

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Žan Batistič

**Avtomatsko generiranje
referenčnih profilov taljenja jekla
v elektro obločni peči**

Magistrsko delo

Mentor: prof. dr. Vito Logar

Somentor: prof. dr. Igor Škrjanc

Ljubljana, 2018

Zahvala

Za vso pomoč in svetovanje bi se rad zahvalil mentorju prof. dr. Vitu Logarju in somentorju prof. dr. Igorju Škrjancu. Njuno usmerjanje in ideje, ko so se stvari zataknila, je omogočilo nastanek dela.

Zahvala za omogočitev študija in spodbudo pri študiju gre moji družini. Posebna zahvala gre Katji, ki mi je tekom študija vedno stala ob strani in me podpirala.

Vsebina

1	Uvod	5
2	Elektro obločna peč	7
2.1	Električni oblok	7
2.1.1	Električni oblok v EOP	9
2.1.2	Regulacija električnega obloka v EOP	9
2.2	Drugi viri energije v EOP	10
2.3	Zgradba EOP	11
2.3.1	Nagibni mehanizem	11
2.3.2	Kotel	12
2.3.3	Pokrov kotla	12
2.3.4	Nosilci elektrod	12
2.3.5	Elektrode	13
2.3.6	Sistem mešalnikov taline	14
2.3.7	Kopja in plinski gorilniki	14
2.4	Zalaganje EOP	15
2.4.1	Topli zagon	17
3	Analiza zalaganja EOP	19

3.1	Klasifikacija odpadnih jekel	19
3.2	Predstavitev problema analize	23
3.3	Utežena Levenshteinova razdalja kot mera podobnosti zalaganja košar EOP	23
3.4	Levenshteinova razdalja	24
3.5	Utežena Levenshteinova razdalja	25
3.5.1	Učenje uteži	27
3.5.2	Transformacija informacije o zalaganju	27
3.5.3	Optimizacijski problem nenegativnih najmanjših kvadratov	28
3.5.4	Izvedba modela	30
3.5.5	Rezultati modela	33
3.6	"City-block" razdalja v prostoru materialov kot mera podobnosti med košarama	37
3.6.1	Celoten prostor materialov	38
3.6.2	Nižanje prostora materialov	38
4	Generiranje profilov	43
4.1	Analiza profilov	43
4.1.1	Deskriptorji profilov	44
4.2	Cilji talilnega procesa	47
4.3	Generiranje optimalnega profila	48
4.3.1	Kriterij generiranja novih profilov	48
4.3.2	Identifikacija aktivnega dela profila	49
4.3.3	Težave pri optimizaciji profilov	49
4.3.4	Obravnava časovnega zamika tipičnih delov profilov	51

4.3.5	Metoda križne korelacije	51
4.3.6	Obravnavo različno dolgih aktivnih delov profilov	53
4.3.7	Dvostopenjska optimizacija profilov	53
4.4	Analiza generiranih profilov	54
4.5	Predlagane izboljšave	56
5	Orodje Operater	59
5.1	Database Explorer	60
5.2	Database Analytics	62
5.2.1	Analiza zalogov EOP iz podatkovne baze	63
5.2.2	Izbor najprimernejše razvrstitve jekel	64
5.2.3	Vnos novega zaloga EOP	64
5.2.4	Analiza novo vnešenega zaloga EOP	65
5.2.5	Prikaz statistike	66
5.3	Profiler	66
6	Zaključek	69

Seznam slik

2.1	Shema razmer pri pojavu električnega obloka.	8
2.2	Prikaz zgradbe EOP z označenimi deli.	13
2.3	Prikaz izvedbe elektrodnih ramen in postavitve elektrod.	14
2.4	Prikaz umestitve večnamenskih kopij v moderni EOP.	16
3.1	Prikaz transformacije informacije o zalaganju tretje košare v niz blokov.	29
3.2	Diagram poteka učenja uteži utežene Levenshteinove razdalje. . .	34
3.3	Rezultati križne korelacije izhodov modela in procesa pri učnih podatkih na vhodu.	35
3.4	Rezultati križne korelacije izhodov modela in procesa pri testnih podatkih na vhodu.	36
3.5	Rezultati avtokorelacije napake izhoda modela pri učnih podatkih.	36
3.6	Rezultati avtokorelacije napake izhoda modela pri testnih podatkih.	37
3.7	Oblak točk v 3 razsežnem prostoru s konstantno "City-block" od- daljenostjo od izhodišča.	39
3.8	Prikaz križnih korelacij med standardiziranimi vrednostmi mer po- dobnosti utežene Levenshteinove razdalje in štirimi "City-block" razdaljami.	41

4.1	Histogram normiranih vrednosti deskriptorjev profilov.	45
4.2	Prikaz določanja deskriptorjev profilov.	46
4.3	Prikaz določanja aktivnega dela profilov.	50
4.4	Prikaz izračuna križne korelacije dveh profilov CH ₄ gorilca	52
4.5	Diagram poteka "Operater" programa.	55
4.6	Prikaz postopka generiranja profila za CH ₄ gorilec.	57
4.7	Prikaz postopka generiranja profila za kisikovo kopje.	58
5.1	Razredni diagram programa "Operater" po specifikaciji UML 2.0 .	61
5.2	Prikaz delovanje podokna "Database Explorer".	62
5.3	Prikaz podokna "Database Analytics".	63
5.4	Prikaz orodja za vnos novega zaloga znotraj podokna "Database Analytics".	65
5.5	Prikaz statistike izračunanih mer podobnosti med zalogi znotraj podokna "Database Analytics".	66
5.6	Prikaz podokna "Profiler".	67

Seznam tabel

1	Veličine in simboli	xiii
3.1	Tabela klasifikacije jeklenega odpada po EUROFER specifikaciji. .	21
3.2	Nadaljevanje tabele klasifikacije jeklenega odpada po EUROFER specifikaciji.	22
3.3	Prikaz izračuna Levenshteinove razdalje na primeru dveh zalogov.	25
3.4	Prikaz izračuna utežene Levenshteinove razdalje na primeru v tabeli (3.3)	26
3.5	Uporabljene uteži za izračun utežene Levenshteinove razdalje tabeli 3.4	26
4.1	Tabela povprečnih vrednosti in standardnih odklonov deskriptorjev profilov.	47

Seznam uporabljenih simbolov

V pričujočem zaključnem delu so uporabljeni naslednje veličine in simboli:

Tabela 1: Veličine in simboli			
Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
navidezna električna moč	Q	volt-amper	VA
čas	t	sekunda	s
masa	m	kilogram	kg
nasipna gostota	ρ	tona na kubični meter	t/m^3
kot nagiba	-	stopinja	$^\circ$
temperatura	T	stopinje kelvina	K
deskriptor profila i	D_i	-	-
utež operacije	w	-	-
standardni odklon	σ	-	-

Povzetek

Svetovne potrebe po jeklu so začele, z vstopom v 21. stoletje, strmo naraščati, kar je privedlo do porasta cen surovin. Jeklarne stremijo k optimizaciji procesa taljenja jekla in rešitve iščejo v modernejših konfiguracijah talilnih peči z boljšimi izkoristki. Poleg gradnje novih izboljšanih elektro obločnih peči se jeklarska industrija posveča tudi optimizaciji delovanja obstoječih sistemov.

Delo predstavlja postopek razvoja orodja za avtomatsko generiranje optimiziranih profilov taljenja jekla v elektro obločni peči. V prvem delu se posvetimo spoznavanju z elektro obločno pečjo, njenimi podsistemi in pojavi znotraj te. Ta del je ključen za razumevanje problema, ki ga poskuša delo reševati. Drugi del zajema analizo podatkovne baze o obratovanju elektro obločne peči, z namenom odkrivanja vhodno-izhodnih relacij procesa in pridobivanja znanj o lastnostih posameznih spremenljivk v podatkovni bazi. Predlagamo model, ki ob znanem zalogu elektro obločne peči predlaga nove profile taljenja. Relacije med zalogi smo pojasnjevali z različnimi merami podobnosti. V zadnjem delu magistrske naloge predstavimo grafični vmesnik, ki združuje funkcionalnosti pregledovanja podatkovne baze, preverjanja delovanja različnih mer podobnosti med zalogi in avtomatskega generiranja profilov taljenja jekla.

Ključne besede: elektro obločna peč, podatkovna baza, zalaganje peči, profili, mera podobnosti, grafični vmesnik

Abstract

In the beginning of the 21st century, world steel needs began to rise steeply, which led to a rise in raw material prices. Steelmakers strive to optimize the steel melting process and are looking for solutions in more modern configurations of melting furnaces with better efficiency. In addition to the construction of new improved electric arc furnaces, the steel industry is aiming to optimize the operation of existing systems.

The thesis presents the procedure of developing a tool for automatic generation of optimized steel melting profiles in an electric arc furnace. In the first part, we focus on presenting the electric arc furnace, its subsystems and the phenomena occurring inside the furnace. This part is crucial to understanding the problem, the work is trying to solve. The second part covers the analysis of the database, containing operational data of the electric arc furnace, in order to detect the input-output relations of the process and to acquire knowledge about the properties of individual variables in the database. We propose a model that generates new melting profiles in relation to the specified charging of an electric arc furnace. The relations between the charges were explained by different similarity measures. In the last part of the thesis we present a graphical user interface that combines the functionality of exploring the database, examining the behavior of various similarity measures between charges, and automatic generation of steel melting profiles.

Key words: electric arc furnace, database, furnace charging, profiles, similarity

measure, graphical user interface

1 Uvod

Postopek avtomatizacije in optimizacije procesov v industriji je danes nujen za zagotavljanje konkurenčnosti, za izboljšanje delovnih razmer in vodi k čistejši industriji, ki bolje izkorišča energijske vire. Digitalizacija industrije, ki smo ji priča v zadnjih letih, je privedla do nastanka obsežnih podatkovnih baz. Razvoj postopkov prepoznavanja vzorcev v podatkih in hiter razvoj računalniške strojne opreme omogočata učinkovito analizo velikih količin podatkov iz podatkovnih baz, z namenom pridobivanja novih znanj o procesih, z namenom snovanja prediktivnih modelov in z namenom optimizacije procesov.

Pridelava jekla v elektro obločni pečji se je začela v 19. stoletju po tem, ko je Humphrey Davy odkril pojav električnega obloka. Kapacitete prvih elektro obločnih peči so bile od 5 do 6 ton z nazivno navidezno električno močjo od 170 do 230 kVA. Do konca tridesetih let dvajsetega stoletja je razvoj elektro obločnih peči zavirala visoka cena električne energije in visoka cena izdelave elektrod. Od takrat se je uporaba tega načina pridelave jekla močno povečevala. Navečje elektro obločne peči v današnjih dneh dosegajo kapaciteto 400 ton z nazivno navidezno električno močjo 165 MVA [1].

Predelava železnega odpada v elektro obločni pečji je z vidika porabe energije zahteven proces. Elektro obločna peč velja za enega največjih posameznih električnih bremen v elektro energetskem omrežju [2]. Z naraščanjem svetovnih potreb po jeklu in višanjem ekoloških standardov je potreba po optimizaciji procesa vse večja [1]. Jeklarska industrija stremi k skrajšanju časa potrebnega za predelavo jeklenega odpada, izboljšanju izplena jekla pri talilnem postopku in

minimizaciji porabljene energije pri postopku predelave. Vpeljane so bile mnoge rešitve, ki so privedle do ključnih premikov k izboljšanju procesa taljenja jekla, od povečanja izkoriščanja termokemičnih procesov v talini, do vgradnje modernih sistemov vpihovanja plinov in žlindrotvornih materialov v kotel elektro obločne peči [3],[4]. Nova orodja, ki vplivajo na talilni proces, odpirajo nov prostor za izboljšave procesa. Izboljšave smo v delu iskali z analizo obratovalnih podatkov moderne elektro obločne peči.

Podatkovno bazo z obratovalnimi podatki elektro obločne peči nam je prihrbela ena od evropskih jeklaren. Na podatkih smo izvajali analize zalaganja elektro obločne peči in referenčnih profilov taljenja jekla. Iskali smo povezave med založenimi materiali in talilnim procesom. Soočali smo se s problemi nepopolnih podatkov in neustreznih podatkov. Pri izboru analiz nas je omejeval obseg podatkov, ki je tudi usmeril izvedbo analiz. Z neupoštevanjem količine podatkov pri izboru in izvedbi analiz, bi izračuni hitro presegli časovno izvedljivost. Cilj raziskave je bil razvoj orodja, ki bi bil sposoben konfiguracije procesa taljenja preko referenčnih profilov taljenja glede na zalogo. Poleg pridobitve na samodejnem nastavljanju profilov taljenja, orodje profile generira s ciljem optimiziranja procesa taljenja. Pri vrednotenju generiranih referenčnih profilov smo bili omejeni, saj bi bilo za ustrezno vrednotenje potrebno profile testirati na dejanski elektro obločni peči.

Grafični vmesniki omogočajo večjo intuitivnost in enostavnost uporabe računalniških orodij [5]. V okviru magistrskega dela smo razvili grafični vmesnik, ki združuje funkcije pregledovanja podatkovne baze, funkcije podatkovne analitike in orodje za generiranje referenčnih profilov taljenja. Grafični vmesnik smo oblikovali tako, da uporabnika vodi skozi faze razvoja orodja.

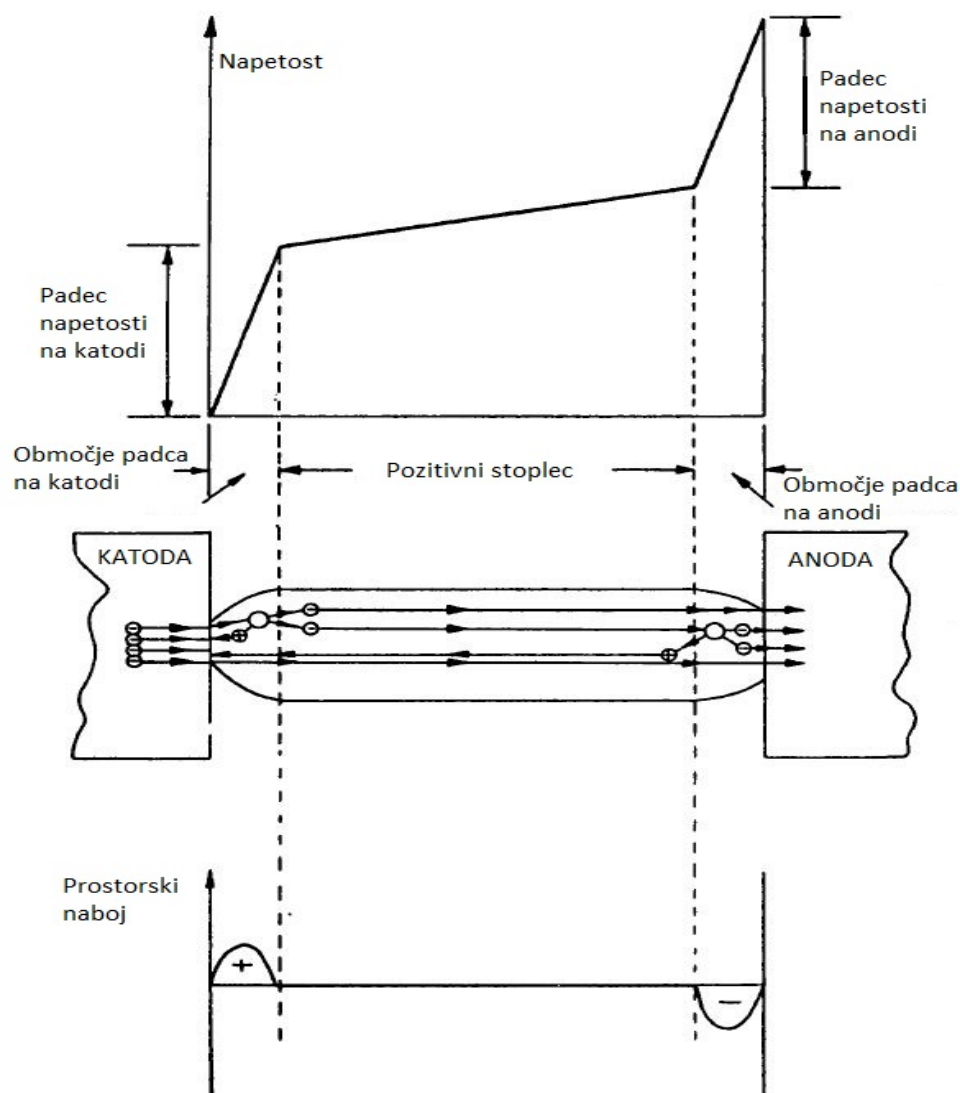
2 Elektro obločna peč

Elektro obločna peč (EOP) je sestavni del sistema za predelavo odpadnega jekla. Proces predelave odpadnega jekla predvideva dovajanje toplotne energije jeklu preko točke stalitve. Končno temperaturo, ki jo mora jeklo doseči definira ciljna kvaliteta jekla. Za glavni vir toplotne energije EOP izkorišča fenomen električnega obloka. Ena glavnih prednosti elektro obločne peči je zmožnost pridelave širokega nabora jekel iz različnih vrst jeklenega odpada. Fleksibilnost omogoča visoko prilagodljivost potrebam trga [6].

2.1 Električni oblok

Iniciacija električnega obloka je možna z ločitvijo nosilcev toka, s prehodom iz stanja plinske razelektritve ali pri visokofrekvenčnem električnim preboju [7]. Za vse vrste oblokov je značilna visoka temperatura prevodnega kanala, večja od 4000K [7]. Za oblok je značilno intenzivno elektromagnetno sevanje v vidnem delu frekvenčnega spektra in visoka gostota toka. Lastnosti obloka so v osnovi pogojene z lastnostmi plina, v katerem se oblok tvori in lastnostmi elektrod [8].

Električni oblok razdelimo na tri območja, območje stolpca obloka, območje padca napetosti katode in območje padca napetosti anode [9]. Območje stolpca obloka se obnaša kot prevodnik s konstantno jakostjo polja po dolžini in z glavnimi nosilci toka elektroni. Zanj je značilno, da se pri nizkih tokovih napetost obloka manjša (negativna karakteristika), na določeni točki pa se karakteristika obrne in napetost začne s tokom naraščati (pozitivna karakteristika). V območjih padca



Slika 2.1: Shema razmer pri pojavu električnega obloka.

napetosti katode in anode so razmere takšne, da dopuščajo prehod toka iz plina v elektrodo. Za ti dve območji je značilen velik gradient napetosti oziroma visoko električno polje, ki rezultira v elektronski multiplikaciji v območju katode in v manj intenzivni ionizaciji v območju anode [7].

2.1.1 Električni oblok v EOP

Električni oblok je za taljenje jekla zanimiv zaradi visokega termo-električnega sevanja. Izkoriščanje tega omogoča hitro taljenje jekla z minimalnimi izgubami mase jekla. Procesi oksidacije goriv, ki bi bili potencialno uporabni za taljenje jekla, povzročajo oksidacijo jekla in posledično izgubo na masi jekla [6].

V idustriji predelave jekla se v glavnem uporabljata dve vrsti peči. Za prvo je značilno monofazno, enosmerno napajanje, za drugo trifazno, izmenično napajanje. Enosmerna monofazna peč je bolj učinkovita in boljša z vidika porabe elektrod, vendar je pri izdelavi občutno dražja [1]. EOP, ki jo obravnava delo, je trifazni sistem, ki za tvorjenje obloka uporablja tri grafitne elektrode. Pred iniciacijo obloka se morata vsaj dve grafitni elektrodi dotakniti jekla. V trenutku dotika steče kratkostični tok skozi elektrodi in jeklo. Regulator odmakne elektrodi in z ločitvijo nosilcev toka se iniciira oblok [6].

2.1.2 Regulacija električnega obloka v EOP

Površina založene mase v EOP je ob začetni vzpostavitvi obloka močno razgibana. Nestabilnost in naključnost dolžine obloka je v začetni fazi taljenja pričakovana. Z ustrežno amplitudo napajalne električne napetosti in regulacijo oddaljenosti elektrod od založenega jekla vplivamo na dolžino obloka in oddano moč. Regulacija višine postavitve elektrod je nujna tudi po vzpostavitvi stabilnejših razmer v peči, saj se višina gladine taline spreminja s stopnjo staljenosti jekla. Poleg sprememb stanja taline se dolžina obloka spreminja tudi z obrabo elektrod.

