

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Žiga Štosir

**Optimizacija legiranja jekla s pomočjo strojnega
učenja**

DIPLOMSKO DELO

INTERDISCIPLINARNI UNIVERZITETNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN MATEMATIKA

MENTOR: izr. prof. dr. Matjaž Kukar

Ljubljana, 2019

Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Tematika naloge:

Pridobite in uredite podatke o legiranju jekla, ter s pomočjo strojnega učenja zgradite modele za napovedovanje potrebnih količin dodatkov. Izberite primerne tipe modelov in s pomočjo linearnega programiranja minimizirajte napovedano količino dodatkov. Pristop ovrednotite na pridobljenih podatkih s primerno metodologijo.

Zahvaljujem se svojim bližnjim za motivacijo in podporo med študijem. Posebej se zahvaljujem svojemu mentorju izr. prof. dr. Matjažu Kukarju za pomoč in vodstvo pri izdelavi diplomske naloge. Prav tako se zahvaljujem podjetju SIJ Metal Ravne in zaposlenim v oddelku informatike za strokovno podporo in razlago osnov metalurških znanj.

Kazalo

Povzetek

Abstract

Poglavje 1	Uvod	1
1.1	Obstoječe rešitve	1
1.2	Povzetek dela	2
Poglavje 2	Izdelava jekla	3
2.1	Vrste jekel	3
2.2	Izdelava jekla po postopku EOP-VPP	3
2.2.1	Izdelava jekla v EOP	4
2.2.2	Obdelava jekla v ponovci po postopku VPP (LF/VD)	8
2.2.3	Litje jekla	11
2.3	Vzorčno jeklo OCR12VM	11
2.3.1	Skupina orodnih jekel OCR12	12
2.3.2	Orodno jeklo OCR12VM	12
Poglavje 3	Uporabljene metode	13
3.1	Orange	13
3.2	Regresija	13
3.2.1	Linearna regresija	13
3.3	CRISP-DM	14
3.4	Linearno programiranje	15
Poglavje 4	Metode dela	17
4.1	Razumevanje problema	17
4.2	Razumevanje podatkov	17
4.3	Priprava podatkov	18

4.4	Vizualizacija podatkov.....	21
4.5	Statističen opis podatkov.....	25
Poglavje 5	Modeliranje in rezultati.....	35
5.1	Strojno učenje	35
5.2	Linearno programiranje.....	40
Poglavje 6	Rezultati	43
Poglavje 7	Sklepne ugotovitve	51
7.1	Možnosti za izboljšavo in možnosti za nadaljnje delo.....	51

Povzetek

Naslov: Optimizacija legiranja jekla s pomočjo strojnega učenja

Cilj diplomske naloge je modeliranje doziranja in optimizacija porabe legirnih dodatkov v proizvodnji jekla. V prvem delu predstavimo proces izdelave jekla in nekaj osnov metalurgije, ki so podlaga za razumevanje zastavljenega problema. V nadaljevanju predstavimo orodja in tehnologije, ki smo jih uporabili pri izdelavi naloge. Sledijo opis, način pridobitve, obdelave in vizualizacije podatkov, modeliranje problema in predstavitev rezultatov. Pri delu smo uporabili orodje Orange s programskim jezikom Python in knjižnico Matplotlib. V zadnjem delu predstavimo zaključek ter možnosti prihranka pri porabi legirnih dodatkov in časa, potrebnega za izdelavo šarže, kar predstavlja velik potencial za nadaljnje delo.

Ključne besede: izdelava jekla, strojno učenje, optimizacija, linearno programiranje, Python

Abstract

Title: Optimization of steel alloying with machine learning

The aim of this thesis is the optimization of alloy additions in steel making. In the first part of this thesis we present some basics of metallurgy and the process of steel making where our problem originates from. Then we present the tools and technologies used in development, followed by a description on how we processed and modelled the data. After that we then describe the results. In conclusion we summarize our work and present possibilities for improvement and further development.

Keywords: steel making, machine learning, optimization, linear programming, Python

Poglavje 1 **Uvod**

Z optimizacijo procesa legiranja jekla lahko dosežemo precejšnje prihranke pri porabi ferolegur, izboljšamo končne kemijske sestave jekla in znižamo odstotek kemijsko zgrešenih šarž, kar ima pri izdelavi jekla izreden ekonomski in kakovostni učinek.

V okviru diplomske naloge smo se ukvarjali z optimizacijo porabe legirnih dodatkov v procesu izdelave in legiranja jekla po tehnologiji EOP-VPP z uporabo metod strojnega učenja (linearna regresija) in linearnega programiranja. Za izbor in pripravo ustreznih podatkov ter modeliranje smo uporabili orodje Orange. Rezultate linearne regresije pa smo nato uporabili kot osnovo za optimizacijo legirnih dodatkov z metodo linearnega programiranja.

1.1 Obstoječe rešitve

Za jeklarsko industrijo je značilno veliko število kompleksnih zaporednih procesov z večjim številom spremenljivk, od samih vhodnih surovin do tehničnih specifikacij procesov, ki vplivajo na kakovost vmesnega proizvoda in končnega izdelka. Zato tudi v jeklarski industriji uporabljajo in razvijajo čim učinkovitejše modele napovedovanja procesa izdelave jekla, ki omogočajo pravočasno in učinkovito odločanje med izdelavo.

V mnogih procesih v jeklarnah so bile uporabljene tehnike strojnega učenja za napovedovanje rezultatov metalurških procesov. Ker pa so neposredne meritve za večino parametrov, ki predstavljajo kemijsko sestavo jekla zaradi visokih temperatur in tlaka v peči praktično nemogoče, je pomembno, da lahko te parametre zanesljivo napovemo in prikažemo med procesom.

Tako so nastali matematični modeli, ki opisujejo metalurški proces v plavžu ali visoki peči (industrijska talilna peč za pridobivanje surovega železa), matematične simulacije procesa izdelave jekla v elektroobločni peči. [9] [10] Matematične modele pa so za potrebe optimizacije legirnih dodatkov v koraku finega legiranja uporabljali že v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. [6]

Zaradi vse večje potrebe po visokokakovostnem jeklu pa je postal proces finega legiranja v ponovčni peči zaradi zahtev po čim natančnejši kemijski sestavi in čistoti jekla vedno

pomembnejši. Zato so se razvili kinetični modeli za napoved kemijske sestave jekla, ki modelirajo kemijske reakcije pri procesu finega legiranja v ponovčni peči. [11] [12] Zaradi same kompleksne narave teh modelov pa smo se želeli problema lotiti na lažje razumljiv način, s strojnim učenjem.

1.2 Povzetek dela

V prvem delu smo opisali osnove metalurgije in tehnologijo izdelave jekla EOP-VPP, da smo se seznanili z okoljem, iz katerega izhaja zastavljeni problem diplomske naloge. V tretjem poglavju so opisane uporabljene metode in orodja, s katerimi smo si pomagali pri reševanju problema. V četrtem poglavju je sledil podrobnejši opis učnih podatkov, s katerimi smo se ukvarjali pri delu, od kod izhajajo in kaj nam v praksi pomenijo. Sestavljeno je iz sklopov »Razumevanje problema«, »Razumevanje podatkov«, »Priprava podatkov«, »Vizualizacija podatkov« in »Statističen opis podatkov«. V sklopu »Razumevanje problema« je opisana narava problema in možnost uporabe njegove rešitve. V sklopih »Razumevanje podatkov«, »Priprava podatkov«, »Vizualizacija podatkov« in »Statističen opis podatkov« pa je podrobneje opisana narava podatkov, njihova priprava za modeliranje ter njihova vizualizacija in opis s statističnega vidika za lažje razumevanje podatkov in problema.

Peto poglavje je namenjeno modeliranju problema, kjer smo opisali postopek, s katerim smo se lotili modeliranja svojega problema, kako smo za svoj zastavljeni problem uporabili strojno učenje in nato te rezultate v naslednjem koraku uporabili pri optimizaciji z linearnim programiranjem. Šesto poglavje je namenjeno predstavitvi rezultatov. Svoje rezultate, pridobljene z optimizacijo z linearnim programom, smo primerjali z izmerjenimi podatki iz prakse. V zadnjem poglavju pa so razložene najpomembnejše ugotovitve ter sklepi diplomskega dela, sledita jim še opis morebitnih nadgraditev in implementacija rešitve.

Poglavje 2 Izdelava jekla

Jeklo je železova zlitina, pri kateri je poleg samega železa najpomembnejši zlitinski element ogljik, dodani pa so še drugi legirni elementi. Ogljika je v jeklih razmeroma malo, njegov masni delež je navadno manjši od dveh odstotkov, kljub temu ima najpomembnejši vpliv na uporabne lastnosti jekel.

2.1 Vrste jekel

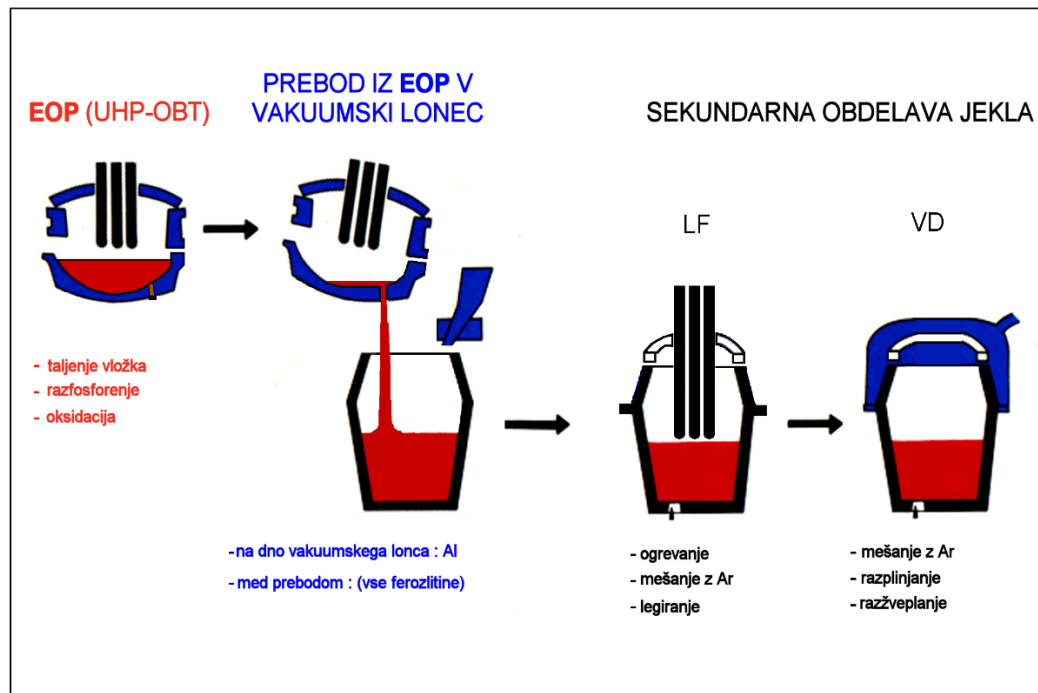
Jekla delimo v skupine po kemijski sestavi, kakovosti in namenu uporabe.

Po kemijski sestavi ločimo nelegirana in legirana jekla. Nelegirana jekla so izdelana brez dodanih legirnih elementov, vsebujejo primesi v običajnih količinah. Legirana jekla se dalje delijo na nizko legirana, ki vsebujejo do pet odstotkov dodanih legirnih elementov, in visokolegirana jekla, ki vsebujejo več kot pet odstotkov dodanih elementov. Po kakovosti ločimo jekla na navadna, kakovostna in plemenita. Ločijo se glede na zahteve mehanskih lastnosti in predpisane kemične analize. Legirana jekla se v večini uvrščajo med plemenita jekla. Po namenu uporabe se jekla razvrščajo na konstrukcijska jekla, orodna jekla in jekla s posebnimi lastnostmi. [5]

Konstrukcijska jekla se uporabljajo v strojogradnji in za različne jeklene konstrukcije. Orodna jekla se uporabljajo za izdelavo različnih orodij za obdelavo kovin in nekovin. Jekla s posebnimi lastnostmi odlikujejo odpornost proti različnim kemičnim vplivom in vročini ter odpornost proti različnim vrstam obrabe. [5]

2.2 Izdelava jekla po postopku EOP-VPP

Za opis problema, ki smo si ga zastavili pri izdelavi diplomske naloge, bomo najprej opisali tehnologijo izdelave jekla po postopku EOP-VPP, ki ga za izdelavo jekla uporabljajo v podjetju SIJ METAL RAVNE.



Slika 2.1: Tehnološka shema EOP-VPP. Vir slike: [2]

Na sliki je predstavljena tehnološka shema izdelave jekla EOP-VPP, ki se prične v EOP (elektroobložna peč, angl. EAF, *electric arc furnace*) in se nato nadaljuje v VPP (vakuumska ponovna peč, angl. LF/VD, *ladle furnace/vacuum degassing*).

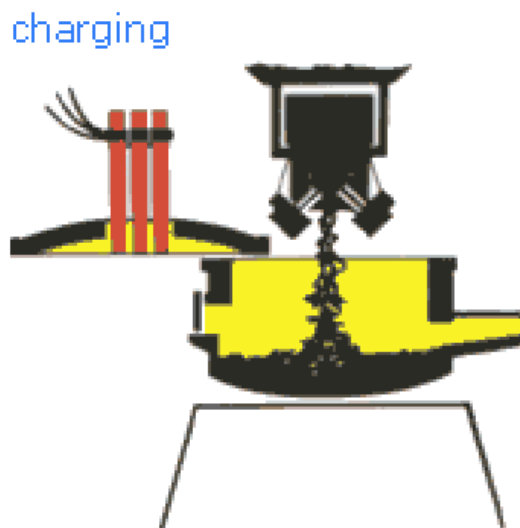
2.2.1 Izdelava jekla v EOP

Izdelava jekla v elektroobložni peči je diskontinuiran proces. En cikel oziroma šarža traja od preboda do preboda (angl. *Tap-to-Tap*), od zaključka prejšnjega do zaključka naslednjega cikla, in ga sestavljajo naslednje tehnološke faze:

- zalaganje peči,
- taljenje vložka,
- oksidacija,
- odstranitev – vlek žindre,
- prebod taline iz EOP v ponovco. [2]

2.2.1.1 Zalaganje vložka

V elektroobložno peč kovinski vložek, ki ga sestavljajo nelegirani jekleni odpad, legirani jekleni odpad, grodelj in siva litina, zlagamo z žerjavom in košarami, za to prilagojenimi.



Slika 2.2: Zalaganje vložka. Vir slike: [2]

Poleg jeklene surovine se v elektroobložno peč pred pričetkom taljenja dodajo tudi nekateri nekovinski dodatki, s katerimi je omogočena nadaljnja obdelava taline oziroma raztaljenega vložka, kot so apno, apnenec, ogljik v obliki karburita, grafita ali koksa, boksit in jedavec. [2]

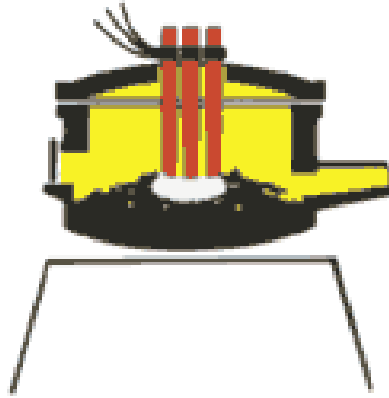
2.2.1.2 Taljenje vložka

Z ekonomskega vidika je zaželeno, da se vložek v elektroobložni peči stali v čim krajšem času in s čim manjšimi stroški.

