

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Ivana M. Jovanović

**MODEL INTELIGENTNOG SISTEMA
ADAPTIVNOG UPRAVLJANJA
PROCESOM PRERADE RUDE**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Ivana M. Jovanović

**MODEL OF INTELLIGENT ADAPTIVE
CONTROL SYSTEM FOR ORE
TREATMENT PROCESS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor: dr Igor Miljanović, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

1. dr Ivan Obradović, redovni profesor
naučna oblast: Matematika i informatika
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

2. dr Igor Miljanović, vanredni profesor
naučna oblast: Računarstvo i sistemsko inženjerstvo
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

3. dr Ljubiša Andrić, naučni savetnik
naučna oblast: Priprema mineralnih sirovina
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd

Datum odbrane: _____

MODEL INTELIGENTNOG SISTEMA ADAPTIVNOG UPRAVLJANJA PROCESOM PRERADE RUDE

Rezime

U oblasti procesa prerade rude, flotacijska koncentracija predstavlja jednu od najznačajnijih i najčešće primenjivanih metoda separacije korisnih od nekorisnih minerala. Samim tim, veoma je važno osigurati uspešan rad flotacijskog postrojenja kroz dostizanje zadovoljavajućih tehno-ekonomskih pokazatelja. Cilj upravljanja procesom flotacijske koncentracije je upravo optimizacija kvaliteta i iskorišćenja korisne komponente u koncentratu uz maksimizaciju profita. Shodno tome, istraživanja na polju modelovanja i upravljanja ovim procesom zauzimaju značajno mesto u praksi kontrolnog inženjeringa.

Teorijska istraživanja u okviru doktorske disertacije obuhvatila su analizu položaja i uloge različitih pristupa modelovanja i upravljanja flotacijskim sistemima.

Jedan od takvih pristupa jeste modelovanje klasičnim matematičkim metodama koje uključuje empirijske, kinetičke, populaciono-bilansne i modele zasnovane na verovatnoći. Međutim, uzimajući u obzir složenost procesa flotacije čiji je uzrok interakcija mnogih mikroprocessa koji se odvijaju na granici tri faze (čvrsta, tečna i gasovita), primena klasičnih matematičkih jednačina za sada nije pokazala dovoljnu efikasnost.

Kao perspektivna alternativa klasičnom pristupu modelovanja, u novije vreme su sve više prisutne i metode soft kompjutinga. Ove metode, za razliku od klasičnih matematičkih metoda, ispoljavaju izvesnu toleranciju na nepreciznosti i neodređenosti tehnoloških parametara pri opisu realnih sistema, te stoga nude prilagodljivija i robusnija rešenja za probleme modelovanja stohastičkih procesa kakav je flotacijski. Sa aspekta tehnologije procesa, najčešće korišćene tehnike soft kompjutinga su veštačke neuronske mreže, fazi logika i metoda potpunih vektora, dok se genetski algoritmi uglavnom primenjuju za određivanje optimalne konfiguracije flotacijskih postrojenja. Ipak treba naglasiti da iako postoje neke klase problema iz oblasti modelovanja procesa flotacijske koncentracije koje su uspešno rešene primenom metoda soft kompjutinga, mnoga pitanja na ovom polju još uvek ostaju otvorena.

Kada je reč o tehnikama upravljanja flotacijskim procesom u mehaničkim flotacijskim ćelijama, zaključak je da tradicionalni PID kontroleri nisu pogodni za sveobuhvatno upravljanje dinamičkim flotacijskim sistemima, osim pri nižim nivoima kontrolne hijerarhije. U oblasti naprednog upravljanja, prediktivne tehnike zasnovane na modelu mogu poboljšati performanse flotacijskog procesa, ali po pravilu u kratkom vremenskom periodu. Konačno, inteligentne

tehnike i ekspertski sistemi imaju dobar potencijal u upravljanju flotacijskim postrojenjima jer povećavaju opštu fleksibilnost kontrole procesa.

Eksperimentalna ispitivanja u okviru doktorske disertacije obuhvatila su razvoj i validaciju deset različitih modela procesa flotacijske koncentracije, baziranih na sledećim metodama soft kompjutinga: fazi logika (Mamdani i Takagi-Sugeno sistem zaključivanja), veštačke neuronske mreže i hibridni adaptivni neuro-fazi sistem zaključivanja. Kao nezavisno promenljive veličine usvojene su: sadržaj bakra u ulaznoj rudi, potrošnja kolektora na osnovnom flotiranju, potrošnja penušača, pH vrednost pulpe na osnovnom flotiranju i potrošnja kolektora na dopunskom flotiranju. Nasuprot tome, u svojstvu zavisno promenljivih veličina razmatrani su sadržaj i iskorišćenje bakra u koncentratu kao i sadržaj bakra u jalovini. Ostali tehničko-tehnološki parametri, relevantni za proces flotacijske koncentracije smatrani su konstantnim. Za testiranje adekvatnosti formiranih modela korišćeni su realni procesni podaci, prikupljeni višegodišnjim praćenjem rada industrijskog flotacijskog postrojenja u Velikom Krivelju.

Na osnovu dobijenih rezultata utvrđeno je da modeli bazirani na metodama soft kompjutinga dobro oslikavaju ponašanje flotacijskog sistema. Takođe je ustanovljeno da su nešto bolji rezultati modelovanja postignuti primenom veštačkih neuronskih mreža nego primenom fazi logike i hibridnog sistema ANFIS. Pored toga, međusobnom komparacijom performansi modela zasnovanih na Mamdani i Takagi-Sugeno fazi sistemima zaključivanja, uočeno je da Takagi-Sugeno sistem daje neznatno povoljnije ishode kada je u pitanju modelovanje procesa flotacije.

Ključne reči: flotacijska koncentracija, modelovanje, upravljanje, inteligentni sistem, soft kompjuting, fazi logika, veštačke neuronske mreže

Naučna oblast: RUDARSKO INŽENJERSTVO

Uža naučna oblast: RAČUNARSTVO I SISTEMSKO INŽENJERSTVO

UDK: 004.81-1:005.1/.3/.5/.7:311
519.237/.245
621.31:622:681.3
658.5:659.2(043.3)

MODEL OF INTELLIGENT ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR ORE TREATMENT PROCESS

Abstract

In the ore processing area, froth flotation is one of the most significant and most frequently used methods for separating useful minerals from gangue. Therefore, it is important to ensure the successful flotation plant operation through satisfactory techno-economic indicators. The purpose of the flotation process control is precisely the optimization of the concentrate grade and recovery, while maximizing profits. Consequently, research into the modelling and control of this process have always been an important area in control engineering practice.

Theoretical research within the dissertation included an analysis of the position and role of different approaches of flotation systems modelling and control.

One of the approaches is modelling by classical mathematical methods that includes empirical, probabilistic, kinetic, and population-balance based models. However, taking into consideration the complexity of the flotation process, caused by the interaction of many micro processes on the boundary of three phases (solid, liquid and gaseous), classical mathematical equations have not been effective enough so far.