V prvi fazi taljenja je pomembno zagotoviti čimprejšnjo potopitev koncev elektrod v talino, saj bi predolga izpostavitve strehe peči žarku poškodovala peč. Nestabilnost obloka v prvi fazi taljenja lahko predstavlja velike obremenitve za električno omrežje, zato so za prvo fazo značilni manjši tokovi in posledično manjša moč peči. Tok preko električnega obloka se veča s stabilnostjo obloka. Pomembna funkcija, ki jo mora regulator pomika elektrod imeti, je reagiranje

na morebiten kratek stik med elektrodo in jeklom. Ob pojavu kratkega stika mora sistem čim hitreje odmakniti elektrodo, da prekini kratek stik. Predolgo obratovanje peči v kratkem stiku bi povzročilo varnostni izklop EOP [9, stran 70].

Za ohranitev ali doseganje željenih vrednosti dolžine obloka se postavitev elektrod regulira z vetikalnim pomikom posamezne elektrode preko hidravličnih ali elektromehanskih aktuatorjev. Regulator postavitve elektrod mora slediti naslednjim zahtevam [10]:

1. Zagotavlja povprečne prednastavljene vrednosti sekundarnega toka, napetosti in moči.
2. Odziva se na trenutne tokovne spremembe z namenom omejitve trajanja in amplitude tokovnih konic. Tako zaščiti elektrode in električno napajalno opremo in omeji pojav napetostnih nihanj v električnem omrežju.
3. Dovoljuje operaterju EOP, da direktno vpliva na postavitev elektrod.

Povratna informacija o stanju obloka je določljiva preko meritev toka in napetosti na posamezni fazi. Regulacija obloka navadno poteka preko tokovne regulacije, regulacije napetosti obloka, impedančne regulacije in uporovne regulacije. [9].

2.2 Drugi viri energije v EOP

Poleg električnih procesov, ki povečujejo notranjo energijo jeklu, v EOP potekajo tudi termo-kemični procesi. K pozitivni energijski bilanci prispevajo oksidacije materialov znotraj peči. Glavni del energije prispevata oksidacija metana, dovedenega preko gorilcev, in oksidacija ogljika v talini. Pri novejših pečeh je prisotna reakcija naknadne oksidacije ogljikovega monooksida oziroma reakcija pozgorevanja ogljikovega monoksida [4]. Za potek reakcij je potrebno ustrezno dovajanje kisika in metana in dodajanje ogljika.

Zagotavljanje ustrezne stopnje kisika v peči je pomembno, saj je po nekaterih virih prispevek energije termo-kemijskih reakcij skupni dovedeni energiji med 10 in 40 procenti [4]. Večji del dovedene energije preko sekundarnih virov je značilen za peči z nižjo električno močjo na tono založenega jekla. Prednost sekundarnih virov energije je možnost zagotavljanja enakomernejšega taljenja jekla [10].

Glavni del energijskih izgub pri talilnem procesu v EOP predstavlja energija akumulirana v nastalih plinih, ki se odsesavajo tekom taljenja. Nekateri proizvajalci EOP načrtujejo nove peči, ki omogočajo izkoriščanje toplotne energije odsesanih odpadnih plinov za predgretje košare, ki čaka na zalog [14]. Po nekaterih virih sistem izkoriščanja energije odpadnih plinov prispeva k zmanjšanju specifične porabljene energije pri taljenju do 40 kWh na tono jekla [15].

2.3 Zgradba EOP

Opis zgradbe EOP nam predstavi dele, ki so ključni za delovanje EOP. Profili, ki jih bomo analizirali v naslednjih poglavjih, vplivajo na delovanje predstavljenih podsistemov EOP.

2.3.1 Nagibni mehanizem

Nagibni mehanizem EOP omogoča nagib kotla pri izvajanju funkcije odlivanja taline in funkcije odstranjevanja žlindre. Poleg funkcij nagibanja, nagibalni mehanizem nudi mehanski stik peči s podlago. Nagibni mehanizem je pri večini EOP izveden s hidravličnimi cilindri [10]. Nagibni koti kotla, ki jih mora mehanizem doseči za izvedbo odlivanja, so odvisni od konstrukcije EOP. Pri klasični izvedbi EOP mora nagibni mehanizem omogočati nagibanje kotla EOP do 45° [6]. Na delovanje nagibnega mehanizma, lahko vplivamo preko regulacijskega profila, ki pa ni bil del naše raziskave.

2.3.2 Kotel

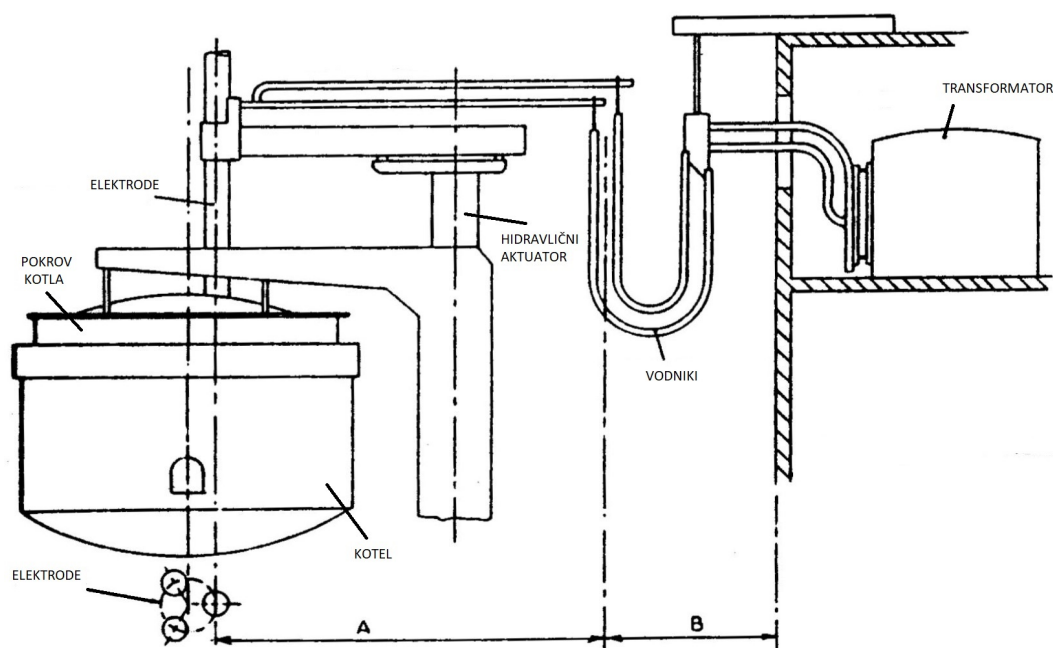
Kotel EOP je lahko sestavljen iz dveh ali treh delov. Spodnji del kotla je izdelan iz kotlovske pločevine in v celoti obzidan z ognjevarno obzidavo. Velikost spodnjega dela se dimenzionira glede na predvideno kapaciteto peči. Pri konstrukciji spodnjega dela je potrebno predvideti sistem mešalnikov taline, sistem za opravljanje meritev taline in vnesti odprtino za odlivanje taline. Pri kotlu, sestavljenem iz treh delov, se srednji del, ki je izpostavljen vplivom žlindre, po obrabi zamenja z novim obnovljenim srednjim delom. Obstaja mnogo izvedb zgornjega dela kotla. Oblika je odvisna od predvidenega potrebnega časa za zamenjavo delov kotla in materialov, ki se bodo zalagali. Za zgornji del kotla je potrebno vodno hlajenje, ki je izvedeno preko vodno hlajenih panelov [10]. Umestitev kotla v zgradbi EOP je razvidna na sliki (2.2).

2.3.3 Pokrov kotla

Pokrov kotla je premično zapiralo zgornjega dela kotla, katerega premike opravlja hidravlični mehanizem. Tako kot za zgornji del kotla, tudi za pokrov kotla velja, da je vodno hlajen. V sredino pokrova kotla so umeščene odprtine, ki služijo kot vhod elektrod v delovni prostor. Odsesavanje dimnih plinov in prahu iz delovnega prostora je možno skozi ti. četrto odprtino v pokrovu kotla. Peta odprtina v pokrovu kotla je namenjena dodajanju žlindrotvornih materialov, ogljika in drugih legirnih materialov. Odmiki pokrova kotla EOP so predvideni pri zalaganju EOP in menjavi obrabljenih delov kotla [6]. Umestitev pokrova kotla v zgradbi EOP je razvidna na sliki (2.2).

2.3.4 Nosilci elektrod

Nosilci elektrod so sestavljeni iz elektrodnih ram in vpenjalnih glav elektrod. Sistem elektrod navadno sestavljajo tri elektrode, enakomerno razporejene po krožnici. Elektrodne rame sestavljajo bakreni tokovodniki in jeklena konstrukcija

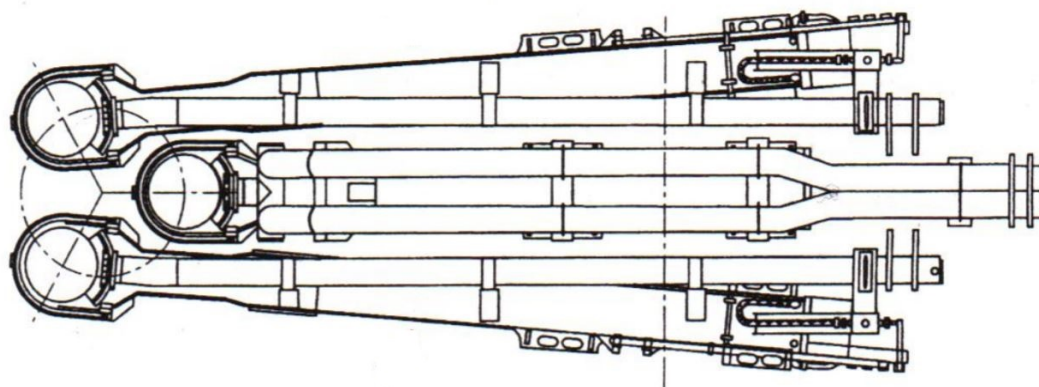


Slika 2.2: Prikaz zgradbe EOP z označenimi deli.

in so povezava med sekundarnim navitjem transformatorja in elektrodami. Pri konstrukciji elektrodnih ram je pomembno zagotavljanje električne simetričnosti z zagotovitvijo enakih impedanc elektrodnih ram. Vertikalni pomik elektrod opravlja mehanizem za dvig elektrod, izveden z visokoodzivno hidravliko[6]. Primer zgradbe nosilcev elektrod je prikazan na sliki (2.3).

2.3.5 Elektrode

Grafitne elektrode so v EOP vpete v vpenjalne glave na koncih nosilcev elektrod. Vpenjanje se realizira preko diskastih vzmeti. Električni stik je zagotovljen preko bakrenih plošč. Dimenzije elektrod se določi glede na tokovno obremenitev elektrode in glede na mehanske zahteve [10].



Slika 2.3: Prikaz izvedbe elektrodnih ramen in postavitve elektrod.

2.3.6 Sistem mešalnikov taline

Sistem mešalnikov taline je sistem, ki z mešanjem taline omogoča boljšo razporeditev toplote v talini in tako omogoči boljšo temperaturno regulacijo taline. Sistem pospešuje metalurške reakcije in omogoča hitrejšo homogenizacijo taline [16]. Sistem mešalnikov je lahko izveden z indukcijskimi mešalniki, sestavljenimi iz velikih, vodno hlajenih tuljav, nameščenih pod kotlom EOP [10]. EOP, ki jo obravnava delo, je imela funkcijo mešanja taline, izvedeno z vpihovanjem inertnega plina - dušika preko oploščenih poroznih funkcionalnih teles na dnu kotla. Poleg mešanja taline so inertni plini pomembni za odstranjevanje raztopljenih plinov v kopeli in za izločanje nekovinskih oksidnih vključkov v žlindro [6].

2.3.7 Kopja in plinski gorilniki

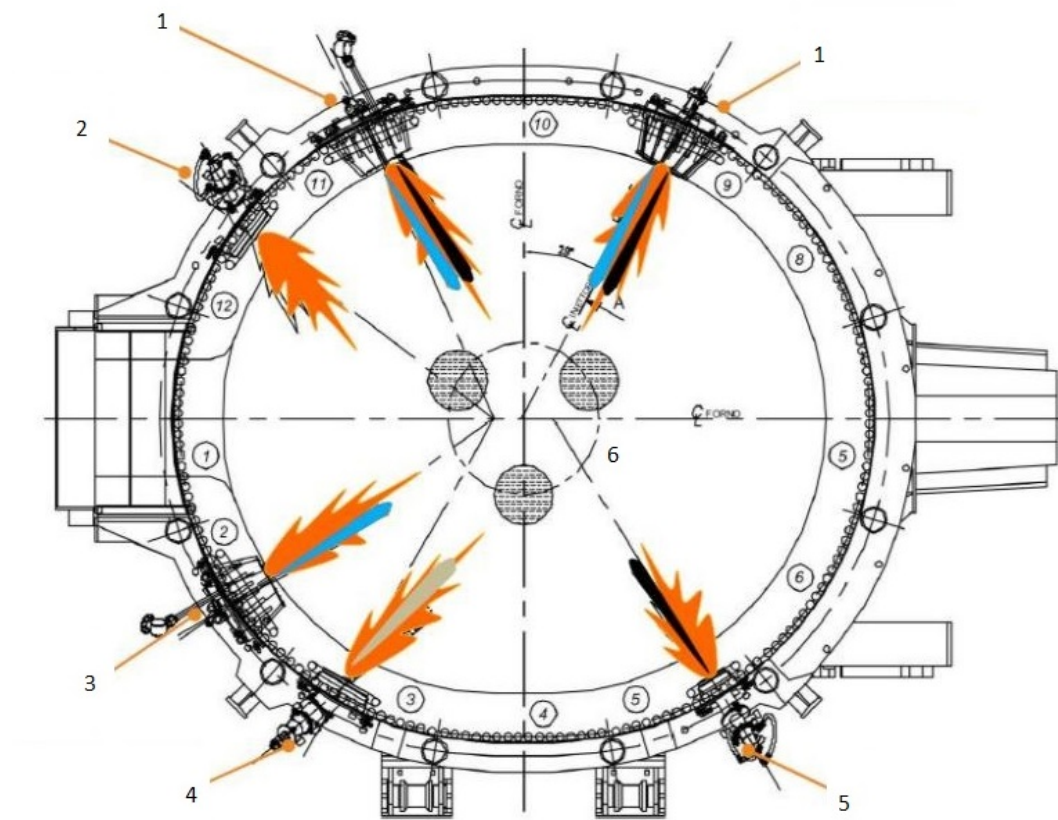
Sistem kopij, razporejenih po steni kotla, omogoča injektiranje materialov v kopel. V modernih EOP se uporabljajo kopja, ki omogočajo večnamensko injektiranje materialov z dodano funkcijo plinskega gorilca [17]. EOP, ki jo obravnava delo, uporablja pet različnih večnamenskih kopij:

1. Kopje za injektiranje apna in doloapna kot žlindrotvornih dodatkov z dodano funkcijo plinskega gorilnika. Na sliki (2.4) je označeno s številko 4.
2. Kopje za injektiranje ogljika z dodano funkcijo plinskega gorilnika. Injektiranje ogljika v žlindro omogoči penjenje žlindre [3]. Na sliki (2.4) označeno s številko 5.
3. Kopje za injektiranje kisika z dodano funkcijo plinskega gorilnika. Na sliki (2.4) je označeno s številko 3.
4. Kopje, ki omogoča hkratno injektiranje ogljika in kisika ter lahko deluje kot plinski gorilnik. Na sliki (2.4) je označeno s številko 1.

2.4 Zalaganje EOP

Zalaganje peči je del procesa predelave jekla, ki nastopi pred pričetkom taljenja jekla. V primeru EOP, ki jo obravnava delo, je proces taljenja jekla razdeljen na tri dele. Peč se prek treh delov postopoma založi. Za zalaganje peči je potrebna prekinitev delovanja peči. Sistem elektrod se dvigne in streha peči se odmakne. Košara z založenim odpadnim jeklom se z dvigalom postavi nad peč in založi peč [10]. Pri postopnem zalaganju so za posamezno košaro določena priporočila vrstnega reda zalaganja in količino posamezne vrste odpada. Postopek zalaganja peči je pomemben za doseganje željene kvalitete jekla, za hitrejšo vzpostavitev stabilnega stanja obloka v peči in za zaščito sten in strehe peči [6].

Zalogi peči se med seboj razlikujejo po založeni teži in vrsti založenih materialov. Vsak od založenih tipov jeklenega odpada vpliva na proces taljenja na specifičen način. Zalaganje EOP z jeklenim odpadom, ki ga sestavljajo majhni delci jekla, povečuje stopnjo oksidacije železa in slabša izplen jekla. Zalaganje EOP z jeklenim odpadom, ki ga sestavljajo veliki delci jekla, predstavlja nevarnost loma elektrod, ko se veliki kosi jekla sesedajo v talino. Padec večjih delov jekla v talino lahko povzroči prelitje taline čez rob peči. V praksi se EOP zalaga



Slika 2.4: Prikaz umestitve večnamenskih kopij v moderni EOP.

s ciljem minimizacije negativnih vplivov posamezne vrste jeklenega odpada in ciljem optimalnega delovanja EOP z vidika minimalnega števila postopnih zalaganj do polno založene peči, čimkrajšega časa taljenja in čim manjše porabe elektrod [10, stran 9.7].

2.4.1 Topli zagon

Pred vsako obnovo kotla peči oziroma pred rednim vzdrževanjem peči je potrebno peč popolnoma izprazniti. Prvi proces taljenja po popolni izpraznitvi se začne z ohlajeno pečjo, založeno le z vsebino prve založene košare. Za ostale šarže, ki ne nastopijo neposredno po nujnem popolnem odlitju taline, je značilno, da se prva košara zalaga v neprazno peč. Po končanem talilnem procesu je odlitje nepopolno in del taline ostane v peči. Takšen začetek taljenja imenujemo topli zagon (ang. "hot heel"). Prednosti toplega zagona sta hitrejša vzpostavitev stabilnega obloka in zgodnejši začetek dodajanja kisika, kar prispeva k hitrejšemu izločanju fosforja iz taline [18, stran 38]. Prisotnost taline pri toplem zagonu služi tudi kot zaščita dna peči pred direktno izpostavitvijo sevanju obloka, ko ta predre odpadno jeklo [6, stran 47-48]. Slabost toplega zagona je naključnost, ki jo ta vpelje v informacijo o zalaganju EOP. Masa preostale taline se ne beleži in jo lahko le ocenimo.

3 Analiza zalaganja EOP

Zalog EOP je eden glavnih vhodnih podatkov, ki definira postopek taljenja. Na podlagi zaloge in željene končne kvalitete jekla se prilagajajo profili taljenja. Na talilni proces vplivajo fizikalne lastnosti, naprimer velikost delcev in gostota materiala [6], in kemične lastnosti založenih materialov, naprimer stopnja nečistosti jekla kot prisotnost nekovin.

Problem analize zalaganja EOP se je izražal kot iskanje relacije med zalogom peči in profili taljenja. Izpostavili smo lastnosti materialov, za katere je bilo pričakovano, da vplivajo na postopek taljenja. Predvideli smo, da na hitrost vzpostavitve stabilnega obloka vpliva lastnost nasipne gostote založenega materiala in zaporedje založenih vrst jekel. Predviden glavni prispevek k variabilnosti porabe energije med talilnimi procesi je bila razlika v skupni založeni masi. Postopek analize zaloge smo morali tako prilagoditi na način, ki je omogočal odkrivanje izpostavljenih vplivov.

3.1 Klasifikacija odpadnih jekel

Za potrebe analize je bilo potrebno definirati število razredov odpadnih jekel, s katerimi smo opisali zalog EOP. Uporabili smo uveljavljene klasifikacije odpadnih jekel, ki se uporabljajo v jeklarski industriji.