Na začetku vložek talimo z nekoliko nižjo napetostjo, da preprečimo močno sevanje obloka na obok peči. Ko se elektrode nekoliko pogreznejo, nadaljujemo taljenje z maksimalno napetostjo. Po 20–30 minutah elektroda doseže končno lego, na kateri se ustavi. V tem trenutku se je na dnu peči že nabrala talina. Elektrode dvignemo in vložek režemo z vpihovanjem kisika, da se ta nekoliko usede oziroma da se prepreči padanje vložka. Pred koncem taljenja znižamo napetost in povečamo tok. Med taljenjem nekateri elementi delno odgorijo, nekateri elementi, aluminij, titan in silicij ter precejšnji delež mangana, pa zgorijo popolnoma. [2]

Faza taljenja (angl. *melting*) lahko poteka avtomatsko z vodenjem s procesnim računalnikom, kar nam pomaga pri krmiljenju porabe električne energije. [2]

melting

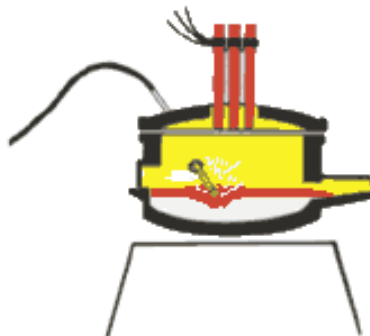


Slika 2.3: Taljenje vložka. Vir slike: [2]

2.2.1.3 Oksidacija taline

Naloge oksidacije (angl. *blowing*) so: zmanjšati koncentracijo fosforja v talini, odstraniti odvečne pline in segreti jeklo. [2]

'blowing'



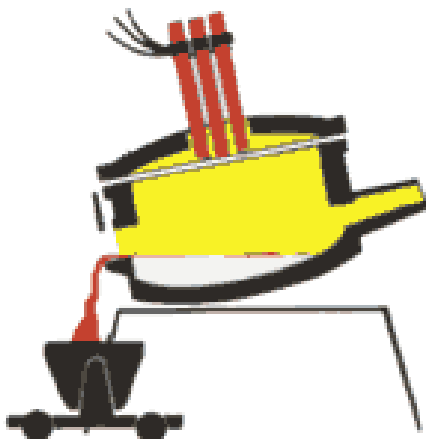
Slika 2.4: Oksidacija taline. Vir slike: [2]

2.2.1.4 Odstranitev – vlek žlindre

Po fazi oksidacije taline je v peči oksidativna žlindra, ki vsebuje okside železa, mangana, silicija, kroma itd. Ta žlindra je neprimerna za rafinacijo jekla, ki se izvaja v ponovci, zato jo

je potrebno pred izlivom jekla iz elektroobločne peči v ponovco odstraniti. To se izvede s tako imenovanim vlekem žindre (angl. *slagging*). [2]

slagging



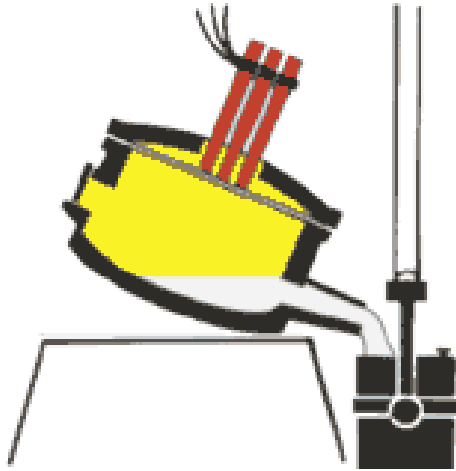
Slika 2.5: Vlek žindre. Vir slike: [2]

2.2.1.5 Izlitje jekla iz EOP v ponovco

Postopek praznjenja elektroobločne peči se imenuje prebod (angl. *tapping*). Prebod poteka po posebnem tehnološkem procesu.

Prebod se prične, ko talina ustreza zahtevam tehnološkega predpisa. Talina se iz elektroobločne peči prelije v tako imenovano prenosno ponovco. V elektroobločni peči talina še nima dokončne kemijske sestave, zato se v procesu polnjenja ponovce talini dodajo ustrezni dodatki, ki omogočijo nadaljnjo obdelavo. [2]

tapping



Slika 2.6: Izliv jekla iz EOP v ponovco. Vir slike: [2]

V postopku preboda se talini ročno dodaja aluminij v obliki palic. Grobo legiranje poteka s ferosilicijem ali silicijmanganom in feromanganom. Apno se talini dodaja zaradi tvorjenja nove žlindre. Apnena žindra bi bila pregosta, zato se ji dodaja še boksit, ki žindro razredči. V ponovci je potrebno talino ves čas mešati, zato se s spodnje strani ponovce vpihuje argon iz argonskega kamna. V času preboda se pretok argona poveča. Postopek preboda je zaključen, ko je prenosna ponovca polna in je talina obdelana. Talina se nato v prenosni ponovci z livnim žerjavom prenese v ponovčno peč na končno obdelavo. [2]

2.2.2 Obdelava jekla v ponovci po postopku VPP (LF/VD)

Za klasično jeklarsko prakso je bilo značilno, da se je jeklo izdelalo od začetka do konca v enem agregatu. Z uporabo moderne tehnologije se je proizvodnja jekla razdelila na primarno in sekundarno, kar je pomenilo izboljšanje ekonomičnosti proizvodnje jekla. [2]

Ponovčna peč je bila razvita v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja zaradi potreb kritja toplotnih izgub, ki nastajajo pri sekundarni obdelavi jekla v ponovci. Zaradi možnosti ogrevanja taline med obdelavo v ponovci z grafitnimi elektrodami je bilo mogoče redukcijski del rafinacije iz EOP prenesti v ponovco. [2]

Danes je večina jeklarskih ponovc opremljena s poroznim argonskim kamnom na dnu ponovce, tako je omogočeno neprekinjeno mešanje taline in s tem hitrejše izločanje nekovinskih vključkov. Tako talina postaja čedalje bolj homogena. [2]



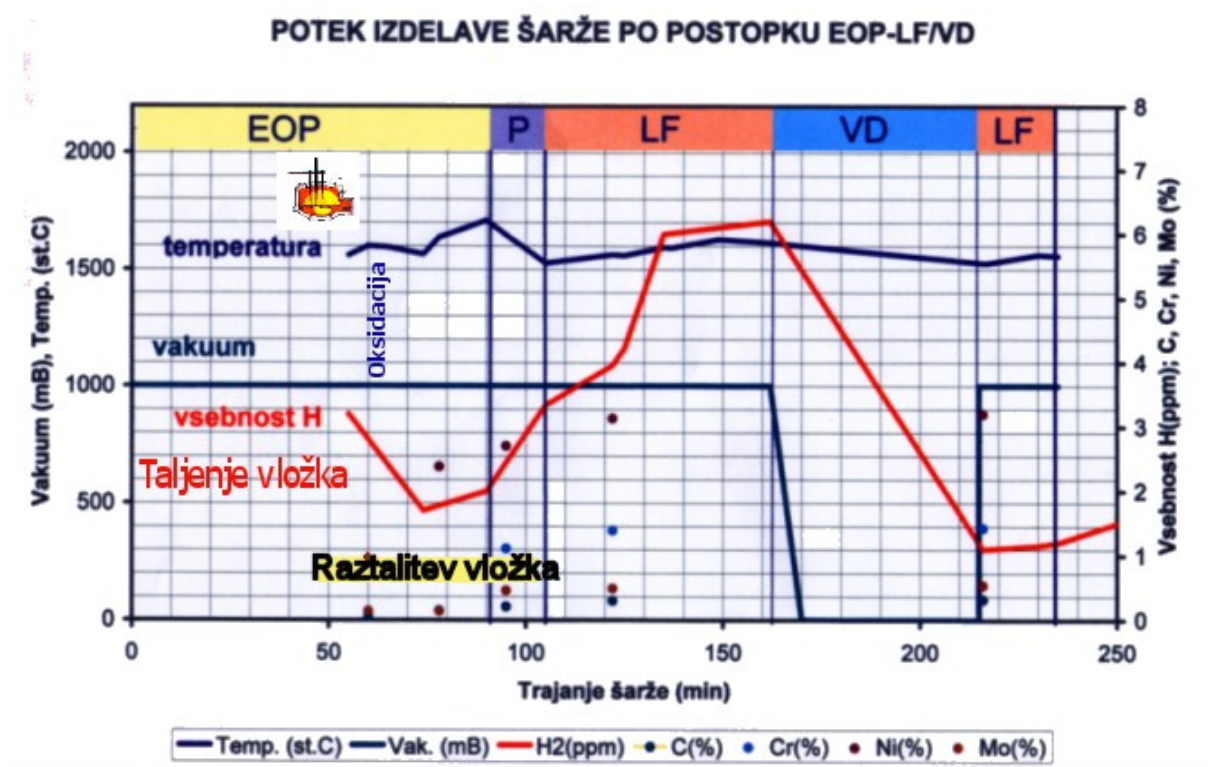
Slika 2.7: Vakuumska ponovčna peč (LF/VD). Vir slike: [2]

Postopki obdelave, ki potekajo v ponovčni peči, so naslednji:

- dezoksidacija jekla, da se iz taline odstrani odvečen kisik;
- **fino legiranje, na podlagi katerega se doseže ustrezna kemična sestava jekla;**
- odstranjevanje nekovinskih vključkov iz taline;
- v omejenem obsegu razžveplanje jekla, redukcija kovinskih oksidov iz žindre in odstranitev raztopljenih plinov iz jekla;
- mešanje taline s kopjem (del vakuumske ponovčne peči po katerem lahko v peč vpihujemo pline) s poroznim kamnom na dnu ponovčne peči, elektromagnetno mešanje, kar pospešuje izločanje nekovinskih vključkov, omogoča reakcije med talino in žindro in poskrbi za homogenizacijo temperature;
- vpihovanje prašnatih materialov, streljanje oplasčene žice (postopek dodajanja ferozlitin v obliki oplasčene žice);
- razplinjenje (odstranjevanje odvečnih plinov in žvepla).

Že v času same proizvodnje jekla je potrebno vedeti, kakšno jeklo želimo izdelati. Poznamo proizvodnjo legiranega ali nelegiranega jekla. Glede na to, kakšno jeklo želimo izdelati, se v postopku obdelave v ponovčni peči dodajajo oziroma ne dodajajo legirni dodatki. Legirne dodatke jeklu dodajamo zato, da bi s tem spremenili njegove lastnosti. [2]

Glede na to, kakšne lastnosti od jekla pričakujemo, v ponovčno peč dodajamo posamezni legirni dodatek. Kot legirni dodatek talini se v jeklarstvu uporabljajo **ferozlitine**, zlitine, ki ne vsebujejo manj kot štiri odstotke železa in vsebujejo različne kovinske in/ali nekovinske elemente ter imajo ime po zlitinskem elementu. Najpogosteje uporabljene ferozlitine so ferokrom, feromangan, feromangansilicij, feronikelj, ferosilicij, ferovanadij, feromolibden in ferovolfram. [2]



Slika 2.8: Potek izdelave šarže po postopku EOP-LF/VD. Vir slike: [2]

Naštejmo nekaj elementov, ki jih dodamo jeklu, in na kratko opišimo njihov vpliv na kakovost jekla:

- C – ogljik. Z dodajanjem tega elementa, jeklu naraščata kaljivost in trdnost, vendar se ob tem zmanjšujeta razteznost in obdelovalnost jekla.
- Cr – krom. Krom jeklu zvišuje odpornost na površinski pritisk in obrabo ter zmanjša toplotno prevodnost in razteznost. Z naraščanjem vsebnosti kroma narašča tudi korozijska obstojnost jekla.
- Co – kobalt. Stabilizira strukturo jekla.

- Al – aluminij. Povečuje trdnost in žilavost jekla.
- Mn – mangan. Ob dodajanju mangana dosežemo, da se jeklu poveča meja plastičnosti in natezna trdnost.
- Mo – molibden. Zvišuje mejo elastičnosti, plastičnosti in natezno trdnost jekla.
- Ni – nikelj. Nikelj kot legirni element praviloma dodajamo takrat, kadar želimo izdelati jeklo za posebne potrebe, na primer jeklo, ki se uporablja pri visokih ali nizkih temperaturah.
- Si – silicij. Povečuje mejo elastičnosti ter povečuje dinamičnost jekla, povečuje trdnost in odpornost proti obrabi.
- Ti – titan. Z dodajanjem titana jeklo dobi fino zrnato strukturo.
- V – vanadij. Povišuje odpornost proti obrabi in povišuje trdoto jekla.
- W – volfram. Z dodajanjem volframa se jeklu poveča elastičnost in natezna trdnost.

2.2.3 Litje jekla

V tem delu talina že ima želeno kemično sestavo, zato ji že lahko rečemo tekoče jeklo. Tekoče jeklo se najprej prelije v vmesno ponovco. Vmesna ponovca se uporablja kot nekakšen zbiralnik, v katerem se z žerjavom prenese na livno mesto. Tekoče jeklo mora biti zaščiteno pred oksidacijo, zato je ves čas prekrito z izolacijskim prahom, ki poleg tega preprečuje tudi toplotne izgube. Na livnem mestu so vnaprej pripravljene livne plošče. Na livni plošči se nahajajo jeklene kokile, trajne forme, ki so med seboj povezane s centralnim livnim sistemom, ta je za vsako litje posebej zgrajen iz ognjevdržnega materiala. Litje jekla poteka tako, da skozi dno ponovce jeklo odlijemo v sredino livne plošče, jeklo po livnem sistemu enakomerno priteče do vseh jeklenih kokil in jih v celoti zapolni. Na vrh vsake odlite kokile se doda eksotermni prašek, ki povzroči, da se jeklo na tem mestu strdi najkasneje. Med litjem se iz curka tekočega jekla odvzame zadnji vzorec za določitev končne kemične sestave jekla. [2]

Jeklo se nato ohladi pod temperaturo strjevanja, preden s posebno pripravo strjeno jeklo, ingot, izvlečemo iz kokile.

2.3 Vzorčno jeklo OCR12VM

Pri našem delu smo se osredotočili na jeklo z oznako OCR12VM, ki se v proizvodnji podjetja SIJ METAL RAVNE pojavi najpogosteje. Jeklo OCR12VM spada v skupino orodnih jekel, natančneje v skupino orodnih jekel OCR12. Ker smo svoj problem zožili na le eno izmed mnogih kvalitet jekla, smo s tem zmanjšali razpršenost vrednosti deležev posameznih elementov v šaržah, kar nam je omogočilo natančnejše delo.

2.3.1 Skupina orodnih jekel OCR12

Skupina jekel OCR12 so jekla z veliko količino kroma in ogljika ter se večinoma uporabljajo za rezalna orodja, merila in vsa orodja, ki so izpostavljena močni obrabi. Jekla OCR12 vsebujejo še legirne elemente, kot so silicij, mangan, volfram, molibden, vanadij in kobalt. Jekla OCR12 spadajo v skupino legiranih orodnih jekel za delo v hladnem, v katero sodijo vsa orodja, ki se pri delu ne segrevajo ali pa se segrevajo minimalno. Najpomembnejše lastnosti jekel OCR12 oziroma orodnih jekel za delo v hladnem so žilavost, velika trdota, odpornost proti obrabi, rezilnost in obstojnost mer. Vse našteje lastnosti so odvisne od kemične sestave, toplotne obdelave, oblike in stanja površin, veliko pa je odvisno tudi od vzdrževanja orodij. Skupina legiranih orodnih jekel za delo v hladnem je zelo obširna in obsega zelo različne vrste orodnih jekel, zaradi česar je smiselna razdelitev težavna. Največkrat so zaradi boljše preglednosti razdeljena po kemični sestavi, nato pa še po načinu toplotne obdelave.

Kemična sestava je zelo pomembna, saj že sam ogljik orodnim jeklom daje različne lastnosti. Večja kot je količina ogljika v jeklu, večji sta zaradi nastajanja karbidov odpornost proti obrabi in rezalna sposobnost. Prav tako na lastnosti vplivajo drugi legirni elementi. S tvorbo karbidov namreč povečujejo odpornost proti obrabi in rezalno sposobnost ali pa zagotavljajo drobnejše zrno in s tem povečujejo žilavost jekla. Legirni elementi močno vplivajo tudi na kaljivost in s tem posredno na tlačno trdnost, obstojnost mer in varnost pri kaljenju.

2.3.2 Orodno jeklo OCR12VM

Orodno jeklo OCR12VM spada v skupino OCR12 jekel, ki imajo veliko količino kroma in ogljika z dodatkom vanadija in molibdena.

To orodno jeklo se uporablja za delo v hladnem in ima visoko dimenzijsko stabilnost pri toplotni obdelavi, zelo visoko odpornost proti nastajanju razpok, visoko obdelovalnost, srednjo žilavost in odpornost proti obrabi. Uporablja se predvsem za merilna orodja, strojne nože za lesno, papirno in kovinsko industrijo, nože za škarje za rezanje v hladnem stanju in orodja za rezanje navojev.

Poglavje 3 Uporabljene metode

3.1 Orange

Orange je zbirka orodij za strojno učenje in podatkovno rudarjenje, namenjena uporabi s skriptami Python ali vizualnim programiranjem.

Knjižnica je oblikovana kot hierarhično organizirana zbirka orodij za podatkovno rudarjenje. Knjižnico je mogoče uporabljati v skriptah Python, poleg tega pa predstavlja temelj orodja za vizualno programiranje. V orodju za vizualno programiranje so komponente predstavljene z grafičnimi gradniki (ang. *Widget*). Te gradnike povezujemo med sabo, povezave predstavljajo podatke, ki se posredujejo od gradnika do gradnika. [4]

V tej diplomski nalogi je bilo uporabljeno orodje Orange za vizualno programiranje, verzija 3.13.