Recently, soft computing methods emerged as a perspective alternative to the classical modelling approach. These methods, unlike the conventional mathematical methods, exhibit a certain tolerance to imprecision and uncertainty of technological parameters in the description of real systems. Therefore, they offer more flexible and more robust solutions to the problems of modelling of stochastic processes such as froth flotation. From the standpoint of process technology, the most commonly used soft computing techniques are artificial neural networks, fuzzy logic and support vector machines, while genetic algorithms are mainly applied to optimize the flotation circuit configuration. However, it should be noted that although several classes of flotation problems are being successfully modelled with soft computing methods, there still remain a number of unresolved issues and obstacles.

When it comes to control techniques for flotation plants with mechanical cells, the conclusion is that the traditional PID controllers are found not suitable for the comprehensive control of dynamic flotation systems, except, in part, for the lower hierarchy levels. In the area of advanced control, model predictive methods can improve flotation process performances, but as a rule, in a short period of time. Finally, intelligent methods and expert systems have a good potential in flotation control, increasing its overall flexibility.

Experimental studies in this doctoral dissertation covered the development and validation of ten different flotation process models based on the following soft computing methods: fuzzy logic (Mamdani and Takagi-Sugeno fuzzy inference system), artificial neural networks and hybrid adaptive neuro-fuzzy inference system. Copper content in the feed, pulp pH value and collector dosage in the rougher flotation circuit, frother consumption, and collector dosage in the scavenger flotation circuit were selected as input variables. Opposed to that, concentrate grade and recovery as well as tailings grade were adopted as output variables. Other technical and technological parameters, relevant to the froth flotation process were considered constant. The testing of the adequacy of models is performed on the basis of real process data. These data were collected by multiannual monitoring of operation of „Veliki Krivelj” industrial flotation plant.

On the basis of the obtained results, it was found that soft computing-based models well describe the behavior of the flotation system. It was also noticed that better results were achieved through the application of artificial neural networks then by using of fuzzy logic or hybrid adaptive neuro-fuzzy inference system. Furthermore, comparison between characteristics of models based on Mamdani and Takagi-Sugeno fuzzy inference systems was performed. The Takagi-Sugeno system was proven to deliver slightly better results when it comes to modelling of the flotation process.

Keywords: flotation concentration, modelling, control, intelligent system, soft computing, fuzzy logic, artificial neural networks

Scientific area: MINING ENGINEERING

Narrow scientific area: COMPUTING AND SYSTEM ENGINEERING

UDC: 004.81-1:005.1/.3/.5/.7:311
519.237/.245
621.31:622:681.3
658.5:659.2(043.3)

ZAHVALNOST

Ova doktorska disertacija je rezultat petogodišnjeg rada na polju primene metoda soft kompjutinga u cilju razvoja modela i upravljačkih sistema procesa flotacijske koncentracije. Stoga koristim priliku da zahvalim posebnim osobama koje su dale svoj doprinos tokom njene izrade.

Pre svega, veliku zahvalnost dugujem svom mentoru, prof. dr Igoru Miljanoviću, kao i članovima komisije, prof. dr Ivanu Obradoviću i dr Ljubiši Andriću, na ekspertizi, moralnoj i intelektualnoj podršci i svim korisnim sugestijama.

Takođe sam veoma zahvalna dragim kolegama iz kompanije RTB Bor koji su mi svaki put nesebično izašli u susret i pružili uvid u obilje informacija o flotacijskom postrojenju „Veliki Krivelj“.

Deo moje zahvalnosti pripada kolegi dr Vladanu Miloševiću iz Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, uz čiju je pomoć započet rad na ovoj doktorskoj disertaciji.

Svakako, ogromnu zahvalnost dugujem svojoj porodici – suprugu Tomislavu, roditeljima Milki, Miliji i Blagici, sestri Dragici, sestricima Ani i Ognjenu, zetu Nenadu, kao i izuzetnoj prijateljici Sanji, koji su me sa mnogo ljubavi bodrili u najtežim trenucima i pomogli da istrajem na ovom, nimalo jednostavnom, putu do uspeha.

Ivana Jovanović

Pregled skraćenica

AI	–	veštačka inteligencija (engl. Artificial Intelligence)
AIS	–	veštački imuni sistem (eng. Artificial Immune System)
ANFIS	–	adaptivni neuro-fazi sistem zaključivanja (engl. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)
ANN	–	veštačka neuronska mreža (engl. Artificial Neural Network)
BPL	–	procentualno učešće trikalcijum fosfata u fosfatnim stenama (engl. Bone Phosphate of Lime)
BPNN	–	neuronska mreža koja uči na bazi povratnog rasprostiranja greške (engl. Backpropagation Neural Network)
CSA	–	algoritam kukavičje pretrage (engl. Cuckoo Search Algorithm)
DE	–	algoritam diferencijalne evolucije (engl. Differential evolution)
DMC	–	upravljanje na bazi dinamičke matrice (engl. Dynamic Matrix Control)
EHAC	–	adaptivno upravljanje na bazi proširenja horizonta (engl. Extended Horizon Adaptive Control)
ELM	–	tip neuronske mreže koncipiran na metodi ekstremnog učenja (engl. Extreme Learning Machine)
EPSAC	–	prošireno samopodešavajuće prediktivno upravljanje (engl. Extended Prediction Self-Adaptive Control)
ESN	–	rekurentna neuronska mreža sa eho stanjem (engl. Echo State Network)
FGV	–	funkcija gustine verovatnoće
GA	–	genetski algoritam (engl. Genetic Algorithm)
GANN	–	hibridni neuro-genetski algoritam (engl. Genetic Algorithm Neural Network)
GLCM	–	matrica združenog pojavljivanja nivoa sivog (engl. Gray Level Co-occurrence Matrix)
GPC	–	generalizovano prediktivno upravljanje (engl. Generalized Predictive Control)
GSA	–	gravitacioni pretraživački algoritam (engl. Gravitational Search Algorithm)
GSO	–	algoritam svitaca (engl. Glowworm Swarm Optimization)
KAX	–	kalijum amil ksantat
KEX	–	kalijum etil ksantat
LDA	–	linearna diskriminantna analiza (engl. Linear Discriminant Analysis)
LS-SVM	–	metoda potpornih vektora koja koristi tehniku najmanjih kvadrata (engl. Least Squares Support Vector Machines)
LVQ	–	Kvantizacija vektora učenja (engl. Learning Vector Quantization)
MARS	–	multivarijantni adaptivni regresioni splajnovi (engl. Multivariate Adaptive Regression Splines)
MIMO	–	višestruki ulazi/izlazi (engl. multiple inputs/multiple outputs)
MLP	–	višeslojni perceptron (engl. Multilayer Perceptron)
MPC	–	modelsko prediktivno upravljanje (engl. Model Predictive Control)
MPHC	–	modelsko prediktivno heurističko upravljanje (engl. Model Predictive Heuristic Control)