Odpadna jekla delimo na odslužena odpadna jekla, odpadna jekla kot odpadki proizvodnega procesa in povratna odpadna jekla, ki nastanejo v procesih znotraj železarne. Za zadnji dve skupini jekel velja, da sta čistejši, znane sestave, in

tako primernejši za reciklažo. Odslužena jekla imajo pogosto spemenljivo sestavo in vsebujejo za predelavo nezaželjene nečistosti [18]. Naprej smo odpadna jekla delili glede na povprečno velikost delcev jekla, na lahke, srednje težke in težke razrede jekel. Za lahko skupino odpadnih jekel je značilna visoka nasipna gostota ρ . Mednje smo uvrstili ostružke, drobljeni jekleni odpad, manjše kose pločevin, vse vrste grodlja in direktno ali gobasto železo. Med srednje težki odpad, smo uvrstili ostale vrste pločevin in povratna odpadna jekla. V razred težkih odpadnih jekel smo uvrstili odpadna jekla, ki so produkt različnih področij industrijskega razreza in odpadne jeklene plošče.

Specifikacija, po kateri smo se tudi ravnali, je Evropska specifikacija o jeklenem odpadu (ang. "European steel scrap specification") [19]. Ta predvideva šest kategorij odpadnih jekel. Definira podkategorije vsaki kategoriji in jim opredeli mejne vrednosti nečistoč, nasipne gostote in dimenzije delcev. Opis vsake od enajstih podkategorij skupaj z ostalimi podatki je podan v tabelah (3.1) in (3.2).

Tabela 3.1: Tabela klasifikacije jeklenega odpada po EUROFER specifikaciji.

Kategorija	Specifikacija	Opis	Dimezije delcev	Nasipna gostota (t/m^3)	Odstotek nečistoč
Star jekleni odpad	E3	Star, debel jekleni odpad, pripravljen z namenom direktnega zalaganja. Lahko vsebuje cevi in votle dele. Ne vključuje dele karoserije avtomobila, betonskega železa in armaturnih mrež in ne vsebuje bakrenih in svinčevih ostankov, z namenom doseganja ciljne sestave in čistoče.	Debelina $\geq 6mm$, dimezije $< 1.5x0.5x0.5m$	≥ 0.6	$\leq 1\%$
	E1	Star, tanek jekleni odpad pripravljen z namenom direktnega zalaganja. Ne vključuje dele karoserije avtomobila, betonskega železa in jeklenih profilov in ne vsebuje bakrenih in svinčevih ostankov, z namenom doseganja ciljne sestave in čistoče.	Debelina $< 6mm$, dimezije $< 1.5x0.5x0.5m$	≥ 0.5	$< 1.5\%$
Nov jekleni odpad	E2	Nov, debel povratni jekleni odpad, pripravljen z namenom direktnega zalaganja. Ne vključuje prevlečenih delov, bakrenih in svinčevih ostankov, betonskega jekla in jeklenih profilov, tudi če so novi.	Debelina $\geq 3mm$, dimezije $< 1.5x0.5x0.5m$	≥ 0.6	$< 0.3\%$
	E8	Nov, tanek povratni jekleni odpad pripravljen z namenom direktnega zalaganja. Ne vključuje dele karoserije avtomobila, betonskega železa in jeklenih profilov in ne vsebuje bakrenih in svinčevih ostankov, z namenom doseganja ciljne sestave in čistoče.	Debelina $< 3mm$, dimezije $< 1.5x0.5x0.5m$	≥ 0.4	$< 0.3\%$
Drobljen jekleni odpad	E6	Nov tanek povratni jekleni odpad pripravljen z namenom direktnega zalaganja. Ne vsebuje bakrenih in svinčevih ostankov in prevlečenih delov z namenom doseganja ciljne sestave in čistoče.		≥ 1	$< 0.3\%$
	E40	Drobljen jekleni odpad katerega 95% delcev ne presega 200 mm v nobeno smer. Preostalih 5% ne sme vsebovati nobenega delca, ki presega 1000 mm v katerokoli smer. Pripravljen mora biti, da omogoča direktno zalaganje, brez odvečne vlage. Ne sme vsebovati ostankov bakra, svınca, litin in nečistoč, z namenom doseganja ciljne sestave in čistoče.		> 0.9	$< 0.3\%$

Tabela 3.2: Nadaljevanje tabele klasifikacije jeklenega odpada po EUROFER specifikaciji.

Kategorija	Specifikacija	Opis	Dimezije delcev	Nasipna gostota (t/m^3)	Odstotek nečistoč
Jekleni ostružki	E5H	Jekleni ostružki z visoko vsebnostjo ogljika z znanim izvorom homogene strukture. Ostružki avtomatnih jekel so lahko prisotni a morajo biti zavedeni. Ostružki morajo biti brez nekovinskih nečistoč in ne preveč oksidirani.			
	E5M	Mešani jekleni ostružki z visoko vsebnostjo ogljika brez prisotnosti ostružkov avtomatnih jekel. Ostružki morajo biti brez nekovinskih nečistoč in ne preveč oksidirani.			
Jekleni odpad z visoko stopnjo nečistoč	EHRB	Star in nov jekleni odpad, ki ga sestavljajo v glavnem armaturna jekla in profili. Lahko je drobljen, rezan ali stisnjen v pakete, brez prisotnosti betona ali drugi gradbenih materialov. Ne sme vsebovati ostankov bakra, svinca, litin z namenom doseganja ciljne sestave in čistoče.	Max. $1.5x0.5x0.5m$	≥ 0.5	$< 1.5\%$
	EHRM	Star in nov jekleni odpad, ki ga sestavljajo mehanski deli (zobniki, jermenice,...), ki niso dovoljeni v preostalih specifikacijah. Odpad ne sme vsebovati ostankov bakra, svinca in litin z namenom ciljne sestave in čistoče.	Max. $1.5x0.5x0.5m$	≥ 0.6	$< 0.7\%$

3.2 Predstavitev problema analize

Analizo zalaganja EOP smo izbrali tako, da je omogočala odkrivanje vpliva vrste reda založenih jekel in mase posamezne vrste jekla na porabljeno energijo pri taljenju. Za produkt analize smo predvideli model, ki bi vhodni podatek o novem zalogu peči razporedil med skupino zalogov iz podatkovne baze, ki so si med seboj, upoštevajoč kriterij porabljene energije pri taljenju, najbližje. Na podlagi te skupine smo predvideli napoved novih profilov taljenja vhodnega zaloga.

Pri iskanju ustrezne mere podobnosti med zalogoma smo morali najprej raziskati možne kombinacije zalogov in preučiti kakšna bi morala biti mera podobnosti za te kombinacije. Za mero podobnosti smo predpostavili, da mora med dvema zalogoma, ki sta si po založenih materialih in masah enaka, prepoznati razliko v zaporedju založenih materialov, če se ta pojavi. Mera mora prepoznati razliko med zalogoma, ki sta si po založenih materialih enaka, razlikujeta pa se po založenih masah. Pomembna lastnost mere, ki smo jo predvideli, je bila tudi zmožnost prepoznavne podobnosti med zalogoma z različnimi založenimi materiali. Rešitev za mero podobnosti, ki je ustrezala vsem definiranim pogojem, smo našli v uteženi Levenshteinovi razdalji in predstavitvi zaloga EOP kot niza po masi enakovrednih blokov.

3.3 Utežena Levenshteinova razdalja kot mera podobnosti zalaganja košar EOP

Metoda vrednotenja podobnosti med zalogoma dveh košar EOP, ki je dopuščala odkrivanje predstavljenih vplivov, je bila razvita iz utežene Levenshteinove razdalje. Ideja utežene Levenshtinove razdalje, kot mere podobnosti med zalogi košar EOP, je predvidela podobnost kot optimalno zaporedje operacij, ki zalog ene košare pretvorijo v zalog druge. Vrednotenje operacij je predstavljeno z utežmi, ki odražajo doprinos izvedene operacije k spremembi porabe energije pri taljenju.

3.4 Levenshteinova razdalja

Izračun Levenshteinove razdalje je problem dinamičnega programiranja, ki z minimalnim številom operacij pretvori prvi niz v drugega. Razdalja deluje nad nizi blokov oziroma simbolov in nad njimi vpelje tri operacije. Operacije vrivanja, brisanja in zamenjave so mehanizmi pretvorbe enega niza v drugega. Vsaka izvedena operacija doprinese k povečanju končne razdalje med nizoma. Operacija zamenjave enakih blokov v nizu je edina operacija, ki ne poveča razdalje med nizoma [20].

Iskanje optimalnega zaporedja operacij poteka v dveh delih. V prvem delu algoritem izvaja tvorbo matrike ovrednotenih prehodov med vozlišči. Z izjemo prvega vozlišča so vsa preostala dosegljiva preko treh prehodov. Horizontalni prehod je poskus poravnave niza preko operacije vrivanja, vertikalni prehod je poskus poravnave niza preko operacije brisanja. Diagonalni prehod med vozlišči predstavlja operacijo zamenjave bloka, ki lahko cenilki, v primeru različnih blokov, doda vrednost, oziroma v primeru enakih blokov, ne spremeni vrednosti cenilke. Algoritem začne v vozlišču $(0,0)$ katerega vrednost je 0. Izračun vsakega vozlišča je problem minimizacije cenilke. Algoritem za vrednost vozlišča izbere minimalno vrednost vsote enega od predhodnih vozlišč in operacije prehoda med tema dvema vozliščema. Diagonalni prehodi so omogočeni le v smeri proti zadnjemu vozlišču, torej vozlišča v desnem spodnjem kotu. Rezultat prvega dela algoritma je matrika vrednosti vozlišč, velikosti N krat M , kjer sta M število blokov v prvem primerjalnem nizu povečano za ena in N število blokov drugem primerjalnem nizu povečano za ena. Matrika v elementu (N,M) vsebuje vrednost Levenshteinove razdalje med nizoma. Drugi del algoritma išče zaporedje operacij, ki se je izvedlo za izračun minimalne razdalje. Iskanje začne v vozlišču (N,M) in se pomika proti izhodiščnemu vozlišču $(0,0)$ tako, da izbere predhodno vozlišče z najnižjo vrednostjo cenilke, s prioriteto izbora operacije zamenjave. Možnih je več zaporedij operacij za doseg minimalne vrednosti cenilke [20].

Primer izračuna Levenshteinove razdalje je prikazan v tabeli (3.3). Za primer

smo prepostavili dva vzorčna, različno dolga zaloga. V tabeli je predstavljena matrika ovrednotenih prehodov med vozlišči. Spodnji, desni element matrike je končna vrednost Levenshteinove razdalje, osenčeni elementi predstavljajo vmesne vrednosti pri računanju razdalje. V tem primeru vidimo, da sta za izračun razdalje možni dve zaporedji operacij. Poudariti je potrebno, da za sam izračun Levenshteinove razdalje ni potrebno poznavanje operacij, ki so se izvedle pri izračunu razdalje.

Tabela 3.3: Prikaz izračuna Levenshteinove razdalje na primeru dveh zalogov.

		Zalog 1					
		ID1		ID1	ID3	ID3	ID4
		0	1	2	3	4	5
Zalog 2	ID1	1	0	1	2	3	4
	ID3	2	1	1	1	2	3
	ID3	3	2	2	1	1	2
	ID5	4	3	3	2	2	2

3.5 Utežena Levenshteinova razdalja

V primerih, ko pričakujemo, da operacije nad določenimi bloki v nizu niso enakovredne, v Levenshteinovo razdaljo vpeljemo uteži. Za vsak tip bloka definiramo utež, ki bo delovala nad operacijo vrivanja bloka, utež, ki bo delovala nad operacijo brisanja bloka in seznam uteži, ki delujejo nad zamenjavo bloka s katerimkoli od preostalih blokov.

Metoda operira nad nizi blokov na način kot metoda Levenshteinove razdalje. V prvem delu, pri katerem se izračunava matrika vozlišč, se za vsako izvedeno operacijo uporabi vrednost uteži operacije. Vrednost vozlišča se določi kot minimalno vrednost vsote predhodnega vozlišča in uteži, ki vozlišči poveže.

Prikaz izračuna utežene Levenshteinove razdalje je prikazan v tabeli (3.4). Razdaljo računamo na istih zalogih, ki smo jih uporabili pri izračunu razdalje v

tabeli (3.3). Pri izračunu smo uporabili uteži, definirane v tabeli (3.5). Zaporedje operacij, ki se uporabijo za izračun utežene Levenshteinove razdalje v podanem primeru, je enako kot pri primeru izračuna neutežene razdalje. Ohranitev zaporedja operacij pri prehodu iz neutežene na uteženo Levenshteinovo razdaljo ni privzeta. V tabeli (3.4) je iz osenčenih polj razvidno zaporedje operacij, ki privedejo do končne razdalje. Pri postopku identifikacije uporabljenih operacij je potrebno za določitev vsake izvedene operacije preveriti, če razlika med vozliščema ustreza vrednosti uteži operacije, ki poveže vozlišči.

Tabela 3.4: Prikaz izračuna utežene Levenshteinove razdalje na primeru v tabeli (3.3)

		Zalog 1					
			ID1	ID1	ID3	ID3	ID4
		0	10	20	35	50	57
Zalog 2	ID1	10	0	10	24	39	53
	ID3	25	15	4	10	24	31
	ID3	40	30	19	4	10	25
	ID5	45	35	32	9	7	12

Tabela 3.5: Uporabljene uteži za izračun utežene Levenshteinove razdalje tabeli 3.4

		ID1	ID3	ID4	ID5
Zamenjava	Dodajanje	10	15	7	5
	Brisanje	10	15	7	5
	ID1	0	4	3	2
	ID3	4	0	1	3
	ID4	3	1	0	2
	ID5	2	3	2	0

3.5.1 Učenje uteži

Izračun matrike vozlišč po metodi utežene Levenshteinove razdalje je mogoč po inicializaciji uteži. Vse uteži smo najprej inicializirali na vrednost ena. Tako smo dobili metodo, ki deluje kot Levenshteinova razdalja. Po izvedbi drugega dela algoritma si zabeležimo izvedene operacije. Operacije zabeležimo kot vektor z elementi, ki predstavljajo doprinos vsake uteži metode h končni vrednosti cenilke. Izberemo učno množico nizov in za vsako izvedbo izračuna utežene Levenshteinove razdalje z inicializiranimi utežmi, med dvema nizoma iz učne množice dobimo vektor doprinosa uteži. Vektorje zapišemo kot vrstice regresijske matrike C , velikosti $n \cdot m$ krat N , kjer je $n \cdot m$ število izračunanih razdalj med nizi in N število uteži, ki jih vpeljuje metoda. Optimizacijska metoda je bila izbrana tako, da zadošča pogojem delovanja metode utežene Levenshteinove razdalje. Uteži morajo biti pozitivna realna števila. Optimizacija linearnih najmanjših kvadratov z omejitvijo se je izkazala za ustrezno. Problem smo zapisali kot (3.2). Kriterijska funkcija, uporabljena v optimizaciji, je temeljila na razliki porabe električne energije med taljenjem šarž, med katerima računamo razdaljo. Glede na izbrano kriterijsko funkcijo v optimizacijskem postopku smo pričakovali, da bo na ta način izračunana mera podobnosti med košarama izražala morebitne povezave med zalaganjem in porabljeno električno energijo pri taljenju založene mase. Potrebno je poudariti, da za nekatere operacije, ki bi se lahko pri izvedbi izračuna razdalje na testnih oziroma novih podatkih o zalogu izvedle, nimamo optimiziranih uteži. Te uteži je potrebno nastaviti na višjo vrednost od najvišje optimizirane vrednosti uteži. Tako zagotovimo, da neoptimizirane uteži operacij niso del izračuna utežene Levenshteinove razdalje.

3.5.2 Transformacija informacije o zalaganju

Podatek o zalaganju EOP zajema podatke o založeni masi posamezne vrste je-klenega odpada in zaporedju založenih materialov za posamezno košaro vsake šarže. Podatek o založeni masi je zvezna spremenljivka in tako neprimerna za

direktno obravnavo z metodo Levenshteinove razdalje. Rešitev problema smo iskali v transformaciji podatka založene mase odpadnega jekla v niz po masi enakovrednih blokov, kvantov. Zapis zaloga kot niza blokov ustreza obliki zapisa, s katerim operira metoda utežene Levenshteinove razdalje. Definiranje mase bloka je zahtevalo kompromis med minimalno izgubo informacije o zalogu in časovno zahtevnostjo izračuna vpeljane razdalje. Za zagotovitev izvedljivosti izračuna razdalj in ohranitve informacije o zalogu najmanjših zabeleženih mas v podatkih smo za obravnavano EOP, s kapaciteto zaloga 100 ton, definirali maso bloka enako 500 kilogramom.

3.5.3 Optimizacijski problem nenegativnih najmanjših kvadratov

Za vrednosti uteži smo se omejili na pozitivna realna števila. Prilagodili smo metodo linearne regresije z vpeljavo omejitve nad optimiziranimi parametri. Izračun vrednosti parametrov regresijskega modela, ki so v našem primeru enaki vrednostim uteži utežene Levenshteinove razdalje, smo omejili na pozitivna realna števila. Poleg omejitve uteži smo morali omejiti tudi vrednosti izhodnega vektorja oziroma kriterijske funkcije na pozitivna realna števila. Omejitev kriterijske funkcije smo vpeljali, zaradi pričakovanih negativnih vplivov operacij brisanja blokov na kriterijsko funkcijo, kar bi ob omejitvi na izračun pozitivnih vrednosti uteži operacij rezultiralo v slabem regresijskem modelu.

Metoda linearnih najmanjših kvadratov je metoda ocenjevanja parametrov regresijskega modela. Metoda izbere parametre empiričnega modela tako, da minimizira vsoto kvadratov razdalj med vsakim podatkom in hiperravnino, ki jo definira enačba modela [21]. Metoda linearnih najmanjših kvadratov z omejitvijo, ki smo jo uporabili za ocenjevanje uteži, je iskala parametre w modela (3.1), da so ustrezali (3.2). Elementi Δe_{mn} vektorja E v enačbi (3.1) se izračunajo kot razlika med porabljenima električnima energijama pri taljenju zalogo n -te in m -te šarže. Elementi vrstice v matriki C v enačbi (3.1) so števci izvedenih operacij, oziroma

uporabljenih uteži operacij w pri izračunu Levenshteinove razdalje.

$$E = C \cdot w, \text{ kjer je}$$

$$E = \begin{bmatrix} \Delta e_{11} \\ \Delta e_{12} \\ \vdots \\ \Delta e_{1n} \\ \Delta e_{21} \\ \Delta e_{22} \\ \vdots \\ \Delta e_{2n} \\ \vdots \\ \Delta e_{mn} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c_{11,1} & c_{11,2} & \cdots & c_{11,N} \\ c_{12,1} & c_{12,2} & \cdots & c_{12,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{1n,1} & c_{1n,2} & \cdots & c_{1n,N} \\ c_{21,1} & c_{21,2} & \cdots & c_{21,N} \\ c_{22,1} & c_{22,2} & \cdots & c_{22,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{2n,1} & c_{2n,2} & \cdots & c_{2n,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{mn,1} & c_{mn,2} & \cdots & c_{mn,N} \end{bmatrix} \quad w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\min_w \|C \cdot w - E\|_2^2, \text{ kjer je } w \geq 0 \quad (3.2)$$

3.5.4 Izvedba modela

Predlagan model smo izvedli v okolju Matlab. Podatki o zalaganju so bili, v primeru raziskave, ki jo obravnava delo, del SQL podatkovne baze o obratovanju EOP. Izvoz baze v obliko, primerno za obdelavo v okolju Matlab je potekal preko vmesnega formata CSV (ang. "comma separated values"). Pretvorjeno tabelo smo prilagodili obliki zapisa informacije o zalaganju, ki je ustrezala predlaganemu modelu.

Izvoz tabel iz podatkovne baze smo izvedli z orodjem "SQLCMD". Orodje omogoča interaktivno izvajanje "T-SQL" stavkov in skript preko ukazne vrstice. Primer stavka, ki iz SQL podatkovne baze izvozi tabelo s podatki o zalaganju je predstavljen v naslednji vrstici [22].

```
sqlcmd -S ZAN -d EOPDATA -E -Q "SELECT * FROM [DBO].REP_BUCKET_DATA" -o
"RepBucketData.csv" -s ",,"
```

Ukaz je sestavljen iz klica orodja in šestih nastavitev.