3.2 Regresija

Naloga regresijskega prediktorja je za problem, ki je opisan z množico atributov (značilki, lastnosti), določiti vrednost odvisne (regresijske) zvezne spremenljivke. Regresijski prediktor mora imeti na neki način predstavljeno zvezno funkcijo, ki preslika prostor atributov v napovedano vrednost. Ta funkcija je lahko podana vnaprej ali pa je naučena iz podatkov – primerov problemov, rešenih v preteklosti. Naloga učnega algoritma je torej iz množice opisov primerov z znanimi vrednostmi odvisne spremenljivke izračunati zvezno funkcijo, ki jo lahko uporabimo za določanje vrednosti regresijske spremenljivke novih primerov. [1]

Regresijske prediktorje ločimo glede na način predstavitve regresijske funkcije. Najpogostejši regresorji so: linearna regresija, lokalno utežena regresija, regresijska drevesa, regresija po metodi podpornih vektorjev ter usmerjene (večnivojske) umetne nevronske mreže. [1]

3.2.1 Linearna regresija

Linearna regresijska funkcija predpostavlja, da so vsi atributi zvezni (in ustrezno normalizirani) ter da obstaja linearna relacija med odvisno regresijsko spremenljivko in atributi. Treba je le

določiti koeficiente linearne funkcije tako, da minimiziramo vsoto kvadratov napak napovedi regresijske spremenljivke v vseh učnih primerih. Za to lahko uporabimo bodisi analitično rešitev, bodisi iterativen algoritem za iskanje optimalne funkcije. Rezultat je hiperravnina, ki za vsak primer določa vrednost odvisne spremenljivke. Napaka za neki primer je njegova razdalja od hiperravnine v smeri osi, ki ustreza odvisni spremenljivki. [1]

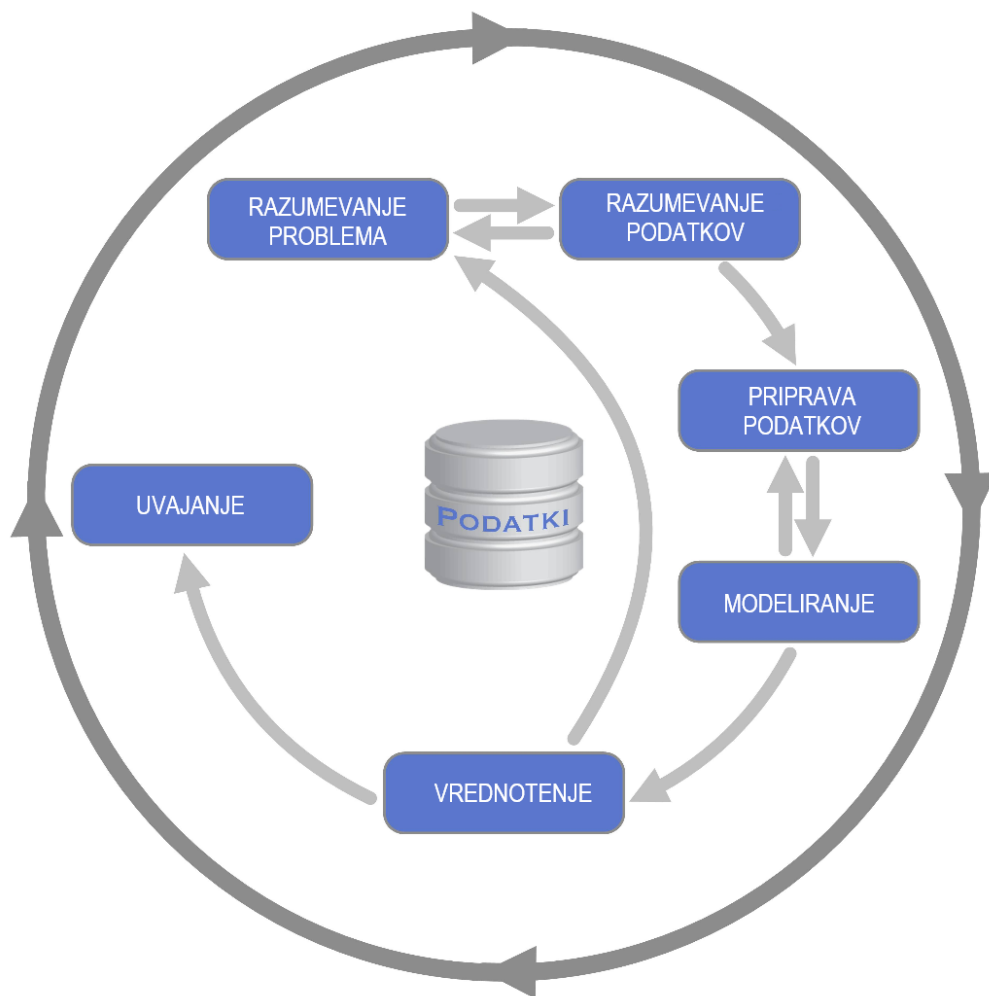
Pri nelinearnih primerih lahko bodisi uporabljamo funkcijo, ki je sestavljena (zlepljena) iz več lokalno linearnih funkcij, bodisi uporabimo v linearni kombinaciji tudi nelinearne člene. In dobimo npr. kvadratno, polinomsko, logaritemsko itd. funkcijo.

Linearna regresija teži k iskanju najustreznejše premice, ki poteka čim bližje čim več vrednostim oziroma točkam na grafu. Najbolje privilegajoča se premica se imenuje regresijska premica. Kriterij za to je običajno, da mora biti vsota kvadratov napake med dejansko in napovedano vrednostjo minimalna. [1]

3.3 CRISP-DM

CRISP-DM (angl. *Cross Industry Standard Process for Data Mining*) je procesni model, ki opisuje najpogosteje uporabljene pristope, ki jih uporabljajo strokovnjaki pri reševanju problemov, povezanih s podatkovnim rudarjenjem, in zagotavlja strukturiran pristop do načrtovanja. Metodologija je robustna in dobro uveljavljena.

Cikel metodologije je sestavljen iz šestih faz, ki so prikazane na sliki 3.1. Zaporedje faz ni statično ter premikanje naprej in nazaj med fazami je priporočljivo. Puščice na omenjeni sliki prikazujejo najpomembnejše odvisnosti med fazami. Ni nujno, da se podatkovno rudarjenje konča v zadnji fazi, v uvajanju. Spoznanja po tem procesu lahko sprožijo nov pogled na problem, novo razumevanje problema, bolj specifična poslovna vprašanja ...



Slika 3.1: Shema procesa CRISP-DM.

3.4 Linearno programiranje

Linearno programiranje ali linearna optimizacija je poseben primer splošnejšega matematičnega programiranja ali optimizacije, pri kateri so kriterijska funkcija in omejitvene zahteve linearne. S pojmom linearno programiranje zajamemo linearne optimizacijske naloge in tudi metode za reševanje. [3]

Naloga linearnega programiranja je poiskati maksimum (ali minimum) kriterijske (ciljne, namenske) funkcije:

$$f(x) = c^T x = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$$

pri pogojih $Ax \leq b, x \geq 0$ (ali $Ax \geq b, x \geq 0$).

$Ax \leq b$ je krajši zapis sistema neenačb:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ &\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \end{aligned} \tag{3.1}$$

torej je A matrika z m vrsticami in n stolpci, b vektor m konstant, x pa vektor n spremenljivk.
[3]

Poglavje 4 Metode dela

4.1 Razumevanje problema

V metalurških modelih za modeliranje postopka legiranja jekla je vključenih veliko kemijskih in fizikalnih parametrov, ki vplivajo na potek izdelave jekla. V obsegu diplomskega dela smo poskušali razviti nov abstraktni model za napovedovanje kemijske sestave na podlagi predhodne kemijske sestave in dodanih legur. Posledično nas je zanimalo, ali lahko z uporabo našega modela izboljšamo natančnost legiranja jekla in s tem zmanjšamo število legiranj med proizvodnjo ter prihranimo čas in surovine.

Ker so podatki pridobljeni s kemijskimi analizami vzorcev, vzetih med izdelavo jekla po vsakem legiranju pri obdelavi v VPP, lahko rezultati dela koristijo za mogoče zmanjšanje proizvodnega časa in porabljenih legur v proizvodnji jekla. Kemijske sestave smo napovedovali z linearno regresijo, same legirne dodatke pa smo minimizirali z uporabo linearnega programiranja.

Pri delu smo se omejili na samo eno jeklo, to je bilo jeklo OCR12VM, ki ga v podjetju SIJ Metal Ravne izdelajo in prodajo največ. Tako smo se odločili zaradi lažje in natančnejše analize same kemijske sestave. Izmerjene vrednosti kemijskih analiz vzorcev pri izdelavi šarž jekla smo pridobili v podjetju SIJ Metal Ravne.

4.2 Razumevanje podatkov

Podatki kemijskih sestav in količine dodanih legur pred odvzemom vsakega vzorca med izdelavo posamezne šarže, ki smo jih uporabljali pri delu, so pridobljeni iz informacijskega sistema DBSTEEL v podjetju SIJ METAL RAVNE in se hranijo v bazi podatkov tipa MICROSOFT SQL SERVER.

Sistem temelji na podatkovni bazi MSSQL Server 2012 in je bil razvit za potrebe nadzora in spremljanja šarž med postopkom izdelave jekla v podjetju.

4.3 Priprava podatkov

Ob pričetku dela so nam podatke izvozili v štiri ločene datoteke Excel (XLSX). Vsaka datoteka je predstavljala eno izmed zaporednih laboratorijskih analiz vzorcev, odvzetih med izdelavo šarž, vsebovala je podatke o količini dodanih legur pred odvzemom vzorca za analizo in kemijsko sestavo jekla po opravljeni analizi v laboratoriju. Cilj postopka priprave podatkov je bil urediti posamezne vzorce šarž, nekatere šarže so namreč imele svoje vzorce in analize pomešane med datotekami in te niso kazale dejanskega poteka izdelave.

Iz podatkov smo odstranili tudi odvečne stolpce, ki nam niso koristili pri nadaljnjem modeliranju problema. V nadaljevanju smo se hoteli osredotočiti le na eno izmed mnogih jekel, izbrali smo jeklo OCR12VM, ki ga najpogosteje najdemo v proizvodnji, zato smo iz podatkov izbrali le vrstice s šaržami, ki ustrezajo naši izbrani kakovosti OCR12VM, hkrati pa smo odstranili tudi tiste, ki so imele nepopolne kemijske sestave (v podatkih, ki smo jih dobili od podjetja so manjkale posamezne vrednosti za nekatere elemente, ki določajo kemijsko sestavo, skupaj smo imeli štiri take šarže).

Na sliki 4.1 je prikazan primer podatkov šarž za tretjo analizo v obliki, ki nam je bila na voljo pred obdelavo.

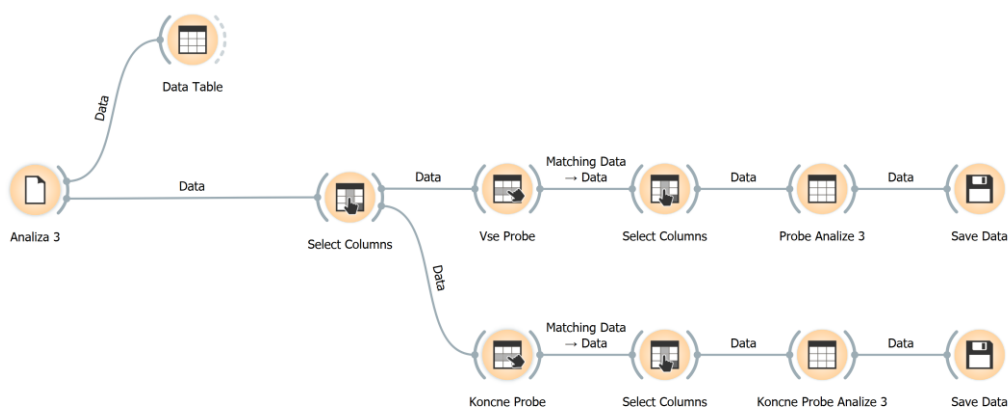
Tako smo dobili štiri nove tekstovne datoteke (TAB), ki so vsebovale urejene podatke s kemijskimi analizami in količinami dodanih legur, prva je vsebovala vzorce številka osem, ki predstavljajo prvi odvzet vzorec, ko šarža pride na obdelavo v VPP, druga devet, tretja je vsebovala vzorce številka deset, med katerimi je bilo že nekaj končnih vzorcev, in četrta, ki je vsebovala samo končne vzorce, v tem primeru vzorce številka enajst. Naredili smo tudi datoteko s podatki o končnih vzorcih za primere, ko se je izdelava šarže zaključila po tretji laboratorijski analizi, za morebitne potrebe pri vizualizaciji podatkov in pomoč pri modeliranju problema.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	C_S3	Si_S3	Mn_S3	P_S3	S_S3	Cr_S3	Ni_S3	Mo_S3	V_S3	Cu_S3	W_S3	AL_S3	VPP_AIBlo	VPP_ALGr	VPP_Boksi	VPP_CaO	VPP_CASi	VPP_Cf13	VPP_EPÁ
2	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu	continuu
3																			
4	1.52	0.25	0.26	0.025	0.005	11.45	0.12	0.72	0.94	0.05	0.06	0.008	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1.52	0.23	0.26	0.026	0.003	11.3	0.22	0.73	0.75	0.1	0.09	0.011	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	1.55	0.28	0.32	0.026	0.012	11.25	0.21	0.75	0.76	0.14	0.12	0.012	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	1.5	0.27	0.27	0.027	0.009	11.44	0.22	0.74	0.77	0.09	0.07	0.014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1.55	0.32	0.25	0.023	0.013	11.34	0.28	0.74	0.75	0.11	0.06	0.008	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	1.54	0.26	0.31	0.016	0.007	11.72	0.15	0.73	0.95	0.22	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.51	0.2	0.28	0.025	0.017	11.47	0.15	0.74	0.97	0.06	0.14	0.004	0.0	0.0	0.0	0.0	49.2	0.0	0.0
11	1.5	0.28	0.24	0.025	0.011	11.48	0.17	0.74	0.94	0.09	0.07	0.012	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	1.5	0.27	0.23	0.024	0.008	11.47	0.18	0.78	0.96	0.1	0.04	0.015	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	5.8	150.0
13	1.54	0.25	0.23	0.026	0.007	11.5	0.26	0.75	0.79	0.09	0.05	0.011	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	1.52	0.3	0.26	0.022	0.007	11.46	0.12	0.75	0.75	0.06	0.03	0.008	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	1.5	0.28	0.31	0.023	0.012	11.33	0.15	0.73	0.71	0.05	0.03	0.012	0.0	0.0	0.0	0.0	15.4	6.0	150.0
16	1.53	0.26	0.25	0.027	0.014	11.32	0.21	0.74	0.93	0.1	0.09	0.015	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	1.49	0.23	0.23	0.027	0.01	11.21	0.17	0.72	0.75	0.09	0.13	0.012	0.0	0.0	0.0	0.0	16.5	0.0	0.0
18	1.57	0.27	0.35	0.023	0.005	11.52	0.23	0.83	0.85	0.09	0.09	0.007	0.0	0.0	0.0	0.0	11.8	0.0	0.0
19	1.51	0.26	0.32	0.027	0.012	11.41	0.22	0.73	0.95	0.11	0.07	0.013	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	1.5	0.26	0.28	0.027	0.005	11.35	0.2	0.76	0.66	0.1	0.08	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Slika 4.2: Primer podatkov šarž za analizo tri po obdelavi.

Na sliki 4.2 pa je prikazan primer podatkov za tretjo analizo po obdelavi, ko so bili podatki že pripravljene za naše nadaljnje delo.

Ta korak smo opravili kar v orodju Orange. Uporabljali smo integriran izbor stolpcev, ki so nam koristili pri nadaljnjem delu, nato pa smo izbrali še vrstice, ki so predstavljale šarže s kakovostjo jekla OCR12VM, to smo storili za podatke iz prve in druge laboratorijske analize. Pri tretji in četrti analizi smo storili enako, le da smo tu ločili še podatke, ki so predstavljali laboratorijske analize končnih vzorcev, kot prikazuje spodnja shema, podatki pa so bili sedaj primernejši za naše nadaljnje delo.



Slika 4.3: Shema urejanja podatkov za tretjo analizo v orodju Orange.

4.4 Vizualizacija podatkov

Zaradi lažjega razumevanja in predstavitve poteka legiranja jekla smo pri tem koraku želeli izvedeti, kako se spreminja kemijska sestava šarže skozi laboratorijske analize. Posebej nas je zanimalo, kako se skozi postopek legiranja spreminja odstotek posameznih elementov, ki so v jeklu, in prikazati tako imenovane legirne elemente, ki so vnaprej določeni z izbrano kakovostjo in so bistvenega pomena za kasnejše lastnosti jekla.

Za to smo v orodju Orange s programskim jezikom Python in knjižnico Matplotlib vizualizirali spremembo deleža, merjenega v odstotkih, posameznih kemijskih elementov med laboratorijskimi analizami.