NGLDM	–	matrica zavisnosti nivoa sivog susednih piksela (engl. Neighboring Gray Level Dependence Matrix)
NSGA-II	–	nedominantni sortirajući genetski algoritam (engl. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)
PFC	–	prediktivno funkcionalno upravljanje (engl. Predictive Functional Control)
PGM	–	platinska grupa metala
PI	–	proporcionalno-integralni (odnosi se na regulatore procesa)
PID	–	proporcionalno-integralno-derivativni (odnosi se na regulatore procesa)
PLC	–	programabilni logički kontroler (engl. Programmable Logic Controller)
PSO	–	algoritam roja čestica (engl. Particle Swarm Optimization)
QDMC	–	upravljanje na bazi kvadratne dinamičke matrice (eng. Quadratic Dynamic Matrix Control)
QSAR	–	kvantitativni odnos strukture i aktivnosti (engl. Quantitative structure–activity relationship)
RBFNN	–	neuronska mreža sa radijalnim baznim funkcijama (engl. Radial Basis Function Neural Network)
RMSE	–	koren srednje kvadratne greške (engl. root-mean-square error)
RNN	–	rekurentna neuronska mreža (engl. Recurrent Neural Network)
RVM	–	metoda relevantnih vektora (engl. Relevance Vector Machine)
SISO	–	pojedinačni ulaz/izlaz (engl. single input/single output)
SOM	–	Samoorganizujuća mapa (engl. Self-organizing Map)
SVM	–	Metoda potpornih vektora (engl. Support Vector Machine)
SVR	–	Regresiona metoda potpornih vektora (engl. Support Vector Regression)

Sadržaj

1.0 UVOD	1
1.1 PREDMET ISTRAŽIVANJA	1
1.2 NAUČNI CILJEVI ISTRAŽIVANJA	2
1.3 OSNOVNE POLAZNE POSTAVKE U ISTRAŽIVANJIMA	3
1.4 PROGRAM ISTRAŽIVANJA	4
1.5 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	4
2.0 OSNOVNI KONCEPT FLOTACIJSKE KONCENTRACIJE	5
3.0 MODELOVANJE FLOTACIJSKIH PROCESA	9
3.1 ZNAČAJ MODELOVANJA FLOTACIJSKIH PROCESA	10
3.2 KLASIFIKACIJA FLOTACIJSKIH MODELA	11
3.3 FLOTACIJSKE PROMENLJIVE	12
4.0 MODELI ZASNOVANI NA KLASIČNIM METODAMA	15
4.1 EMPIRIJSKI MODELI	15
4.2 PROBABILISTIČKI MODELI	16
4.3 KINETIČKI MODELI	19
4.4 POPULACIONO-BILANSNI MODELI	22
4.5 KRATAK OSVRT NA MODELE ZASNOVANE NA KLASIČNIM MATEMATIČKIM JEDNAČINAMA	25
5.0 MODELI ZASNOVANI NA PRAVILIMA SOFT KOMPJUTINGA	26
5.1 VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE	26
5.1.1 Primena veštačkih neuronskih mreža u modelovanju flotacijskih procesa	29
5.1.2 Primena veštačkih neuronskih mreža u sistemima kompjuterske vizuelizacije	36
5.1.3 Primena veštačkih neuronskih mreža pri modelovanju nekonvencionalnih procesa flotacije ..	39
5.2 FAZI LOGIKA	40
5.2.1 Primena fazi logike u modelovanju flotacijskih procesa	47
5.3 GENETSKI ALGORITMI	54
5.3.1 Primena genetskih algoritama u modelovanju flotacijskih procesa	56
5.4 METODA POTPORNIH VEKTORA	62
5.4.1 Primena metode potpornih vektora u modelovanju procesa flotacijske koncentracije	64
5.5 STABLA ODLUČIVANJA	67
5.5.1 Primena stabala odlučivanja u modelovanju flotacijskih procesa	69
5.6 DRUGE METODE SOFT KOMPJUTINGA U MODELOVANJU FLOTACIJSKIH PROCESA	72
5.7 HIBRIDNI PRISTUP	73
5.8 FINALNA RAZMATRANJA O MODELOVANJU METODAMA SOFT KOMPJUTINGA	83

5.8.1	Analiza prikazanih rezultata svetskih istraživanja	83
5.8.2	Neki aspekti primene metoda soft kompjutinga u modelovanju flotacijskih procesa	85
6.0	TEHNIKE UPRAVLJANJA FLOTACIJSKIM POSTROJENJIMA SA MEHANIČKIM FLOTACIJSKIM ĆELIJAMA	89
6.1	<i>STRATIFIKACIJA UPRAVLJAČKIH NIVOVA I CILJEVI UPRAVLJANJA</i>	90
6.1.1	Hijerarhija upravljačkih (kontrolnih) nivoa	91
6.1.2	Izbor kontrolne strategije	94
6.2	<i>KRATAK PREGLED METODA KLASIČNOG UPRAVLJANJA</i>	96
6.3	<i>MODELSKO PREDIKTIVNO UPRAVLJANJE</i>	98
6.3.1	Koncept, struktura i algoritmi	98
6.3.2	Modelsko prediktivno upravljanje u flotacijskom sistemu	100
6.3.3	Neke od predloženih MPC strategija	101
6.3.4	Modelsko prediktivno upravljanje kao sredstvo za optimizaciju procesa i maksimizaciju profita	105
6.3.5	Nešto drugačiji pristup modelskom prediktivnom upravljanju u flotacijskim sistemima	108
6.3.6	Komercijalna primena prediktivnog upravljanja zasnovanog na modelu	108
6.4	<i>INTELIGENTNO UPRAVLJANJE</i>	111
6.4.1	Potreba za sofisticiranijim kontrolnim metodama	111
6.4.2	Ekspertski sistemi u okviru inteligentnog upravljanja	112
6.4.3	Sistemi kompjuterske vizuelizacije	114
6.4.3.1	<i>Kratak opis svojstava ekstrahovanih iz slika pene</i>	116
6.4.3.2	<i>Neke od predloženih strategija računarske vizuelizacije</i>	117
6.4.3.3	<i>Komercijalna primena računarske vizuelizacije</i>	121
6.4.4	Kontrolne metode izvan pravila klasične logike	124
6.5	<i>FINALNA RAZMATRANJA O TEHNIKAMA UPRAVLJANJA FLOTACIJSKIM SISTEMOM</i>	134
7.0	POSTAVKA MODELA INTELIGENTNOG SISTEMA	139
7.1	<i>UVODNE NAPOMENE</i>	139
7.2	<i>OPIS TEHNOLOŠKE ŠEME PROCESA</i>	140
7.2.1	Drobljenje i prosejavanje	141
7.2.2	Mlevenje i klasiranje	143
7.2.3	Osnovno flotiranje minerala bakra	145
7.2.4	Domeljavanje osnovnog koncentrata, prečišćavanje i dopunsko flotiranje	145
7.2.5	Odvodnjavanje koncentrata bakra	146
7.2.6	Odvodnjavanje jalovine	147
7.2.7	Kontrola i regulacija tehnoloških parametara u procesu flotacijske koncentracije	148
7.3	<i>FORMIRANJE BAZE PODATAKA</i>	151
7.4	<i>IZBOR I FAZIFIKACIJA PROMENLJIVIH</i>	153