- 'sqlcmd' je klic programa iz ukazne vrstice.
- '-S' omogoči nastavitve instance Microsoftovega SQL strežnika s katerim se SQLCMD poveže.
- '-d' omogoči dolčitev podatkovne baze znotraj strežnika s katero se SQLCMD poveže.
- '-E' zagotovi uporabo varne povezave z bazo.
- '-Q' nastavitve, omogoča vnos poizvedbe znotraj dvojnih navednic.
- '-o' opcija dovoli definiranje izhodne datoteke, v katero se bo shranil rezultat poizvedbe.
- '-s' opcija definira kateri znak se bo uporabil pri ločevanju podatkov v vrsticah.

Izračun utežene Levenshteinove razdalje je problem dinamičnega programiranja. Izvedba izračuna v okolju Matlab bi bila, s standardnimi funkcijami, ki jih okolje omogoča, za obseg podatkov časovno prezahtevna. Operirali smo z bazo z več kot 8000 zabeleženimi zalogi EOP, kar je pomenilo, da je bilo potrebno po tem, ko smo za učno množico vzeli tretjino razpoložljivih zalogov, še vedno opraviti več kot šest milijonov izračunov Levenshteinove razdalje. Predvideli smo, da bi bila tudi uporaba paralelnega računanja, ki ga omogoča orodje Matlab, časovno prezahtevna. Rešitev problema smo našli v izvedbi algoritma izračuna razdalje v obliki MEX funkcije v programskem jeziku C++.

MEX datoteke so vmesnik med okoljem Matlab in programi, napisanimi v C/C++ programskem jeziku. Za zapis MEX datoteke je potrebno upoštevati standarde jezika C/C++ in zahtevano obliko funkcij, ki jo definira Matlab. Matlab z uporabo prevajalnika, MEX datoteko prevede v binarno MEX datoteko, ki jo je mogoče klicati iz okolja Matlab na enak način, kot standardne Matlabove funkcije [23].

```

#include <math.h>
#include <stdlib.h>
.
.
#include "matrix.h"
#include "mex.h"

double GetSubstWeight(mxArray *WeightStruct, char *SubstId);

void mexFunction(int nlhs,mxArray *plhs[],int nrhs,const mxArray *prhs[])
{
    if(nrhs != 5){
        mexErrMsgIdAndTxt( "MATLAB:LvsthDist:invalidNumInputs" ,
            "Four inputs required.");
    }
    .
    .
    plhs[0] = ArrayOut;
}

double GetSubstWeight(mxArray *WeightStruct, char *SubstId)
{
    /* C++ programska koda za funkcijo GetSubstWeight */
}

```

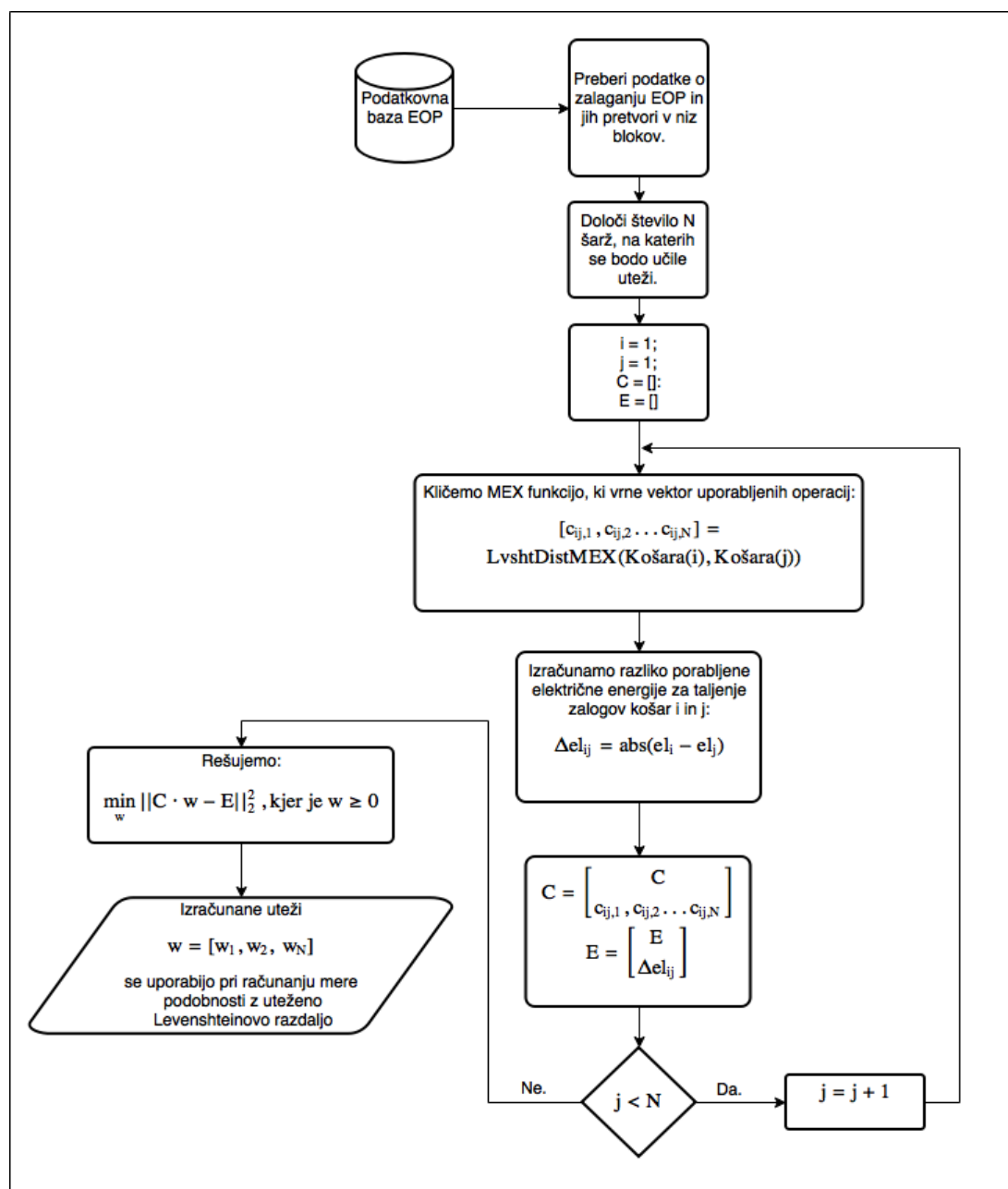
Vključitev zaglavnih datotek je skladna s standardom programskega jezika C++. MEX datoteka zahteva vključitev zaglavne datoteke "mex.h". Definirana sta tudi ime funkcije znotraj MEX datoteke, do katere Matlab dostopa - "mexFunction", in njena oblika. V "nrhs" argument v funkciji "mexFunction" se zapiše število vhodnih argumentov v seznamu vhodnih argumentov "prhs". V "nlhs" argument v funkciji "mexFunction" se zapiše število izhodnih argumentov v seznamu izhodnih argumentov "plhs". Pomembno je, da so vse funkcije, do katerih dostopa

funkcija "mexFunction", v datoteki definirane pred definicijo funkcije "mexFunction". Ime datoteke, v katero je shranjena programska koda, definira ime prevedene funkcije, ki jo bomo klicali iz okolja Matlab [23]. Uporaba MEX funkcij nam je omogočila časovno izvedljivost algoritma. Nekritične dele izračuna modela smo izvedli z uporabo standardnih Matlabovih funkcij.

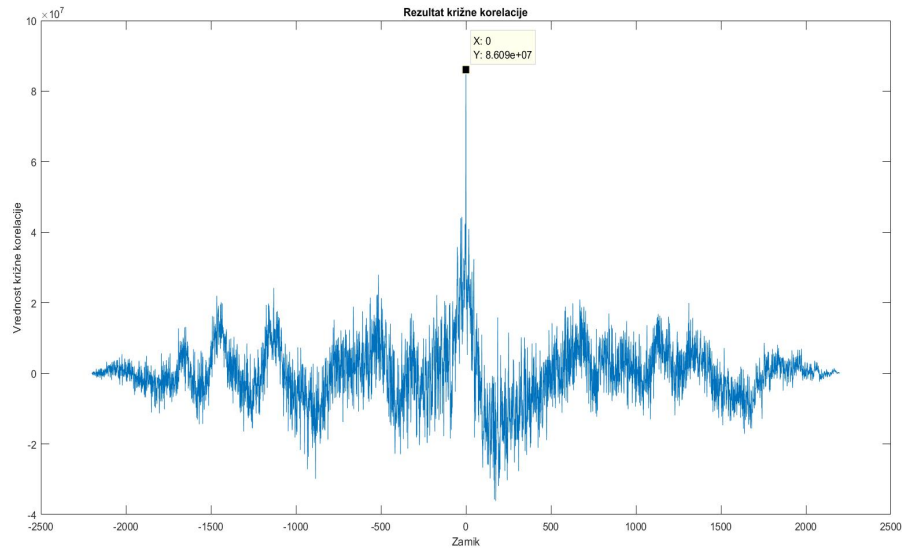
3.5.5 Rezultati modela

Rezultati modela so bili generirani po predhodnem učenju uteži utežene Levenshteinove razdalje. Uteži smo učili z opisano metodo nenegativnih najmanjših kvadratov na 490.000 primerjavah zalogov prve košare. Model z naučenimi utežmi mere podobnosti smo nato uporabili na setu 2.500 primerjav zalogov, naključno izbranih iz učne množice, in setu 2.500 primerjav zalogov, izbranih iz testne množice. Model nam je za vsako primerjavo zalogov na izhodu generiral oceno razlike v porabi električne energije pri taljenju teh dveh zalogov. Ustreznost ocene smo vrednotili z izračunom križne korelacije (3.3, 4.6) izhoda modela za set primerjav in dejanske razlike v porabi električne energije med zalogoma v setu primerjav. V enačbi (3.3) sta y_{model} in y_{proces} vektorja izhoda modela in procesa dolžine n . Slika (3.3) prikazuje opisano križno korelacijo za učni set primerjav. Pri zamiku 0 je jasno razviden maksimum korelacije, kar pomeni, da obstaja povezava med razliko v zalogu in razliko v porabljeni električni energiji pri taljenju zalogov, in da povezavo model deloma pojasni. Naprej smo izračunali avtokorelacijo napake med izhodom modela in dejanskimi vrednostmi. Rezultat avtokorelacije je podan na grafu (3.5). Iz poteka avtokorelacije napake je mogoče razbrati, da je signal napake podoben naključnemu signalu.

Model smo, analogno testiranju na učnih podatkih, testirali še na testnih podatkih. Iz grafov korelacije izhodov (3.4) in avtokorelacije napake (3.6) lahko tudi pri testnih podatkih trdimo, da obstaja povezava med razliko v zalogu in razliko v porabljeni električni energiji pri taljenju zalogov, in da povezavo model deloma pojasni. Rezultati so bili pri testnih podatkih pričakovano slabši.



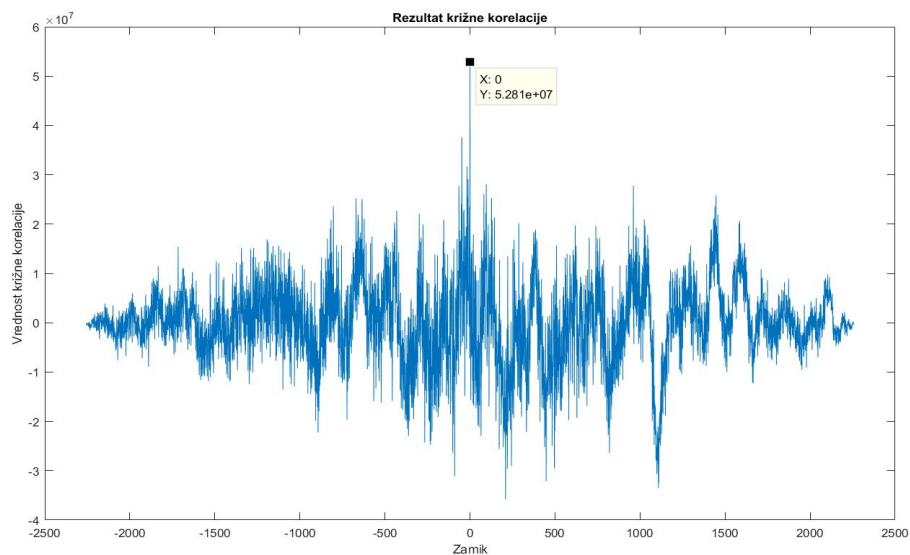
Slika 3.2: Diagram poteka učenja uteži utežene Levenshteinove razdalje.



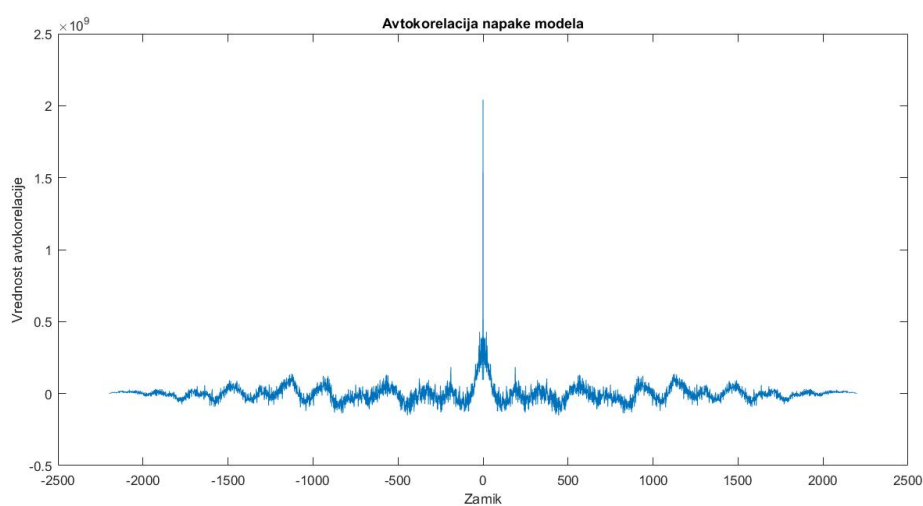
Slika 3.3: Rezultati križne korelacije izhodov modela in procesa pri učnih podatkih na vходу.

Stopnja korelacije med zalogi in porabljeno električno energijo je bila nekoliko pod pričakovanji. Poleg možne neustreznosti uporabljenega modela, smo razlog našli v slabi primerljivosti stanja taline po končanem taljenju prve košare.

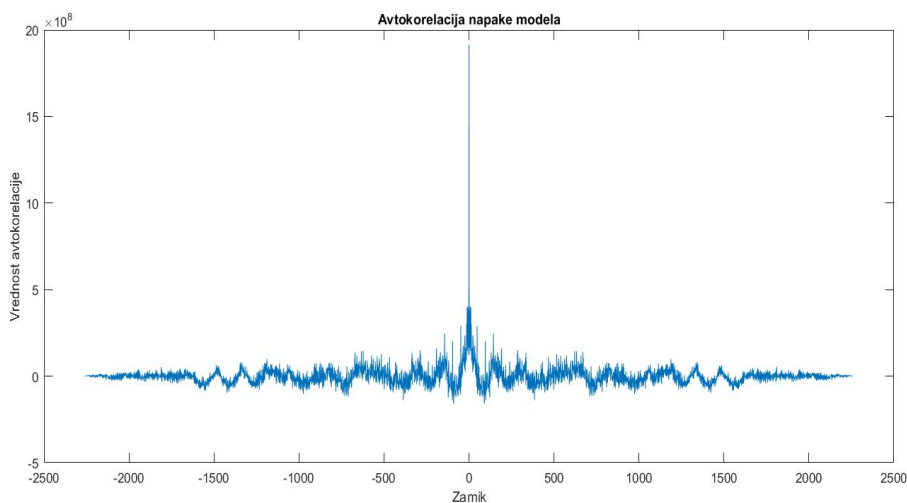
$$\begin{aligned}
 \varphi_{ij}[k] &= (f_{model} \star f_{proces})[k] \quad , \quad \text{kjer je} \\
 f_{model}[k] &= y_{model}[k] - \frac{\sum_{i=1}^n y_{model}[i]}{n} \\
 f_{proces}[k] &= y_{proces}[k] - \frac{\sum_{i=1}^n y_{proces}[i]}{n}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$



Slika 3.4: Rezultati križne korelacije izhodov modela in procesa pri testnih podatkih na vходу.



Slika 3.5: Rezultati avtokorelacije napake izhoda modela pri učnih podatkih.



Slika 3.6: Rezultati avtokorelacije napake izhoda modela pri testnih podatkih.

3.6 "City-block" razdalja v prostoru materialov kot mera podobnosti med košarama

Z analizo rezultatov predstavljenega modela smo ocenili, da smo vrstnemu redu zalaganja pripisali prevelik vpliv na porabo energije. Odločili smo se znižati kompleksnost modela in ohraniti le vrednotenje založenih mas materialov. Zalog smo se odločili predstaviti v prostoru materialov. Vsaka dimenzija prostora je predstavljala zvezno spremenljivko založene mase posamezne vrste odpadnega jekla. V prostoru materialov smo za mero podobnosti med zalogi definirali "City-block" razdaljo. Interpretacija izbrane metrike je neposredno iskanje najbližjih zalogov po seštevku razlik mas posameznih vrst odpadnih jekel. Metoda vpelje nekatere nezaželjene lastnosti. Pri uporabi prejšnje metode smo opazili, da zamenjave istih količin različnih vrst materialov ne doprinesejo toliko k spremembi porabe energije, kot doprinese povečanje skupne mase zaloga. Pri uporabi "City-block" razdalje kot mere podobnosti v prostoru materialov, bi se ob konstantni skupni masi zaloga, v prostoru pomikali po površini hiperkocke. Tako bi, glede na maso, dve ogljišči hiperkocke predstavljali enako skupno založeno maso in pričakovana po-

trebna energija taljenja ne bi smela bistveno odstopati. Podobnost med šaržami, izražena s "City-block" razdaljo v prostoru materialov, ne odraža podobnosti po porabljeni energiji, saj daje večji pomen vrsti založenih materialov kot založeni masi. V primeru tri razsežnega prostora materialov, bi zaloge s konstantno skupno založeno maso predstavili kot na sliki (3.7), z oblakom točk. Na sliki (3.7) je jasno razvidna opisana hiperkocka.

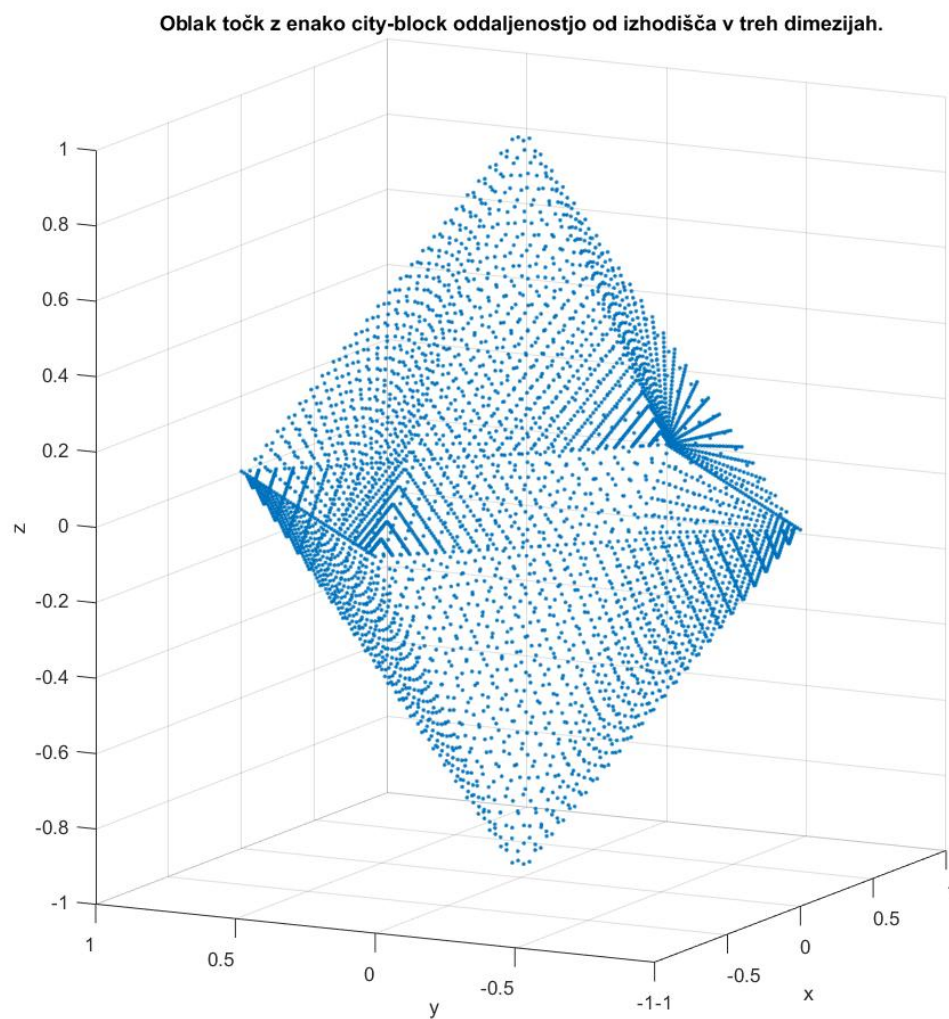
Po pregledu baze podatkov, smo zaključili, da skupne založene mase pri večini šarž bistveno ne odstopajo. S to ugotovitvijo smo predvideli, da opisana lastnost "City-block" razdalje, ne bi dajala neustreznih rezultatov. Najbližji zalog bi, ob predpostavki enake skupne mase vseh primerjanih zalogo, s stališča talilnega postopka predstavljal predvideno najpodobnejšo šaržo.