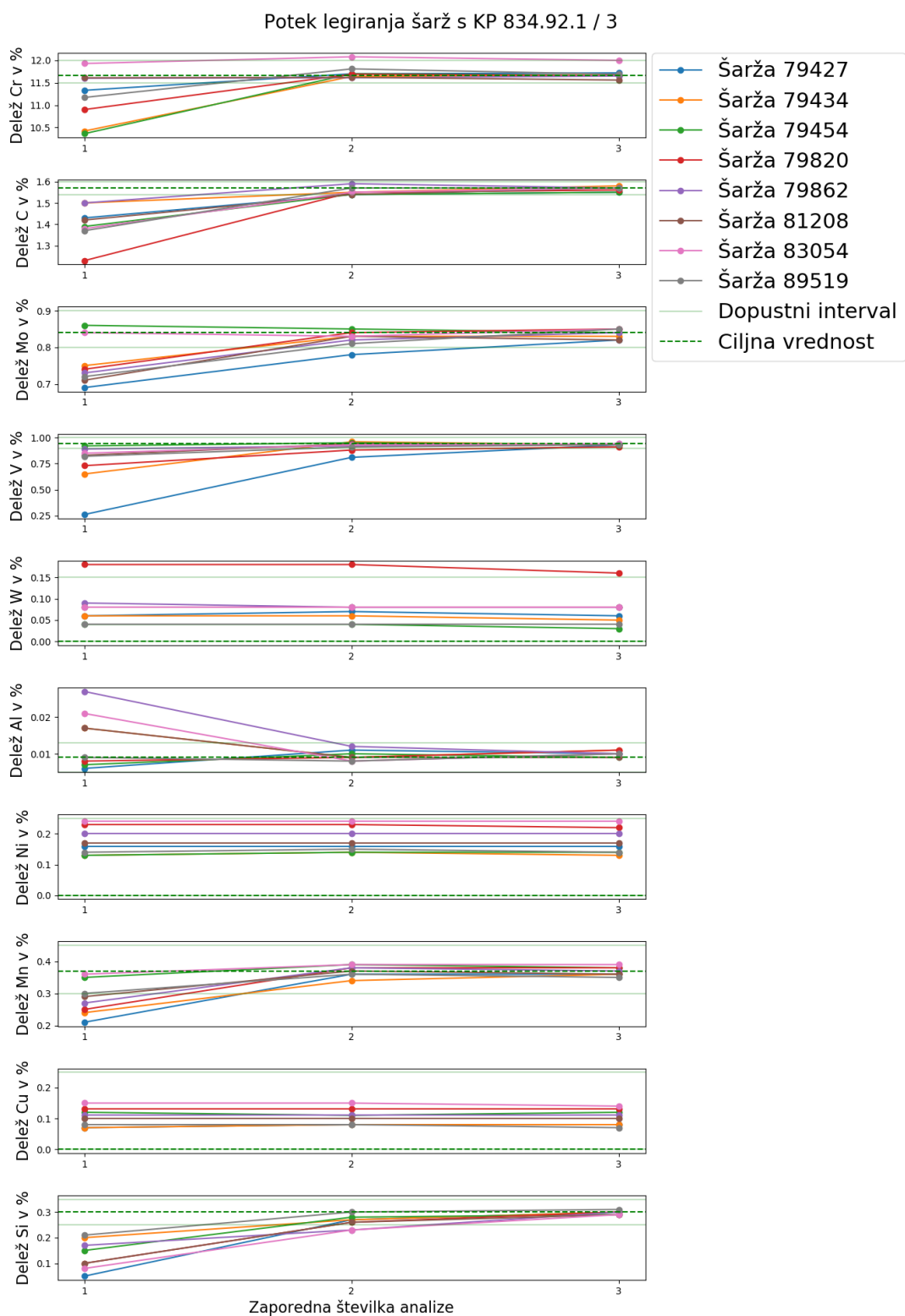
Ob pričetku izdelave posamezne šarže, se mu določi kakovostni predpis jekla, kratko KP, ki znotraj posamezne kakovosti jekla natančneje opiše kemijsko sestavo jekla in šaržo spremlja med celotno izdelavo. V KP je predpisan ciljni odstotek vsakega kemijskega elementa, ki je sestavni del jekla. Poleg ciljnega odstotka pa sta navedeni tudi zgornja in spodnja vrednost, spet merjeni v odstotkih, ki predstavljata dopustni interval vrednosti posameznih elementov. Še posebej pomemben pa je KP za legirne elemente, za katere želimo doseči čim manjše odstopanje od predpisane ciljne vrednosti.

Da smo lahko spremljali, kako se odstotki kemijskih elementov spreminjajo glede na dopustni interval in kakšne so vrednosti v primerjavi s ciljnim odstotkom, smo hkrati vizualizirali le šarže znotraj enega KP, ločili pa smo jih tudi po tem, ali so se končale po tretji ali po četrti laboratorijski analizi.

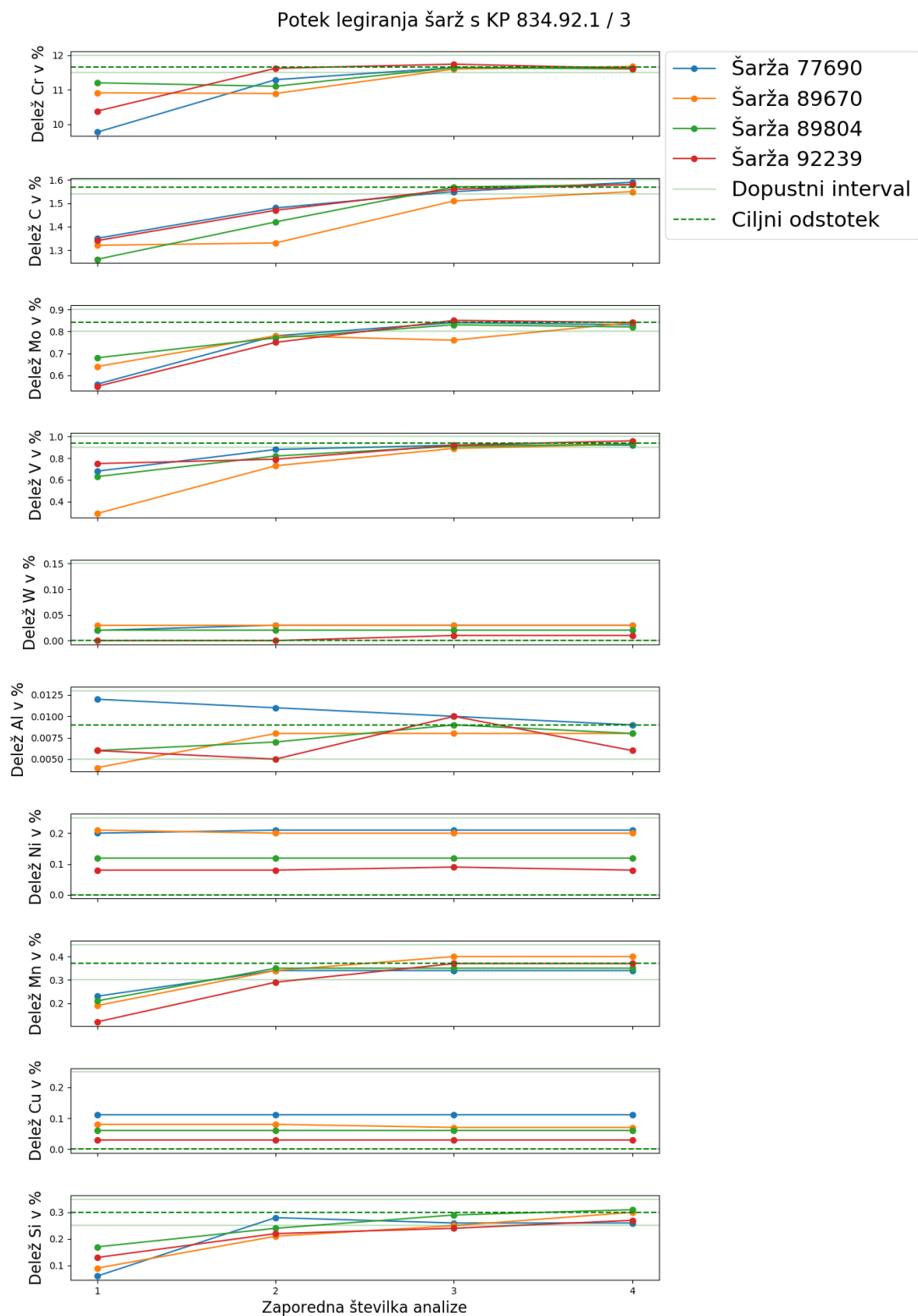
Za prikaz smo izbrali KP z oznako 834.92.1/3, ki je podrobneje opisan v tabeli. Interval je na sliki 4.4 in sliki 4.5 prikazan z rahlo zeleno barvo, ciljna vrednost pa je prikazana s črtkano črto in z močnejšo zeleno barvo.

Sestava v %		
Element	Ciljna vrednost	Dopustni interval
Cr	11,66	11,5–12,00
C	1,57	1,54–1,60
Mo	0,84	0,80–0,90
V	0,94	0,90–1,00
W	0	< 0,15
Al	0,009	0,005–0,013
Ni	0	< 0,25
Mn	0,37	0,30–0,45
Cu	0	< 0,25
Si	0,30	0,25–0,35

Tabela 4.1: Ciljne in dopustne vrednosti elementov v jeklu, ki so predpisane s kemijskim predpisom 834.92.1/3.



Slika 4.4: Potek legiranja šarž s KP 834.92.1/3, ki se končajo po tretji analizi.



Slika 4.5: Potek legiranja šarž s KP 834.92.1/3, ki se končajo po četrti analizi.

Iz tega koraka je bilo razvidno, da se delež nekaterih elementov (W, Ni, Cu) skozi postopek legiranja in posamezne analize sploh ne spreminja ali pa se spreminja zelo neopazno. Razlog za to najdemo v tem, da ti elementi s sabo ne prinesejo bistvenih učinkov na lastnosti jekla, zato njihovega deleža sami ne želimo povečati. Hkrati pa ti elementi težko izgorijo in so redko del kemijskih reakcij, s čimer bi lahko njihov delež zmanjšali, in jih zato tudi ne moremo popolnoma odstraniti iz jekla. Preostali elementi (Cr, C, V, Mo, Al, Mn, Si) pa imajo pri jeklu OCR12VM strožje predpisane dovoljene intervale deležev elementov, zato se ti elementi dolegirajo, da se njihov delež poviša, ali pa se njihov delež poskuša zmanjšati.

4.5 Statističen opis podatkov

Podatki, ki smo jih uporabljali pri našem delu, so bili zajeti za obdobje od 27. 7. 2004 do 17. 4. 2016. Za delo smo imeli na voljo 3413 šarž. Enako število je bilo tudi kemijskih analiz pred prvim legiranjem. Po prvem legiranju je bilo za naše šarže izvedenih 3373 kemijskih analiz, po drugem legiranju 1668 in po tretjem še 1725. Posamezna kemijska analiza pa je sestavljena iz vrednosti deležev dvanajstih elementov.

Za boljše razumevanje podatkov smo poleg že opisane vizualizacije opravili tudi statističen opis podatkov. Pri statističnem opisu podatkov smo pri vsaki izmed kemijskih analiz za vsebnosti posameznih elementov izračunali maksimum, minimum, povprečno vrednost, standardno deviacijo, mediano, prvi in drugi kvartil ter interkvartilni razpon. Rezultati so za posamezne analize predstavljeni v tabeli 4.2, tabeli 4.3, tabeli 4.4 in tabeli 4.5.

Prva analiza								
Element	Maksimum	Minimum	Povprečna vrednost	Standardna deviacija	Mediana	Prvi kvartil	Tretji kvartil	Interkvartilni razpon
Cr	12,700	8,010	10,689	0,591	10,720	10,320	11,070	0,750
C	1,660	0,510	1,317	0,110	1,330	1,260	1,390	0,130
Si	0,410	0,060	0,248	0,031	0,250	0,230	0,270	0,040
Mn	0,450	0,080	0,192	0,048	0,180	0,160	0,220	0,060
Mo	1,130	0,060	0,627	0,096	0,640	0,580	0,690	0,110
V	1,050	0,050	0,574	0,217	0,630	0,340	0,740	0,400
W	0,540	0,000	0,051	0,041	0,040	0,020	0,070	0,050
Al	0,478	0,002	0,014	0,043	0,007	0,005	0,011	0,006
Ni	0,630	0,050	0,176	0,046	0,170	0,150	0,200	0,050
Cu	0,310	0,020	0,085	0,030	0,080	0,070	0,100	0,030
P	0,038	0,010	0,025	0,003	0,025	0,023	0,026	0,003
S	0,097	0,005	0,025	0,010	0,022	0,018	0,029	0,011

Tabela 4.2: Maksimum, minimum, povprečna vrednost, standardna deviacija, mediana, prvi in tretji kvartil ter interkvartilni razpon vsebnosti posameznih elementov v jeklu pri vzorcih za prvo kemijsko analizo. 3413 šarž.

Druga analiza								
Element	Maksimum	Minimum	Povprečje	Standardna deviacija	Mediana	Prvi kvartil	Drugi kvartil	Interkvartilni razpon
Cr	12,460	10,000	11,318	0,262	11,310	11,170	11,450	0,280
C	1,650	0,990	1,453	0,071	1,470	1,420	1,500	0,080
Si	0,410	0,060	0,248	0,031	0,250	0,230	0,270	0,040
Mn	0,450	0,120	0,265	0,038	0,260	0,240	0,280	0,040
Mo	1,120	0,510	0,736	0,048	0,730	0,710	0,750	0,040
V	1,050	0,260	0,786	0,101	0,760	0,720	0,890	0,170
W	0,530	0,000	0,052	0,041	0,040	0,020	0,070	0,050
Al	0,048	0,001	0,011	0,005	0,010	0,008	0,014	0,006
Ni	0,570	0,060	0,176	0,045	0,170	0,150	0,200	0,050
Cu	0,310	0,020	0,085	0,029	0,080	0,070	0,100	0,030
P	0,037	0,011	0,025	0,003	0,025	0,023	0,026	0,003
S	0,080	0,001	0,016	0,009	0,014	0,009	0,021	0,012

Tabela 4.3: Maksimum, minimum, povprečna vrednost, standardna deviacija, mediana, prvi in tretji kvartil ter interkvartilni razpon vsebnosti posameznih elementov v jeklu pri vzorcih za drugo kemijsko analizo. 3373 šarž.

Tretja analiza								
Element	Maksimum	Minimum	Povprečje	Standardna deviacija	Mediana	Prvi kvartil	Drugi kvartil	Interkvartilni razpon
Cr	12,700	10,720	11,458	0,203	11,410	11,330	11,550	0,220
C	1,610	1,300	1,512	0,028	1,510	1,500	1,530	0,030
Si	0,390	0,130	0,266	0,025	0,270	0,250	0,280	0,030
Mn	0,470	0,190	0,274	0,038	0,270	0,250	0,280	0,030
Mo	1,100	0,590	0,758	0,044	0,750	0,740	0,760	0,020
V	1,070	0,280	0,821	0,094	0,770	0,750	0,930	0,180
W	0,520	0,000	0,051	0,040	0,040	0,020	0,070	0,050
Al	0,027	0,003	0,011	0,004	0,011	0,008	0,014	0,006
Ni	0,580	0,060	0,177	0,045	0,170	0,150	0,200	0,050
Cu	0,300	0,020	0,084	0,029	0,080	0,070	0,100	0,030
P	0,033	0,010	0,024	0,003	0,024	0,022	0,026	0,004
S	0,070	0,000	0,008	0,004	0,008	0,005	0,011	0,006

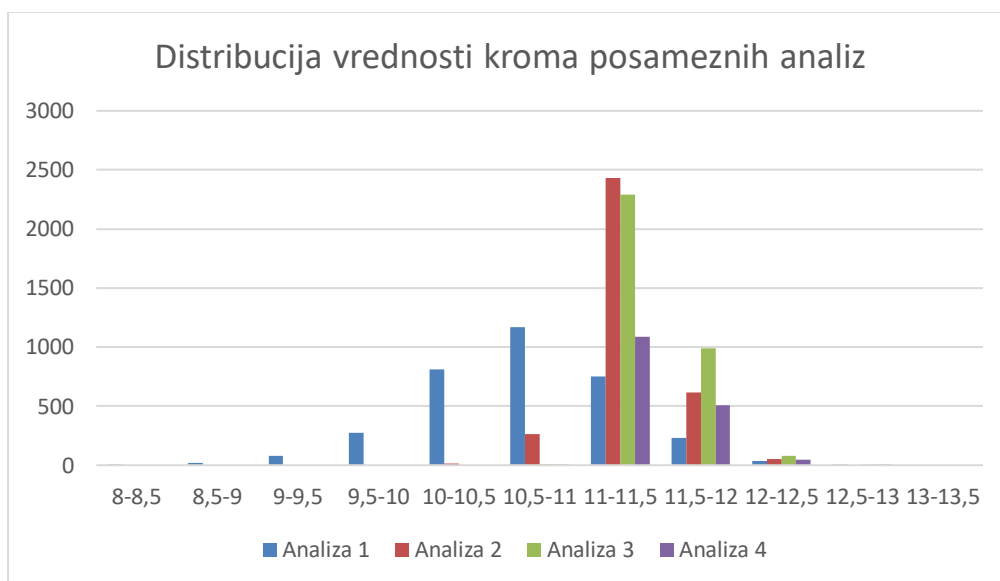
Tabela 4.4: Maksimum, minimum, povprečna vrednost, standardna deviacija, mediana, prvi in tretji kvartil ter interkvartilni razpon vsebnosti posameznih elementov v jeklu pri vzorcih za tretjo kemijsko analizo. 1668 šarž.

