljivke koristna, saj prispeva k hitrejši konvergenci metode. Za parametra c_1 in c_2 je bila

predlagana vrednost 2,05 [19].

$$\mathbf{v}_i^{(r)} = \kappa(\mathbf{v}_i^{(r-1)} + c_1 \mathbf{rnd}_o(\mathbf{pb}_i^{(r-1)} - \mathbf{x}_i^{(r-1)}) + c_2 \mathbf{rnd}_o(\mathbf{gb}_i^{(r-1)} - \mathbf{x}_i^{(r-1)})) \quad (3.43)$$

$$\kappa = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \text{ kjer je } \varphi = c_1 + c_2, \varphi > 4 \quad (3.44)$$

Metoda PSO se lahko ujame v lokalni minimum in iz njega ne more pobegniti. Ko se vsi delci zberejo v okolici lokalnega minimuma, sta zadnja dva izraza enačbe (3.43) majhna in postane hitrost delca v večini odvisna od izraza $\kappa \mathbf{v}_i$. Hitrost je tako iz iteracije v iteracijo vse manjša, kar preprečuje iskanje rešitve izven trenutne okolice lokalnega minimuma. V literaturi [18] smo našli rešitev, v kateri je predlagana vpeljava mutacije v metodo PSO. Tako preprečimo neželeno ustalitev v lokalnem minimum, hkrati pa ohranimo lastnosti hitre konvergence standardne metode PSO.

V metodo PSO uvedemo nekaj novih spremenljivk. Spremenljivka *stag* šteje koliko iteracij metodi PSO ni uspelo izboljšati najboljšega rezultata kriterijske funkcije. Spremenljivka λ določa verjetnost mutacije pozicije delca v posamezni dimenziji. Predlagamo, da se vrednost mutacije linearno povečuje z vrednostjo števca *stag*, kar prikazuje enačba (3.45). Maksimalno vrednost mutacije določa spremenljivka λ_{max} . Z večanjem verjetnosti mutacije se vse bolj poudarja iskanje rešitve izven okolice lokalnega minimuma. V primeru, da se doseže maksimalna vrednost števca *stag_{max}* se verjetnost mutacije λ skokovito postavi na ena. Tako se vse pozicije delcev naključno nastavijo, kar je skrajni ukrep iskanja rešitve izven lokalnega minimuma. Pseudokoda določitve vrednosti mutacije λ v *r*-ti iteraciji metode PSO z mutacijo je prikazana v algoritmu 4.

$$\lambda^{(r)} = \frac{\lambda_{max}}{stag_{max}} stag^{(r)} \quad (3.45)$$

Algoritem 4: Določitev mutacije $\lambda^{(r)}$

- 1: $stag^{(r)} = stag^{(r-1)} + 1$
 - 2: Če se izboljša najboljši rezultat kriterijske funkcije: $stag^{(r)} = 0$
 - 3: Izračunaj verjetnost mutacije $\lambda^{(r)}$ iz $stag^{(r)}$
 - 4: Če je $stag^{(r)} \geq stag_{max}$: $\lambda^{(r)} = 100\%$ in $stag^{(r)} = 0$
-

Po adaptaciji delcev z enačbama (3.43) in (3.42) sledi mutacija pozicije delca. Pogostost mutacije je določena s faktorjem verjetnosti mutacije λ . Enačba (3.46) prikazuje modifikacijo pozicije delca z uporabo naključne mutacije:

$$\mathbf{x}_i^{(r)} = \mathbf{x}_i^{(r)} + \text{sign}(\mathbf{rnd} - \frac{1}{2}) \circ (\mathbf{x}_{max} - \mathbf{x}_{min}) \circ (\mathbf{rnd} < \lambda^{(r)}), \quad (3.46)$$

pri čemer predstavlja $(\mathbf{x}_{max} - \mathbf{x}_{min})$ vektor velikosti razpona prostora po vseh dimenzijah. Z izrazom $\text{sign}(\mathbf{rnd} - \frac{1}{2})$ naključno določimo pozitiven ali negativen predznak mutacije po vseh dimenzijah. Ali se zgodi mutacija je odvisno od logičnega izraza $(\mathbf{rnd} < \lambda^{(r)})$. Delec mutira v posamezni dimenziji, če je naključna vrednost manjša od λ . Ko je λ enaka ena, pride do mutacije vseh delcev. Algoritem 5 prikazuje psevdokodo poteka metode PSO z mutacijo, ki je podobna algoritmu 3, z razliko v dodatku mutacije in dodatne določitve parametrov λ_{max} in $stag_{max}$.

Algoritem 5: PSO z mutacijo

- 1: Nastavi parametre r_{max} , n , $\mathbf{x}_{min}$, $\mathbf{x}_{max}$ in $\mathbf{v}_{max}$
 - 2: Nastavi parametre mutacije $stag_{max}$ in λ_{max}
 - 3: Inicializiraj začetne pozicije $\mathbf{x}_i^{(0)}$ in hitrosti $\mathbf{v}_i^{(0)}$
 - 4: $r = 0$
 - 5: **ponavljaj**
 - 6: $r = r + 1$
 - 7: Ovrednoti kriterijsko funkcijo za vse delce
 - 8: Posodobi najboljše pozicije delcev $\mathbf{pb}_i^{(r)}$ in roja $\mathbf{gb}^{(r)}$
 - 9: Izračunaj hitrosti $\mathbf{v}_i^{(r)}$ in pozicije $\mathbf{x}_i^{(r)}$
 - 10: Določi $\lambda^{(r)}$ in mutiraj pozicije $\mathbf{x}_i^{(r)}$
 - 11: Popravi hitrosti $\mathbf{v}_i^{(r)}$ in pozicije $\mathbf{x}_i^{(r)}$
 - 12: **dokler** ni izpolnjen zaustavitveni pogoj
-

4 Model temperature taline

Poglavje obravnava izgradnjo treh mehkih modelov temperature taline. Najprej v poglavju 4.1 predstavimo uporabljene podatke. Modele temperature taline s postopno nadgradnjo strukture prikažemo v poglavju 4.2. Sledi predstavitev dvostopenjske strategije detekcije neustreznih meritev temperature v poglavju 4.3. V zadnjem poglavju 4.4 prikažemo določitev parametrov metode PSO z mutacijo, s katero določimo posledične parametre mehkih modelov.

4.1 Uporabljeni podatki

Podatke razdelimo na učno in testno množico. Učno množico uporabimo za učenje modela, testno množico pa nato uporabimo za validacijo naučenega modela. Določitev testne množice je zahtevna naloga, saj se med meritvami temperature pojavljajo številne neustrezne meritve. Testno množico smo se odločili določiti ročno. Pri izbiri šarž za testno množico smo poskušali biti čimbolj nepristranski. Med vsemi podatki smo določili nekaj intervalov, na katerih smo izbrali šarže, ki po našem mnenju niso vsebovale neustreznih meritev temperature. Vse ostale podatke smo uvrstili v učno množico.

Meritve masnega pretoka ogljika in volumnskega pretoka kisika imajo čas vzorčenja desetih sekund. Meritve moči na transformatorju pa imajo čas vzorčenja dveh sekund. Občasno se zgodi, da se kakšna meritev izgubi ali pride do časovnega zamika meritve. V izogib nevšečnostim, ki so posledica različnih časov vzorčenja, smo med meritvami naredili interpolacijo ničtega reda. To pomeni, da vsako meritev zadržimo na prejšnji vrednosti, dokler ne prejmemo nove meritve. Za ločljivost interpoliranih meritev smo izbrali čas vzorčenja ene sekunde. Meri-

tve temperature taline se pojavljajo precej redkeje, zato med njimi ne izvajamo nobene interpolacije.

4.2 Tipi modelov temperature taline

V poglavju najprej navedemo predpostavke in poenostavitve modelov temperature taline. V nadaljnjih podpoglavjih opišemo tri različne modele temperature taline, ki ocenjujejo temperaturo taline v EOP pri procesu rafinacije. Z vsakim modelom vključimo več znanja o procesu v strukturo posameznega modela.

Predpostavke in poenostavitve, ki smo jih upoštevali pri vseh modelih temperature taline:

1. odpadno jeklo je v celoti staljeno,
2. temperatura taline jekla je homogena,
3. prva meritev temperature taline je pravilna,
4. s prvo meritvijo temperature taline inicializiramo model,
5. masa taline jekla je enaka masi vložka odpadnega jekla,
6. model ne upošteva nobenih dimenzij in parametrov EOP.

4.2.1 Model TS prve vrste

V literaturi pogosto srečamo model TS prvega reda. To pomeni, da je posledični del modela TS linearna funkcija vhodov. Enačba (4.1) prikazuje lokalni model temperature taline $\hat{T}_i$, ki je linearna funkcija vhodov $\mathbf{u}(k) = [m_{vl}(k), \dot{m}_C(k), \dot{m}_{O_2}(k), P_{tr}(k)]^T$. Lokalnemu modelu smo dodali trenutno oceno temperature modela $\hat{T}(k)$, da preprečimo skoke temperature. Model vsebuje tudi konstanto w_{i0} oz. afini člen. Parametri $\mathbf{w}_i = [w_{i0}, w_{i1}, \dots, w_{i4}]^T$ definirajo lastnosti i -tega modela.

$$\hat{T}_i(k+1) = \hat{T}(k) + w_{i0} + w_{i1}m_{vl}(k) + w_{i2}\dot{m}_C(k) + w_{i3}\dot{m}_{O_2}(k) + w_{i4}P_{tr}(k) \quad (4.1)$$

Izhod modela TS prve vrste je ocena temperature taline $\hat{T}$ v naslednjem časovnem trenutku. Enačba (4.2) prikazuje izračun izhoda modela, kjer μ_i predstavlja pripadnosti vhodne spremenljivke $\mathbf{u}(k)$ k i -temu roju.