3.6.1 Celoten prostor materialov

Sprva smo razdaljo med zalogi računali v prostoru 22-ih vrst odpadnih jekel. Podobnost med zalogom dveh šarž, smo računali kot evklidsko normo vektorja treh "City-block" razdalj. Vsaka razdalja v vektorju je razdalja med istoležnima košarama v vsaki od šarž. Obravnava EOP se zalaga postopno s tremi košarami, zato je tudi vektor razdalj dolžine tri. Rezultati so pokazali, da je delovanje metode ustrezno in po pričakovanjih poišče šaržo z najbližjim zalogom. Kljub temu, da ne upoštevamo vrstega reda zalaganja, se izkaže, da vrstna reda najbližjih poiskanih zalogo, v večini primerov sovpadata. Predvidimo, da je razlog za to v uveljavljenih pravilih o zaporedju vrst odpadnih jekel pri zalaganju košar EOP.

3.6.2 Nižanje prostora materialov

Izkazalo se je, da je število šarž, ki med seboj izkazujejo veliko mero podobnosti, majhno. Dve šarži, ki se med seboj razlikujeta v eni vrsti založenega odpadnega jekla s podobnimi talilnimi lastnostmi, sta si z vidika talilnega procesa podobni, vendar te podobnosti z zadnjo metodo ne identificiramo. Ob ustreznem

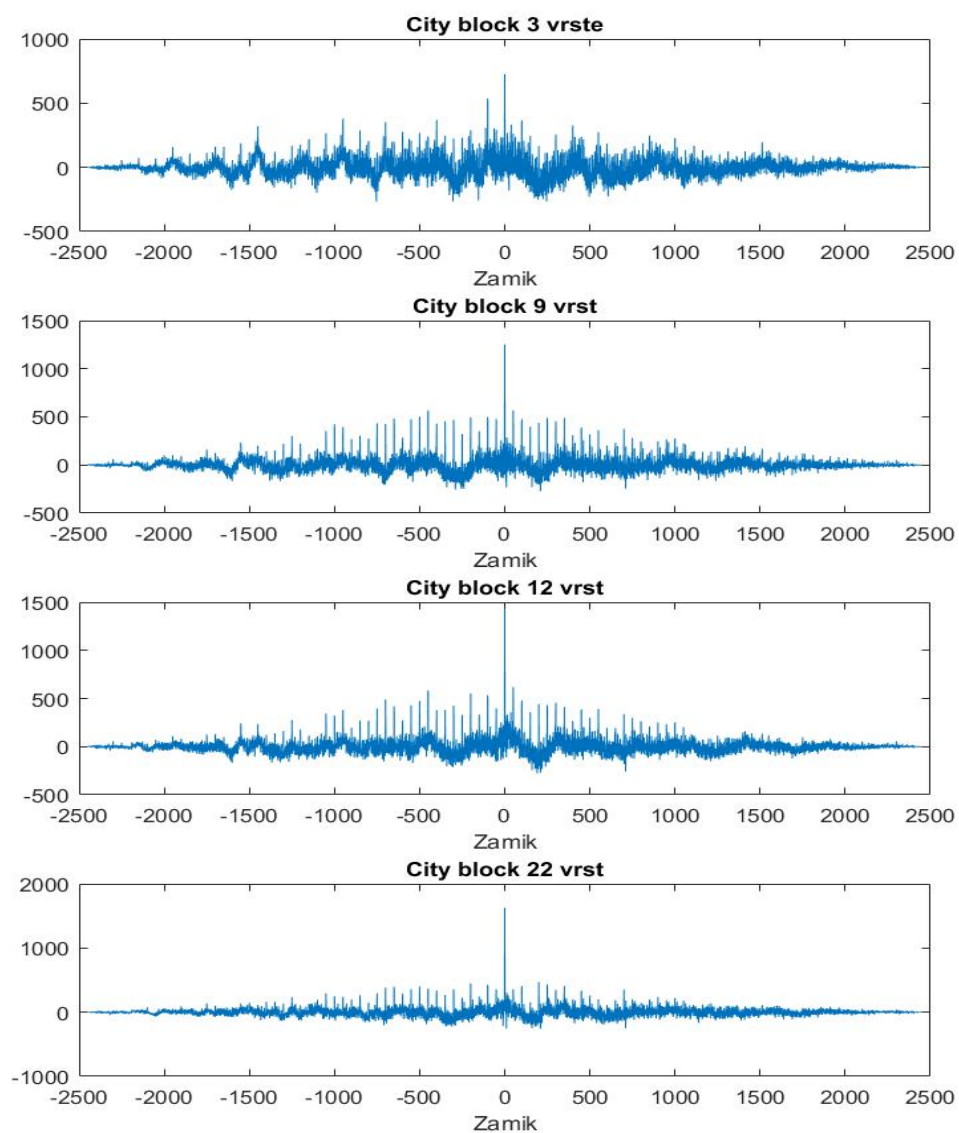


Slika 3.7: Oblak točk v 3 razsežnem prostoru s konstantno "City-block" oddaljenostjo od izhodišča.

zmanjšanju števila vrst odpadnih jekel dosežemo, da izračun "City-block" razdalje med zalogi bolje opiše podobnost med talilnimi procesi. Nižanje prostora smo izvedli v treh stopnjah. Postopoma smo združevali vrste odpadnih jekel v nadvrste. Najprej smo prostor materialov znižali na dvanajst vrst odpadnih jekel, nato na devet in na tri. Pri prehodu iz dvaindvajsetih vrst na dvanajst smo združevali vrste, ki pripadajo istemu tipu odpada. Nadaljno združevanje je upoštevalo sorodnost nekaterih tipov odpada in jih predstavilo z skupnim nadtipom. Prehod na tri skupine materialov, je upošteval delitev odpadnih jekel na lahke, srednje težke in težke.

Rezultate metode, dobljene z nižanjem prostora materialov, smo vrednotili tako, da smo jih primerjali z rezultati dobljenimi pri modelu, ki za mero podobnosti med košarami uporablja uteženo Levenshteinovo razdaljo. Za vrednotenje smo z vsako metodo generirali vektor mer podobnosti za 2.500 primerjav zalogov prve košare. Nato smo vektorje standardizirali po enačbi (3.4) in med njimi izračunali križno korelacijo (4.6). Rezultati križnih korelacij so predstavljeni na sliki (3.8). V signalih križnih korelacij je jasno razviden maksimum pri zamiku 0, kar pomeni, da med uteženo Levenshteinovo razdaljo in "City-block" razdaljo obstaja povezava. S signali križnih korelacij lahko upravičimo nižanje prostora materialov do 9 kategorij. Pri 3 razsežnem prostoru materialov se korelacija med merama podobnosti občutno zniža.

$$\begin{aligned}
 X' &= \frac{X - \mu(X)}{\sigma(X)}, \text{ kjer je} \\
 X &- \text{vektor podatkov } x_i \\
 X' &- \text{vektor standardiziranih podatkov} \\
 \sigma &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \\
 \mu &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i
 \end{aligned} \tag{3.4}$$



Slika 3.8: Prikaz križnih korelacij med standardiziranimi vrednostmi mer podobnosti utežene Levenshteinove razdalje in štirimi "City-block" razdaljami.

4 Generiranje profilov

Generiranje referenčnih profilov, ki definirajo talilni proces, je v glavnem delo operaterjev, ki na podlagi izkušenj in priporočil prilagajajo talilni proces zalogu EOP in ciljem talilnega procesa. Profili se spreminjajo tekom talilnega procesa glede na stanje v EOP. Stanje se določa preko merljivih veličin, faznih tokov in napetosti, in pojavov, ki generirajo specifičen zvok, ki ga izkušen operater poveže s stanjem v EOP. Avtomatsko generiranje referenčnih profilov bi razbremenilo operaterja v začetni fazi planiranja profilov. Predvideno je tudi zmanjšanje števila popravkov profilov tekom talilnega procesa. Predlagano generiranje profilov temelji na bazi podatkov preteklih talilnih procesov in ne upošteva stanja EOP v realnem času. Naključne pojave pri obratovanju EOP, kot so lom grafitnih elektrod, težave pri zalaganju košar idr., vnaprej ne moremo predvideti.

Sistem generiranja referenčnih profilov, ki ga delo predlaga, omogoča obravnavo posameznih, že izvedenih talilnih procesov in predlaga izboljšave z vidika nižanja porabljene energije. To bi lahko dalo operaterju novo znanje o vplivih spreminjanja profilov na porabo energije v talilnem procesu.

4.1 Analiza profilov

Analizo profilov smo začeli s pregledovanjem profilov, ki smo jih kasneje zajeli v orodje za avtomatsko generiranje profilov. Iskali smo skupne lastnosti sorodnih profilov in način, kako učinkovito opisati posamezen profil. Po pregledu profilov smo ugotovili, da v glavnem vsi profili sledijo določeni obliki. Opazili smo, da

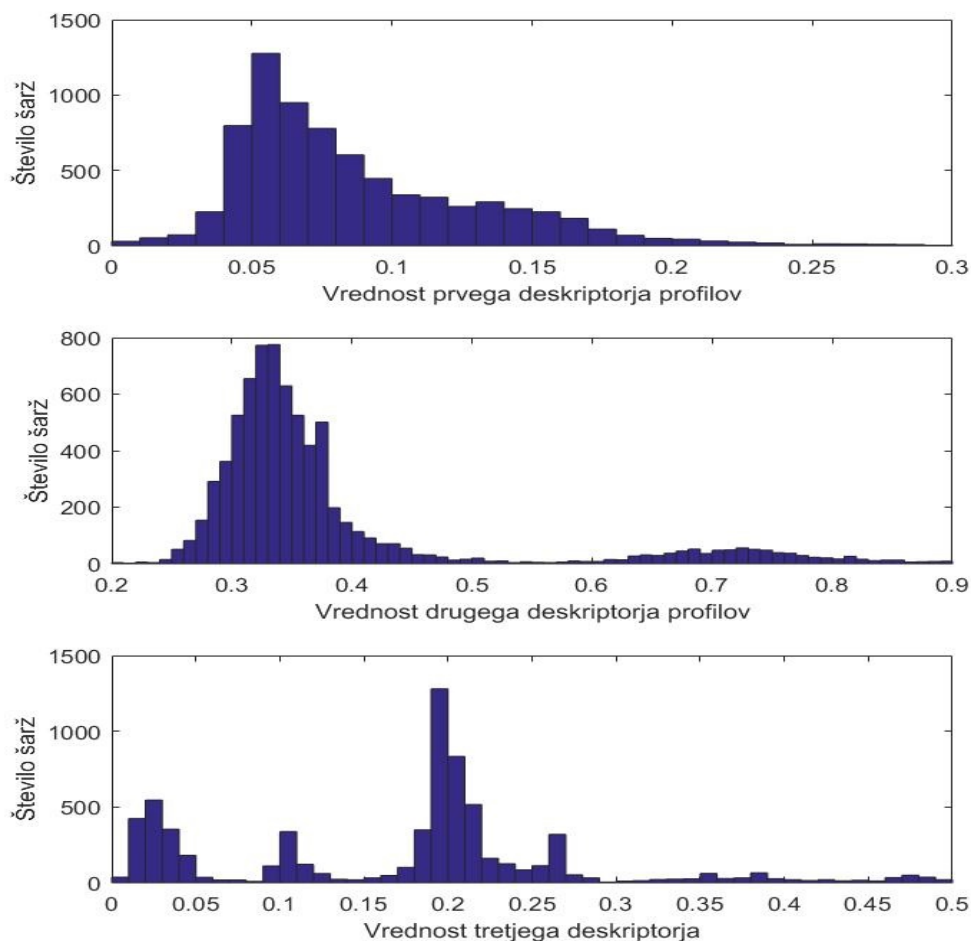
je za profile značilna faza praviloma monotonega naraščanja profila proti maksimalni vrednosti. Sledi del profila, ki ohranja maksimalno vrednost, kateremu sledi faza praviloma monotonega upadanja profila proti minimalni vrednosti. Glavne razlike med profili smo opazili v točki, pri kateri se začne faza naraščanja profila, v dolžini dela profila z maksimalno vrednostjo in v strmini upadanja profila. Z namenom pridobitve kvantitativne ocene variabilnosti oblike profilov, smo definirali tri deskriptorje oblike profilov. Deskriptorji so bili zasnovani tako, da so prepoznavali opažene razlike med profili.

4.1.1 Deskriptorji profilov

Prvi deskriptor je definiran z enačbo (4.1) kot integral razlike maksimalne vrednosti profila in profila od začetka profila t_0 do časa, ko profil doseže maksimalno vrednost t_{max} . Prvi deskriptor tako nosi informacijo o času začetka monotonega naraščanja in o strmini naraščanja.

Drugi deskriptor je definiran z enačbo (4.2) kot povprečna vrednost integrala profila od časa začetka monotonega naraščanja t_1 do konca monotonega upadanja profila t_2 . Z znanjem o značilni obliki profilov smo lahko sklepali, da višja povprečna vrednost drugega deskriptorja pomeni daljši del profila, ko je ta pri maksimalni vrednosti. Integral smo časovno normirali, da bi lahko drugi deskriptor razločil med profiloma, za katera je vrednost integrala enaka, a se razlikujeta po maksimalni vrednosti profila in trajanju dela profila, ki ga integriramo. Del profila, ki se integrira pri drugem deskriptorju smo poimenovali sredinski del profila, kasneje tudi tipični del profila.

Tretji deskriptor je definiran z enačbo (4.3) kot integral razlike maksimalne vrednosti profila in profila od trenutka, ko profil doseže maksimalno vrednost t_{max} , do konca profila pri času t_{final} . Tretji deskriptor nosi informacijo o strmini upadanja profila in o času, ko je profil dosegel minimalno vrednost do konca profila.



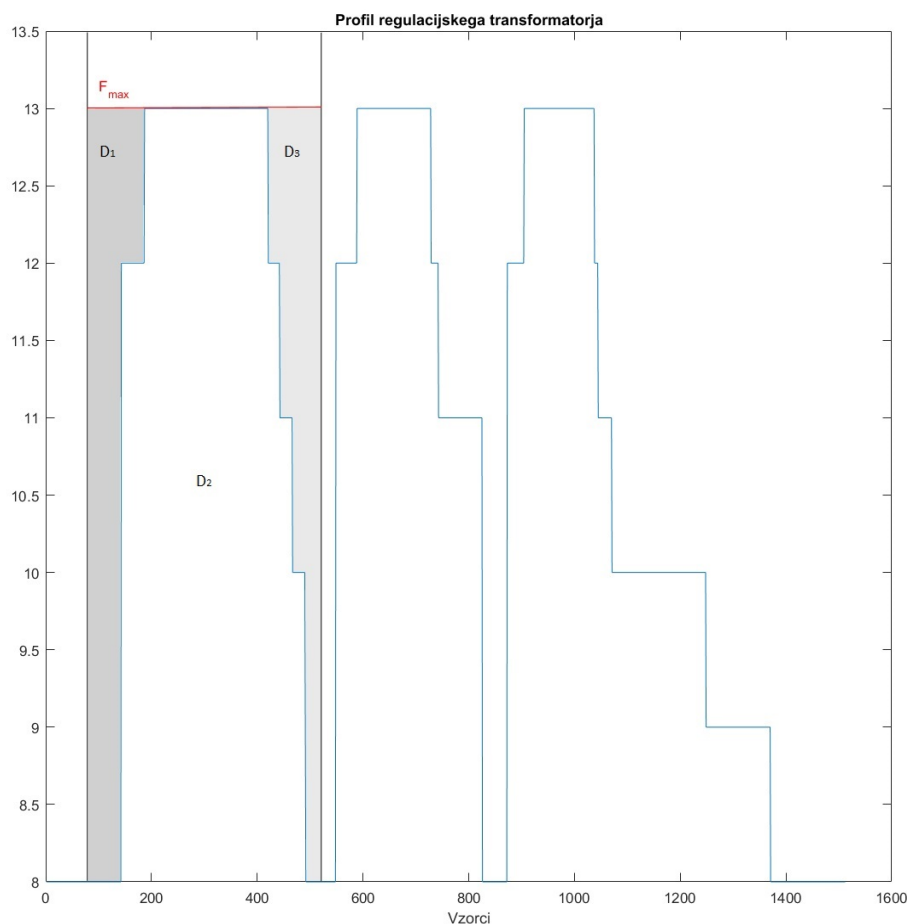
Slika 4.1: Histogram normiranih vrednosti deskriptorjev profilov.

$$D_1 = (t_{max} - t_0) \cdot f(t_{max}) - \int_{t_0}^{t_{max}} f(t)dt \quad (4.1)$$

$$D_2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt \quad (4.2)$$

$$D_3 = (t_{final} - t_{max}) \cdot f(t_{max}) - \int_{t_{max}}^{t_{final}} f(t)dt \quad (4.3)$$

Analiza vrednosti deskriptorjev nam je dala vpogled v variabilnost oblike profilov. Slika (4.1) prikazuje tri histograme vrednosti deskriptorjev normiranih na



Slika 4.2: Prikaz določanja deskriptorjev profilov.

interval vrednosti 0 do 1. Histogrami so podani za profile regulacijskega transformatorja za taljenje prve košare. Za profil, ki ga obravnavajo histogrami lahko rečemo, da prihaja do večjih variabilnosti oblike pri prvem in tretjem deskriptorju. Pričakujemo torej večjo variabilnost pri časovnem zamiku sredjega dela profila, kot pri sami obliki srednjega dela.

Po analizi deskriptorjev profilov za regulacijski transformator in metanov gorilec bi se lahko pri nadaljnjem razvoju orodja za avtomatsko generiranje profilov osredotočali le na časovne zamike srednjih delov profilov in ne na obliko sre-

Tabela 4.1: Tabela povprečnih vrednosti in standardnih odklonov deskriptorjev profilov.

Ime profila	$\overline{D_1}$	$\sigma(D_1)$	$\overline{D_2}$	$\sigma(D_2)$	$\overline{D_3}$	$\sigma(D_3)$
Regulacijski transformator	0.0872	0.0690	0.3562	0.0685	0.1910	0.1609
CH4 gorilec	0.1240	0.1038	0.6417	0.0320	0.1541	0.1211
Kisikovo kopje	0.1479	0.0649	0.4469	0.1044	0.2676	0.0641

dnjega dela. Iz tabele (4.1.1) je to razvidno iz razmerja standardnih odklonov in povprečnih vrednosti deskriptorjev, ki je večje za prvi in tretji deskriptor.