Četrta analiza								
Element	Maksimum	Minimum	Povprečje	Standardna deviacija	Mediana	Prvi kvartil	Drugi kvartil	Interkvartilni razpon
Cr	12,670	10,900	11,469	0,205	11,410	11,340	11,560	0,220
C	1,600	1,460	1,523	0,024	1,520	1,510	1,540	0,030
Si	0,420	0,170	0,276	0,025	0,270	0,260	0,290	0,030
Mn	0,470	0,210	0,274	0,041	0,260	0,250	0,280	0,030
Mo	1,100	0,690	0,762	0,049	0,750	0,740	0,760	0,020
V	1,000	0,300	0,811	0,087	0,770	0,750	0,920	0,170
W	0,510	0,000	0,037	0,031	0,030	0,020	0,040	0,020
Al	0,025	0,005	0,011	0,003	0,010	0,009	0,014	0,005
Ni	0,470	0,070	0,168	0,041	0,160	0,140	0,190	0,050
Cu	0,280	0,020	0,075	0,022	0,070	0,060	0,080	0,020
P	0,031	0,002	0,023	0,002	0,023	0,022	0,025	0,003
S	0,020	0,001	0,008	0,003	0,008	0,005	0,010	0,005

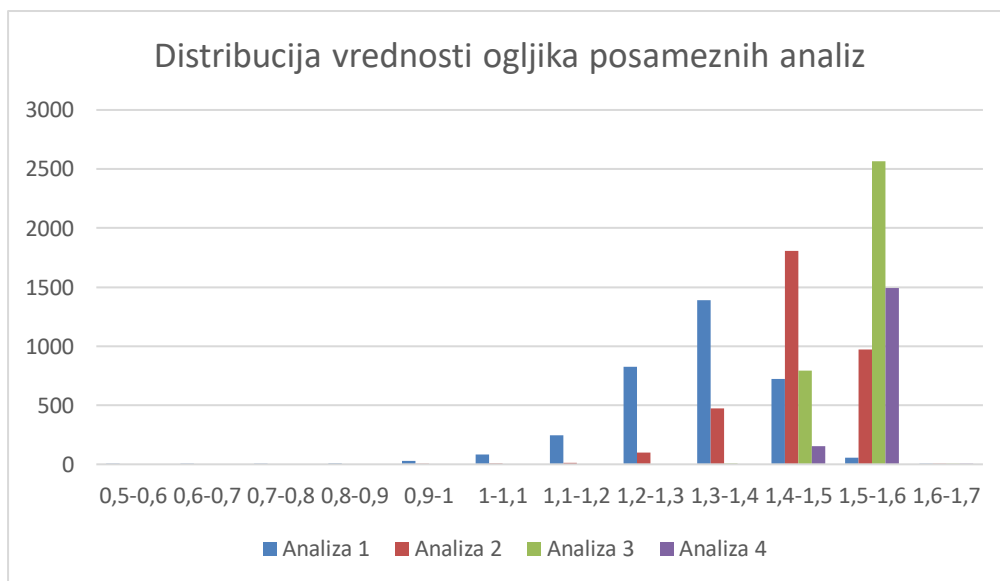
Tabela 4.5: Maksimum, minimum, povprečna vrednost, standardna deviacija, mediana, prvi in tretji kvartil ter interkvartilni razpon vsebnosti posameznih elementov v jeklu pri vzorcih za četrto kemijsko analizo. 1725 šarž.

Iz tega lahko lepo vidimo, kako se za posamezne elemente skozi analize interval vseh vrednosti zožuje, saj je delež posameznega elementa v jeklu po vsakem legiranju bližje želeni končni vrednosti.

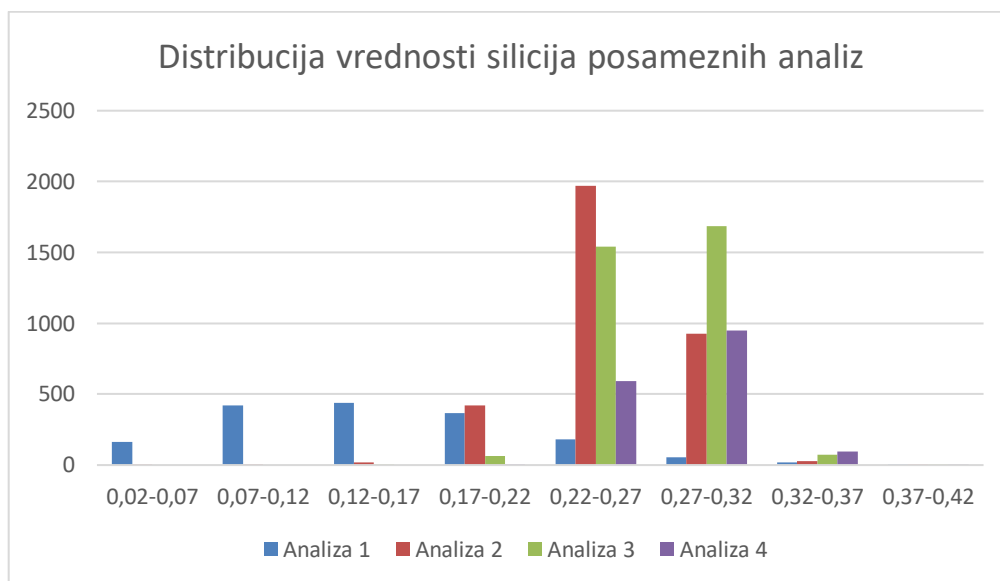
Poleg tega pa smo želeli vedeti tudi, kako so podatki kemijskih analiz razporejeni za vsakega izmed elementov in kako se ta razporeditev spreminja skozi posamezne analize. Za to smo za vsak element iz kemijskih analiz izdelali distribucijski graf, rezultati pa so prikazani na slikah spodaj.



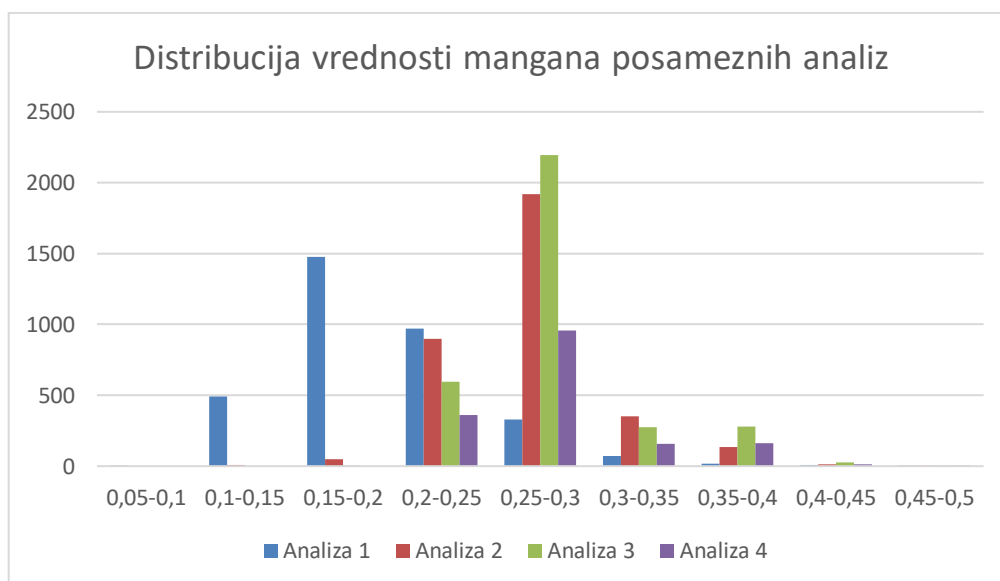
Slika 4.6: Graf distribucije kroma posameznih analiz.



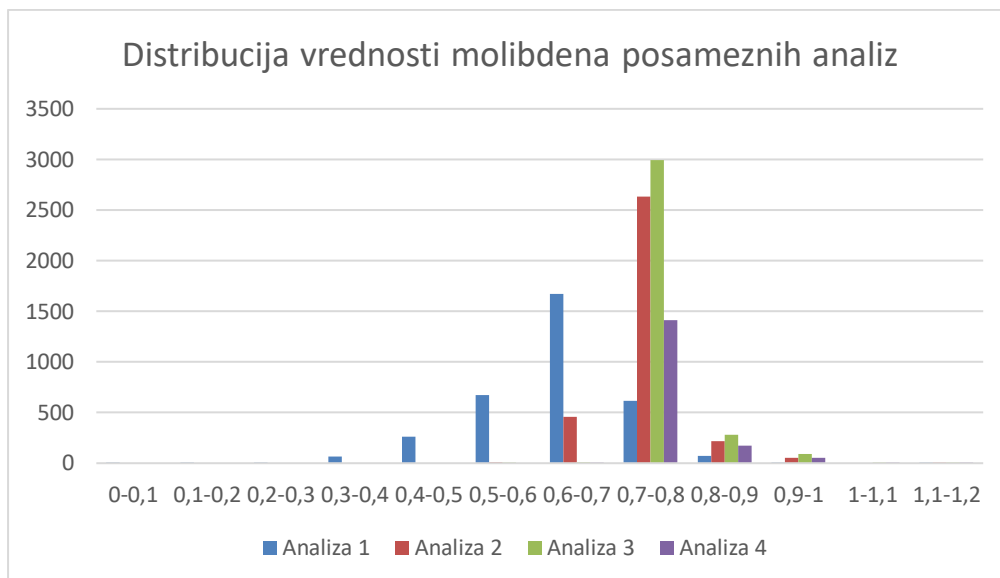
Slika 4.7: Graf distribucije ogljika posameznih analiz.



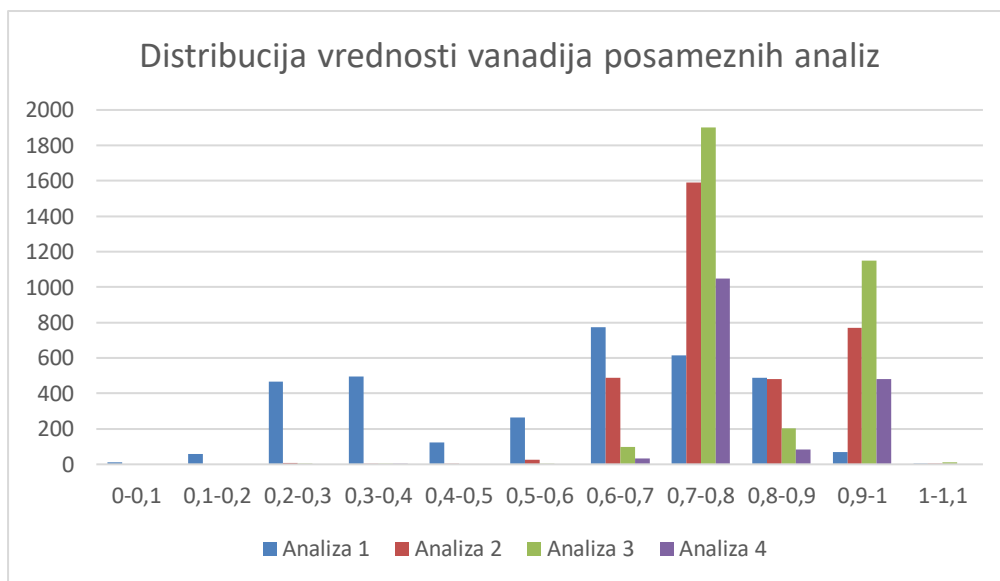
Slika 4.8: Graf distribucije silicija posameznih analiz.



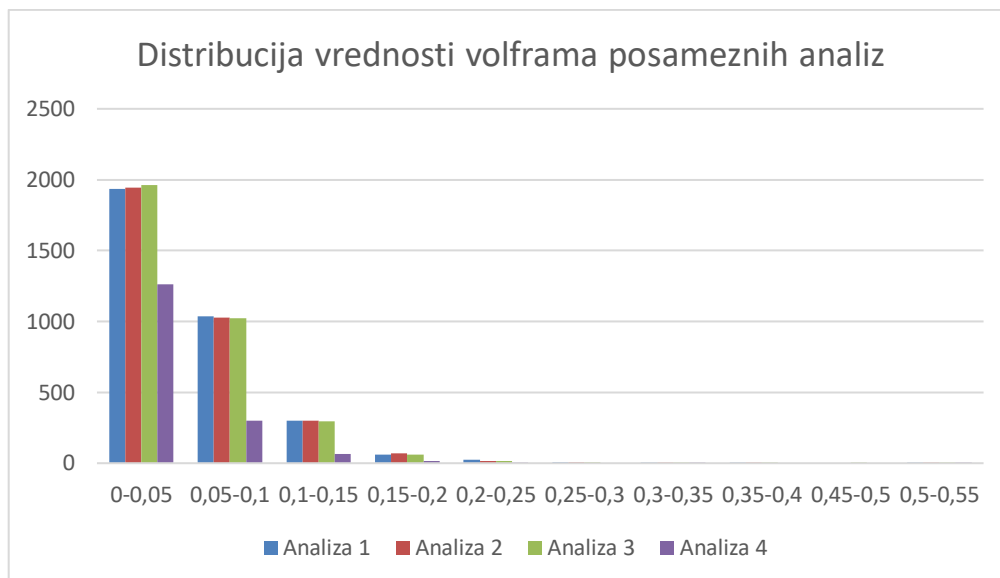
Slika 4.9: Graf distribucije mangana posameznih analiz.



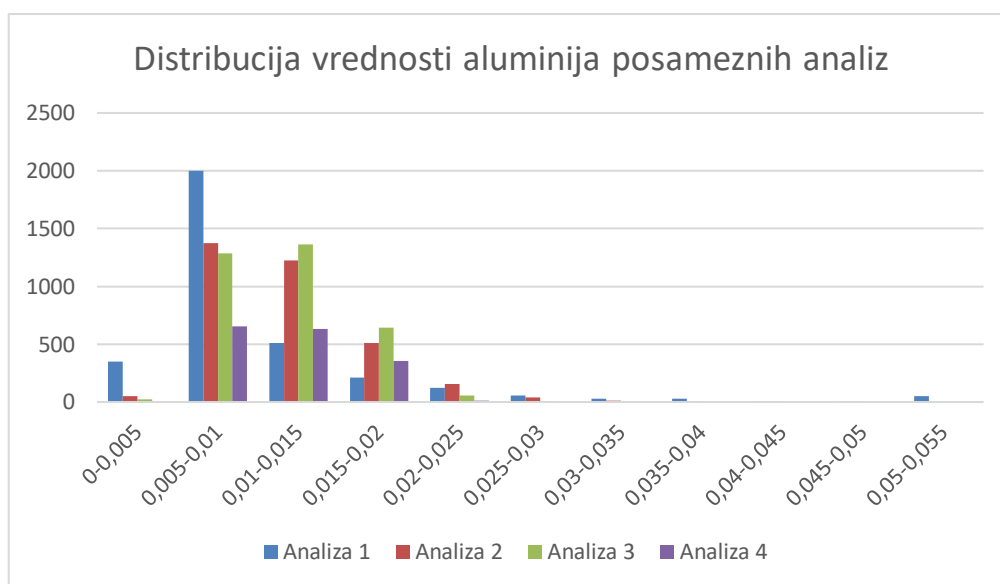
Slika 4.10: Graf distribucije molibdena posameznih analiz.