7.4.1 Izbor ulaznih i izlaznih parametara u modelima	153
7.4.2 Fazifikacija ulaznih i izlaznih parametara u fazi logičkim modelima.....	156
7.5 FORMIRANJE BAZE PRAVILA U FAZI LOGIČKIM MODELIMA	161
7.6 POSTUPCI RAZVOJA MODELA PROCESA FLOTACIJSKE KONCENTRACIJE	163
7.6.1 Elementarni fazi logički model zasnovan na Mamdani sistemu zaključivanja (EMM).....	163
7.6.2 Elementarni fazi logički model zasnovan na Takagi-Sugeno sistemu zaključivanja (ESM) ..	165
7.6.3 Prošireni fazi logički model zasnovan na Mamdani sistemu zaključivanja (PMM)	166
7.6.4 Prošireni fazi logički model zasnovan na Takagi-Sugeno sistemu zaključivanja (PSM)	167
7.6.5 Hibridni model za predviđanje sadržaja bakra u koncentratu (ANF1)	169
7.6.6 Hibridni model za predviđanje iskorišćenja bakra u koncentratu (ANF2).....	172
7.6.7 Hibridni model za predviđanje sadržaja bakra u jalovini (ANF3)	173
7.6.8 Model na bazi neuronske mreže za predviđanje sadržaja bakra u koncentratu (VNM1)	175
7.6.9 Model na bazi neuronske mreže za predviđanje iskorišćenja bakra u koncentratu (VNM2) ..	176
7.6.10 Model na bazi neuronske mreže za predviđanje sadržaja bakra u jalovini (VNM3)	177
8.0 REZULTATI MODELOVANJA I DISKUSIJA	179
8.1 PREGLED REZULTATA I ESTIMACIJA PREDIKTIVNIH SVOJSTAVA MODELA	179
8.2 UPOREDNA ANALIZA ISHODA MODELOVANJA	192
8.3 IMPLEMENTACIJA MODELA ZASNOVANIH NA METODAMA SOFT KOMPJUTINGA U INTELIGENTNI SISTEM UPRAVLJANJA	197
9.0 ZAKLJUČAK I PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA	199
LITERATURA	202
BIOGRAFIJA AUTORA	217

1.0 UVOD

1.1 PREDMET ISTRAŽIVANJA

Operacije upravljanja procesima u rudarstvu i pripremi mineralnih sirovina su, zbog interaktivne prirode i složenosti tehnoloških sistema, često opterećene problemima kod kojih je izuzetno teško ili čak nemoguće pronaći precizno rešenje. Ipak, u većini slučajeva, nije neophodno znati potpuno precizno rešenje, već je dovoljno poznavati odgovarajući opseg uslova koji daje zadovoljavajući rezultat. U tom smislu, svrsishodna obrada raspoloživih podataka, uz prethodno stečenu ekspertizu, od suštinskog je značaja za rešavanje ove klase problema.

Imajući u vidu navedeno, upravljanje procesima ili segmentima procesa prerade rude, a u okviru toga i flotacijske koncentracije, često je bazirano na ručnoj kontroli i regulaciji procesnih parametara – prikupljanju, obradi i interpretaciji akviziranih podataka od strane operatera, akumulaciji i primeni ekspertskog znanja, preduzimanju upravljačkih akcija zasnovanih na principima analogije, iskustva, stručnih procena i sl. Ovakav način upravljanja, zasnovan na ljudskom iskustvu i drugim heurističkim pravilima, predstavlja relativno dobar pristup vođenja procesa, koji, međutim, u konačnom ishodu, iz različitih razloga (nedovoljno poznavanje procesa, greške u radu i sl.) ne daje optimalne rezultate. Posledice se mogu sagledati kroz velika odstupanja proizvodnih učinaka, utroška energije i materijalnih resursa, operativnu nestabilnost, povećane troškove proizvodnje, smanjenu bezbednost rada i sl.

Shodno tome, optimizaciju metodologije upravljanja procesima prerade ruda, pre svega flotacijske koncentracije, treba tražiti u savremenim naučnim i tehničkim pristupima, odnosno uvođenju automatskih upravljačkih sistema u onoj meri u kojoj to sam proces dozvoljava, a u najmanju ruku kao vid podrške odlučivanju operaterima u postrojenju. Da bi se to ostvarilo, neophodno je definisati i razviti pouzdan matematički model procesa (ili nekoliko povezanih modela koji opisuju segmente procesa) koji bi poslužio kao sredstvo za prevazilaženje pomenutih poteškoća u radu postrojenja.

Ipak, razvoj kvantitativnih modela predviđanja rezultata procesa flotacijske koncentracije koji bi se dalje koristio u cilju simulacije rada flotacijskih ćelija ili celog postrojenja je zahtevan i složen zadatak. Osnovni problem u razvoju ovakvih modela

predstavlja činjenica da se flotacijski proces sastoji iz niza mikro procesa čijom spregom dejstava se dobija konačan rezultat.

Upravljačke tehnike zasnovane na klasičnim algoritmima ili matematičkim formulama nisu u potpunosti pogodne za kontrolu i regulaciju ovako složenog, visoko nelinearnog i nedovoljno poznatog flotacijskog sistema, koga uz to karakterišu i značajne procesne oscilacije. Stoga se nameće potreba za uvođenjem metoda veštačke inteligencije, kao delotvornog i sada već u značajnoj meri potvrđenog pristupa u modelovanju i upravljanju flotacijskim sistemom.

Upotrebom matematičkih metoda predstavljenih inteligentnim tehnikama moguće je razvoj kvalitativno novog modela flotacijske koncentracije koji je dovoljno matematički precizan, ali istovremeno i dovoljno fleksibilan da emulira neke od karakteristika ljudskog poimanja procesnih stanja. Ovakav pristup, posledično, može dovesti do unapređenja upravljanja procesom flotacijske koncentracije, što bi konačno dovelo do maksimizacije dobiti postrojenja, prema najboljoj kombinaciji odnosa profita i ograničenja nametnutih kvalitetom i iskorišćenjem korisne komponente u koncentratu.

U skladu sa navedenim, istraživačko usmerenje u okviru ove doktorske disertacije vezano je za sagledavanje mogućnosti primene različitih metoda soft kompjutinga u modelovanju i upravljanju procesom flotacijske koncentracije, sa teorijskog i praktičnog aspekta.

1.2 NAUČNI CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Procesi pripreme mineralnih sirovina izloženi su promenljivim dejstvima različitih prirodnih, tehničko-tehnoloških, tržišno-ekonomskih i drugih uticaja, koji determinišu alternative odvijanja datih procesa. Tako na primer, promenljiv kvalitet mineralne sirovine (u pogledu procentualnog sadržaja korisnih, nekorisnih i štetnih komponenata, vrste mineralizacije, stepena oslobođenosti korisnih minerala i sl.) na ulazu u proces, utiče na racionalnost, ekonomičnost i efikasnost rada flotacijskog postrojenja, na utrošak energije i normativnih materijala, troškove proizvodnje, eksploatacioni vek opreme i mašina, mogućnost adekvatne zaštite životne sredine i sl. Imajući u vidu prirodu i međusobnu interakciju uticajnih faktora, jasno se može nazreti potreba za adaptivnim upravljanjem, koje će kroz inteligentni pristup, na odgovarajući način amortizovati poremećajne uticaje.