Analiza profilov kisikovega kopja je ovrgla možnost upoštevanja le časovnih zamikov pri generiranju novih profilov, saj je z relativno visokim razmerjem standardnega odklona in povprečne vrednosti drugega deskriptorja pokazala, da za ta profil nezanemarljiv del variabilnosti prispeva oblika srediskega dela profila.

Rezultate analize smo predstavili za profile, ki so se uporabili za taljenje prvih košar. Podobne rezultate smo dobili tudi za naslednji dve košari.

4.2 Cilji talilnega procesa

Moderne jeklarne, za zadoščanje potreb trga po različnih lastnostih jekel, proizvajajo širok nabor različnih jekel. Jeklarna, v kateri je nameščena obravnavana EOP, izdeluje več kot 1.500 različnih vrst jekel. Za pridelavo določenega tipa jekla je potrebno ustrezno usmeriti celoten postopek pridelave jekla, torej tudi talilni proces jeklenega odpada. Za usmeritev tega se definirajo cilji talilnega procesa, ki definirajo končno temperaturo taline in stopnjo vsebnosti kisika v talini po končanem taljenju zadnje košare v šarži. Iz definiranih ciljev lahko sklepamo, da ti vplivajo na referenčne profile in jih je potrebno upoštevati pri generiranju novih profilov. Neupoštevanje ciljev bi lahko privedlo do neupravičenega zmanjšanja

dovedene energije in kisika pri talilnem procesu.

4.3 Generiranje optimalnega profila

Izvedba algoritma generiranja optimalnega profila glede na definiran zalog EOP in cilje talilnega procesa je predstavljala problem integracije modela, pridobljenega z analizo zalaganja EOP, in algoritma generiranja novega profila. Povezava med orodjema je informacija o talilnih postopkih po zalogu najpodobnejših šarž in vrednost mere podobnosti za posamezne šarže. Na podlagi teh informacij algoritem generiranja novega profila oblikuje kriterij, po katerem se formira nov profil.

4.3.1 Kriterij generiranja novih profilov

Kriterij generiranja novih profilov smo predstavili kot vektor vrednosti K , izračunanih na podlagi željene optimizacije. Umestitev računanja kriterija v program, je predstavljena v diagramu poteka programa (4.5). Vrednosti v vektorju K predstavljajo uteži, ki ovrednotijo šarže glede na ustreznost optimizaciji. Za optimizacijo porabe električne energije smo uteži določili kot normirane inverzne vrednosti porabe električne energije (4.4). Vektor smo normirali z vrednostjo vsote elementov vektorja. Število šarž, ki so upoštevane v optimizaciji profilov, je odvisno od vrednosti mere podobnosti med zalogi. V optimizaciji se upoštevajo le šarže z zalogi, katerih vrednost mere podobnosti do novega zaloga ne presega določenega praga. Prag smo določili tako, da se v povprečju v optimizacijski postopek uvrsti pet do šest šarž. Za zagotovitev upoštevanja ciljev talilnega procesa se v optimizacijski postopek uvrstijo le šarže z enakimi cilji. V primeru, da po zalogu najpodobnejša šarža izkazuje tudi najoptimalnejše delovanje EOP, se optimizacijski postopek zaključi in se predlagajo profili, ki so se uporabili pri tej šarži.

$$K = \frac{1}{\sum_{j=2}^m \frac{1}{el_j}} \cdot \left[\frac{1}{el_2}, \frac{1}{el_3}, \dots, \frac{1}{el_m} \right] \quad (4.4)$$

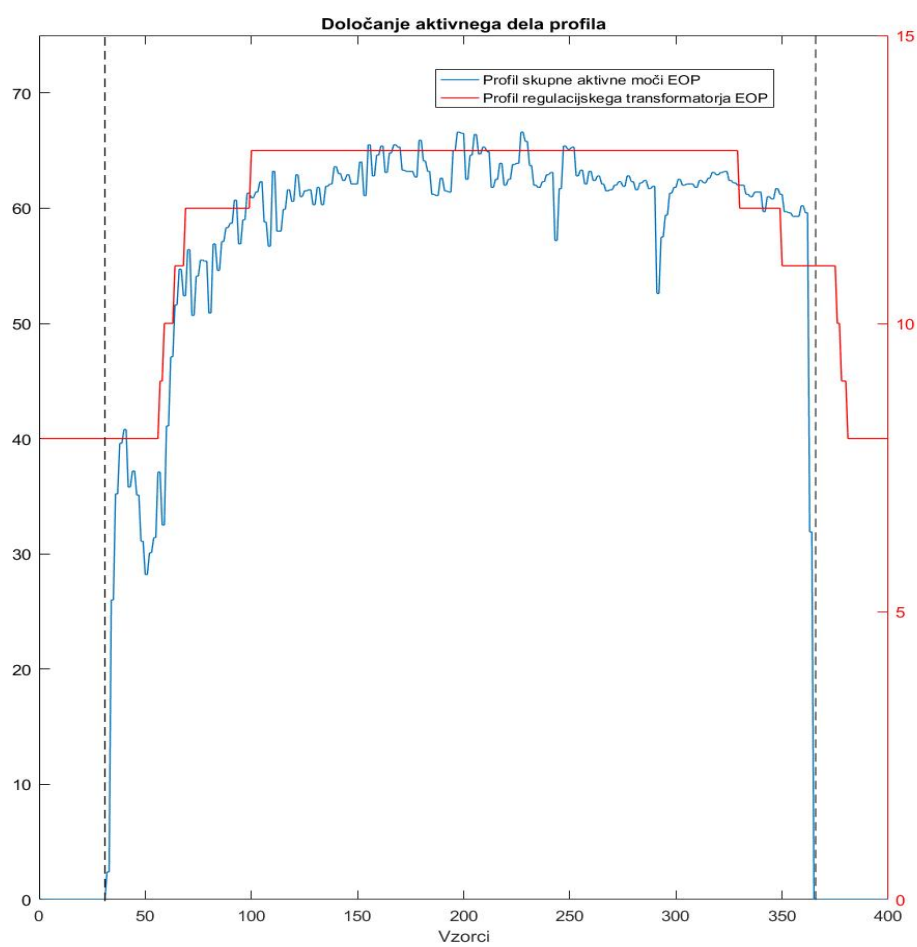
4.3.2 Identifikacija aktivnega dela profila

Po tem, ko smo določili šarže, ki se bodo upoštevale pri optimizaciji, in definirali uteži, ki predstavljajo vpliv posamezne šarže na optimizacijo, smo se osredotočili na profile. Referenčni profili so definirani za celotni čas talilnega procesa od zaloga prve košare do odlitja taline. V času, ko poteka zalaganje košar, opravljanje meritev in obravnava zastojev, peč ne obratuje. Profili so za ta čas definirani, a ne vplivajo na spreminjanje stanja v EOP. Za identifikacijo aktivnih delov referenčnih profilov smo uporabili meritev trenutne aktivne moči EOP. Predpostavili smo, da je peč aktivna takrat, ko je vzpostavljen oblok na vsaj eni od elektrod. Za nadaljno obdelavo smo uporabljali le aktivne dele profilov.

Prikaz problema identifikacije aktivnih delov profilov je prikazan na sliki (4.3). Vidimo, da je profil regulacijskega transformatorja definiran na širšem območju kot je EOP aktivna. Meji aktivnega dela profila, ki sta bili identificirani, sta prikazani s prekinjenima navpičnima črtama. Ob upoštevanju celotnega profila brez omejitve na aktivni del, profil ne bi izražal dejanskega stanja v EOP.

4.3.3 Težave pri optimizaciji profilov

Natančnejši pregled posamezne vrste profilov je opozoril na dve večji težavi pri obravnavi profilov. Časovni zamik tipičnih delov profilov je bila prva težava, ki je onemogočila uporabo preprostega uteženega povprečja za predlog novega profila. Razviti je bilo potrebno algoritem, ki je pred računanjem uteženega povprečja poravnal tipične dele profilov. Druga težava se je pojavila pri omejitvi na aktivne dele profilov, kar je vpeljalo razliko v dolžini obravnavanih profilov. To je pomenilo, da v vsakem trenutku izračuna novega profila nimamo na voljo vseh, v optimizacijski postopek uvrščenih, profilov.



Slika 4.3: Prikaz določanja aktivnega dela profilov.

4.3.4 Obravnava časovnega zamika tipičnih delov profilov

Referenčne profile sestavljajo deli, ko je podsistem, na katerega vplivajo, neaktiven in deli, ko je aktiven. Aktivni deli referenčnih profilov imajo za vsak podsistem sistema EOP, na katerega vplivajo, tipično obliko. Trenutek aktiviranja profila posameznega podsistema se med šaržami razlikuje. Identifikacija časovnega zamika tipičnih delov referenčnih profilov je ključna za ustrezno generiranje novih profilov. Z uporabo postopka križne korelacije med dvema profiloma smo določili časovni zamik med tipičnima deloma profilov kot indeks maksimalne vrednosti vektorja križne korelacije.

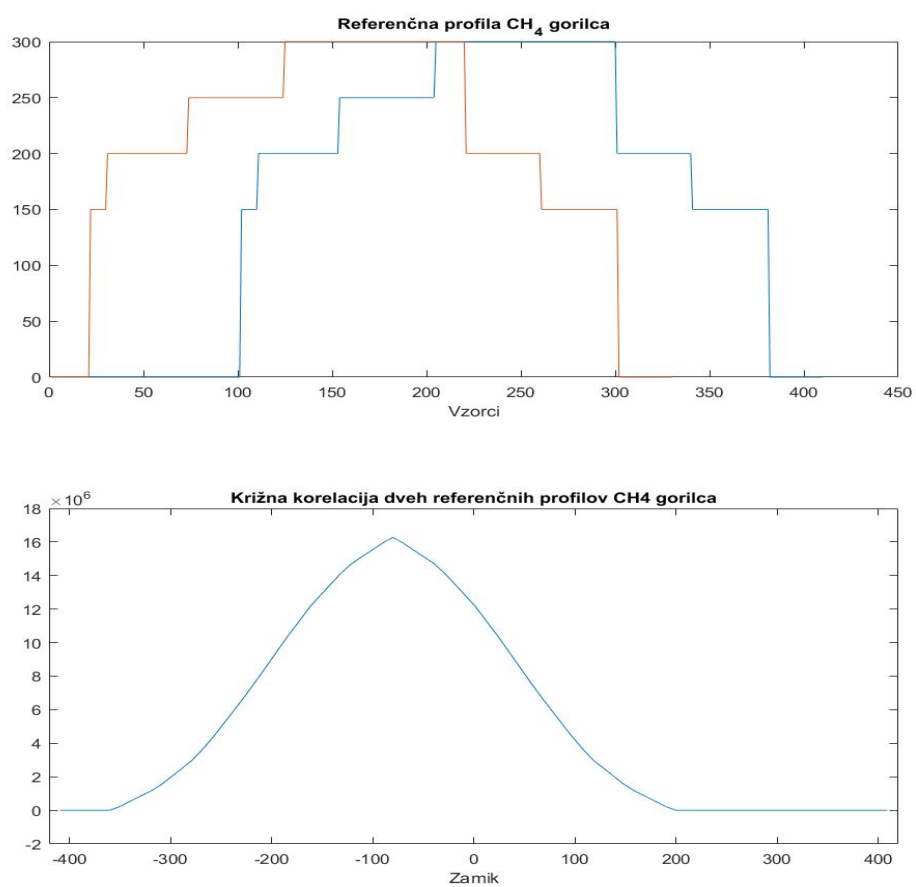
4.3.5 Metoda križne korelacije

Korelacija $\varphi_{ij}(\tau)$ dveh neperiodičnih signalov $f_i(t)$ in $f_j(t)$ je podana z izrazom (4.5) [24]. Ker imamo opravka z neperiodičnimi, diskretnimi signali, je izračun korelacije, ki smo ga uporabljali, sledil izrazu za korelacijo $\varphi_{ij}[k]$ (4.6) dveh diskretnih funkcij $f_i[k]$ in $f_j[k]$. Korelacijo med dvema diskretnima signaloma $f_i[k]$ in $f_j[k]$, za katera velja $f_i[k] \neq f_j[k]$, imenujemo diskretna križna korelacija. Križno korelacijo diskretnih signalov $f_i[k]$ in $f_j[k]$ interpretiramo kot funkcijo medsebojne podobnosti signalov v odvisnosti od zamika signalov k .

$$(f_i \star f_j)(\tau) = \varphi_{ij}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{f_i(t)} f_j(t + \tau) dt \quad (4.5)$$

$$(f_i \star f_j)[k] = \varphi_{ij}[k] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \overline{f_i[m]} f_j[m + k] \quad (4.6)$$

Križno korelacijo smo v programu izvajali s klicom Matlab funkcije "xcorr", ki izračuna diskretno križno korelacijo signalov podanih v obliki vektorjev. Funkcija križno korelacijo računa med dvema enako dolgima signaloma. Na sliki (4.4) je razvidno, da signala na zgornjem grafu nista enake dolžine. Funkcija "xcorr" v takem primeru krajšemu signalu pripne vektor ničel, dolžine enake razliki dolžin signalov. To je razvidno v dolžini signala križne korelacije na spodnjem grafu slike (4.4). Za pridobitev pravilnega zamika med tipičnimi deli signalov je



Slika 4.4: Prikaz izračuna križne korelacije dveh profilov CH₄ gorilca

potrebno upoštevati funkcionalnost dodajanja ničel krajšemu signalu. Pravilno izračunavanje smo dosegli tako, da smo pri križni korelaciji zamikali vedno daljši signal, tj. signal brez dodanih ničel. Ker se ničle dodajajo na konec krajšega signala, nam tako na zamike signala križne korelacije niso vplivale. Upoštevati smo morali le spremembo predznaka zamika, glede na to, kateri signal smo zamikali.

Iz spodnjega grafa križne korelacije na sliki (4.4) je razvidno, da sta si profila iz zgornjega grafa na sliki (4.4) najbolj podobna pri zamiku 81-ih vzorcev, oziroma sta tipična dela profilov zamaknjena za 81 vzorcev.

4.3.6 Obravnava različno dolgih aktivnih delov profilov

Krajsanje referenčnih profilov na aktivne dele je privedlo do različnih dolžin profilov, ki se obravnavajo v optimizacijskem postopku. Za uporabo uteženega povprečja aktivnih delov profilov je bilo potrebno določiti, kako bo metoda delovala v delih, kjer niso vsi profili definirani. Za ustrezno se je izkazalo, da v vsaki točki računamo uteženo povprečje na podlagi definiranih profilov, s tem da za točke, kjer niso definirani vsi profili, ponovno izračunamo uteži.

4.3.7 Dvostopenjska optimizacija profilov

Algoritem generiranja referenčnega profila za nov zalog začnemo z izbiro prototipa, katerega bomo izpostavili postopku optimizacije. Za prototip algoritem izbere tisti profil, ki je bil uporabljen v talilnem postopku šarže z najpodobnejšim zalogom novemu zalogu. Preveri se, ali ima izbran zalog, ki izkazuje najvišjo podobnost novemu zalogu, tudi najboljši izračunan kriterij. Ob izpolnjenem pogoju program predlaga profil, ki se je uporabil za taljenje izbranega zaloga. Nadaljnje spreminjanje profila, ki se je uporabil za taljenje najpodobnejšega zaloga novemu zalogu, in uporaba katerega je privedla do najnižje porabljene električne energije na tono jekla, bi bilo neupravičeno.

Od tu naprej algoritem razdelimo na dve stopnji. Prva stopnja zajema časovni

premik tipičnega dela prototipnega profila in je v diagramu poteka programa (4.5) predstavljen kot del diagrama znotraj modrega polja. Premik T_1 definiramo kot uteženo povprečje časovnih t_i zamikov tipičnih delov ostalih profilov P_i v optimizacijskem postopku do tipičnega dela prototipnega profila P_1 . Uteženo povprečje časovnih zamikov se izračuna po enačbah (4.7) in (4.8). S tem dosežemo, da se tipični del prototipnega profila časovno pomakne v smeri zmanjšanja porabe električne energije.

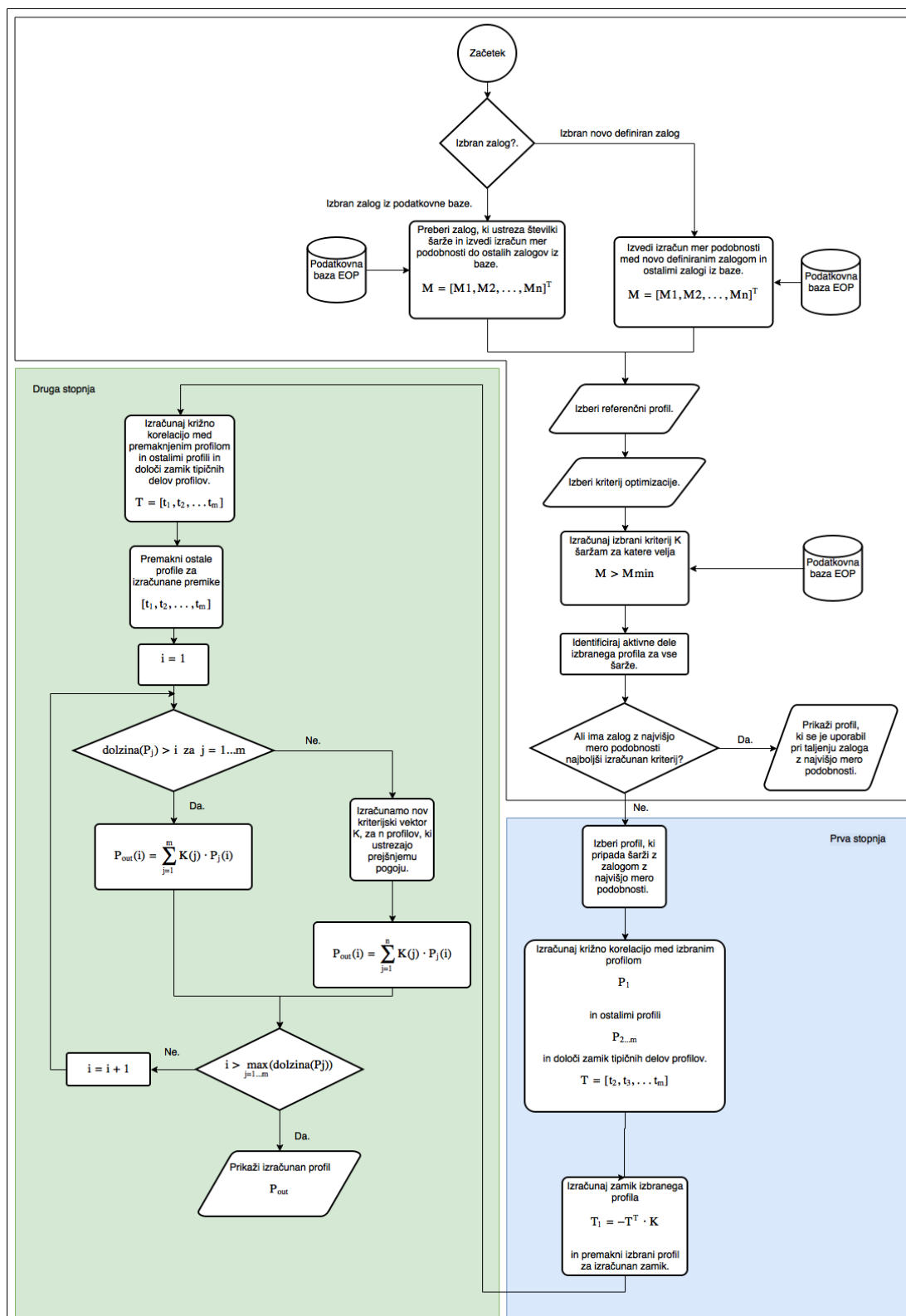
$$T_1 = [t_2, t_3, \dots, t_m] = -T^T \cdot K \quad (4.7)$$

$$t_i = \max_k ((P_1 \star P_i)[k]) \quad , \quad kjer \quad je \quad i = 2 \dots m \quad (4.8)$$

Druga stopnja obravnava spemembo oblike tipičnega dela prototipnega profila in je v diagramu poteka programa (4.5) predstavljena kot del diagrama znotraj zelenega polja. Algoritem najprej, s pomočjo metode križne korelacije, poravna tipične dele ostalih profilov s premaknjenim tipičnim delom prototipnega profila. Časovni zamiki profilov se izračunajo po enačbi (4.8). Pri zamikih je potrebno upoštevati spremembo predznaka časovnega zamika. Na premaknjenih profilih se nato izračuna uteženo povprečje P_{out} . Uteženo povprečje se računa za vsako točko profila posebej in pri tem se uporabi toliko profilov, kolikor jih je v točki definiranih. Za primere, ko v točki kateri od n profilov ni definiran, se ponovno izračunajo uteži K . Rezultat uteženega povprečja je referenčni profil, katerega zaloga vrednosti so realna števila. Za uporabo profila kot referenčnega vhoda v podsistem EOP je potrebno zalogo vrednosti profila prilagoditi zalogi vrednosti vhoda. Za večino profilov moramo vrednosti omejiti na cela, pozitivna števila.