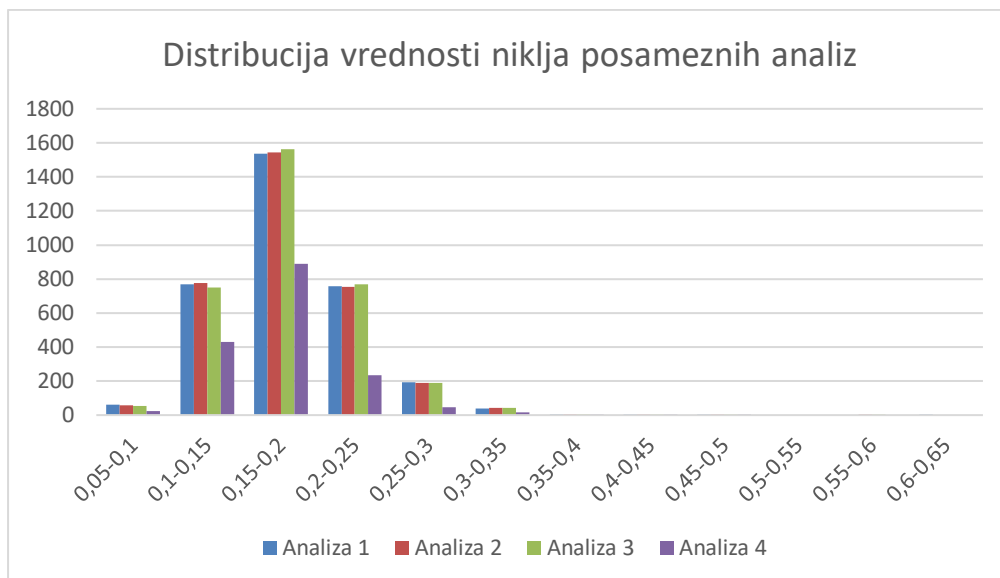
Slika 4.11: Graf distribucije vanadija posameznih analiz.



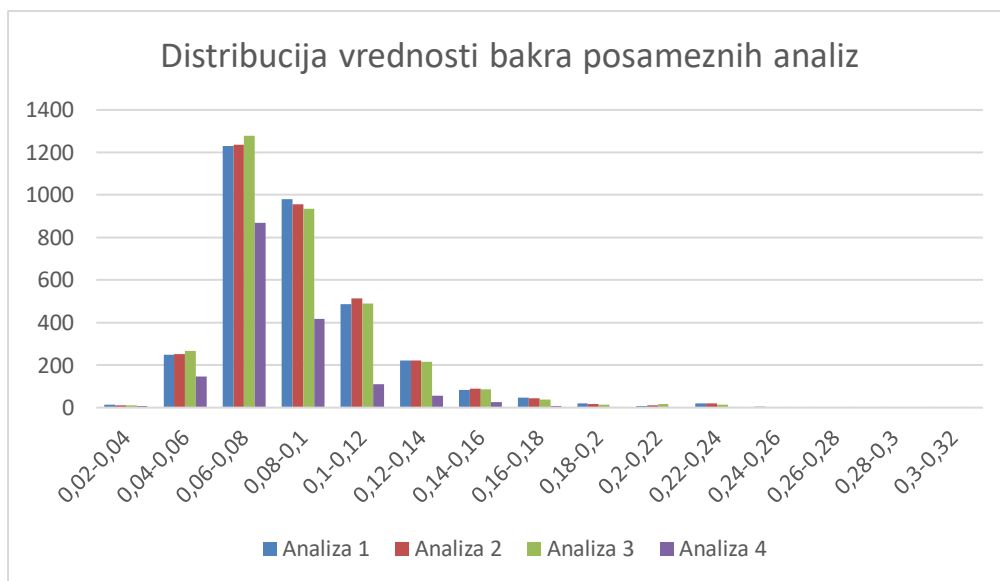
Slika 4.12: Graf distribucije volframa posameznih analiz.



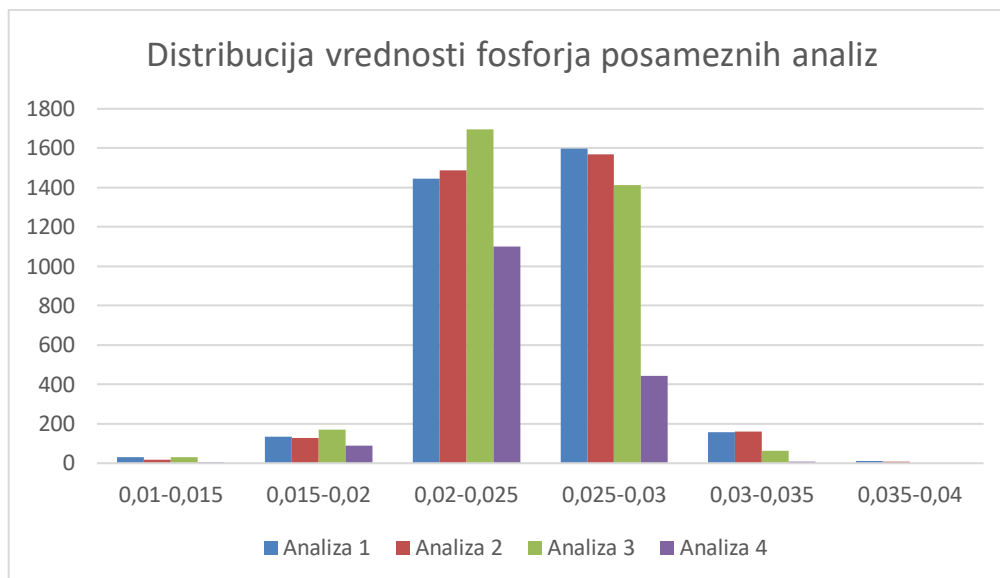
Slika 4.13: Graf distribucije aluminija posameznih analiz.



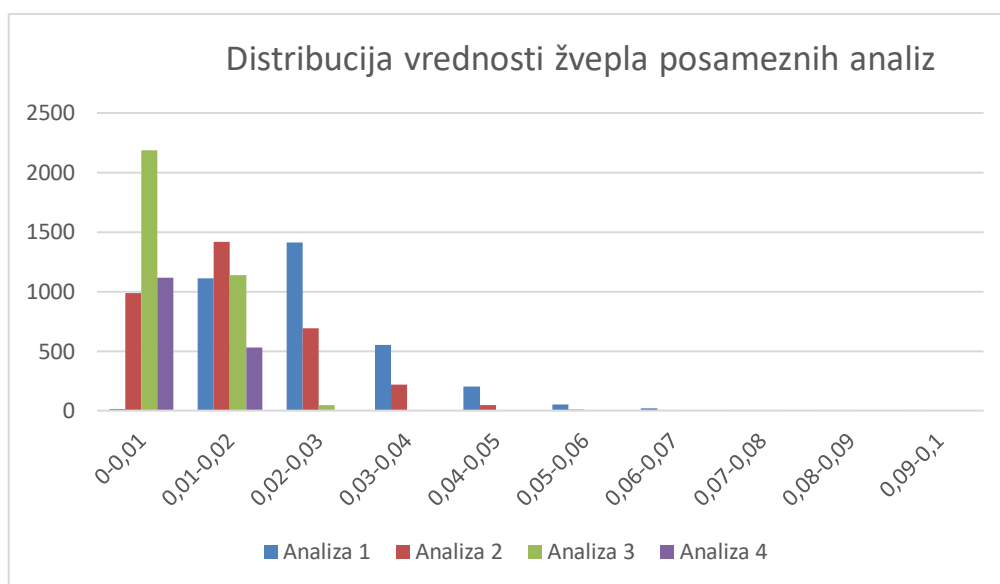
Slika 4.14: Graf distribucije niklja posameznih analiz.



Slika 4.15: Graf distribucije bakra posameznih analiz.



Slika 4.16: Graf distribucije fosforja posameznih analiz.



Slika 4.17: Graf distribucije žvepla posameznih analiz.

Iz distribucijskih grafov je razvidno, kateri izmed elementov se skozi posamezne analize vzorcev spreminjajo največ in katerim se vsebnost v jeklu ne spreminja. Vidimo, da se skozi analize vzorcev najbolj spreminjajo krom, ogljik, silicij, mangan, molibden, vanadij, aluminij in tudi žveplo. Vsebnost žvepla skozi analize pada, medtem ko se ostalim povečuje. Volfram, nikelj, baker in fosfor pa se skozi zaporedne analize ne spreminjajo.

Poglavje 5 Modeliranje in rezultati

Modeliranja problema smo se lotili tako, da smo z uporabo linearne regresije za vsako legiranje od skupno treh med celotnim postopkom regresije izdelali sedem posameznih modelov, ki so uporabni kot napovedni model za vsakega od prej omenjenih legirnih elementov.

Rezultate strojnega učenja (koeficiente linearnih regresijskih napovednih modelov) smo nato v naslednjem koraku uporabili kot osnovo za zapis treh optimizacijskih linearnih programov, s katerimi smo optimizirali količino dodanih legur.

5.1 Strojno učenje

Cilj strojnega učenja pri našem delu je bil, na podlagi izmerjenih podatkov za šarže, ustvariti napovedne modele za napovedovanje vsebnosti posameznih legirnih elementov v procesu legiranja jekla, ki bi se čim boljše prilegali izmerjenim vrednostim, torej da bi naši modeli čim boljše prikazali resnično dogajanje v tem koraku izdelave jekla. Da smo lahko rezultate strojnega učenja nato uporabili za zapis linearnih programov, smo se strojnega učenja lotili z uporabo linearne regresije.

Pri strojnem učenju smo uporabili metodo prečnega preverjanja, in sicer smo za izdelavo svojih modelov uporabili desetkratno prečno preverjanje po šaržah. Kot oceno kakovosti posameznega modela pa smo vzeli dva parametra, srednja kvadratna napaka (angl. *mean squared error* (MSE)), srednja absolutna napaka (angl. *mean absolute error* (MAE)), med napovedano vrednostjo $\hat{f}(i)$ in želeno vrednostjo $f(i)$:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(i) - \hat{f}(i))^2 \quad (5.1)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f(i) - \hat{f}(i)| \quad (5.2)$$

Rezultati uporabe linearne regresije za izdelavo napovednih modelov za posamezen legirni element pri vsakem izmed legiranj so navedeni v tabeli 5.1 in tabeli 5.2.

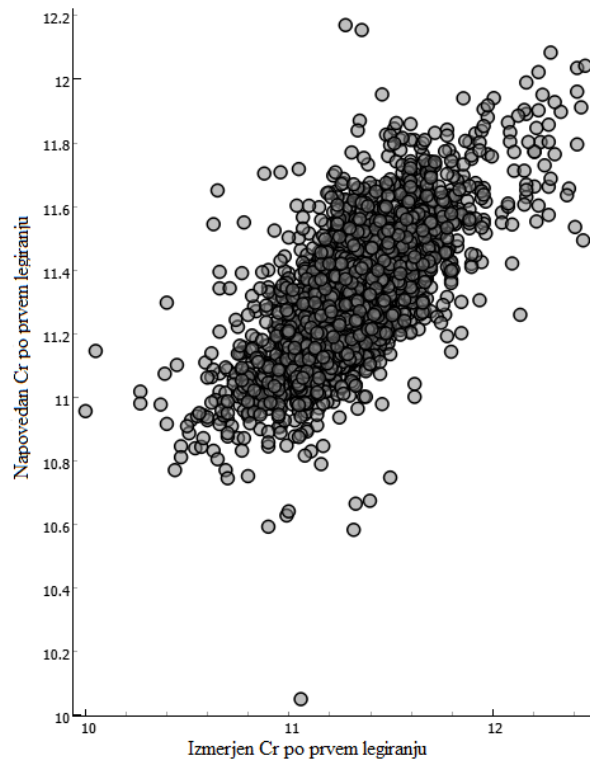
MSE napovednih modelov							
Legiranje	Cr	C	Mo	V	Mn	Al	Si
Prvo	0,035	0,003	0,001	0,004	0,001	0,000	0,001
Drugo	0,007	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Tretje	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 5.1: MSE modelov izbranih metod za posamezen element pri prvem legiranju.

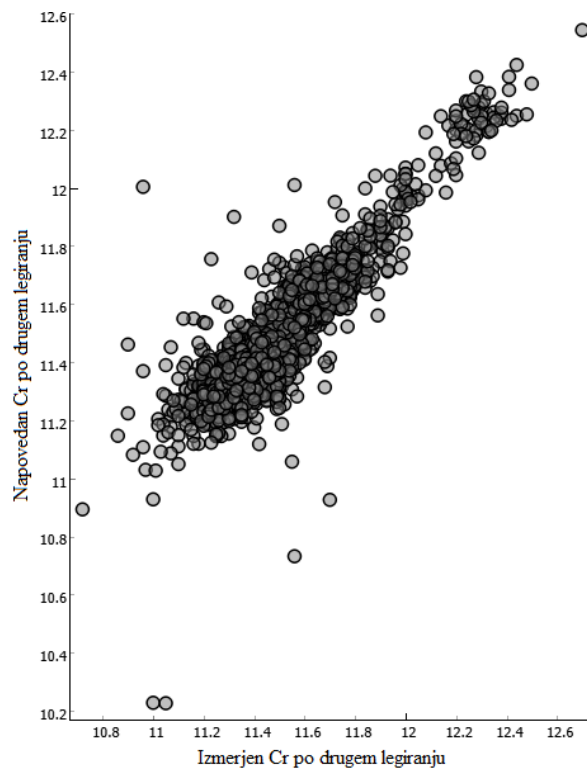
MAE napovednih modelov							
Legiranje	Cr	C	Mo	V	Mn	Al	Si
Prvo	0,137	0,041	0,026	0,047	0,016	0,003	0,020
Drugo	0,059	0,016	0,010	0,016	0,007	0,002	0,012
Tretje	0,055	0,016	0,009	0,011	0,005	0,002	0,008

Tabela 5.2: MAE modelov izbranih metod za posamezen element pri prvem legiranju.

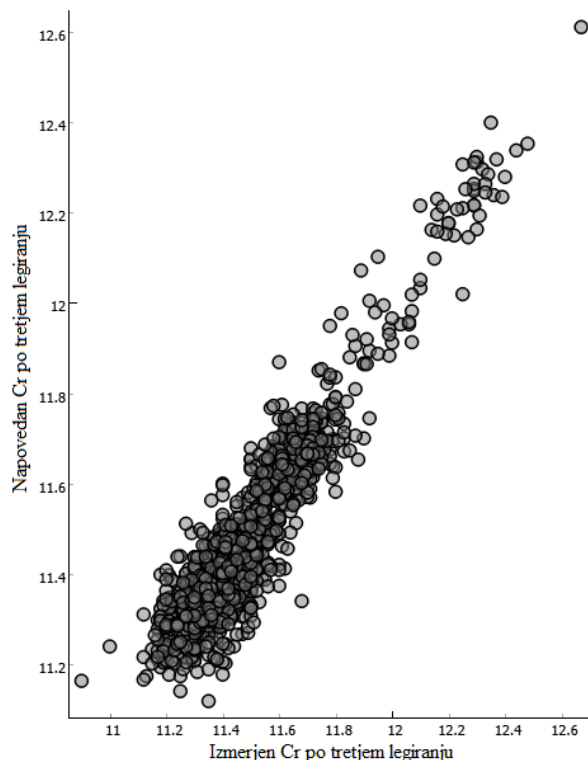
Na sliki 5.1, sliki 5.2 in sliki 5.3 je prikazan napovedan odstotek kroma (primer enega izmed legirnih elementov v jeklu) pri posameznih legiranjih v primerjavi z izmerjenim odstotkom, tudi tukaj opazimo, da napovedane in izmerjene vrednosti bolj sovpadajo pri drugem in tretjem legiranju kot pa pri prvem.



Slika 5.1: Napovedan in izmerjen delež Cr po prvem legiranju.



Slika 5.2: Napovedan in izmerjen delež Cr po drugem legiranju.



Slika 5.3: Napovedan in izmerjen delež Cr po tretjem legiranju.

Do sedaj smo za ocenjevanje uspešnosti strojnega učenja uporabili le vrednosti MSE in MAE, ker pa imamo pri nekaterih legirnih elementih opravka z zelo majhnimi vrednostimi in ker je MAE odvisna od dejanskega razpona možnih vrednosti funkcije, smo za modele izračunali še relativno srednjo absolutno napako (RMAE):

$$RMAE = \frac{N \times MAE}{\sum_i |f(i) - \bar{f}|} \quad (3.3)$$

kjer je $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_i f(i)$. [1]

Relativna srednja absolutna napaka je nenegativna in za sprejemljive hipoteze manjša od ena:

$$0 \leq RMAE \leq 1. [1]$$

RMAE napovednih modelov							
Legiranje	Cr	C	Mo	V	Mn	Al	Si
Prvo	0,716	0,772	0,804	0,545	0,588	0,791	0,851
Drugo	0,400	0,729	0,365	0,190	0,256	0,652	0,629
Tretje	0,369	0,849	0,288	0,143	0,163	0,683	0,404

Tabela 5.3: RMAE napovednih modelov.

Ključnega pomena pa je bilo tudi, kako dobro se naši napovedni modeli obnesejo v primerjavi z metalurško napovedjo, ki jo predstavlja ciljni odstotek posameznega elementa v jeklu in je določena s KP ob pričetku šarže. Za to smo spet izračunali MAE po enačbi (5.2), za $\hat{f}(i)$ smo najprej vzeli metalurško napoved, nato pa še napoved naših modelov, $f(i)$ pa je spet predstavljal izmerjeno vrednost. Rezultati tega za posamezna legiranja so predstavljeni v tabelah spodaj.