U tom smislu, na početku izrade ove doktorske disertacije identifikovani su sledeći naučni ciljevi: (1) celovito sagledavanje i prepoznavanje ključnih obeležja razmatranog problema modelovanja i upravljanja procesom flotacijske koncentracije (2) istraživanje mogućih pristupa za rešavanje problema razvoja inteligentnog modela za adaptivno upravljanje procesom, sa akcentom na aplikaciji metoda soft kompjutinga (3) provera primenljivosti formiranih modela pri realnim procesnim uslovima, na primeru flotacijskog postrojenja za preradu sulfidnih minerala bakra „Veliki Krivelj”, Rudarsko-topioničarskog basena Bor.

1.3 OSNOVNE POLAZNE POSTAVKE U ISTRAŽIVANJIMA

Inicijalna istraživanja koja se danas sprovode u svetskim okvirima, potvrđuju primenljivost metoda soft kompjutinga u modelovanju i upravljanju procesima flotacijske koncentracije, kao i pripreme mineralnih sirovina u celini. Različite studije na ovu temu uključuju upotrebu fazi logike, veštačkih neuronskih mreža, genetskih algoritama, metoda potpornih vektora i sl., a česta je i kombinacija ovih metoda sa tehnikama računarski podržane vizuelizacije. Spregnuti mehanizmi pomenutih softverskih alata, prema današnjim saznanjima, omogućavaju aproksimacije procesnih funkcija sa povoljnim proizvodnim ishodima. Ipak, informacije dobijene iz literaturnih izvora govore u prilog konstataciji da su istraživanja na ovom polju u početnoj fazi i da mnoga pitanja i dileme još uvek ostaju otvoreni. Shodno tome, problematika modelovanja procesa flotacijske koncentracije metodama soft kompjutinga predstavlja oblast koja je vrlo zahvalna za dalju nadgradnju, naučna i razvojna istraživanja.

Na osnovu ovakvih i sličnih saznanja, formiran je koncept istraživanja u okviru doktorske disertacije, pri čemu su ustanovljene osnovne polazne postavke: (1) značaj razvoja matematičkih modela procesa flotacijske koncentracije u savremenim uslovima upravljanja procesima prerade ruda, kod nas i u svetu; (2) nepotpuna istraženost ove klase problema, uz primenu potencijalno efikasnih alata soft kompjutinga u njihovom rešavanju; (3) velika otvorenost i afirmativnost tematskog prostora za proširenje područja daljih istraživanja.

1.4 PROGRAM ISTRAŽIVANJA

Program istraživanja doktorske disertacije obuhvatio je dva osnovna aspekta definisanja i rešavanja predmetne problematike – teorijski i praktični.

U sklopu teorijskih istraživanja predviđene su i realizovane sledeće aktivnosti: (1) identifikacija problema kroz teorijske osnove procesa flotacijske koncentracije i razmatranje uticaja različitih faktora na nivou tehnologije i matematičkog modelovanja procesa (2) sagledavanje svetskih iskustava i trendova u oblasti modelovanja i upravljanja flotacijskim sistemima, baziranih na primeni klasičnih matematičkih metoda i tehnika soft kompjutinga, uz kritički osvrt na postignute rezultate iz datog domena i davanje odgovora na fokusirane probleme.

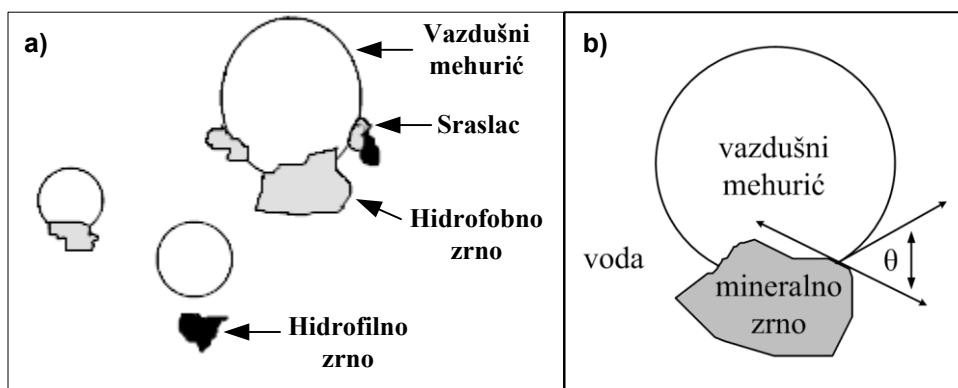
U okviru praktičnih istraživanja, ostvarene su aktivnosti koje podrazumevaju: (1) razvoj eksperimentalnih modela flotacijske koncentracije, zasnovanih na različitim metodama soft kompjutinga – fazi logici, veštačkim neuronskim mrežama, kao i hibridnom ANFIS sistemu; (2) testiranja i praktične provere postavljenih modela; (3) analizu ostvarenih rezultata i ocenu mogućnosti primene modela u realnim uslovima (4) zapažanja i predlog daljih istraživanja.

1.5 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Metodologija istraživanja je usko spregnuta sa tematikom doktorske disertacije, odnosno potrebama koje iziskuje naučni pristup, ciljevi i program istraživanja. S obzirom da su istraživanja u okviru doktorske disertacije koncipirana na teorijskom i primenjenom nivou, u prvom redu izvršeno je sistematsko prikupljanje i procena adekvatnosti literaturnih izvora, zatim sagledavanje svetskih dostignuća, iskustava, i istraživačko-razvojnih trendova kroz naučno-analitički pristup, kao i praćenje aktuelnih događanja na polju primene soft kompjutinga u modelovanju i upravljanju procesima flotacijske koncentracije. Na praktičnom nivou razvijeni su modeli za adaptivno upravljanje radom postrojenja za flotacijsku koncentraciju pomoću metoda obuhvaćenih mekim računarstvom: fazi logika, veštačke neuronske mreže i adaptivni neuro-fazi sistem. Eksperimentalna testiranja i istraživanja pouzdanosti modela izvršena su u virtuelnom ambijentu programskog paketa MATLAB, odnosno modula Fuzzy Logic Toolbox i Neural Network Toolbox, kao i programa MS Excel.