4.4 Analiza generiranih profilov

Vrednotenje generiranih profilov je bilo omejeno na ocenjevanje ustreznosti generiranih profilov pričakovanim profilom. Dejansko vrednotenje izboljšav, ki jih avtomatsko generirani profili vpeljejo, bi bilo možno po analizi večmesečnega



Slika 4.5: Diagram poteka "Operator" programa.

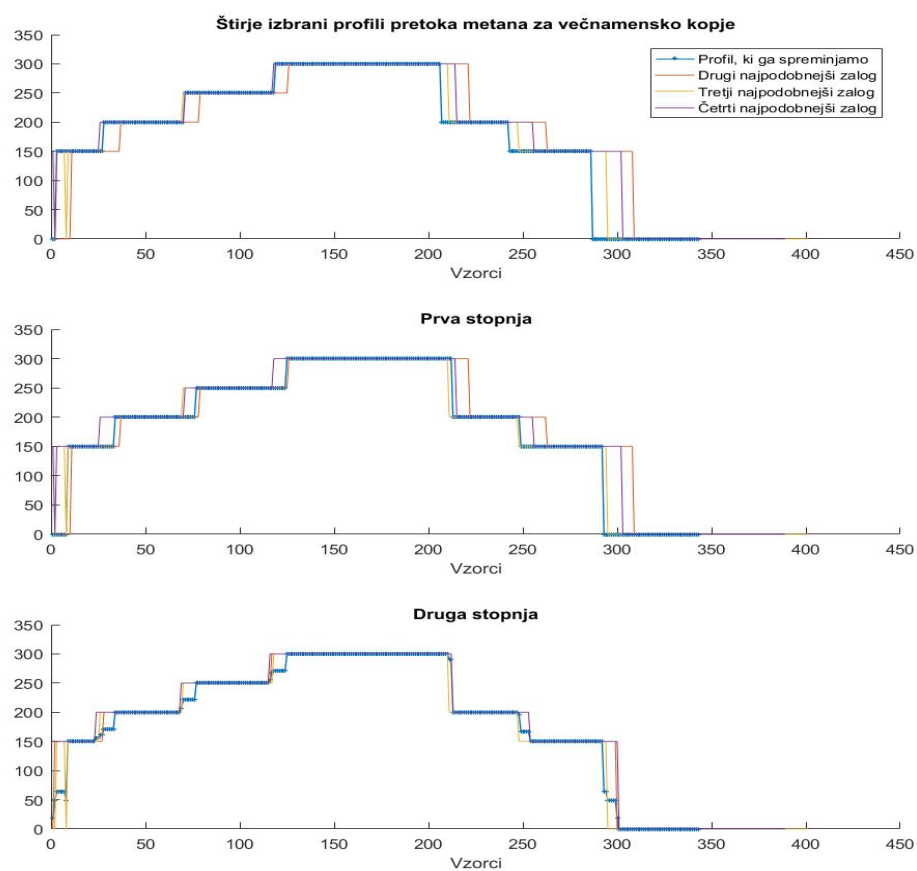
obratovanja s predlaganimi profili vodene EOP. Za potrebe magistrske naloge nam takšno testiranje ni bilo omogočeno.

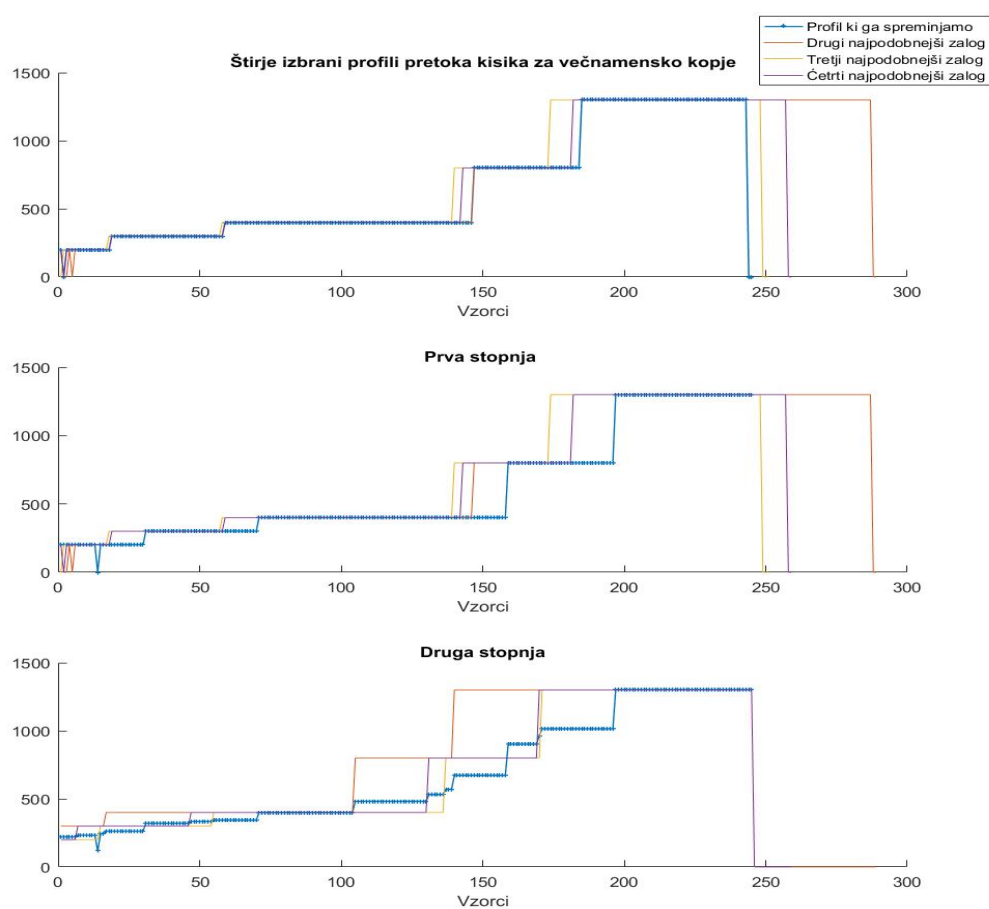
Kot je pokazala analiza profilov, so za profile metanskih gorilcev značilne relativno majhne spremembe v obliki sredinskega dela profila. Do večjih sprememb prihaja pri časovnih zamikih sredinskih delov. Tretji graf na sliki (4.6) prikazuje profile po drugem časovnem zamiku. Vidimo, da se profili skoraj prekrivajo, kar pa ne moremo reči za tretji graf slike (4.7), ki predstavlja drugič zamaknjene profile kisikovega kopja. Po pričakovanjih se je izkazalo, da ima pri generiranju profilov metanovih gorilcev in profilov regulacijskega transformatorja večji vpliv na izhodni profil prva stopnja optimizacije. Prevladujoča stopnja optimizacije pri generiranju profilov kisikovih kopij je težje določljiva, saj pri profilih prihaja do variabilnosti pri časovnem zamiku med sredinskimi deli in do variabilnosti pri sami obliki sredinskega dela.

4.5 Predlagane izboljšave

V našem delu smo se usmerili v razvoj rešitve, ki bi relativno enostavno generirala nov profil glede na najboljše talilne procese iz baze podatkov. Temeljit pregled referenčnih profilov iz baze je razkril skupne lastnosti profilov, ki so upravičile uporabo enotne metode za izračun novega profila ne glede na tip profila. Razvoj metod za vsak tip profilov bi zahteval raziskavo lastnosti profilov in vpliva sprememb časovnih zamikov in sprememb oblik tipičnih delov profilov na obnašanje podsistemov EOP. Sistem EOP na katerem sloni delo, je voden z 28-imi referenčnimi profili. Razvoj metod za avtomatsko generiranje vsakega od 28-ih profilov presega obseg našega dela, predstavlja pa logično razširitev in izboljšavo metode.

Vpeljava novih kriterijev za izbiro šarž, ki se uvrstijo v postopek generiranja novega profila, in upoštevanje dodatnih lastnosti šarž pri izračunavanju uteži metode, bi razširilo možnost uporabe metode.

Slika 4.6: Prikaz postopka generiranja profila za CH₄ gorilec.



Slika 4.7: Prikaz postopka generiranja profila za kisikovo kopje.

5 Orodje Operater

Orodje "Operater" je bilo razvito v okviru našega dela z namenom pregledne združitve modelov in metod opisanih v prejšnjih poglavjih. Združitev vseh metod, ki so postopoma pripeljale do končnih rešitev, nam v orodju "Operater" omogoči vpogled v razvojni postopek metod. Uporabnik lahko preverja delovanje metod, opisanih v tem delu, in jih med seboj primerja. Vse ugotovitve v obliki grafov in diagramov je mogoče izvoziti v obliko Matlab slikovnih datotek, kjer je omogočeno dodatno urejanje prikaza rezultatov. Dostop do vseh funkcionalnosti orodja "Operater" je urejen preko grafičnega vmesnika. Ta je logično razdeljen na tri glavne dele, ki si sledijo v vrstnem redu razvoja metod. Prvi del vmesnika, imenovan "Operater", omogoča enostavno raziskovanje baze podatkov, ki je nastajala skozi večletno obratovanje EOP. Raziskovalec baze podatkov predstavlja začetni del raziskovalnega postopka, pregledovanja podatkov. Ugotovitve iz začetnega dela so pripeljale do snovanja prvih analiz zalaganja EOP in do razvoja metod avtomatskega generiranja novih profilov. Drugi del grafičnega vmesnika uporabniku predstavi analize zalaganja EOP. Omogočen je vnos novega zalaganja treh košar ali izbor zalaganja iz podatkovne baze. Tretji del vmesnika zajema funkcije generiranja novih referenčnih profilov. Profili se lahko generirajo za novo vnešen zalog ali za zalog iz podatkovne baze. Pri generiranju referenčnega profila za zaloge iz podatkovne baze lahko preverjamo odstopanja predlaganih profilov od tistih, ki so se za izbran zalog uporabili pri taljenju.

Orodje "Operater" smo izvedli v programskem okolju Matlab. Orodje sestavljajo štiri programske enote, ki so v programski kodi izvedene kot razredi.

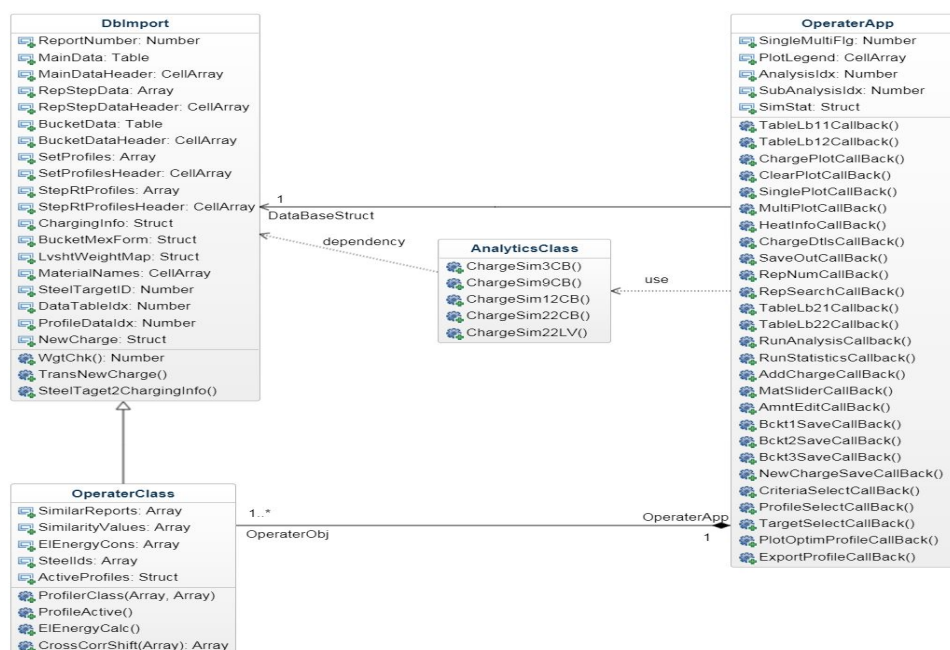
Iniciacija razreda, ki skrbi za upravljanje s podatkovno bazo, v pomnilnik naloži podatkovno bazo. Poleg dostopa do podatkov iz baze, razred omogoča funkcije in spremenljivke za pretvorbo podatkov v oblike, ki ustrezajo nadaljnim izračunom. Nabor funkcij, ki sestavljajo drugo programsko enoto, implementira metode analize zalaganj EOP. Funkcionalnost generiranja referenčnih profilov omogoča razred, ki ga sestavljajo metode dvostopenjske optimizacije profilov, izbora ustreznih profilov za generiranje novega profila, izračunavanja uteži in spremenljivke, v katere se shranjujejo izračunani profili in potrebni vmesni izračuni. Zadnja programska enota skrbi za grafiko vmesnika in definira funkcije, ki se izvedejo ob dogodku na grafičnem vmesniku. Dogodki so v grafičnem vmesniku kliki na gumb, vnos teksta v tekstovno polje, izbor elementa v meniju idr. Funkcije, ki se odzivajo na navedene dogodke povezujejo ostale programske enote v celoto. Struktura programa, v obliki prikaza razredov, njihovih lastnosti in metod ter odnosov med njimi, je prikazana na sliki (5.1) kot razredni diagram po UML (Unified modeling language) specifikaciji.

5.1 Database Explorer

Prvi del grafičnega vmesnika orodja "Operater" je namenjen raziskovanju podatkovne baze. Sestavljen je iz petih glavnih delov. Glavo podokna sestavljata logotip naročnika raziskave in logotip izvajalca raziskave ter naslov podokna in verzija programa. V nogi podokna je zapis imena orodja in datum in kraj, kjer je bil program izdelan. Prostor med glavo in ного je razdeljen na tri dele.

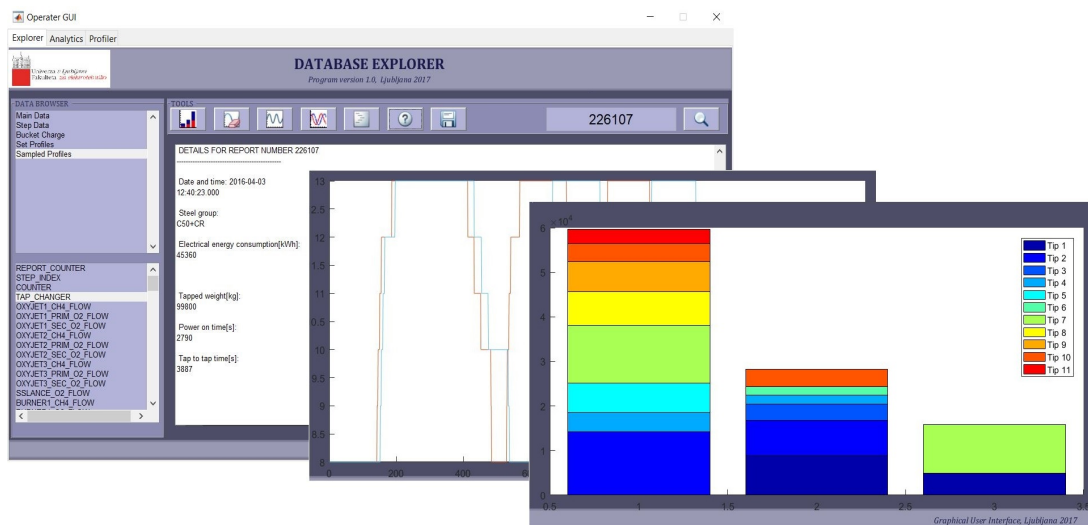
Del naslovljen "Data Browser", preko dveh polj s seznamom omogoča izbor podatkov za izris. V prvem polju s seznamom je mogoče izbrati tabelo iz podatkovne baze, v kateri se nahaja iskan podatek. Izbor željene tabele v drugem polju s seznamom prikaže spremenljivke, ki so prisotne v izbrani tabeli.

Del, naslovljen "Tools", opravlja funkcijo orodne vrstice. Omogoča izbiro med sedmimi orodji in izbiro željene šarže preko vnosa številke šarže ali iskalnika



Slika 5.1: Razredni diagram programa "Operator" po specifikaciji UML 2.0

šarž. Prvo izmed sedmih orodij omogoča grafični prikaz zaloga izbrane šarže. Zalog se izriše kot stolpični diagram prikazan na sliki (5.2). Naslednja tri orodja omogočajo izris podatkov, izbranih v delu "Data Browser". Prvo od treh orodij omogoča brisanje izrisa, drugo omogoča samostojen izris izbranega podatka, tretje orodje pa na obstoječ izris doda novoizbran podatek. Peto orodje orodne vrstice generira izpis s podatki o zalaganju izbrane šarže. Izpis sestavlja podrobnejši zapis založenih materialov in njihovih mas po posameznih košarah. Naslednje, šesto orodje, generira zapis o podrobnostih izbrane šarže. Podrobnosti so podatek o datumu in času izbrane šarže, podatek o ciljni vrsti jekla, podatek o porabi električne energije, podatek o skupni založeni teži in podatka o času taljenja in skupnem času trajanja izbrane šarže. Zadnje orodje izmed sedmih omogoča shranjevanje izrisov v željen format in mapo. Izbira formata, imena in mape za shranjevanje je izvedena z upravljalnikom datotek. Skrajno desni del orodne vrstice je namenjen izbiri nove šarže iz podatkovne baze prek vnosa številke šarže



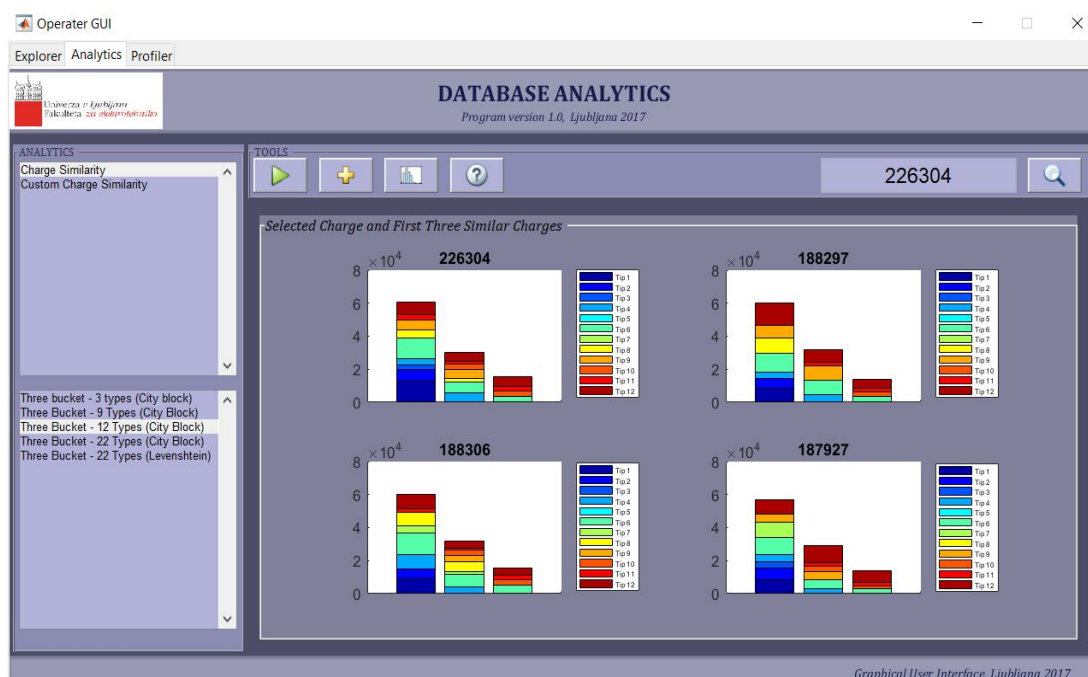
Slika 5.2: Prikaz delovanje podokna "Database Explorer".

ali prek izbora številke šarže prek seznama, ki je del pojavnega okna. Pojavno okno za izbor šarže se aktivira ob kliku na gumb v orodni vrstici poleg polja za vnos številke šarže.