$$\hat{T}(k+1) = \sum_{i=1}^c \mu_i(\mathbf{u}(k)) \hat{T}_i(k) \quad (4.2)$$

Parametri modela TS prve vrste. Z metodo mehkega rojenja prostora GK, opisano v poglavju 3.2.2, določimo središča $\mathbf{v}_i$ in matrike notranjega produkta $\mathbf{F}_i$ vseh c rojev. Pri tem je potrebno izbrati število rojev c in faktor mehkosti η . Deljenje prostora poteka v štiridimenzionalnem prostoru spremenljivke $\mathbf{u}(k)$. Ko imamo določene parametre v premisi, nadaljujemo z določitvijo parametrov v posledičnem delu. Parametre $\mathbf{w}_i$ vseh c lokalnih modelov, ki jih opisuje enačba (4.1), določimo s pomočjo metode PSO z mutacijo. Postopek optimiranja posledičnih parametrov je podrobneje opisan v poglavju 4.4. Spodaj so prikazani izbrani parametri in lastnosti modela TS prvega reda:

Simbol izhoda modela temperature	—	$\hat{T}_1$
Število rojev c	—	4
Faktor mehkosti η	—	1,5
Število posledičnih parametrov d	—	20
Čas vzorčenja t_s	—	5 s

4.2.2 Model moči TS

Z modelom moči TS poskušamo vključiti več znanja o procesu v strukturo modela. V poglavju 3.3 smo predstavili strukturo modela in z enačbo (3.24) predpostavili spreminjanje temperature taline v EOP pri procesu rafinacije. Enačba (4.3) prikazuje izračun ocene temperature taline $\hat{T}(k+1)$ v naslednjem časovnem trenutku iz vzbujanja EOP $\mathbf{u}(k)$ in trenutne ocene temperature $\hat{T}(k)$:

$$\hat{T}(k+1) = \hat{T}(k) + \frac{t_s}{m_{vl} C_{P,tal}} \hat{P}(\mathbf{u}(k), \hat{T}(k)). \quad (4.3)$$

Z modelom TS je opisano spreminjanje ocene moči $\hat{P}$ v enačbi (4.4). Pripadnostno funkcijo μ_i za i -ti roj določimo glede na vhodno spremenljivko $\mathbf{u}(k)$.

$$\hat{P}(\mathbf{u}(k), \hat{T}(k)) = \sum_{i=1}^c \mu_i(\mathbf{u}(k)) \hat{P}_i(\mathbf{u}(k), \hat{T}(k)) \quad (4.4)$$

Lokalne modele moči TS določa enačba (4.5). Z enačbo (4.6) predpostavimo linearno povezavo med močjo električnega obloka, ki segreva talino, in močjo transformatorja. Z enačbo (4.7) predpostavimo, da je moč kemijskih reakcij linearno odvisna od masnega pretoka ogljika in kisika. Na zadnje v enačbi (4.8) predpostavimo, da je moč izgub taline odvisna od temperature taline vse do polinoma drugega reda. S spremenljivko T_{tal} je označena temperatura tališča jekla.

$$\hat{P}_i(\mathbf{u}(k), \hat{T}(k)) = \hat{P}_{i,el}(P_{tr}(k)) + \hat{P}_{i,kem}(\dot{m}_C(k), \dot{m}_{O_2}(k)) + \hat{P}_{i,iz}(\hat{T}(k)) \quad (4.5)$$

$$\hat{P}_{i,el} = w_{i1}P_{tr}(k) \quad (4.6)$$

$$\hat{P}_{i,kem} = w_{i2}\dot{m}_C(k) + w_{i3}\dot{m}_{O_2}(k) \quad (4.7)$$

$$\hat{P}_{i,iz} = w_{i4} + w_{i5}(\hat{T}(k) - T_{tal}) + w_{i6}(\hat{T}(k) - T_{tal})^2 \quad (4.8)$$

Parametri modela moči TS. Postopek rojenja prostora je povsem enak kot pri modelu TS prvega reda. Izbrati je potrebno število rojev c in faktor mehкости η . Z metodo mehkega rojenja GK določimo središča $\mathbf{v}_i$ in matrike notranjega produkta $\mathbf{F}_i$ vseh c rojev. Nadaljujemo z določitvijo uteži $\mathbf{w}_i = [w_{i0}, w_{i1}, \dots, w_{i6}]^T$ vseh c lokalnih modelov. Posledične parametre modela moči TS določimo s pomočjo metode PSO z mutacijo. Postopek optimiranja posledičnih parametrov je podrobneje opisan v poglavju 4.4. Spodaj so prikazani izbrani parametri in lastnosti modela moči TS:

Simbol izhoda modela temperature	—	$\hat{T}_2$
Število rojev c	—	4
Faktor mehкости η	—	1,5
Število posledičnih parametrov d	—	24
Čas vzorčenja t_s	—	5 s

Nakažimo primer, ko delovanje modela moči TS ni ustrezno. Predpostavimo, da se zgodi sprememba masnega pretoka kisika. To lahko povzroči zamenjavo najvplivnejšega roja mehkega modela. Lokalni model, ki je vezan na novi najvplivnejši roj, pa ima lahko povsem drugačne lastnosti moči izgub $\hat{P}_{i,iz}$. Sprememba vpihovanja kisika v talino pa ne bi smela imeti vpliva na moč izgub taline jekla P_{iz} , kot smo predpostavili v poglavju 3.3. V naslednjem poglavju predstavimo rešitev, ki omenjene pomanjkljivosti odpravi.

4.2.3 Model treh moči TS

S tremi modeli moči TS nadgradimo model moči TS iz prejšnjega poglavja. Izračun ocene temperature taline ohranimo iste oblike, kot je prikazano v enačbi (4.3). Spreminjanje ocene moči $\hat{P}$ nadgradimo, tako da jo razdelimo na tri modele moči TS. Enačba (4.9) prikazuje izračun ocene moči $\hat{P}$ iz treh modelov TS.

$$\hat{P}(\mathbf{u}(k), \hat{T}(k)) = \hat{P}_{el}(m_{vz}, P_{tr}(k)) + \hat{P}_{kem}(\dot{m}_C(k), \dot{m}_{O_2}(k)) + \hat{P}_{iz}(m_{vz}, \hat{T}(k)) \quad (4.9)$$

Enačba (4.10) prikazuje model TS, ki opisuje moč električnega oblaka. Izhajamo iz predpostavljene odvisnosti (3.21). Pripadnostno funkcijo $\mu_{el,i}$ določimo v prostoru spremenljivk $\{m_{vz}, P_{el}\}$. Enačba (4.11) prikazuje model TS, ki opisuje moč kemijskih reakcij. Izhajamo iz predpostavljene odvisnosti (3.22). Pripadnostno funkcijo $\mu_{kem,i}$ določimo v prostoru spremenljivk $\{\dot{m}_C, \dot{m}_{O_2}\}$. Nazadnje enačba (4.12) prikazuje model TS, ki opisuje moč izgub taline jekla. Izhajamo iz predpostavljene odvisnosti (3.23). Pripadnostno funkcijo $\mu_{iz,i}$ določimo v prostoru spremenljivke $\{m_{vz}\}$.

$$\hat{P}_{el} = \sum_{i=1}^{c_{el}} \mu_{el,i}(m_{vz}, P_{el}(k)) \hat{P}_{el,i}(P_{el}(k)) \quad (4.10)$$

$$\hat{P}_{kem} = \sum_{i=1}^{c_{kem}} \mu_{kem,i}(\dot{m}_C(k), \dot{m}_{O_2}(k)) \hat{P}_{kem,i}(\dot{m}_C(k), \dot{m}_{O_2}(k)) \quad (4.11)$$

$$\hat{P}_{iz} = \sum_{i=1}^{c_{iz}} \mu_{iz,i}(m_{vz}) \hat{P}_{iz,i}(\hat{T}(k)) \quad (4.12)$$

Lokalni modeli ohranijo enako obliko, kot pri modelu moči TS prikazanem v prejšnjem poglavju. Nekoliko smo spremenili le poimenovanje posledičnih parametrov, da ustrezajo nadgrajenim modelom.

$$\hat{P}_{el,i} = w_{el,i1} P_{tr}(k) \quad (4.13)$$

$$\hat{P}_{kem,i} = w_{kem,i1} \dot{m}_C(k) + w_{kem,i2} \dot{m}_{O_2}(k) \quad (4.14)$$

$$\hat{P}_{iz,i} = w_{iz,i0} + w_{iz,i1}(\hat{T}(k) - T_{tal}) + w_{iz,i2}(\hat{T}(k) - T_{tal})^2 \quad (4.15)$$

Parametri modela treh moči TS. Z metodo mehkega rojenja GK določimo središča in matrike notranjega produkta za vse tri modele moči TS. Pri tem je po-

trebno izbrati število rojev in faktor mehkosti za vsakega od modelov TS. Paziti moramo, saj imajo pripadnostne funkcije vsakega modela TS drugačne vhodne spremenljivke. Posledične parametre vseh treh modelov TS določimo z metodo PSO z mutacijo. Postopek optimiranja posledičnih parametrov je podrobneje opisan v poglavju 4.4. Spodaj so prikazani izbrani parametri in lastnosti modelov TS:

Simbol izhoda modela temperature	—	$\hat{T}_3$
Število rojev c_{el}	—	2
Število rojev c_{kem}	—	4
Število rojev c_{iz}	—	2
Faktor mehkosti η_{el}	—	1,2
Faktor mehkosti η_{kem}	—	1,5
Faktor mehkosti η_{iz}	—	1,15
Število posledičnih parametrov d	—	16
Čas vzorčenja t_s	—	5 s

4.3 Odstranjevanje neustreznih meritev

Pogovorno pravimo, da so osnova za “dober” model “dobri” podatki. S predobdelavo podatkov poskušamo odpraviti nepravilnosti, ki se med podatki pogosto pojavljajo. V poglavju opišemo postopek detekcije neustreznih meritev temperature taline v EOP pri procesu rafinacije. Podatke odstranjujemo zgolj v učni množici.

Na sliki 2.6 opazimo, da je nekaj meritev temperature pod tališčem jekla. Najverjetneje so bile meritve nepravilno izvedene, zato odstranimo vse meritve temperature, ki se nahajajo pod tališčem jekla.