2.0 OSNOVNI KONCEPT FLOTACIJSKE KONCENTRACIJE

Flotacija predstavlja fenomen koji se primenjuje za separaciju različitih faza, kao što je, na primer, uklanjanje čvrstih čestica ili kapljica ulja iz vode. U pripremi mineralnih sirovina, flotacijska koncentracija je postupak razdvajanja korisnih od ostalih mineralnih komponenata u vodenoj sredini (uz prisustvo vazduha), zasnovan na razlikama u hidrofobnosti¹ zrna različitih minerala [Ćalić (1990)]. Minerali koji se lako kvase vodom nazivaju se hidrofilni, dok se minerali sa ograničenim afinitetom prema kvašenju vodom označavaju kao hidrofobni. Kao rezultat hidrofobnosti, u flotacijskoj ćeliji se mogu izdvojiti tri glavna podprocesa. Na početku, dešava se *kolizija* (sudaranje) između hidrofobnih mineralnih zrna i vazdušnih mehurića. Nakon kolizije, tečni film koji se nalazi između mineralnog zrna i vazdušnog mehurića se stanjuje i konačno puca, što dovodi do pojave *prianjanja*. Dodirna površina čvrsto–tečno–gasovito se pomera po površini mehurića kako bi se formirao *stabilan agregat mineralno zrno–vazdušni mehurić* (slika 1a). Agregat, lakši od vode, kreće se na gore prema površini flotacijske pene, odakle se sakuplja u kanalu za koncentrat. Hidrofilna zrna se ne vezuju za vazdušne mehuriće i ostaju u flotacijskoj ćeliji (odnosno flotacijskoj pulpi) [Karimi et al. (2014a, 2014b), Drzymala (2007)].



Slika 1. Fenomeni u flotacijskoj pulpi: (a) flotacija; (b) ugao dodira [adaptirano prema Drzymala (2007)].

Minerali mogu imati različite stepene hidrofobnosti, a mera njihove hidrofobnosti je ugao dodira. Ugao dodira (θ) se najčešće označava kao ugao koji zaklapaju tangente na površine čvrste i gasovite faze u vodenoj sredini (slika 1b). Kod

¹ Hidrofobnost je osobina materijala koja karakteriše njegovu sposobnost da bude kvašljiv vodom u prisustvu gasovite faze.

hidrofilnih minerala ugao dodira je jednak nuli, dok je kod hidrofobnih veći od nule. Veličina ugla dodira zavisi, između ostalog, od fizičke i hemijske homogenosti površina, kao i od takozvanog linijskog napona koji je analogan površinskom naponu, ali karakteriše energiju kontakta između faznih površina.

Postoje mnoge teorije koje dovode u vezu hidrofobnost (ugao dodira) sa karakteristikama multifaznog sistema [Drzymała (2007)]. Osnovu ovih teorija čini Jungova formula koja povezuje ugao dodira sa međupovršinskim energijama trofaznog sistema koji uključuje čvrstu, tečnu i gasovitu fazu:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sc} + \gamma_{cg} \cos \theta \quad (1)$$

gde je:

θ – ugao dodira

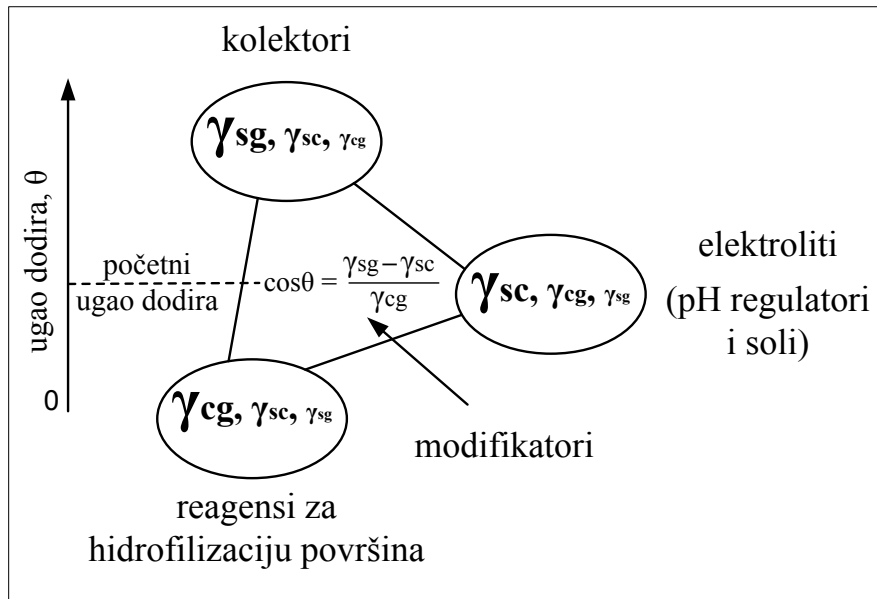
γ_{sg} , γ_{sc} , γ_{cg} – međupovršinske energije na kontaktu redom: čvrste i gasovite, čvrste i tečne, tečne i gasovite faze [mJ/m^2].

Na hidrofobnost materijala se može uticati posredstvom različitih reagenasa (kiselina, baze, soli, organska jedinjenja) koji se dodaju u pulpu. Njihovo dejstvo može se objasniti pomoću Jungove jednačine, s obzirom da oni mogu izmeniti stanje sve tri kontaktne površine. Pravilo je, međutim, da se njihov uticaj najviše manifestuje na jednoj od kontaktnih površina.

Prema podeli koju je dao Drzymała, jedinjenja koja utiču na hidrofobnost i flotabilnost različitih materijala mogu se svrstati u četiri grupe: kolektori, modifikatori (aktivatori, deprimatori, penušači), elektroliti (potencijalodređujuće supstance) i hidrofilizatori². Svaka od ovih grupa različito utiče na hidrofobnost.

Kolektori povećavaju hidrofobnost površina, kao i ugao dodira, uglavnom tako što smanjuju površinsku energiju na kontaktu faza čvrsto–gasovito (tj. γ_{sg}). Hidrofilizatori (surfaktanti) smanjuju hidrofobnost čestica na taj način što snižavaju površinski napon tečnosti, dok elektroliti mogu povećati ili smanjiti ugao dodira uglavnom tako što utiču na kontaktnu površinu čvrsto–tečno. Dejstvo modifikatora (aktivatora, deprimatora, penušača) na osobine kontaktnih površina još uvek nije dovoljno ispitano. Šematski prikaz dejstva reagenasa dat je na slici 2.

²Hidrofilizatori, praktično, predstavljaju posebnu vrstu deprimatora



Slika 2. Proces flotacije uslovljen dejstvom reagenasa na kontaktne površine između faza. Kolektori ispoljavaju jako dejstvo na kontaktnoj površini čvrsto-gasovito, surfaktanti na kontaktnoj površini tečno-gasovito, a elektroliti (regulatori pH i soli) na kontaktnoj površini čvrsto-tečno. Stepen izmene odgovara veličini simbola [Drzymala (2007)].

Uspešnost procesa flotacije zavisi u prvom redu od uslova da je ugao dodira veći od nule, koji mora biti ispunjen.

Neophodnost ispunjenosti ovog uslova može se dokazati termodinamičkom analizom procesa. Flotacija se može posmatrati kao proces analogan hemijskoj reakciji koja se odvija između mineralnog zrna i vazdušnog mehurića u vodenoj sredini. Pri tome dolazi do promene slobodne entalpije procesa (ΔG [mJ/m²]) koja se može izračunati uzimajući u obzir da se pri dodiru jedinične površine zrna i jedinične površine mehurića formira jedinična kontaktna površina između ove dve faze:

$$\Delta G_{flotacije} = \Delta G_{proizvoda} - \Delta G_{reaktanata} = \gamma_{sg} - (\gamma_{sc} + \gamma_{cg}) \quad (2)$$

Uvođenjem Jungove relacije (1) u jednačinu (2) dobija se:

$$\Delta G_{flotacije} = \gamma_{cg}(\cos \theta - 1) \quad (3)$$

Na osnovu jednačine 3 vidi se da će ugao dodira biti veći od nule ako je $\Delta G_{flotacije}$ negativno. Ovo je u skladu sa drugim principom termodinamike prema kome se reakcija (u ovom slučaju flotacija) može odigrati kada je ΔG procesa negativno [Drzymala (2007)].