Vsi izrisi, ki jih generirajo opisana orodja, se izvedejo na delu podokna "Database Explorer" namenjenemu za izrise. Grafi se ob shranjevanju avtomatsko opremijo z oznakami osi, legendo in naslovom. Pri pomikanju med podokni orodja "Operater" se na delu, namenjenemu za izrisovanje, ohrani zadnji izrisan graf.

5.2 Database Analytics

Podokno, naslovljeno "Database Analytics", omogoča dostop do funkcij analize zalogov EOP. Oblikovali smo ga analogno podoknu "Database Explorer". Ohranili smo obliko glave in noge podokna ter razdelitev podokna na pet delov. Del, ki je bil pri "Data Browser" podoknu namenjen izboru podatka, je namenjen izboru željene analize. Za tak način izbora analize smo se odločili, da bi omogočili enostavno kasnejše nadgrajevanje grafičnega vmesnika. Na ta način je mogoče brez poseganja v oblikovanje podokna dodati novo izbiro analize.



Slika 5.3: Prikaz podokna "Database Analytics".

Orodna vrstica omogoča dostop do ukaza o pričetku izvajanja analize, do orodja za dodajanje novega zaloga in do prikaza statistike, če je ta pri izbrani analizi na voljo. Del orodne vrstice je, tako kot pri prvem podoknu, namenjen izbiri nove šarže. Sprememba šarže v kateremkoli podoknu vpliva na vsa podokna. Številka izbrane šarže se prikaže v polju za vnos številke šarže.

Polje za izris je namenjeno izrisovanju rezultatov analiz in statistik, ki so na voljo pri posamezni analizi. Po potrebi se polje za izris razdeli v več podpolj za izris. Tako je možno izrisati več grafov, kar je praktično za primerjavo med grafi.

5.2.1 Analiza zalogov EOP iz podatkovne baze

Izbor šarže iz podatkovne baze preko polja za vnos številke ali preko seznama šarž, omogoči delovanje analize zalaganja EOP iz podatkovne baze. Na voljo imamo pet analiz, ki se med seboj razlikujejo po uporabljeni klasifikaciji jekel

in uporabljeni meri podobnosti. Rezultat vsake od analiz je izračunan vektor mer podobnosti med zalogom izbrane šarže in zalogi vseh ostalih šarž v podatkovni bazi. Na podlagi izračunanega vektorja se izberejo trije zalogi, ki izkazujejo najvišjo podobnost do zaloga izbrane šarže. Kot prikaz rezultata se na polju za izris izriše zalog izbrane šarže in trije najbližji zalogi. Grafi se avtomatsko opremijo z naslovi in legendami.

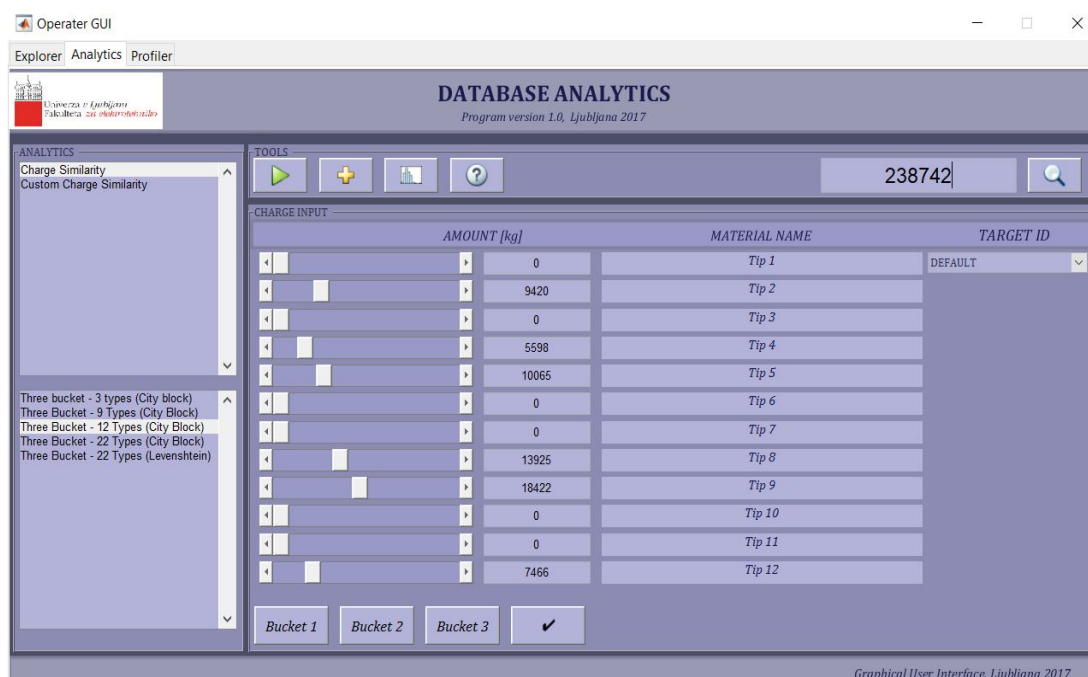
5.2.2 Izbor najprimernejše razvrstitve jekel

Pri izbiri razsežnosti prostora materialov uporabniku pomaga eno od orodij orodne vrstice. Orodje deluje tako, da oceni standardni odklon σ porabe električne energije pri talilnem procesu za m najbližjih šarž. Standardni odklon σ se oceni za vse štiri vrste klasifikacij jekel po enačbi (3.4). Predlaga se tista klasifikacija, ki daje najnižjo oceno standardnega odklona. Za uporabo standardnega odklona porabe električne energije smo se odločili, ker pričakujemo, da podobnost po porabi električne energije pomeni večjo podobnost celotnega talilnega procesa.

5.2.3 Vnos novega zaloga EOP

Pritisk na gumb za dodajanje novega zaloga v orodni vrstici, odpre polje za vnos novega zaloga na delu podokna, ki je namenjen izrisovanju. Zalog EOP je možno definirati z vnosom mase posameznega materiala, ki tvori zalog posamezne košare. Definirati je mogoče tri košare, katerih skupna masa ne sme presegati kapacitete obravnavane EOP. Omejili smo se na fiksno klasifikacijo odpadnih jekel, tj. dvanajst kategorij jekel. Pretvorba vnešenega zaloga v klasifikacijo z devetimi ali tremi kategorijami jekel se izvede samodejno ob izbiri analize. Po tem, ko definiramo zalog za posamezno košaro, moramo to potrditi z enim od treh gumbov za potrditev posamezne košare. Zaključek vnosa novega zaloga potrdimo z gumbom za potrditev novega zaloga.

Poleg definiranja mas založenih materialov za nov zalog je potrebno defini-

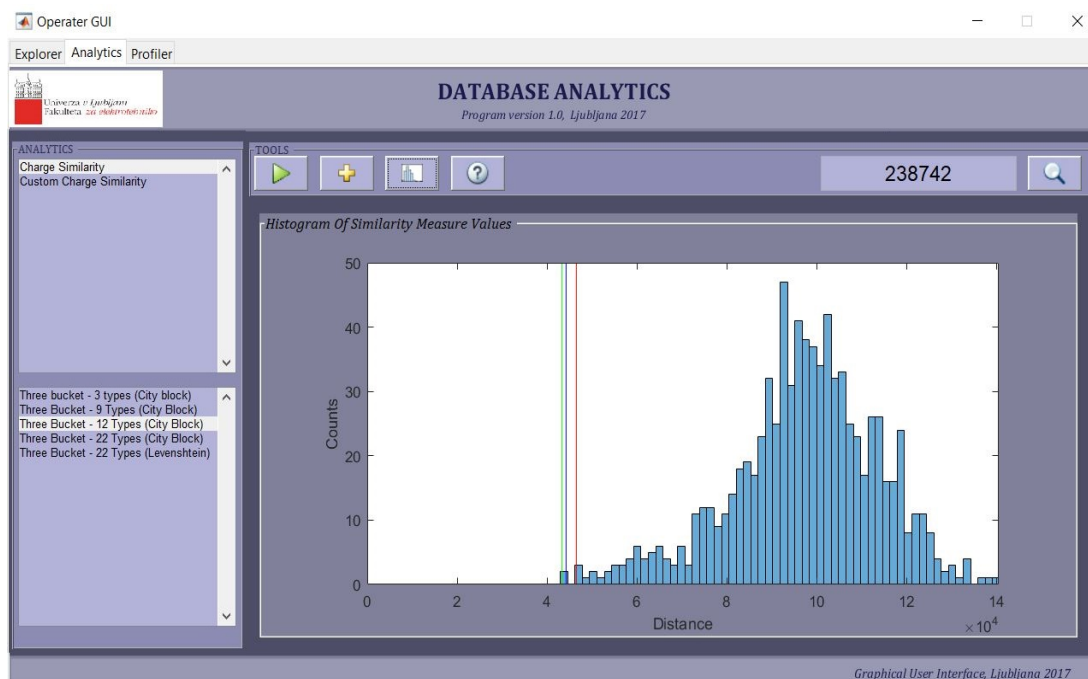


Slika 5.4: Prikaz orodja za vnos novega zaloga znotraj podokna "Database Analytics".

rati tudi identifikacijo cilja talilnega procesa. To je omogočeno preko spustnega seznama, ki vsebuje identifikacije ciljev.

5.2.4 Analiza novo vnešenega zaloga EOP

Za izvedbo analize novo vnešenega zaloga je potrebno iz seznama za izbor analize izbrati analizo novo vnešenega zaloga ti. "Custom Charge Similarity". Ta deluje na podoben način kot analiza zalogov EOP iz podatkovne baze, le da se mera podobnosti določa med novo vnešenim zalogom in ostalimi zalogi iz podatkovne baze. Izris, ki se generira po opravljenem izračunu mer podobnosti, sestavljajo prikaz novo vnešenega zaloga in prikazi treh zalogov, ki izkazujejo najvišjo mero podobnosti.



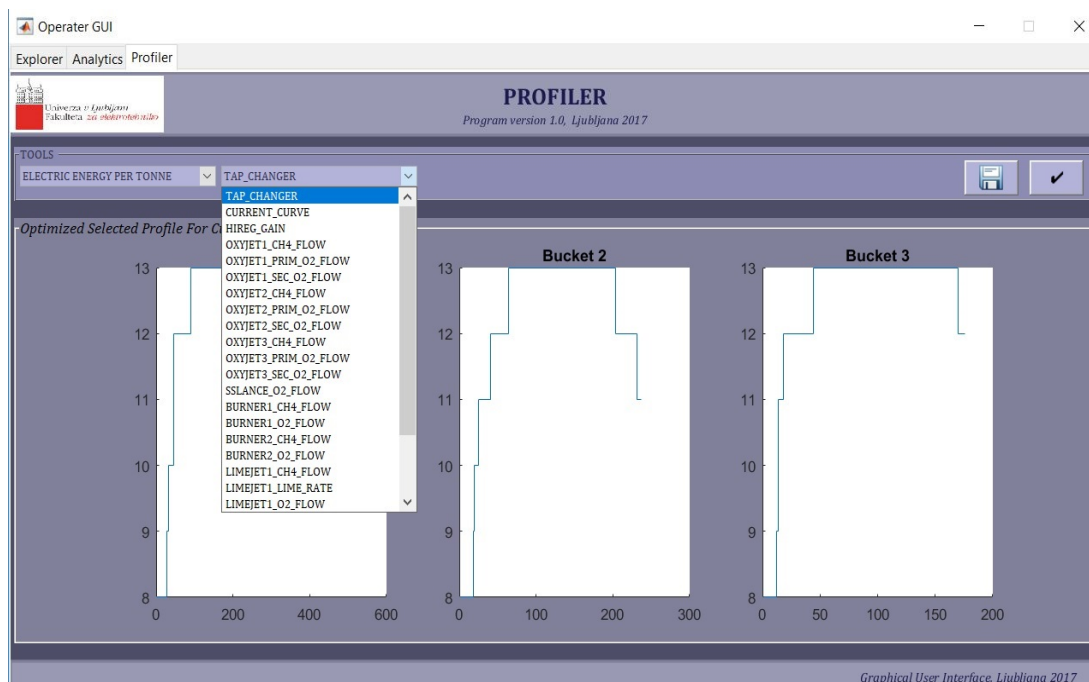
Slika 5.5: Prikaz statistike izračunanih mer podobnosti med zalogi znotraj podokna "Database Analytics".

5.2.5 Prikaz statistike

Orodje za izris statistike je dosegljivo preko gumba v orodni vrstici. Izris je omogočen po tem, ko je bila izvedena katerakoli analiza zalaganj. Iz podatkov v vektorju izračunanih mer podobnosti se izračuna histogram. Ta se nato prikaže na polju za izris. V histogram se vršijo vrednosti mer podobnosti za najpodobnejše tri zaloge. Prikazan histogram nam daje vpogled v porazdelitev zalogov glede na izbrano mero podobnosti.

5.3 Profiler

Tretje podokno, imenovano "Profiler", je oblikovano nekoliko drugače kot prejšnji podokni. V orodni vrstici sta omogočeni izbira kriterija, po katerem se bodo obli-



Slika 5.6: Prikaz podokna "Profiler".

kovali profili, in izbira profila, ki ga želimo generirati. Orodni vrstici sta dodani funkcija zagona orodja generiranja profilov in funkcija shranjevanja generiranih profilov. Prikazno okno je vmeščeno v srednji del podokna in zavzema več prostora kot pri prejšnjih podoknih. Obliko glave in noge podokna smo ohranili.

Generiranje profilov je odvisno od rezultatov analize zalaganj, katero izvedemo v podoknu "Database Analytics". Orodje uporabi tisti zalog, za katerega je bil izračunan zadnji vektor mer podobnosti. Za delovanje orodja za generiranje profilov je potrebno izvesti vsaj eno analizo zalaganj po zagonu grafičnega vmesnika. Avtomatsko generiran profil, ki je bil pred zagonom orodja izbran, se izriše v polju za izris v treh delih. Vsak del prikaza predstavlja del profila za taljenje posamezne košare.

Za shranjevanje generiranega profila se ta shrani v strukturo treh polj. Polje vsebuje del profila v obliki vektorja vrednosti, ki se uporabi za taljenje določene košare.

6 Zaključek

Informacija, ki jo vsebujejo seti podatkov o delovanju sistemov, presega količino informacije, ki jo lahko pridobimo s preprostim pregledovanjem profilov in tabel. Podatkovno usmerjeni modeli odkrivajo znanja o procesih, ki jih tudi obsežni matematični modeli neustrezno opišejo. Naše delo se je omejilo na uporabo statističnih metod na podatkih, s čim manj elementi matematičnega modeliranja.

Baza podatkov o obratovanju EOP nam je omogočila implementacijo statističnih metod z namenom razvoja orodja, ki je sposobno generiranja referenčnih profilov za podsisteme EOP ob znanem zalogu EOP. Avtomatizacija postopka nastavitve referenčnih profilov, ki jo uvaja orodje, razbremenjuje operaterje EOP in pohitri postopek priprave profilov. Prilagajanje zaloga procesu taljenja je, zaradi potrebe po zagotavljanju enakomerne porabe surovin in nepredvidljivi ponudbi surovin na trgu, velikokrat neizvedljivo. Avtomatsko generirani referenčni profili se tako prilagajajo zalogu EOP in ciljem talilnega procesa v smeri optimiziranja talilnega procesa. Razvito orodje ni vezano na lastnosti specifične EOP, ampak le na obratovalne podatke, kar mu omogoča enostavno in hitro prenosljivost na drugo EOP, za katero obstaja dovolj velika baza podatkov o obratovanju.

Delo poleg orodja za generiranje referenčnih profilov predlaga mere podobnosti med zalogi EOP, ki omogočajo identifikacijo vplivov razlik med zalogi na spremembo poljubnega izhoda sistema EOP. Tako ponuja podlago za nadaljnjo raziskovanje vplivov zalaganja EOP na proces taljenja jekla.

Literatura

- [1] M. Peens *et al.*, *Modelling and control of an electrode system for a three-phase Electric Arc Furnace*. PhD thesis, University of Pretoria, 2006.
- [2] S. Golestani in H. Samet, “Generalised cassie–mayr electric arc furnace models,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 13, str. 3364–3373, 2016.
- [3] T. Zhu, *Carbon Injection into Electric Arc Furnace Slags*. PhD thesis, 2012.
- [4] V. Logar, D. Dovžan in I. Škrjanc, “Modeling and validation of an electric arc furnace: Part 2, thermo-chemistry,” *ISIJ international*, vol. 52, no. 3, str. 413–423, 2012.
- [5] “GUI Definition [Online].” Dosegljivo: <http://www.lininfo.org/gui.html>, 2004. [Dostopano: 24.3.2018].
- [6] M. Tolar, *Elektrojeklarstvo*. Sij-Acroni, 2006.
- [7] H. Edels, “Properties and theory of the electric arc. a review of progress,” *Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering*, vol. 108, no. 37, str. 55–69, 1961.
- [8] K. Compton, “Theory of the electric arc,” *Physical Review*, vol. 21, no. 3, str. 266, 1923.
- [9] J. Bratina, *Elektroobločna peč za proizvodnjo jekla*. Slovenske železarne, Železarna Ravne, 1994.

-
- [10] International Iron and Steel Institute. Committee on Technology , *The Electric arc furnace*. Brussels, Belgium : International Iron and Steel Institute, 1982.
- [11] V. Logar, A. Fathi in I. Škrjanc, “A computational model for heat transfer coefficient estimation in electric arc furnace,” *steel research international*, vol. 87, no. 3, str. 330–338, 2016.
- [12] A. Fathi, Y. Saboohi, I. Škrjanc in V. Logar, “Low computational-complexity model of eaf arc-heat distribution,” *ISIJ International*, vol. 55, no. 7, str. 1353–1360, 2015.
- [13] M. Moghadasian in E. Al-Nasser, “Modelling and control of electrode system for an electric arc furnace,” v *Proc. 2nd Int. Conf. Res. Sci., Eng. Techn.(ICRSET)*, str. 129–133, 2014.
- [14] J. I. Network, “Scrap preheating for iron and steel [Online].” Dosegljivo: <http://www.climatetechwiki.org/technology/jiqweb-spis>. [Dostopano: 4. 3. 2018].
- [15] J. R. Schmitt, “Electric arc furnace scrap preheating,” *TechCommentary*, 1997.
- [16] M. Kirschen, A. Hanna, R. Ehrenguber in K. Zettl, “Latest developments in gas purging systems for eaf,” v *AISTech 2015 Conference Proceedings*, vol. 2, str. 1974–1983, 2015.
- [17] M. S.r.l., “More Products [Online].” Dosegljivo: <http://www.more-oxy.com/products.html>. [Dostopano: 5.3.2018].
- [18] E. Pretorius, H. Oltmann in J. Jones, “Eaf fundamentals,” *New York, PA, LWB Refractories*, 2010.
- [19] E. F. Recovery in R. Federation, “Eu-27 steel scrap specification,” tech. rep., Bruselj, Belgija, 2007.

-
- [20] K. K. Sergios Theodoridis, *Pattern Recognition, fourth edition*. Elsevier, 2009.
- [21] D. C. Montgomery in G. C. Runger, *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons, 2010.
- [22] Microsoft, “sqlcmd Utility [Online].” Dosegljivo: <https://docs.microsoft.com/en-us/sql/tools/sqlcmd-utility>. [Dostopano: 5.3.2018].
- [23] MathWorks, “Introducing MEX Files [Online].” Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab-external/introducing-mex-files.html>. [Dostopano: 5.3.2018].
- [24] F. Mihelič, *Signali*. Založba FE in FRI, 2006.