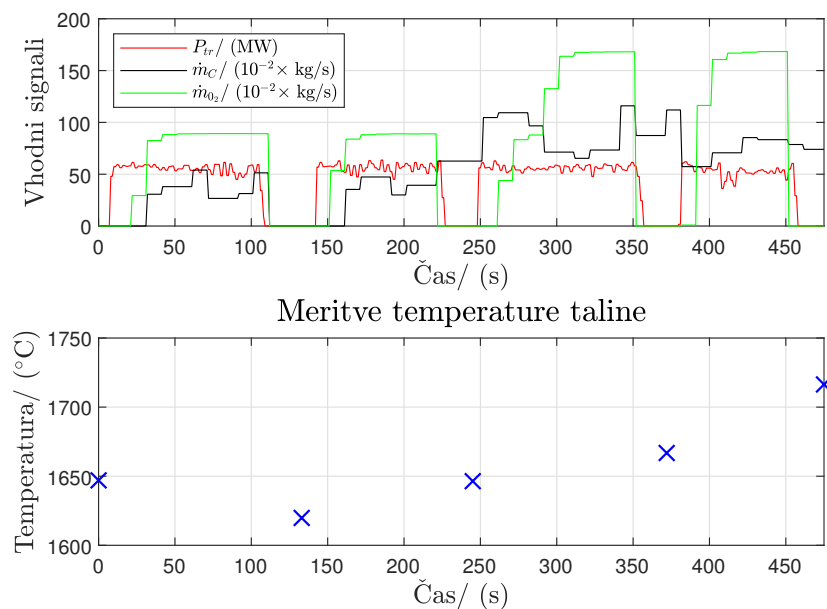
Na sliki 2.7 opazimo, da približno 4 % šarž vsebuje samo eno meritev temperature taline. Prva meritev se uporabi za inicializacijo modela temperature taline in tako ne preostane nobena meritev, s katero bi lahko ovrednotili model. Vse šarže z eno meritvijo temperature taline odstranimo.

Pri nekaterih šaržah se na začetku pojavi nekaj napačnih meritev, sledi daljše

časovno obdobje brez meritev, na koncu pa sledi še nekaj meritev temperature. Gre za napako v zajemu podatkov. Ob podrobnem pregledu teh šarž smo ugotovili, da nam celotnih šarž ni potrebno zavreči. Vsem šaržam, ki trajajo več kot 1100 sekund, odstranimo začetne meritve temperature taline.

Pri pregledu meritev temperature smo opazili zanimiv trend. Pogoste neustrezne meritve temperature taline opazimo med začetnimi meritvami, kjer se kljub dodajanju velikih količin energije temperatura taline minimalno poveša ali celo zniža. Slika 4.1 prikazuje en primer, kjer lahko vidimo, da je prišlo do neustrezne meritve temperature taline. Vzbujanje med prvo in drugo ter drugo in tretjo meritvijo temperature taline je dokaj podobno. Opazimo, da se v prvem primeru temperatura zniža za okoli $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, v drugem primeru pa zviša za približno $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na podlagi teorije lahko sklepamo, da se temperatura taline ob takšnem vzbujanju poveša. Iz tega razloga sklepamo, da je prva meritev neustrezna.

Primer šarže z neustreznimi meritvami



Slika 4.1: Primer šarže z neustreznimi meritvami temperature taline.

Omenjene nepravilnosti pri meritvah temperature taline lahko nastanejo iz treh glavnih razlogov:

1. ob začetku procesa rafinacije (prva meritev temperature taline) odpadno jeklo še ni v celoti staljeno. Dodana energija se lahko delno porablja za taljenje odpadnega jekla,
2. temperatura taline jekla je nehomogena,
3. pri izvajanju meritev temperature taline se lahko zgodi napaka. Na primer, izmerjena temperatura na senzorju se še ni ustalila, ko se izvede meritev.

Neustrezne meritve temperature taline želimo v največji možni meri odstraniti, ker otežujejo učenje modela temperature taline. Predstavimo dvostopenjsko strategijo za izločanje neustreznih meritev v učni množici:

1. na podlagi teoretičnega znanja določimo maksimalno spodnjo in zgornjo mejo spremembe temperature glede na vzbujanje sistema. Odstranimo vse meritve temperature, ki se ne nahajajo znotraj dovoljenega intervala med spodnjo in zgornjo mejo,
2. na preostalih podatkih določimo enostavni model temperature. Odstranimo začetne meritve temperature, ki ne izpolnjujejo izbranega kriterija.

V naslednjih dveh podpoglavjih podrobneje predstavimo dvostopenjsko strategijo za izločanje napačnih meritev v učni množici.

4.3.1 Odstranjevanje neustreznih meritev - Prvi del

Začnemo s prvim delom strategije izločanja neustreznih meritev. Na podlagi teorije poskušamo določiti meje, kako vhodne veličine minimalno in maksimalno vplivajo na spremembo temperature taline. Omenili smo, da se med začetnimi meritvami pojavlja več neustreznih meritev, ker dodano odpadno jeklo mogoče še ni povsem staljeno. Ker so končne meritve bolj zanesljive, bi lažje zaznali neustrezne meritve, če bi začeli detekcijo pri zadnji meritvi. Iz tega razloga začnemo

detekcijo neustreznih meritev pri zadnji meritvi in se od tam v negativni časovni smeri pomikamo proti začetni meritvi. Enačba (4.16) prikazuje modificirano diferenčno enačbo (3.24), kjer dovoljujemo negativno časovno smer simulacije. Ker imamo meritve izmerjene vnaprej, lahko to enostavno izvedemo. Z enačbo (4.16) definiramo dva modela temperature taline, ki predstavljata spodnjo in zgornjo teoretično mejo. Modela označimo z $i = \{min, max\}$.

$$\tilde{T}_i(k-1) = \tilde{T}_i(k) - \frac{t_s}{m_{vl}C_{P,tal}}P(k-1) \quad (4.16)$$

V enačbi (3.20) je prikazana razdelitev moči P na tri faktorje, in sicer P_{el} , P_{kem} in P_{iz} . Enačba (4.17) prikazuje razpisano spodnjo in zgornjo mejo moči segrevanja taline, kjer je $i = \{min, max\}$.

$$\tilde{P}_i(k) = \tilde{P}_{el,i}(k) + \tilde{P}_{kem,i}(k) + \tilde{P}_{iz,i}(k) \quad (4.17)$$

Najprej se posvetimo prvemu faktorju $\tilde{P}_{el}$. Teoretično maksimalno je moč merjena na transformatorju P_{tr} enaka moči P_{el} . Teoretični ideal pa ni nikoli dosežen, ker se del energije porabi za prenos po električni napeljavi od transformatorja do elektrod. Poleg tega električni obloki ne segrevajo le taline jekla, ampak se energija izgublja tudi v preostale dele EOP, kar dodatno niža izkoristek. S preizkušanjem na podatkih smo določili spodnjo in zgornjo mejo izkoristka električne moči, ki znašata $\epsilon_{el,min} = 40 \%$ in $\epsilon_{el,max} = 80 \%$. Enačba (4.18) prikazuje izračun spodnje in zgornje meje moči $\tilde{P}_{el,i}$, kjer je $i = \{min, max\}$.

$$\tilde{P}_{el,i}(k) = \epsilon_{el,i}P_{tr}(k) \quad (4.18)$$

Nadaljujemo z oceno moči kemijskih reakcij $\tilde{P}_{kem}$. V poglavju 3.4 smo se posvetili energiji, ki se sprosti oz. porabi pri kemijskih reakcijah v EOP. V omenjenem poglavju smo navedli številne predpostavke, ki pri dejanskih reakcijah v EOP ne veljajo, zato nadaljnji izračuni služijo zgolj kot okvirne ocene. Enačba (4.19) prikazuje izračun zgornje in spodnje meje moči kemijskih reakcij, kjer je $i = \{min, max\}$.

$$\tilde{P}_{kem,i}(k) = \epsilon_{endo,i}\tilde{P}_{endo}(k) + \epsilon_{ekso,i}\tilde{P}_{ekso}(k) \quad (4.19)$$

Enačba (4.20) prikazuje izračun ocene moči endotermnih reakcij, enačba (4.21) pa oceno moči eksotermnih reakcij:

$$\tilde{P}_{endo}(k) = -\frac{\Delta H_{r-Fe}(k)}{t_s}, \quad (4.20)$$

$$\tilde{P}_{ekso}(k) = -\frac{1}{t_s} [\Delta H_{r-FeO}(k) + \Delta H_{r-CO}(k) + \Delta H_{r-CO_2}(k)], \quad (4.21)$$

pri čemer ΔH_{r-xx} predstavlja reakcijsko entalpijo pri reakciji, kjer nastane produkt xx . Reakcijsko entalpijo izračunamo po enačbi (3.38). Enačbi (4.20) in (4.21) vsebujeta čas vzorčenja t_s , vendar izračun ocene moči endotermnih in eksotermnih reakcij ni odvisen od časa vzorčenja, saj se le-ta krajša s časom vzorčenja v enačbah za izračun množine snovi (3.29) in (3.30). V tabeli (4.1) so prikazani uporabljeni konstantni deleži razdelitve množine kisika in ogljika med reakcije, ki potekajo v EOP. S preizkušanjem na podatkih smo določili spodnjo in zgornjo mejo izkoristka endotermnih in eksotermnih reakcij za segrevanje/ohlajanje taline jekla. Izkoristki za endotermne reakcije znašajo $\epsilon_{endo,min} = 70\%$ in $\epsilon_{endo,max} = 10\%$. Za eksotermne reakcije pa znašajo $\epsilon_{ekso,min} = 40\%$ in $\epsilon_{ekso,max} = 80\%$.