Na ugao dodira ne utiču samo parametri koje opisuje Jungova jednačina (tj. međupovršinske energije na kontaktu faza), već i veličina vazdušnih mehurića, kao i veličina i gustina mineralnih zrna. Stoga, u nekim slučajevima neće doći do formiranja ugla dodira, usled prevelike težine mineralnih zrna koja se odvajaju od vazdušnih mehurića. Flotacija će takođe izostati ako su mineralna zrna previše lagana (usled nedostatka uspešnih sudara sa mehurićima). Iz tog razloga, svaki postupak flotacijske koncentracije ima sopstvene granice u pogledu gornje i donje granične krupnoće mineralne sirovine [Ralston (1992)].

Osim navedenog, na efikasnost procesa flotacijske koncentracije utiče i čitav niz drugih faktora, o čemu će biti više reči u narednim poglavljima.

U industrijskim uslovima, uobičajeno je da se proces flotacijske koncentracije odvija u nekoliko stadijuma [Ćalić (1990)]:

- Prvi stadijum podrazumeva formiranje flotacijske pulpe i odigrava se u procesu mlevenja i klasiranja, a odnosi se na podešavanje krupnoće mineralne sirovine kao i odnosa čvrste i tečne faze u pulpi.
- Drugi stadijum je kondicioniranje pulpe, odnosno podešavanje uslova za selektivno flotiranje jedne mineralne vrste.
- Treći stadijum, tj. kolektiranje predstavlja selektivno osposobljavanje određenog minerala da prione uz vazdušni mehurić, što se postiže dejstvom kolektora.
- Četvrti stadijum ili aeracija označava uvođenje mehurića u flotacijsku pulpu i stvaranje kompleksa vazdušni mehurići-hidrofobna mineralna zrna.
- Peti stadijum je levitacija, odnosno izdizanje kompleksa vazdušni mehurići– mineralna zrna na graničnu površinu flotacijska pulpa–atmosfera. Na površini pulpe obrazuje se mineralizovana pena koja se izdvaja u vidu osnovnog koncentrata. Flotacijska pulpa, koja ostaje u flotacijskoj mašini, u zavisnosti od primenjene šeme procesa može biti ulazna pulpa u sledećoj fazi procesa (na primer u fazi kontrolnog flotiranja, gde se izdvojeni kontrolni koncentrat vraća u fazu osnovnog flotiranja) ili može predstavljati definitivni otok flotiranja. Otok flotiranja je definitivna jalovina ili ulaz u novi ciklus flotiranja nekog drugog minerala.

- Šesti stadijum, prečišćavanje, je postupak ponovnog tretiranja osnovnog koncentrata u cilju dobijanja koncentrata uslovnog kvaliteta i međuproizvoda koji se obično vraća u proces osnovnog flotiranja. Definitivni koncentrat uslovnog kvaliteta retko se postiže jednostepenim prečišćavanjem, zbog čega je, gotovo redovno potrebno primeniti šemu sa višestepenim prečišćavanjem.

3.0 MODELOVANJE FLOTACIJSKIH PROCESA

Model (od lat. *modulus* – mala mera) u užem smislu predstavlja opis nekog sistema, procesa, ili fenomena, koji uzima u obzir poznata (kao i pretpostavljena) svojstva, a može se koristiti u svrhu proučavanja obeležja predmetnog sistema, procesa ili fenomena. Modelovanje, odnosno formiranje matematičkog modela, je postupak tokom koga se svojstva sistema, procesa ili fenomena transformišu u oblik koji je moguće predstaviti matematičkim formulacijama.

Modelovanje se može smatrati postupkom u okviru koga se objekti koje nazivamo promenljive ili parametri dovode u vezu sa drugim objektima putem veznika ili *operatora*, pri čemu promenljive u modelu preslikavaju neka od svojstava procesa. U zavisnosti od vrste operatora, definišu se dva tipa modela: *matematički modeli* u okviru kojih se koriste klasične algebarske operacije i *logički modeli* u okviru kojih se koriste logički operatori [Miljanović (2008b)].

Modelovanje flotacijskih procesa nije jednostavan zadatak. Naime, iako su osnovni principi procesa flotacije dobro poznati, prema rezultatima istraživanja velikog broja istraživača, veoma je teško formirati kvantitativni prediktivni model koji bi se uspešno koristio za simulaciju rada flotacijskog postrojenja u industrijskim uslovima. Razlog ovih poteškoća leži u složenosti mnogih mikroprocesa i njihovih međusobnih kombinacija koji utiču na krajnji ishod separacije mineralnih zrna prema razlici u svojstvima njihovih površina [King (2001)].

Od tridesetih godina prošlog veka pa do danas predstavljeno je mnoštvo različitih matematičkih modela koji sa manjom ili većom adekvatnošću opisuju proces flotacije.

Istorijski gledano, najpre je došlo do razvoja klasičnih flotacijskih modela [Garcia Zuñiga (1935), Schumann (1942), Kelsall (1961), Woodburn (1970), Harris

(1978), Lynch et al. (1981), Zhang (1989), Yianatos (1989), Schulze (1993), Polat and Chander (2000), King (2001), Sherrell (2004), Ali (2007), Yianatos (2007), Saleh (2010), Xian-ping et al. (2011), itd.]. Sa razvojem i primenom računarske tehnike u modelovanju flotacijskih procesa, paralelno sa klasičnim modelima, počinju da se razvijaju i modeli bazirani na metodama soft kompjutinga [Moolman et al. (1995d), Çilek (2002), Vieira et al. (2005a), Marais and Aldrich (2011a), Nakhaei et al. (2012), Nakhaei et al. (2013b), itd.].

3.1 ZNAČAJ MODELOVANJA FLOTACIJSKIH PROCESA

Dosadašnji pristup matematičkom modelovanju procesa flotacijske koncentracije razlikovao se u zavisnosti od naučnog gledišta eksperta, očekivane primene modela i dostupnih investicija u pogledu ljudskih resursa i vremena. Publikovani modeli variraju od tipova koji se zasnivaju na osnovnim matematičkim jednačinama do empirijskih tipova. Njihova potencijalna upotreba ne odnosi se samo na simulaciju procesa, već i na procesnu analizu.

Na primer, modeli se mogu koristiti za analizu podataka koju, sa aspekta kompleksnosti tehnološkog procesa ne bi bilo jednostavno ostvariti, kao što je definisanje iskorišćenja željenog metala po klasama krupnoće u finalnim i intermedijarnim proizvodima i prevencija iskorišćenja neželjenog metala u sitnim klasama koncentrata. Osim toga, modeli mogu biti sredstvo u poboljšanju razumevanja procesa flotacije pre puštanja automatskog kontrolnog sistema u rad [Lynch et al. (1981)].