Primerjava MAE za metalurško in našo napoved pri prvem legiranju							
$\hat{f}(i)$	Cr	C	Mo	V	Mn	Al	Si
Metalurška napoved	0,197	0,075	0,026	0,042	0,025	0,004	0,025
Naša napoved	0,137	0,041	0,026	0,047	0,016	0,003	0,020

Tabela 5.4: Primerjava MAE za metalurško in našo napoved pri prvem legiranju.

Primerjava MAE za metalurško in našo napoved pri drugem legiranju							
$\hat{f}(i)$	Cr	C	Mo	V	Mn	Al	Si
Metalurška napoved	0,081	0,021	0,018	0,016	0,020	0,003	0,021
Naša napoved	0,059	0,016	0,010	0,016	0,007	0,002	0,012

Tabela 5.5: Primerjava MAE za metalurško in našo napoved pri drugem legiranju.

Primerjava MAE za metalurško in našo napoved pri tretjem legiranju							
$\hat{f}(i)$	Cr	C	Mo	V	Mn	Al	Si
Metalurška napoved	0,073	0,013	0,017	0,014	0,018	0,002	0,023
Naša napoved	0,055	0,016	0,009	0,011	0,005	0,002	0,008

Tabela 5.6: Primerjava MAE za metalurško in našo napoved pri tretjem legiranju.

Iz rezultatov je bilo razvidno, da so naši napovedni modeli dosti natančnejši pri opisu postopka legiranja kot pa metalurški, še posebej pri modelih za napovedovanje odstotka kroma, mangana, pa tudi molibdena in silicija. Zaradi tega smo tukaj zaključili s korakom strojnega učenja in z dobljenimi modeli pričeli s korakom linearnega programiranja.

5.2 Linearno programiranje

Ker smo ugotovili, da so naši modeli pri opisu postopka dovolj dobri ali za nekatere elemente celo boljši od metalurških, smo z uporabo linearnega programiranja v tem koraku želeli minimizirati količino uporabljenih legur pri legiranju jekla.

Za zapis linearnih programov smo uporabili rezultate strojnega učenja v prejšnjem koraku, koeficiente linearnih napovednih modelov. Vsak napovedni model za enega izmed legirnih elementov za posamezno legiranje nam je v kombinaciji s predpisano ciljno vrednostjo tega elementa v končnem jeklu predstavljal dve omejitvi v linearnem programu. S ciljnimi odstotkom za posamezen element pri vsaki izmed šarž smo določili nov dopustni interval, z zgornjo in spodnjo vrednostjo, v katerem smo želeli, da je končni odstotek posameznega elementa.

Zgornjo in spodnjo mejo tega intervala smo določili tako, da smo dovolili dvainpolodstotno odstopanje od same ciljne vrednosti. Tako prva omejitev za vsakega izmed legirnih elementov v linearnem programu predstavljala neenačbo, ki zahteva, da je končna vrednost legirnega elementa manjša ali enaka zgornji vrednosti, druga pa, da je ta vrednost večja ali enaka spodnji vrednosti novega intervala. Za primerjavo vzemimo dopustne intervale iz tabele 4.1, kjer zgornja in spodnja meja za krom od ciljne vrednosti odstopata za 2,8 in 1,3 odstotka. V primeru molibdena pa zgornja meja odstopa 7,1 odstotka spodnja pa 4,8 odstotka.

V našem zapisu smo vrednosti posameznih elementov in količino dodanih legur, ki smo jo želeli minimizirati, predstavili kot vektor x , koeficiente i -tega napovednega modela smo označili s $k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}$, kjer je n vsota števila merjenih kemijskih elementov v jeklu (dvanajst) in števila različnih uporabljenih legur, ki se rahlo spreminja skozi posamezna legiranja, ter zgornjo in spodnjo vrednost dopustnega intervala za i -ti legirni element z b_i^Z in b_i^S . S tem sta bili dve omejitvi za vsak legirni element v linearnem programu videti takole:

$$k_{i1}x_1 + k_{i2}x_2 + \dots + k_{in}x_n \leq b_i^Z \quad (5.3)$$

$$k_{i1}x_1 + k_{i2}x_2 + \dots + k_{in}x_n \geq b_i^S \quad (5.4)$$

Za potrebe samega linearnega programa je bilo treba drugo omejitev, neenačbo (5.4), zapisati z operatorjem \leq , kot je zapisana prva omejitev, da smo jo lahko uporabili v linearnem programu. Za to smo celotno neenačbo (5.4) pomnožili z -1 , tako je bila druga omejitev sedaj videti takole:

$$-k_{i1}x_1 - k_{i2}x_2 - \dots - k_{in}x_n \leq -b_i^S \quad (5.5)$$

Vse neenačbe smo nato zapisali v sistem linearnih neenačb $Kx \leq b$, kjer matrika K vsebuje koeficiente k_{ij} in $-k_{ij}$ za $i = 1, 2, \dots, 7$ in $j = 1, 2, \dots, n$, kjer je n vsota števila merjenih kemijskih elementov v jeklu (dvanajst) in števila različnih uporabljenih legur, ki se rahlo spreminja skozi posamezna legiranja, i pa predstavlja število napovednih modelov. Vektor b pa je sestavljen iz vseh zgornjih in spodnjih vrednosti dopustnih intervalov vrednosti elementov.

Tako smo sedaj lahko zapisali linearni program, v katerem smo iskali minimum funkcije $f(x) = c^T x$, ker smo vektor c definirali kot

$$c_i = \begin{cases} 1, & i - \text{ta komponenta } x \text{ predstavlja količino dodane legure} \\ 0, & \text{sicer} \end{cases}$$

pri pogojih $Kx \leq b$, kar je bil krajši zapis za

$$\begin{aligned} k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + \dots + k_{1n}x_n &\leq b_1^Z \\ k_{21}x_1 + k_{22}x_2 + \dots + k_{2n}x_n &\leq b_2^Z \\ &\dots \\ k_{71}x_1 + k_{72}x_2 + \dots + k_{7n}x_n &\leq b_7^Z \\ -k_{11}x_1 - k_{12}x_2 - \dots - k_{1n}x_n &\leq -b_1^S \\ -k_{21}x_1 - k_{22}x_2 - \dots - k_{2n}x_n &\leq -b_2^S \\ &\dots \\ -k_{71}x_1 - k_{72}x_2 - \dots - k_{7n}x_n &\leq -b_7^S \end{aligned} \tag{5.6}$$

Podobno smo definirali tudi omejitve za vektor x . Vrednosti x_i , ki so predstavljale vrednosti posameznih elementov, so morale biti enake tistim, ki so bile izmerjene v prejšnji kemijski analizi posamezne šarže. Obenem pa so morale biti vrednosti x_j , ki so predstavljale količino j -te dodane legure, nenegativne, saj pri legiranju ne moremo dodati negativno količino kake legure.

Tako smo za vsako izmed treh legiranj ter vsako šaržo zapisali linearen program, ki smo ga nato rešili s knjižnico Python SciPy, rezultati pa so predstavljeni v naslednjem poglavju.

Poglavje 6 Rezultati

S programskim jezikom Python in programsko knjižnico SciPy smo za vsako šaržo posebej z linearnim programiranjem naredili optimizacijo legirnih dodatkov. Med sabo pa smo ločili tudi posamezna legiranja, torej prvo, drugo in tretje legiranje. Pri optimizaciji legirnih dodatkov smo poseben poudarek dali ferozlitinam, ki se jih pri proizvodnji jekla OCR12VM porabi največ in v proizvodnji predstavljajo tudi največji strošek legur, to so bile ferozlitine z oznakami FeCrA, FeCrC, FeMnC, FeMo, FeSi in FeV.

Pri prvem legiranju smo količino dodanih legirnih elementov optimizirali za 3413 šarž, 3373 pri drugem legiranju in 1648 pri tretjem legiranju. V tabeli spodaj je predstavljen primer rešenega linearnega programa za šaržo številka 97968 pri prvem legiranju. Izmerjene in optimizirane količine legirnih dodatkov so predstavljene v kilogramih. (Negativna vrednost prihranka pomeni, da smo s svojo optimizacijo porabo tega legirnega dodatka povečali.)

Primer optimizacije za šaržo št. 97968			
Legirni dodatek	Porabljena količina [kg]	Optimizirana količina [kg]	Prihranek [kg]
FeCrA	0	0	0
FeCrC	1300	1016	284
FeMnC	111	210	-99
FeMo	144	247	-103
FeSi	86	0	86
FeV	262	226	36

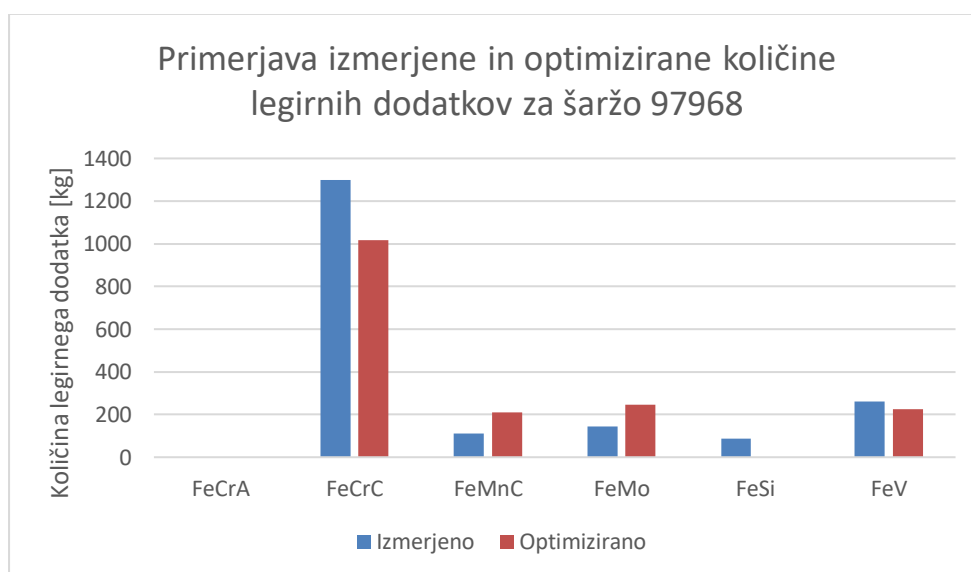
Tabela 6.1: Primer optimizacije za šaržo 97960 pri prvem legiranju.

Ugotovili smo, da bi nam z uporabo linearnega programa v primeru šarže številka 97968 uspelo zmanjšati porabo ferozlitin FeCrC, FeSi in FeV, hkrati pa smo s svojo optimizacijo v tem primeru porabili več FeMnC in FeMo.

Razlog za večjo količino nekaterih legirnih dodatkov po optimizaciji najdemo v tem, da smo pri sami optimizaciji v linearnem programu zahtevali, da vrednosti vseh legirnih elementov v jeklu že po prvem legiranju ne odstopajo za več kot dva in pol odstotka od njihovega ciljnega odstotka, ko smo pri zapisu linearnih programov določili omejitve za vsakega izmed legirnih elementov. Zaradi tako strogih zahtev že pri prvem legiranju je zato v primeru šarže 97968 pri

optimizaciji prišlo do večje porabe FeMnC in FeMo, po drugi strani pa nam te omejitve omogočijo, da se šarža zaključi prej, takoj po prvem legiranju preidemo k litju jekla in za šaržo ne izvajamo drugega ali morda celo tretjega legiranja, s tem pa tudi prihranimo morebitne legirne dodatke, saj že v prvem koraku poskrbimo, da dosežemo željeno končno kemijsko sestavo.

Za lažjo primerjavo med izmerjenimi in optimiziranimi količinami dodanih legur primera prvega legiranja šarže 97968 so rezultati iz tabele 6.1 še enkrat predstavljeni na sliki spodaj.



Slika 6.1: Primerjava izmerjene in optimizirane količine legirnih dodatkov za šaržo 97968.

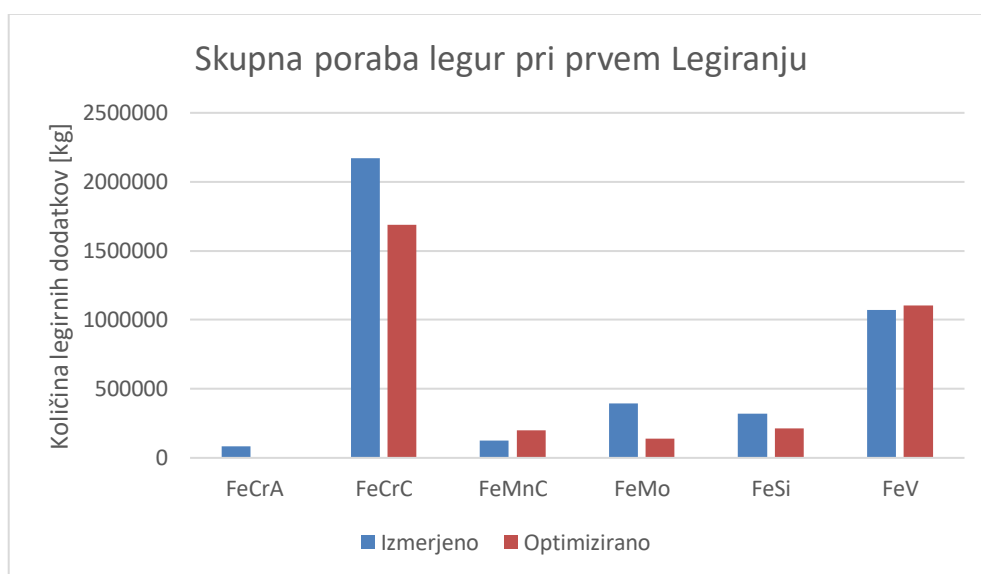
Potem ko smo z linearnim programiranjem za vsako šaržo optimizirali količino dodanih legur, nas je zanimalo kolikšen prihranek oziroma porabo legur smo na podlagi svojih modelov dosegli v vsakem izmed posameznih korakov legiranja.

Skupna poraba legirnih dodatkov pri prvem legiranju			
Legirni dodatek	Porabljena količina [kg]	Optimizirana količina [kg]	Prihranek [kg]
FeCrA	82.561	0	82.561
FeCrC	2.170.414	1.686.869	483.545
FeMnC	126.275	199.643	-73.368
FeMo	395.416	139.013	256.403
FeSi	319.644	211.826	107.818
FeV	1.070.157	1.104.099	-33.942

Tabela 6.2: Rezultati skupne porabe izmerjenih in optimiziranih legirnih dodatkov pri drugem legiranju.

Rezultati skupne porabe legirnih dodatkov pri prvem legiranju, ki so predstavljeni v tabeli 6.2:, kažejo na podobno sliko kot posamičen primer šarže 97968. Pri skupni porabi legirnih dodatkov smo namreč največje prihranke dosegli pri ferozlitinah FeCrC in FeSi, do razlike je prišlo pri FeV, ki smo ga skupaj porabili več, in FeMo, ki smo ga v skupnem seštevku porabili manj. Tudi pri skupni porabi pa smo povečali količino FeMnC, hkrati pa smo povečali tudi količino FeV.

Primerjava rezultatov iz tabele 6.2 je grafično prikazana spodaj.



Slika 6.2: Primerjava skupne porabe izmerjene in optimizirane količine legirnih dodatkov pri prvem legiranju.

Podobne rezultate smo dobili tudi za drugo in tretje legiranje v tabeli 6.3 in tabeli 6.4.

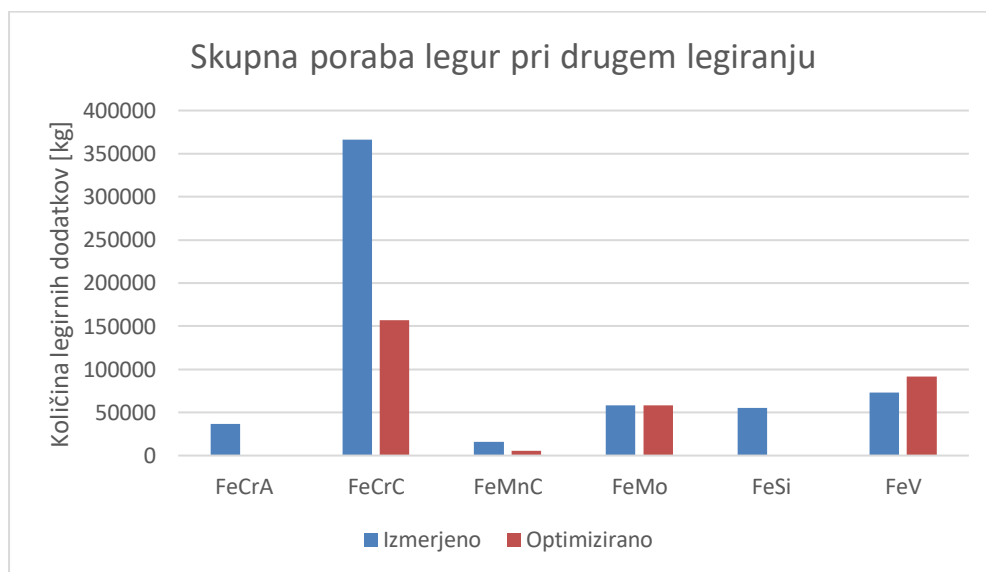
Skupna poraba legirnih dodatkov pri drugem legiranju			
Legirni dodatek	Porabljena količina [kg]	Optimizirana količina [kg]	Prihranek [kg]
FeCrA	36.707	0	36.707
FeCrC	366.592	157.047	209.545
FeMnC	15.671	5636	10.035
FeMo	58.022	58.372	-350
FeSi	55.292	0	55.292
FeV	72.883	91.539	-18.656

Tabela 6.3: Rezultati skupne porabe izmerjenih in optimiziranih legirnih dodatkov pri prvem legiranju.