Tabela 4.1: Konstante deležev razdelitve množine kisika in ogljika med reakcijami v EOP

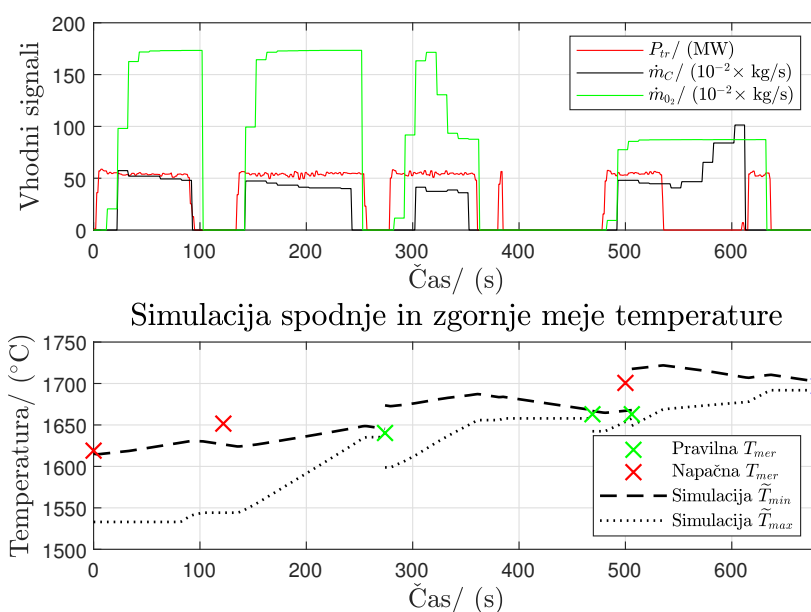
Deleži ogljika	$K_{C-xx} / \%$	Deleži kisika	$K_{O_2-xx} / \%$
K_{C-Fe}	20	K_{O_2-FeO}	70
K_{C-CO}	40	K_{O_2-CO}	10
K_{C-CO_2}	40	$K_{O_2-CO_2}$	20

Preostane še moč izgub taline jekla $\tilde{P}_{iz}$. Z opazovanjem meritev smo se odločili, da območje taline jekla oddaja maksimalno 15 MW moči v preostala območja ($\tilde{P}_{iz,min} = -15$ MW). Za zgornjo mejo pa smo določili, da talina jekla ne oddaja in ne sprejema nič moči $\tilde{P}_{iz,max}$.

Slika 4.2 prikazuje primer šarže, kjer je prikazana detekcija neustreznih meritev, s pomočjo dveh teoretičnih modelov temperature taline. Simulacijo začnemo skrajno desno, pri zadnji meritvi temperature taline (modri križec T_{mer}). Modelu

(črtkana črna $\tilde{T}_{min}$), ki opisuje spodnjo teoretično mejo temperature taline, nastavimo za 5 °C višjo začetno temperaturo od meritve temperature. Podobno modelu (točkasta črna $\tilde{T}_{max}$), ki opisuje zgornjo teoretično mejo temperature taline, nastavimo za 5 °C nižjo začetno temperaturo od meritve. Namen tega je nekoliko razširiti sprejemljivi pas temperatur taline. V negativni časovni smeri simuliramo oba modela, dokler ne pridemo do naslednje (prejšnje) meritve temperature. Meritev označimo kot pravilno (zeleni križec T_{mer}), če se nahaja med simuliranimi temperaturama $\tilde{T}_{min}$ in $\tilde{T}_{max}$. Obema modeloma ponastavimo začetne vrednosti glede na novo določeno pravilno meritev. Meritev označimo kot napačno (rdeči križec T_{mer}), če se ne nahaja med simuliranimi temperaturama $\tilde{T}_{min}$ in $\tilde{T}_{max}$. Tokrat ne ponastavimo vrednosti modelov, ampak nadaljujemo simulacijo z obstoječimi vrednostmi spodnje in zgornje meje temperature. Na intervalu [0 – 80] sekund opazimo, da se vrednost temperature $\tilde{T}_{max}$ ne spreminja. Razlog je v tem, da ne dopuščamo temperature pod tališčem jekla.

Detekcija neustreznih meritev temperature



Slika 4.2: Primer detekcije neustreznih meritev v šarži s simulacijo teoretičnega modela spodnje in zgornje meje v negativni časovni smeri.

Opisana metoda odstranjevanja meritev na osnovi teoretičnega znanja ima tudi nekaj pomanjkljivosti. Metoda predpostavlja, da je zadnja meritev tempe-

rature taline pravilna, kar vedno ne drži. Poleg tega ima metoda težave, če je med meritvami temperature prevelik časovni interval. Daljši kot je čas med meritvami temperature, vse bolj se povečuje sprejemljivo temperaturno območje, kjer je meritev zaznana kot ustrezna. Zaradi tega metoda ne uspe zaznati neustreznih meritev, kjer je čas med meritvami temperature relativno velik. V naslednjem poglavju poskušamo detektirati še vse preostale neustrezne meritve, ki jih predstavljena metoda na osnovi teoretičnega znanja ni uspela zaznati.

4.3.2 Odstranjevanje neustreznih meritev - Drugi del

Med meritvami temperature taline opazimo veliko število neustreznih začetnih meritev, kljub odstranjevanju z metodo, opisano v prejšnjem poglavju. Predlagamo enostavni model temperature taline, ki ga opisuje naslednja enačba:

$$\hat{T}(k+1) = \hat{T}(k) + \frac{t_s}{m_{vz}C_{P,tal}}(w_1P_{tr}(k) + w_2\tilde{P}_{endo}(k) + w_3\tilde{P}_{ekso}(k) + w_4) \quad (4.22)$$

pri čemer predstavlja $\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3, w_4]^T$ parametre modela. Na preostalih podatkih v učni množici določimo parametre enostavnega modela z uporabo metode PSO z mutacijo. Uporabimo enake nastavitve parametrov metode PSO, kot pri optimiranju posledičnih parametrov modela TS, kar je podrobneje predstavljeno v poglavju 4.4.

Uvedemo nov kriterij J za odstranjevanje neustreznih začetnih meritev temperature, ki je prikazan v enačbi (4.23). Za kriterij izberemo normirano vsoto napake med simulirano temperaturo taline in meritvami temperature. Spremenljivka N predstavlja število meritev temperature v šarži, $T_{mer}(j)$ predstavlja j -to meritev temperature taline, $\hat{T}^*(j)$ pa predstavlja vrednost simulirane temperature ob j -ti meritvi. Pozitivna vrednost J pomeni previsoko oceno temperature, medtem ko negativna vrednost pomeni prenizko oceno temperature čez celotno trajanje rafinacije. Z večkratnim poskušanjem in pregledovanjem odstranjenih začetnih meritev smo ocenili zgornjo in spodnjo mejo kriterija J , ki ga prikazuje neenačba (4.24). Šaržam, ki ne izpolnjujejo pogoja neenačbe (4.24), smo odstranili začetno meritev temperature taline. Postopek odstranjevanja začetnih meritev smo ponovili trikrat. Tako smo v nekaterih šaržah odstranili tudi prve

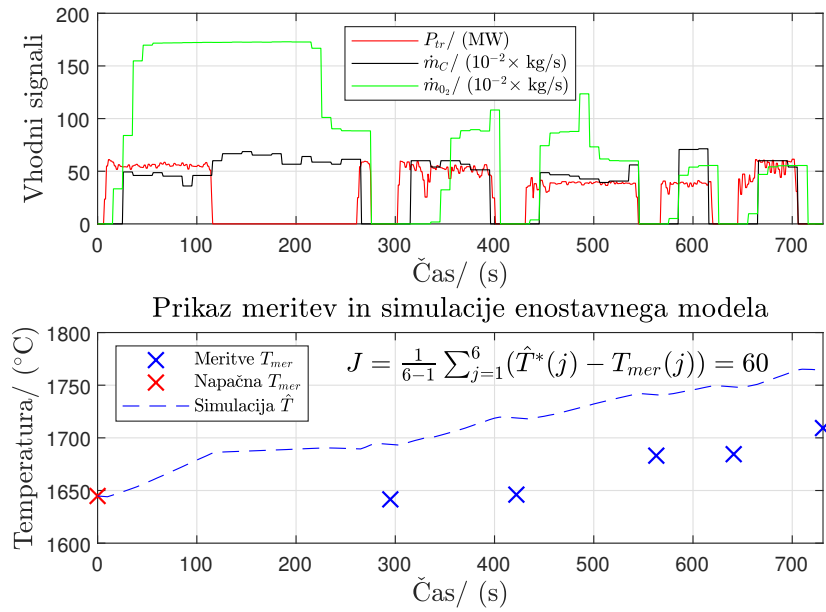
tri meritve temperature taline.

$$J = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\hat{T}^*(j) - T_{mer}(j)) \quad (4.23)$$

$$-30 < J < 15 \quad (4.24)$$

Primer simulacije enostavnega modela in detekcije neustrezne začetne meritve temperature je prikazan na sliki 4.3. Čez celoten potek rafinacije opazimo previsoko oceno temperature, kar nakazuje visoka vrednost kriterija J . Začetno meritev na prikazanem primeru odstranimo, ker ne zadovolji pogoja neenačbe (4.24).

Detekcija neustrezne začetne meritve



Slika 4.3: Primer detekcije neustrezne začetne meritve temperature taline s pomočjo enostavnega modela temperature taline.

4.4 Optimiranje posledičnih parametrov modelov TS

V poglavju predstavimo potek določanja parametrov modelov temperature v EOP pri procesu rafinacije. Vsi podatki so vnaprej znani, zato ni potrebe po sočasnem načinu učenja, kar odpira možnost uporabe časovno potratnejših algoritmov. Za

določanje parametrov modelov TS uporabimo učno množico podatkov, v kateri smo odstranili vse detektirane neustrezne meritve temperature. Najprej določimo parametre v premisi pravil z metodo mehkega rojenja GK. Parametre metode GK smo za vsak model TS podali v poglavju 4.2. Nazadnje določimo še posledične parametre modelov TS z metodo PSO z mutacijo.

V literaturi [10] in [11] je predlagana določitev posledičnih parametrov modela TS z metodo najmanjših kvadratov. V našem primeru pa nimamo primer-
nih vhodno-izhodnih parov podatkov, da bi lahko izvedli takšno učenje. Izhodne meritve temperature taline namreč niso dovolj pogoste. Ustrezna interpolacija med meritvami pa bi bila prezahtevna. Iz tega razloga smo se odločili uporabiti metodo PSO z mutacijo, ki predstavlja dobro alternativo za hitro določanje parametrov modela. Med meritvami temperature se še vedno nahajajo neustrezne meritve, kljub njihovem odstranjevanju, ki smo ga predstavili v poglavju 4.3. Vpliv neustreznih meritev na učenje omilimo tako, da razrežemo šarže na zaporedne pare meritev temperature. Na primer, kjer šarža vsebuje pet meritev temperature, razdelimo šaržo na štiri zaporedne pare meritev temperature. Za vsak par meritev simuliramo izbrani model temperature. Začetno vrednost temperature modela inicializiramo na vrednost prve meritve temperature v paru meritev. Enačba (4.25) prikazuje izračun kriterijske funkcije absolutne napake med modelom in meritvami za vse zaporedne pare meritev temperature:

$$J_{učna} = \bar{e}_{par} = \frac{1}{N_{par}} \sum_{i=1}^{N_{par}} e_{par}(i), \quad (4.25)$$

$$e_{par}(i) = |\hat{T}_i^*(2) - T_{mer,i}(2)|, \quad (4.26)$$

pri čemer $T_{mer,i}(2)$ predstavlja drugo meritev v i -tem paru zaporednih meritev temperature taline in $\hat{T}_i^*(2)$ vrednost simulirane temperature modela ob enakem času kot meritev $T_{mer,i}(2)$. Napaka e_{par} predstavlja vektor absolutne napake vseh zaporednih parov meritev temperature iz vseh šarž v izbrani množici podatkov, spremenljivka N_{par} pa število vseh parov meritev oz. velikost vektorja e_{par} . Absolutno napako smo izbrali zaradi manjše občutljivosti na izjemne podatke v primerjavi s kvadratično napako [11].

Parametri metode PSO z mutacijo. Maksimalno število iteracij r_{max} smo nastavili na 200 iteracij. Konstanti kognitivnega c_1 in socialnega c_2 obnašanja smo

nastavili na vrednosti 2,05. Število delcev n določimo z enačbo (4.27), ki je odvisna od števila parametrov d , ki jih z metodo določamo. Maksimalno vrednost mutacije λ_{max} smo nastavili na 5 %, maksimalno število stagnacije algoritma $stag_{max}$ pa na 50 iteracij. Dobra praksa je algoritem PSO zagnati večkrat, saj kljub dodani mutaciji, metodi pogosto ne uspe najti rešitve izven okolice svojega lokalnega minimuma. Vsem trem predlaganim modelom temperature taline določimo parametre v posledičnem delu s pomočjo metode PSO z mutacijo.

$$n = \left\lceil 10 + 2\sqrt{d} \right\rceil \quad (4.27)$$

Pri vsaki optimizaciji z metodo PSO je potrebno nastaviti meje prostora $\mathbf{x}_{min}$ in $\mathbf{x}_{max}$. Bolje kot omejimo prostor rešitev, hitrejšo konvergenco metode lahko pričakujemo. Za vsako dimenzijo posebej je torej potrebno določiti zgornjo in spodnjo mejo. Nakažemo postopek določitve omejitve prostora parametrov posledičnega dela, ki velja za model treh moči TS ($\hat{T}_3$). Izhajamo iz poglavja 4.3.1, kjer smo določili spodnjo in zgornjo mejo moči dovajanja energije v talino. Iz enačbe (4.18) določimo zgornjo in spodnjo mejo električne moči:

$$\epsilon_{el,min} < w_{el,i1} < \epsilon_{el,max} \quad \forall i, \quad (4.28)$$

pri čemer smo električne izkoristke $\epsilon_{el,min}$ in $\epsilon_{el,max}$ določili v poglavju 4.3.1.

Parametre $w_{kem,i1}$ in $w_{kem,i2}$ omejimo z neenačbama (4.29) in (4.30):

$$w_{kem,1-min} < w_{kem,i1} < w_{kem,1-max} \quad \forall i, \quad (4.29)$$

$$w_{kem,2-min} < w_{kem,i2} < w_{kem,2-max} \quad \forall i. \quad (4.30)$$

Za določanje mej omenjenih parametrov smo uporabili enačbo (4.19). Najprej določimo spodnjo mejo $w_{kem,1-min}$. Pri izračunu enačbe (4.31) upoštevamo masni pretok ogljika $\dot{m}_C = 1$ kg/s in onemogočimo dodajanje kisika ($\dot{m}_{O_2} = 0$):

$$w_{kem,1-min} = \tilde{P}_{kem,min} \approx -8,9 \text{ MW}. \quad (4.31)$$

Zgornjo mejo $w_{kem,1-max}$ določimo podobno kot v zgornjem primeru, ampak sedaj dopustimo vpihovanje kisika ($\dot{m}_{O_2} \neq 0$). Množino ogljika v celoti razdelimo med tri reakcije, kot prikazuje levi stolpec tabele 4.1. Ne upoštevamo pa reakcije

oksidacije železa, saj ogljik v njej ne nastopa. Enačba (4.32) prikazuje izračun zgornje meje $w_{kem,1-max}$:

$$w_{kem,1-max} = \tilde{P}_{kem,max} - \left(-\frac{1}{t_s} \Delta H_{r,FeO} \right) \approx +12 \text{ MW}. \quad (4.32)$$

Spodnja meja $w_{kem,2-min}$ določa minimalno moč kemijskih reakcij, ki jo povzroči masni pretok kisika enak $\dot{m}_{O_2} = 1 \text{ kg/s}$. Dopustimo dodajanje ogljika ($\dot{m}_C \neq 0$). Množino kisika v celoti razdelimo med tri reakcije, kot prikazuje desni stolpec tabele 4.1. Upoštevamo samo eksotermne reakcije, saj kisik ne nastopa pri endotermnih reakcijah. Enačba (4.33) prikazuje izračun spodnje meje $w_{kem,2-min}$:

$$w_{kem,2-min} = \epsilon_{kem,min} \tilde{P}_{ekso} \approx +5 \text{ MW}. \quad (4.33)$$

Zgornjo mejo $w_{kem,2-max}$ določimo tako, da predpostavimo vpihovanje kisika $\dot{m}_{O_2} = 1 \text{ kg/s}$, dodajanje ogljika pa onemogočimo ($\dot{m}_C = 0$). Enačba (4.34) prikazuje izračun zgornje meje $w_{kem,2-max}$:

$$w_{kem,2-max} = \tilde{P}_{kem,max} \approx +12 \text{ MW}. \quad (4.34)$$

Preostane nam še določitev mej parametrov $w_{iz,i0}$, $w_{iz,i1}$ in $w_{iz,i2}$, kar prikazuje neenačba (4.35). Uporabimo podobne omejitve, kot smo jih predstavili v poglavju 4.3.1. Navzgor omejimo vse parametre na moč izgub enako 0 MW, kar prikazuje enačba (4.37). Navzdol pa omejimo moč izgub tako, da ima lahko vsak člen minimalno vrednost -15 MW pri temperaturi $T = T_{tal} + 230 \text{ °C}$, kar je prikazano v enačbi (4.36).

$$w_{iz,ij-min} < w_{iz,ij} < w_{iz,ij-max}, \quad \forall i \wedge \forall j \quad (4.35)$$

$$w_{iz,ij-min} = -\frac{1}{230^j} 15 \text{ MW}, \quad \forall i \wedge \forall j \quad (4.36)$$

$$w_{iz,ij-max} = 0, \quad \forall i \wedge \forall j \quad (4.37)$$

S podobnim razmišljanjem smo omejili posledične parametre ostalih modelov TS in enostavnega modela temperature taline.

Pri metodi PSO je potrebno nastaviti tudi omejitve hitrosti delcev $\mathbf{v}_{max}$, z namenom doseganja hitrejše konvergenca. Z enačbo (4.38) omejimo hitrost delcev na velikost območja posamezne spremenljivke.

$$\mathbf{v}_{max} = \mathbf{x}_{max} - \mathbf{x}_{min} \quad (4.38)$$

5 Rezultati in diskusija

V poglavju predstavimo rezultate dela. Začnemo s poglavjem 5.1, kjer definiramo funkcije za vrednotenje modelov. Sledi poglavje 5.2, kjer prikažemo nekaj vmesnih rezultatov in ovrednotimo modele temperature taline. Mehki model temperature taline primerjamo s teoretičnim modelom EOP. Nazadnje sledi še krajša diskusija v poglavju 5.3.

5.1 Vrednotenje modelov

Najprej za splošni vektor $\mathbf{x}$ definiramo oceno srednje vrednosti $\bar{x}$ in oceno standardnega odklona $\sigma(\mathbf{x})$ z enačbama:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \mathbf{x}(i), \quad (5.1)$$

$$\sigma^2(\mathbf{x}) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}(i) - \bar{x})^2, \quad (5.2)$$

pri čemer $\mathbf{x}(i)$ predstavlja i -ti element vektorja $\mathbf{x}$, N pa dolžino vektorja $\mathbf{x}$.

Vrednotenje modelov temperature izvedemo na množici testnih podatkov, ki je nismo uporabili za učenje modela. Ali se model obnaša zadovoljivo podobno modeliranemu sistemu, preverimo z enačbo (5.3). Spremenljivka $N_{\text{šarž}}$ predstavlja število šarž v obravnavani množici podatkov. Napaka $e_{\text{šarža}}(i)$ prikazuje vsoto absolutne napake med modelom in meritvami temperature za i -to šaržo. Spremenljivka $T_{\text{mer},i}(j)$ predstavlja j -to meritev temperature taline v i -ti šarži, $\hat{T}_i^*(j)$ pa predstavlja vrednost simulirane temperature modela ob enakem času kot

meritev $T_{mer,i}(j)$. Spremenljivka $N_{mer,i}$ predstavlja število meritev temperature v i -ti šarži. Vsoto v enačbi (5.4) začnemo pri drugi meritvi ($j = 2$), ker prvo meritev temperature uporabimo za inicializacijo modela. Iz tega razloga normiramo vsoto s faktorjem $(N_{mer,i} - 1)^{-1}$, tako da napaka $e_{sarža}(i)$ predstavlja povprečno odstopanje modela temperature taline v i -ti šarži.