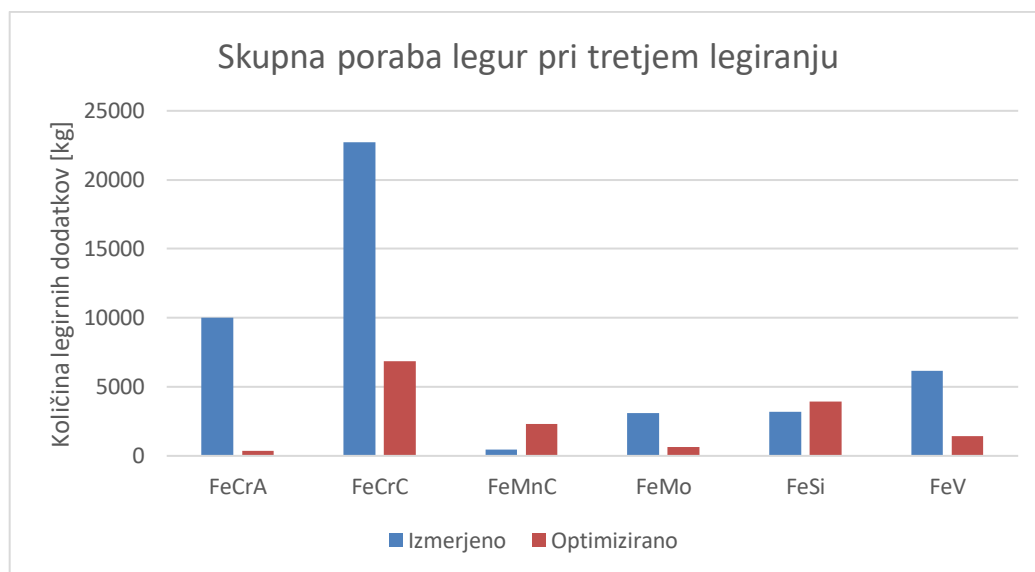
Skupna poraba legirnih dodatkov pri tretjem legiranju			
Legirni dodatek	Porabljena količina [kg]	Optimizirana količina [kg]	Prihranek [kg]
FeCrA	10.030	358	9672
FeCrC	22.719	6856	15.863
FeMnC	433	2323	-1890
FeMo	3110	649	2461
FeSi	3197	3937	-740
FeV	6155	1433	4722

Tabela 6.4: Rezultati skupne porabe izmerjenih in optimiziranih legirnih dodatkov pri drugem legiranju.

Grafična primerjava rezultatov iz tabele 6.3 in tabele 6.4 je prikazana na sliki 6.3 in sliki 6.4.



Slika 6.3: Primerjava skupne porabe izmerjene in optimizirane količine legirnih dodatkov pri drugem legiranju.



Slika 6.4 Primerjava skupne porabe izmerjene in optimizirane količine legirnih dodatkov pri tretjem legiranju.

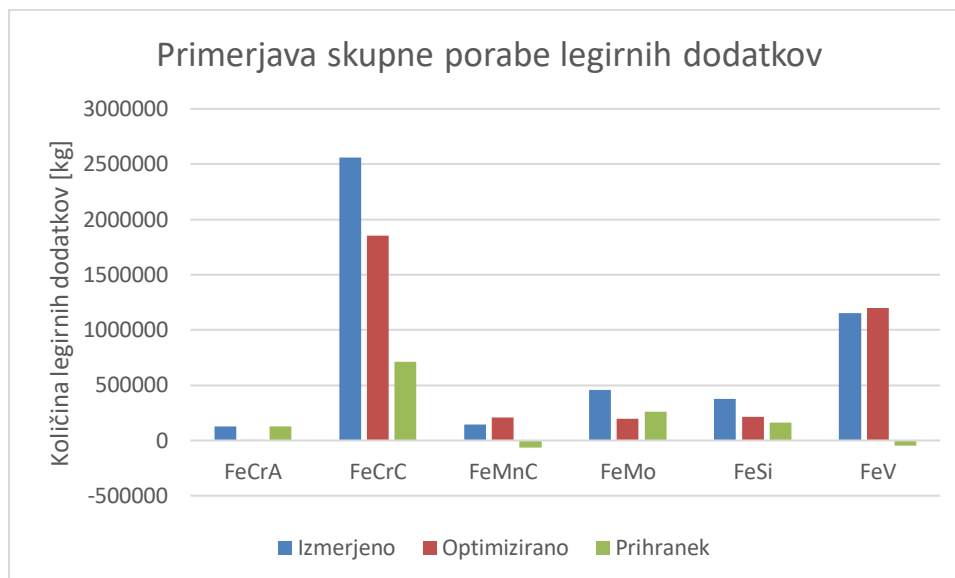
Pri drugem legiranju smo prihranek dosegli pri ferozlitinah FeCrA, FeCrC in FeSi. Zmanjšali smo tudi količino porabljenega FeMnC, povečala pa se nam je poraba FeMo in FeV.

Tako kot pri prvem in drugem smo tudi pri tretjem legiranju zmanjšali količino dodanih ferozlitin FeCrA in FeCrC. Zmanjšali smo tudi porabo FeMo in na novo nam je uspelo prihraniti tudi FeV, kar se ni zgodilo v nobenem od prejšnjih legiranj. Tudi pri tretjem legiranju pa smo povečali porabo dveh legur, in sicer FeMnC ter FeSi.

V tabeli spodaj in na sliki 6.5 je prikazana celotna izmerjena poraba in optimizirana količina legirnih dodatkov skozi vsa tri legiranja.

Skupna poraba legirnih dodatkov pri naših podatkih			
Legirni dodatek	Izmerjena količina [kg]	Optimizirana količina [kg]	Prihranek [kg]
FeCrA	129.298	358	128.940
FeCrC	2.559.725	1.850.772	708.953
FeMnC	142.379	207.602	-65.223
FeMo	456.548	198.034	258.514
FeSi	378.133	215.763	162.370
FeV	1.149.195	1.197.071	-47.876

Tabela 6.5: Skupna količina izmerjenih in optimiziranih legirnih dodatkov pri vseh legiranjih in prihranek, ki smo ga dosegli z optimizacijo z našimi napovednimi modeli.



Slika 6.5: Primerjava količine izmerjenih in optimiziranih legirnih dodatkov ter njihov prihranek po optimizaciji.

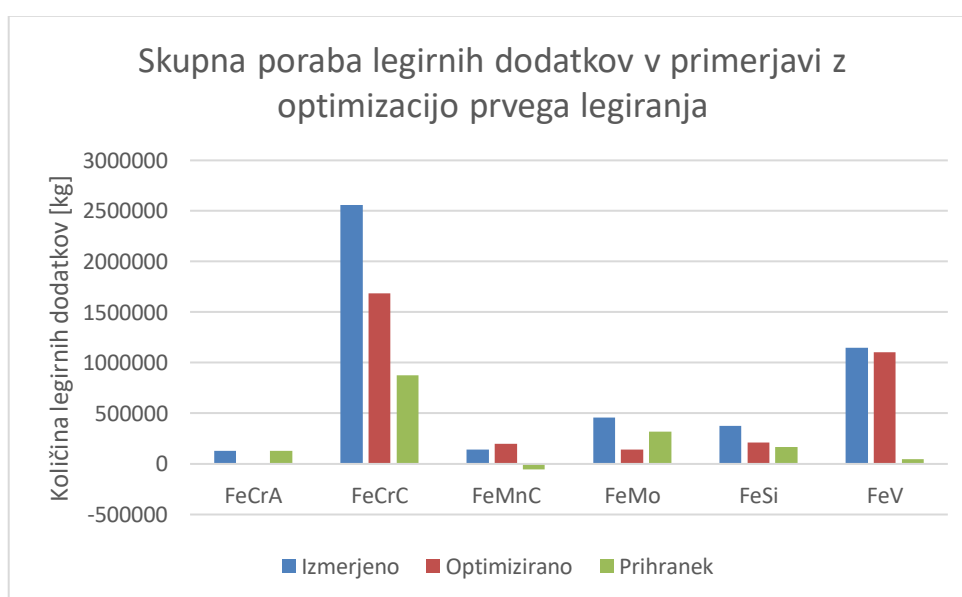
Največje prihranke pri naših podatkih smo dosegli pri legirnih dodatkih FeCrC, FeMo in FeSi. FeCrC smo prihranili kar 128.940 kilogramov, FeMo 258.514 in FeSi 162.370 kilogramov. Prihranili smo tudi veliko večino porabljenega FeCrA, ki je bil pri naši optimizaciji uporabljen le pri tretjem legiranju in v zelo majhnih količinah. Po drugi strani pa smo povečali porabo FeMnC in FeV, prvega smo po optimizaciji porabili 65.220 kilogramov več, kot ga je bilo prvotno uporabljeno v izmerjenih podatkih, drugega pa 47.876 kilogramov več.

Ker pa smo pri linearni optimizaciji že v prvem koraku za elemente postavili omejitve, da morajo biti vsi znotraj dopustnih vrednosti oziroma da od ciljne vrednosti ne smejo odstopati za več kot dva in pol odstotka, bi se pri naši optimizaciji lahko šarže zaključile že po samo enem koraku legiranja. Zato smo izmerjeno skupno porabo ferolegur primerjali samo z rezultati optimizacije prvega legiranja. Rezultati tega so predstavljeni v tabeli spodaj in na sliki 6.6.

Če proces finega legiranja po svoji optimizaciji zaključimo že po prvem legiranju, pri svojih podatkih dosežemo še večje prihranke, saj popolnoma izločimo drugo in tretje legiranje, s tem pa tudi pospešimo samo izdelavo jekla.

Skupna poraba legirnih dodatkov pri naših podatkih			
Legirni dodatek	Izmerjena količina [kg]	Optimizirana količina [kg]	Prihranek [kg]
FeCrA	129.298	0	129.298
FeCrC	2.559.725	1.686.869	872.856
FeMnC	142.379	199.643	-57.264
FeMo	456.548	139.013	317.535
FeSi	378.133	211.826	166.307
FeV	1.149.195	1.104.099	45.096

Tabela 6.6: Skupna poraba izmerjenih legirnih dodatkov v primerjavi z optimizacijo legiranja po samo prvem legiranju.



Slika 6.6: Skupna poraba izmerjenih legirnih dodatkov v primerjavi z optimizacijo legiranja po samo prvem legiranju.

Iz rezultatov je razvidno, da nam je na koncu za svoje podatke šarž uspelo zmanjšati porabo nekaterih legirnih dodatkov. Razlog za povečanje porabljene količine preostalih legirnih dodatkov po optimizaciji pa je, kot omenjeno, v morebitno prestrogo izbranih omejitvah končne vrednosti legirnih elementov pri zapisu linearnih programov, ki smo si jih v kombinaciji s kemijskimi predpisi zadali sami.

Poglavje 7 Sklepne ugotovitve

Cilj diplomskega dela je bil ugotoviti, ali lahko z uporabo metode linearne regresije strojnega učenja in linearnega programiranja optimiziramo porabo legirnih dodatkov, natančneje porabo ferolegur, pri proizvodnji jekla po tehnologiji EOP-VPP.

Po opisu postopka izdelave jekla po tehnologiji EOP-VPP smo s statistično analizo in vizualizacijo podatkov v prvem delu pokazali, kako se vsebovane vrednosti posameznih elementov spreminjajo skozi zaporedne analize vzorcev. Na vsebnost katerih izmed elementov lahko v fazi finega legiranja z dodajanjem ferolegur najbolj vplivamo? Ugotovili smo, da se skozi analize vzorcev najbolj spreminjajo krom, ogljik, silicij, mangan, molibden, vanadij in aluminij. Volfram, nikelj in baker se skozi zaporedne analize ne spreminjajo, na vsebnost fosforja in žvepla pa z dodatkom ferolegur v tem koraku ne moremo vplivati.

Na podlagi teh ugotovitev smo izdelali linearne napovedne modele in jih uporabili za zapis linearnih programov, s katerimi smo nato optimizirali količino dodanih ferolegur za posamezno šaržo.

Naši rezultati kažejo, da je z uporabo linearnega programiranja v kombinaciji z regresijskimi metodami strojnega učenja, natančneje linearne regresije, za naš nabor podatkov mogoča optimizacija ferolegur v fazi finega legiranja pri izdelavi jekla OCR12VM. Morali pa bi ugotoviti, kaj o naših rezultatih menijo strokovnjaki s področja metalurgije in proizvodnje ter kako se naši zaključki obnesejo v praksi.

7.1 Možnosti za izboljšavo in možnosti za nadaljnje delo

Možnosti za izboljšavo so predvsem pri izboru podatkov, ki jih vzamemo kot učno množico, v našem primeru smo analizirali podatke, ki so bili pridobljeni v preteklih letih, zato obstaja možnost, da je v jeklarni v tem času že prišlo do sprememb pri delu in pristopih do dela, kar potem vpliva na same rezultate in optimizacijo. Zato bi bilo mogoče boljše analizo ponoviti na novejših, sodobnejših podatkih. Kljub temu ocenjujemo, da smo dosegli zastavljen cilj.

Možnosti za nadaljnje delo pa so predvsem v vključitvi samih cen legirnih dodatkov korak optimizacije, saj smo do sedaj optimizirali le količino. Kasneje pa mogoče celo v

implementaciji modela v podjetju, kjer bi lahko izvajali strojno učenje na novih, živih podatkih in optimizirali količino legirnih dodatkov na dejanskih šaržah v proizvodnji.

Literatura

- [1] Igor Kononenko, *Strojno učenje*, Ljubljana: Fakulteta računalništvo in informatiko, 2005.
- [2] Alojz Rozman, *Predstavitev: Tehnologija izdelave jekla po postopku EOP-VPP*, Ravne na Koroškem: SIJ Metal Ravne, 2007.
- [3] Egon Zakrajšek, *Matematično modeliranje*, Ljubljana: DMFA, 2004.
- [4] Janez Demšar in Blaž Zupan, "Orange: Data mining fruitfull and fun-a historical perspective.", *Informatica*, izv. 37, 2013.
- [5] *Metalurški priročnik*, Ljubljana, Tehniška založba Slovenije, 1972.
- [6] Jože Šegl, "Učinek uporabe procesnega računalnika v procesu legiranja jekla.", *Železarski zbornik*, letnik 13., številka 1, 1979.
- [7] C-J. Rick, M. Engholm, "Ferro alloy design, ferro alloy selection and utilisation optimization with particular focus on stainless steel materials.", Helsinki, Finska 2010. Dostopno na: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXII/919-Rick.pdf>
- [8] Jens Wendelstorf, "Analysis of the EAF operation by process modelling", *Archives of Metallurgy and Materials (Poland)*, Vol. 53, No 2, pp. 385–390.
- [9] R. D. Morales, H. Rodríguez-Hernández, A. N. Conejo, "A Mathematical Simulator for the EAF Steelmaking Process Using Direct Reduced Iron", *ISIJ International*, Vol. 41 (2001), No. 5, pp. 426–435.
- [10] Xuegong Bl, Torrsell Krister, Wijk Olle, "Prediction of the Blast Furnace Process by a Mathematical Model", *ISIJ International*, Vol. 32 (1992), No 4, pp. 481–488.

- [11] Akifumi Harada, Nobuhiro Maruoka, Hiroyuki Shibata, Shin-ya Kitamura, "A Kinetic Model to Predict the Compositions of Metal, Slag and Inclusions during Ladle Refining: Part 1. Basic Concept and Application", *ISIJ International*, Vol. 53 (2013), No. 12, pp. 2110–2117.
- [12] Akifumi Harada, Nobuhiro Maruoka, Hiroyuki Shibata, Shin-ya Kitamura, "A Kinetic Model to Predict the Compositions of Metal, Slag and Inclusions during Ladle Refining: Part 2. Condition to Control the Inclusion Composition", *ISIJ International*, Vol. 53 (2013), No. 12, pp. 2118–2125.