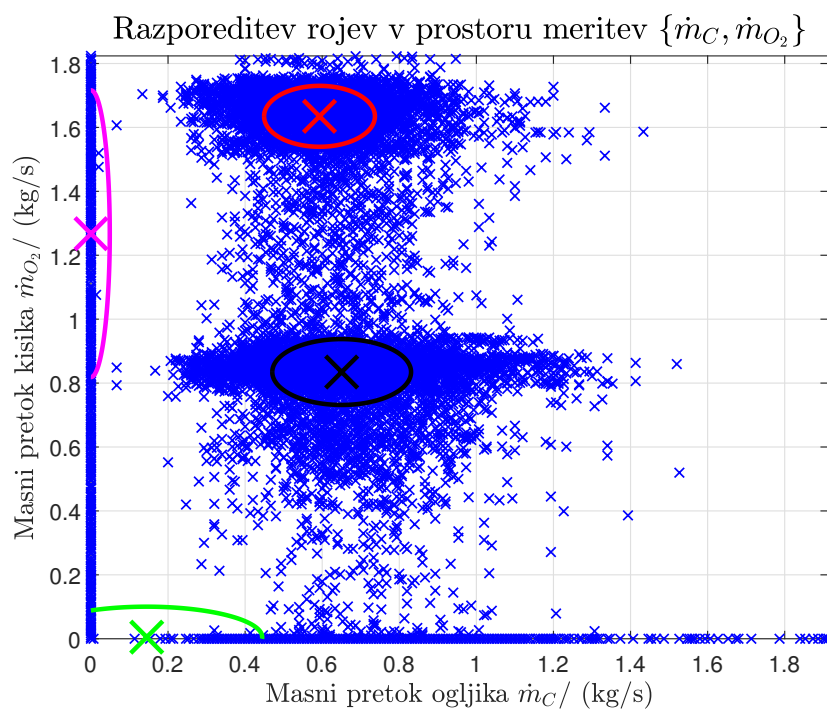
$$J_{testna} = \bar{e}_{sarža} = \frac{1}{N_{sarž}} \sum_{i=1}^{N_{sarž}} e_{sarža}(i) \quad (5.3)$$

$$e_{sarža}(i) = \frac{1}{N_{mer,i} - 1} \sum_{j=2}^{N_{mer,i}} |\hat{T}_i^*(j) - T_{mer,i}(j)| \quad (5.4)$$

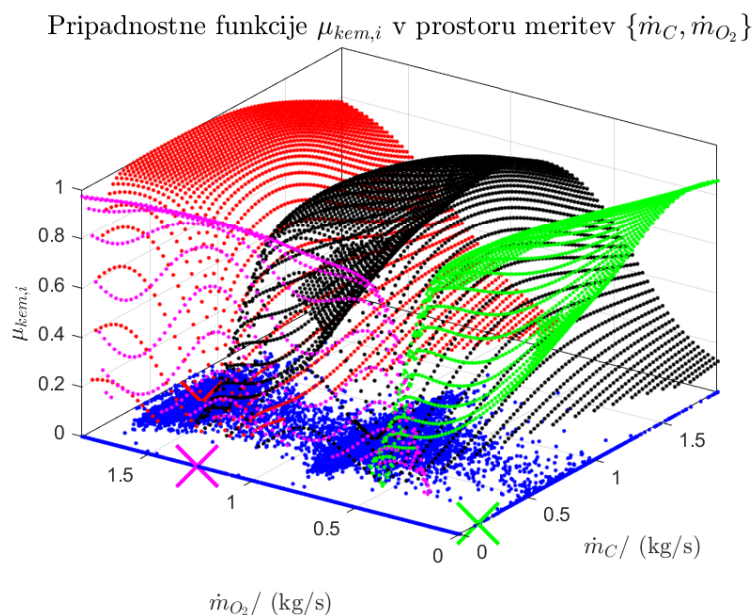
5.2 Rezultati

V poglavju nakažemo najprej nekaj vmesnih rezultatov deljenja prostora z metodo GK in določanja posledičnih parametrov z metodo PSO z mutacijo. Nato prikažemo končne rezultate modelov temperature taline in njihovo primerjavo s teoretičnim modelom EOP.

Primer rezultata deljenja prostora $\{\dot{m}_C, \dot{m}_{O_2}\}$ z metodo GK prikazuje slika 5.1. Meritve so označene z majhnimi modrimi križci. V omenjenem prostoru meritev smo z metodo GK določili središča in kovariančne matrike štirih rojev. Središča so prikazana z velikimi barvnimi križci, okrog križca pa je narisana ena standardna deviacija, ki jo določimo iz kovariančne matrike roja. Iz pridobljenih središč, matrik notranjega produkta in predpisanega faktorja mehkosti lahko določimo pripadnostne funkcije $\mu_{kem,i}$ vseh rojev, ki so prikazane na sliki 5.2. Vse vrednosti pripadnostnih funkcij, ki so nižje od 10 %, smo odstranili zaradi lažjega pregleda. Točke, kjer smo ovrednotili pripadnostne funkcije, so ekvidistantne.

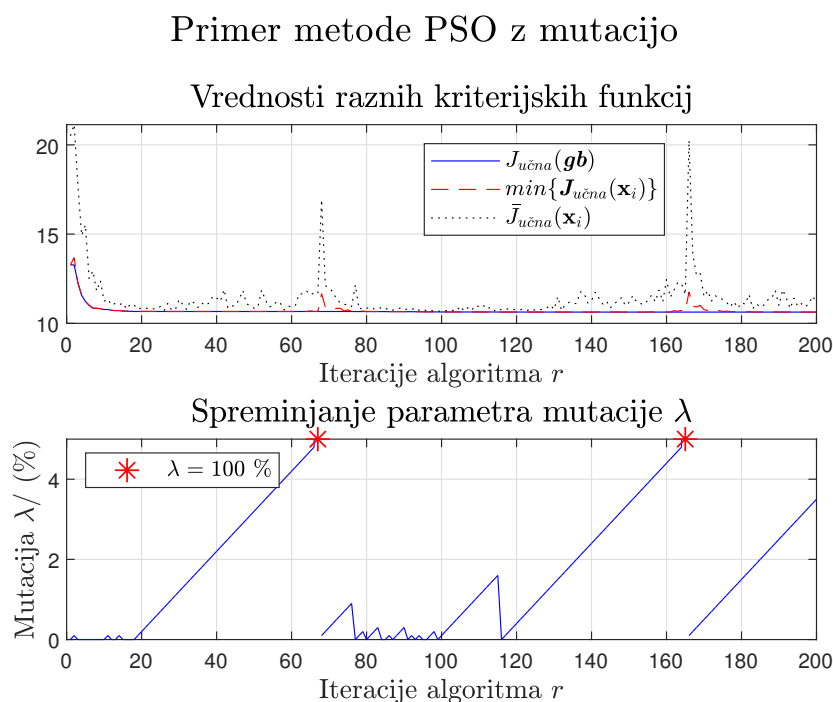


Slika 5.1: Primer razporeditve rojev z metodo GK v prostoru meritev masnega pretoka ogljika in kisika.



Slika 5.2: Prikaz pripadnostnih funkcij rojev v prostoru meritev masnega pretoka ogljika in kisika.

Slika 5.3 prikazuje primer določanja posledičnih parametrov modela temperature taline z metodo PSO z mutacijo. Zgornji graf na sliki 5.3 prikazuje spreminjanje kriterijske funkcije najboljšega delca (polna modra), kriterijsko funkcijo trenutnega najboljšega delca (črtkana rdeča) in povprečje kriterijskih funkcij trenutnih delcev (točkasta črna). Na spodnjem grafu slike 5.3 je prikazano spreminjanje vrednosti mutacije λ skozi iteracije algoritma. Skok mutacije na vrednost ena je prikazan z rdečo zvezdico, zaradi boljšega pregleda nad spreminjanjem mutacije.



Slika 5.3: Primer optimizacije z metodo PSO. Zgornji graf prikazuje spreminjanje ključnih vrednosti kriterijskih funkcij delcev. Spodnji graf pa prikazuje spreminjanje mutacije.

Rezultati treh modelov temperature taline na učnih in na testnih podatkih so prikazani v tabeli 5.1. Pri učenju z metodo PSO ne moremo zagotoviti globalno optimalnega rezultata, ker se metoda pogosto ujame v lokalnem minimumu, zato smo večkrat učili modele temperature taline. Rezultate kriterijskih funkcij $J_{učna}$ in J_{testna} vsakega poskusa učenja shranimo v vektorja $\mathbf{J}_{učna}$ in $\mathbf{J}_{testna}$. V tabeli 5.1 so prikazani rezultati, kjer smo učenje ponovili dvajsetkrat ($N = 20$). Rezultati prikazujejo povprečja in standardne odklone kriterijskih funkcij pri N -kratnem

učenju. Opazimo, da so standardni odkloni vektorja kriterijske funkcije $\mathbf{J}_{učna}$ nekoliko manjši od standardnih odklonov $\mathbf{J}_{testna}$. Iz tabele 5.1 lahko razberemo, da je večkratno učenje modelov vsekakor zaželeno.

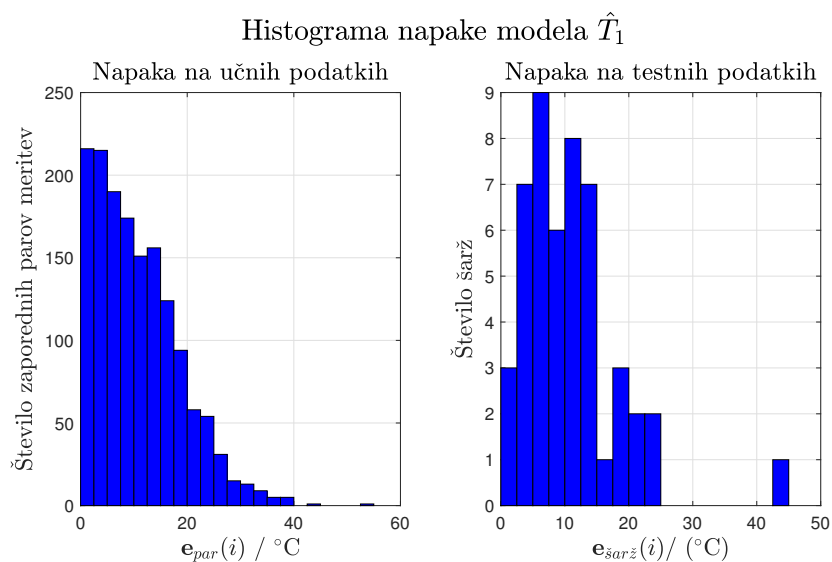
Tabela 5.1: Rezultati večkratnega učenja modelov temperature taline z metodo PSO z mutacijo. Prikaz povprečja in standardnega odklona vektorja kriterijskih funkcij $\mathbf{J}_{učna}$ in $\mathbf{J}_{testna}$.

N = 20	Učna množica		Testna množica	
Modeli:	$\bar{J}_{učna}/\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\sigma(\mathbf{J}_{učna})/\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\bar{J}_{testna}/\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\sigma(\mathbf{J}_{testna})/\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\hat{T}_1$	10,83	0,09	11,17	0,27
$\hat{T}_2$	10,65	0,06	10,66	0,15
$\hat{T}_3$	10,64	0,02	10,69	0,18

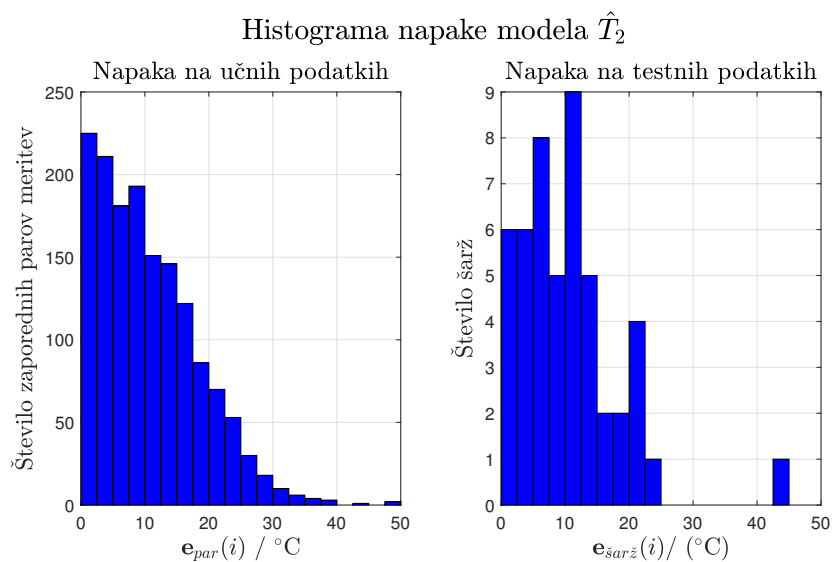
Izmed rezultatov N -kratnega učenja si podrobneje pogledjmo še tiste rezultate učenja, ki imajo najnižjo vrednost kriterijske funkcije J_{testna} . Za vsakega izmed modelov temperature taline so rezultati prikazani v tabeli 5.2. Na levi strani tabele so prikazane vrednosti napak modelov na učni množici. Prikazana so povprečja in standardni odkloni napake e_{par} . Na desni strani tabele so prikazane vrednosti napak modelov na testni množici. Napake $e_{šarž}$ na testni množici smo ovrednotili na celotnih šaržah in v tabeli prikazali povprečja in standardne odklone omenjenih napak. Slike 5.4, 5.5 in 5.6 prikazujejo histograme napak vseh treh modelov temperature taline, ki jih prikazuje tabela 5.2. Histogrami na levi strani prikazujejo porazdelitev napake e_{par} na učni množici, histogrami na desni strani pa porazdelitev napake $e_{šarž}$ na testni množici. Vidimo lahko, da so histogrami vseh modelov na učni množici zelo podobni, nekaj razlik med histogrami pa se pokaže na testni množici.

Tabela 5.2: Rezultati učenja modela temperature taline, kjer je vrednost kriterijske funkcije J_{testna} oz. $\bar{e}_{šarža}$ najnižja. Za vsak model temperature je prikazana povprečna napaka in standardni odklon napake.

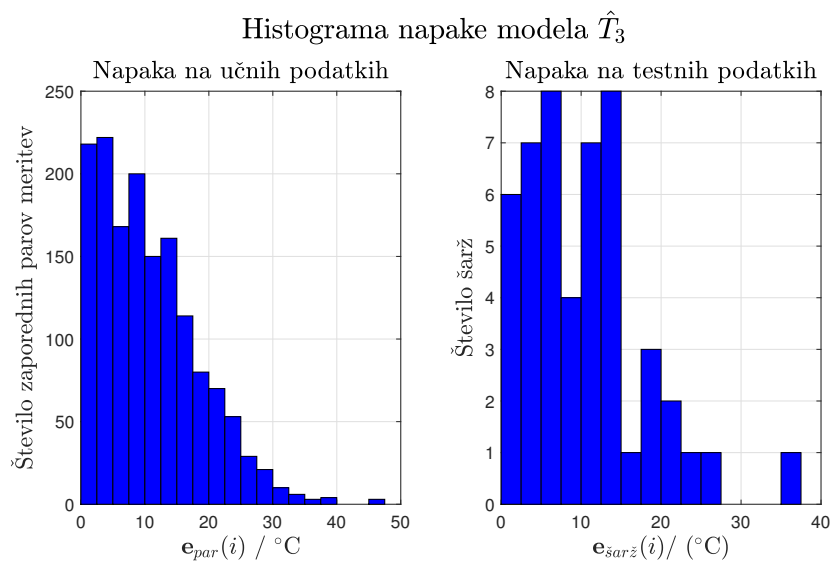
Modeli:	Učna množica		Testna množica	
	$\bar{e}_{par} / ^\circ\text{C}$	$\sigma(e_{par}) / ^\circ\text{C}$	$\bar{e}_{šarža} / ^\circ\text{C}$	$\sigma(e_{šarža}) / ^\circ\text{C}$
$\hat{T}_1$	10,81	7,91	10,72	7,57
$\hat{T}_2$	10,66	7,79	10,41	7,78
$\hat{T}_3$	10,65	7,79	10,39	7,35



Slika 5.4: Histogram napake e_{par} na učni množici in napake $e_{šarža}$ na testni množici za model temperature taline $\hat{T}_1$ (model TS prvega reda).

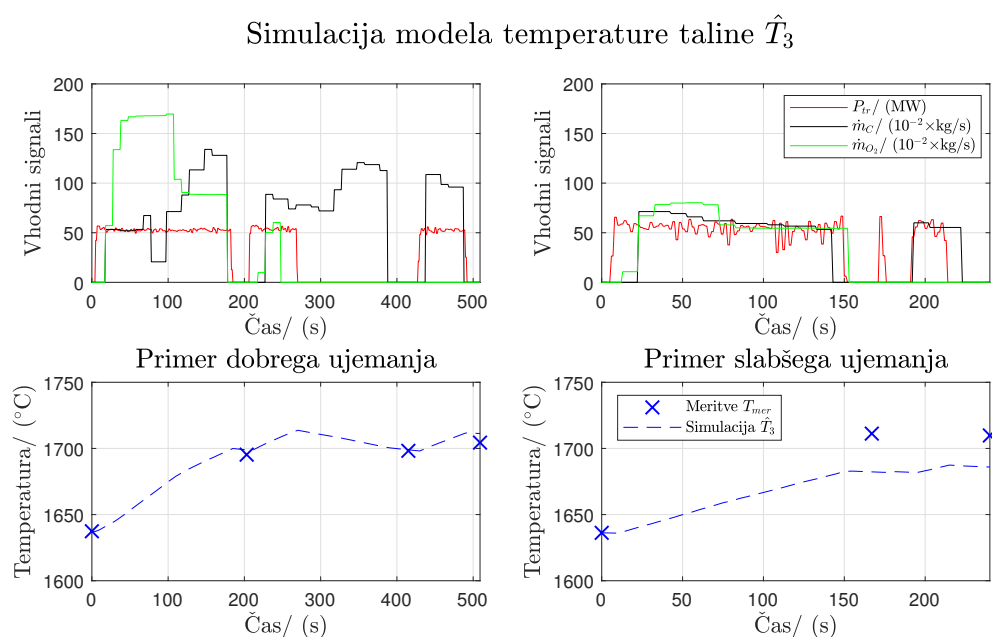


Slika 5.5: Histogram napake e_{par} na učni množici in napake $e_{sarža}$ na testni množici za model temperature taline $\hat{T}_2$ (model moči TS).



Slika 5.6: Histogram napake e_{par} na učni množici in napake $e_{sarža}$ na testni množici za model temperature taline $\hat{T}_3$ (model treh moči TS).

Simulacijo modela temperature taline $\hat{T}_3$ (model treh moči TS) za dva primera šarž iz testne množice prikazuje slika 5.7. Na levi strani vidimo primer dobrega ujemanja, na desni strani pa primer nekoliko slabšega ujemanja modela z meritvami. Na desnem primeru model zgreši obe meritvi za približno 25 °C. Eden od možnih razlogov za odstopanje modela od meritev je v šumu na meritvah temperature, ki izvira iz nehomogenosti temperature taline.



Slika 5.7: Primer simulacije modela temperature taline $\hat{T}_3$ na testnih podatkih. Prikaz dobrega in nekoliko slabšega ujemanja modela.

5.2.1 Primerjava mehkega modela s teoretičnim

Teoretični model EOP so razvili v Laboratoriju za avtomatiko in kibernetiko na Fakulteti za Elektrotehniko. Teoretični model opisuje celoten proces predelave odpadnega jekla od zalaganja peči, taljenja jekla pa vse do izlitja taline. Model temelji na osnovnih fizikalnih zakonih in zajema električne, hidravlične, masne, toplotne in kemijske procese. V modelu so upoštevane tudi dejanske dimenzije EOP, na kateri se zajemajo meritve [6], [7].

Teoretični model EOP primerjamo z modelom temperature taline $\hat{T}_3$ tekom procesa rafinacije. V tabeli 5.3 so prikazana povprečja in standardni odkloni na-

pak modelov ($e_{sarž}$). Napake modelov smo ovrednotili le na delu testne množice, ker nismo imeli vseh simulacijskih potekov teoretičnega modela EOP. Opazimo, da izkazuje model na osnovi mehke logike boljše rezultate od teoretičnega modela EOP.

Tabela 5.3: Primerjava modela temperature taline $\hat{T}_3$ in teoretičnega modela EOP na delu testne množice. Za oba modela je prikazana povprečna napaka in standardni odklon napake vektorja $e_{sarž}$.

	$\bar{e}_{sarž}/\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\sigma(e_{sarž})/\text{ }^{\circ}\text{C}$
Model treh moči TS ($\hat{T}_3$)	11,78	8,86
Teoretični model EOP	17,53	15,51

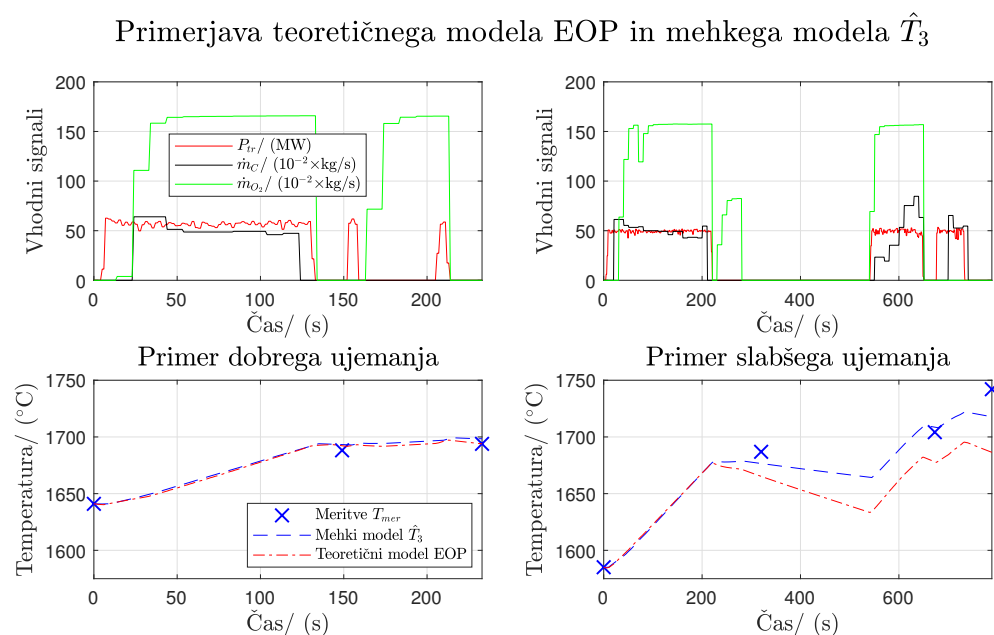
Primerjava med teoretičnim modelom EOP in modelom temperature taline $\hat{T}_3$ je prikazana na sliki 5.8. Na levi strani je prikazan primer, ko oba modela relativno dobro opišeta spreminjanje temperature taline. Opazimo, da sta poteka spreminjanja temperature med modeloma zelo podobna. Na desni strani pa lahko vidimo primer, kjer je obnašanje mehkega modela boljše od teoretičnega modela EOP.

5.3 Diskusija

Modeli temperature taline na osnovi mehke logike so se izkazali za uporabne na področju ocenjevanja temperature taline v EOP pri procesu rafinacije. Njihovo delovanje je boljše v primerjavi s teoretičnim modelom EOP, kar odpira možnost vključitve mehkega modela v obstoječi teoretični model EOP.

Glavna slabost modela je predpostavka, da je do prve meritve temperature taline odpadno jeklo v celoti staljeno. V primeru, da predpostavka ni izpolnjena, mehki model temperature taline ne zna oceniti, koliko energije se še porabi za taljenje jekla. To rezultira v previsoki oceni temperature taline čez celotni potek rafinacije.

Dodatna slabost metode je določitev precejšnjega števila parametrov, kot so število rojev, faktor mehkosti rojenja in omejitev prostora parametrov pri upo-



Slika 5.8: Primerjava med teoretičnim modelom EOP in mehkim modelom $\hat{T}_3$. Leva stran prikazuje primer dobrega ujemanja, desna stran pa primer nekoliko slabšega ujemanja.

rabi metode PSO. Dobimo pa relativno dobre rezultate že s prednastavljenimi vrednostmi. Največjo težavo predstavlja izločitev neustreznih meritev temperature taline, zato smo predlagali dvostopenjsko strategijo odstranjevanja neustreznih meritev temperature. Kljub temu je pri omenjeni strategiji potrebno določiti številne prage, kar je časovno zelo potratno.

Med mehkiimi modeli temperature taline izkazuje najslabše rezultate model TS prve vrste ($\hat{T}_1$). Nekoliko boljša in precej primerljiva sta ostala dva mehka modela temperature taline ($\hat{T}_2$ in $\hat{T}_3$), ki imata zelo podobne rezultate. Je pa gotovo bolj konsistenten model treh moči TS ($\hat{T}_3$), saj smo vanj vključili nekoliko več znanja o procesu.

Model temperature taline se inicializira s prvo meritvijo temperature in po tem ne upošteva več meritev temperature taline. V primeru, da je prva meritev napačna, je celoten nadaljni potek ocene temperature napačen. Ena od možnih nadgradenj modela bi bila sprotne korekcija ocene temperature iz meritev temperature taline.

6 Zaključek

V magistrskem delu smo nakazali postopek mehkega modeliranja temperature taline v elektroobločni peči pri procesu rafinacije. Uporabili smo mehke modele Takagi-Sugeno s pomočjo rojenja Gustafson-Kessel na vhodnih podatkih. Posledične parametre modelov smo določili z optimizacijo z roji delcev. Načrtali smo tri mehke modele temperature taline s postopno nadgradnjo strukture modela z znanjem o procesu. Za vse modele temperature smo predpostavili popolno staljenost vložka odpadnega jekla. Meritve temperature taline, ki niso bile ustrezne, smo z dvostopenjsko strategijo odstranili z namenom boljšega določanja parametrov modelov. Modele temperature taline smo ovrednotili na testni množici in ugotovili, da je obnašanje modelov zadovoljivo.

Med mehкими modeli temperature izkazuje najboljše rezultate model treh moči TS. Omenjeni model temperature smo primerjali tudi s teoretičnim modelom EOP in ugotovili, da je njegovo obnašanje boljše od teoretičnega modela EOP. Z vključitvijo mehkega modela v sočasno delovanje s procesom reciklaže jekla na elektroobločni peči lahko pričakujemo, da bo model dajal zanesljive povratne informacije operaterjem o vrednosti temperature taline. Je pa natančnost modela zelo odvisna od pravilnosti začetne meritve temperature taline in predpostavke, da je odpadno jeklo povsem staljeno. Informacija o temperaturi taline je za operaterje elektroobločne peči koristna, saj bodo s tem lahko zmanjšali pogostost izvajanja meritev temperature taline. Manjše število meritev skrajša čas reciklaže, zmanjša izgube ter zniža stroške nakupa merilnih sond, kar posledično poveča produktivnost in učinkovitost obrata.

Predpostavljeni model temperature ni vezan na specifične lastnosti elektroobločne peči, ampak zgolj na meritve, ki se zajemajo na peči. To mu omogoča

hitro in enostavno prenosljivost tudi na druge dizajne peči. Pristop k mehкому modeliranju, nakazan v delu, ni omejen zgolj na ocenjevanje temperature taline, saj ga je mogoče enostavno razširiti tudi na druga področja.

Literatura

- [1] “World steel association: World steel in figures [Online].” Dosegljivo: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/World-Steel-in-Figures.html>. [Dostopano: 11. 8. 2020].
- [2] “World steel association: Steel facts [Online].” Dosegljivo: <https://www.worldsteel.org/about-steel/steel-facts.html>. [Dostopano: 11. 8. 2020].
- [3] E. Pretorius in H. Oltmann, *EAF Fundamentals*. Process Technology Group – LWB Refractories, Jeremy Jones – Nupro Corporation.
- [4] M. Tolar, *Elektrojeklarstvo*. SIJ - ACRONI, d.o.o, 2006.
- [5] “Electric arc furnace modelling and eaf simulator [Online].” Dosegljivo: <http://msc.fe.uni-lj.si/eaf.asp>. [Dostopano: 10. 7. 2020].
- [6] V. Logar in D. Dovzan, “Modeling and validation of an electric arc furnace: Part 1, heat and mass transfer,” *ISIJ International*, vol. 52, str. 402–412, 03 2012.
- [7] V. Logar in D. Dovzan, “Modeling and validation of an electric arc furnace: Part 2, thermo-chemistry,” *ISIJ International*, vol. 52, str. 413–423, 03 2012.
- [8] J. M. Mesa Fernández, V. Álvarez Cabal, V. R. Montequin in J. V. Balsera, “Online estimation of electric arc furnace tap temperature by using fuzzy neural networks,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 21, no. 7, str. 1001 – 1012, 2008.
- [9] Blachnik M., Maczka K. in Wieczorek T., “A model for temperature prediction of melted steel in the electric arc furnace (eaf),” v *Artificial Intelligence*

- and Soft Computing*. (Rutkowski L., Scherer R., Tadeusiewicz R., Zadeh L.A. in Zurada J.M. (eds), ur.), str. 371–378, Berlin, Heidelberg: vol 6114. Springer, 2010.
- [10] T. Takagi in M. Sugeno, “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 1, str. 116–132, 1985.
- [11] I. Škrjanc, *Inteligenetni sistemi za podporo odločanju, skripta v pripravi*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2016.
- [12] D. E. Gustafson in W. C. Kessel, “Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix,” v *1978 IEEE Conference on Decision and Control including the 17th Symposium on Adaptive Processes*, str. 761–766, 1978.
- [13] J. Kennedy in R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” v *Proceedings of ICNN’95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4, str. 1942–1948 vol.4, 1995.
- [14] Ž. Batistič, “Avtomatsko generiranje referenčnih profilov taljenja jekla v elektro obločni peči,” *Fakulteta za elektrotehniko*, 2018.
- [15] “What is the difference between nm3 and sm3? [Online].” Dosegljivo: <https://www.oxywise.com/en/content/news/what-is-the-difference-between-nm3-and-sm3>. [Dostopano: 12. 7. 2020].
- [16] T. Meier, K. Gandt, T. Echterhof in H. Pfeifer, “Modeling and simulation of the off-gas in an electric arc furnace,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 48, str. 3329–3344, 09 2017.
- [17] B. Čeh, *Splošna kemija*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 2018.
- [18] Ning Li, Yuan-Qing Qin, De-Bao Sun in Tong Zou, “Particle swarm optimization with mutation operator,” v *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.04EX826)*, vol. 4, str. 2251–2256 vol.4, 2004.

- [19] Eberhart in Yuhui Shi, “Particle swarm optimization: developments, applications and resources,” v *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*, vol. 1, str. 81–86 vol. 1, 2001.