Wills i Napier-Munn takođe tvrde da se često tokom razvoja modela dolazi do novih saznanja o samom procesu, što vodi ka poboljšanju tehnika upravljanja flotacijskim sistemom. Pri tom, oni ističu da mnogi od matematičkih modela koji su razvijeni teorijski, ili „offline” imaju ograničenu primenu u automatskoj kontroli procesa, dok su najuspešniji modeli razvijeni „online”, empirijskim pristupom [Wills and Napier-Munn (2006)].

Slično tome, Ali navodi da je matematičko modelovanje naučni put za poboljšanje efikasnosti flotacijskog procesa i da se jednom uspešno konstruisan matematički model može koristiti u budućnosti za poboljšanje tog procesa čak i ako dođe do određenih

promena u procesu. On daje niz prednosti koje se mogu ostvariti matematičkim modelovanjem, optimizacijom i simulacijom procesa flotacije, kao što su:

- Mogućnost smanjenja troškova proizvodnje.
- Redukovanje troškova koji su vezani za istraživanje i razvoj procesa i ušteda na vremenu.
- Bolje razumevanje problema.
- Pružanje podrške odlučivanju zaposlenima u postrojenju.
- Unapređenje upravljanja znanjem.
- Mogućnost rešavanja kompleksnih problema.
- Intenzivniji transfer tehnologija.
- Povećanje bezbednosti rada postrojenja.
- Brže dovodenje novih proizvoda na tržište.
- Smanjenje otpada u razvoju procesa.
- Poboljšanje kvaliteta proizvoda.
- Smanjenje potrebe za potencijalno štetnim eksperimentima [Ali (2007)].

3.2 KLASIFIKACIJA FLOTACIJSKIH MODELA

Polat i Chander ističu da se za opis procesa flotiranja često koriste modeli na mikro i makro nivou. Kod modela na mikro nivou identifikuju se podproces i u flotacijskom sistemu, uzimajući u obzir hemijske i fizičke veze, i koriste za utvrđivanje uzroka i posledica interakcije sistemskih promenljivih. Ovi modeli su po pravilu veoma kompleksni. U modelovanju na makro nivou sveukupni odziv flotacijskog sistema dovodi se u vezu sa različitim operativnim parametrima preko sistema matematičkih jednačina ili pravila i izraza soft kompjutinga [Polat and Chander (2000), Rojas and Cipriano (2011)].

Flotacijski modeli se generalno mogu podeliti u dve kategorije: *empirijski* i *fenomenološki modeli* [Polat and Chander (2000), Casali et al. (2002), Rojas and Cipriano (2011)]. Fenomenološki modeli se dalje mogu klasifikovati kao *probabilistički*, *kinetički* i *populaciono-bilansni* [Polat and Chander (2000)].

Ipak, treba istaći da navedena klasifikacija flotacijskih modela nije striktna, jer postavljanje jasnih granica prilikom klasifikacije često nije moguće. Na primer, populaciono-bilansni modeli se mogu posmatrati kao poseban vid kinetičkih modela.

Dalje, zahvaljujući složenosti samog procesa flotacije, odnosno velikom broju uticajnih promenljivih, često je neophodno kombinovati različite pristupe u modelovanju procesa. Tako, na primer, nije retkost da se kinetički i probabilistički modeli međusobno prepliću i dopunjuju uz upotrebu empirijskih izraza ili konstanti, kako bi se postigla što veća adekvatnost modela.

Pored ove osnovne podele, Hodouin navodi da se modeli razlikuju i prema tome da li su [Hodouin (2011)]:

- Statički (projektovanje konfiguracije postrojenja) ili dinamički (razvoj kontrolnih strategija)
- Deterministički (ne sadrže slučajne promenljive) ili stohastički (sadrže bar jednu slučajnu promenljivu)
- Kauzalni (ulazno-izlazni model) ili nekauzalni (skup relacija koje povezuju procesne promenljive, kao na primer ograničenja u pogledu očuvanja mase)
- Linearni ili nelinearni
- Zasnovani na klasičnim matematičkim jednačinama ili fazi pravilima.

Usled postojanja velikog broja poremećajnih promenljivih, nije moguće formirati model samo na osnovu teorijske analize, a čak i kada bi se to postiglo, model bi mogao postati toliko složen da bi bio krajnje nepraktičan. Stoga do danas nije razvijen čisto teorijski model flotacije [Zhang (1989)].

Izbor vrste modela zavisiće od konkretnih procesnih uslova i željenih performansi flotacijskog procesa. Međutim, treba naglasiti da modeli složenih procesa kao što je flotacijska koncentracija nikada ne mogu u potpunosti preslikavati stvarni proces. Stoga je potrebno identifikovati slabosti svakog modela i u zavisnosti od očekivane primene zanemariti tačno one tehnološke aspekte procesa koji imaju minimalan uticaj na adekvatnost modela.

3.3 FLOTACIJSKE PROMENLJIVE

Pored osnovnih flotacijskih podprocesa o kojima je bilo reči u poglavlju 2.0 drugi, simultani prateći procesi se takođe odvijaju u trofaznom flotacijskom sistemu. Neki od njih su: prelazak jalovine u fazu pene, koalescencija vazдушnih mehurića, odvajanje korisnih minerala od vazдушnih mehurića kada pređu u fazu pene, itd., što

ukazuje na veoma kompleksnu prirodu flotacijske koncentracije u realnim uslovima [Shean and Cilliers (2011), Čalić (1990), Drzymala (2007)].

Prema literaturnim podacima, procenjuje se da postoji oko 100 promenljivih veličina koje (u različitom obimu) utiču na proces flotacije [Laurila et al. (2002), Harris et al. (2002)].

Pored toga, uzajamna interakcija promenljivih dalje usložnjava situaciju u pogledu mogućnosti modelovanja i upravljanja procesom. Na primer, povećanje protoka vazduha u flotacijskoj ćeliji može kao rezultat dati veće mehuriće, što dalje utiče na brzinu podizanja mehurića, stepen prijanjanja mineralnih zrna, visinu pene i slično [Čalić (1990), Milošević (1994), Shean and Cilliers (2011)]. Dalje, posmatrano u industrijskim uslovima, izmena bilo koje promenljive u nekom od stadijuma flotacijske koncentracije uticaće na promenu sastava i protoka pulpe kako u kasnijim, tako i u prethodnim (ukoliko postoji povratni tok materijala) stadijumima flotiranja. Lynch navodi primer da u procesu koncentracije sulfidnih ruda olova i cinka, povećanje nivoa pulpe u ćelijama kontrolnog flotiranja rezultuje povećanjem iskorišćenja vode, korisne i nekorisne komponente u kontrolnom koncentratu. Ova povećana količina materijala iz koncentrata kontrolnog flotiranja utiče na povećanje protoka pulpe u osnovnom flotiranju, čime se skraćuje vreme zadržavanja materijala u osnovnom flotiranju. Promene koje se dešavaju u prečišćavanju, kao i konačni rezultat rada postrojenja ogledaće se u većem iskorišćenju korisne komponente, ali nižem kvalitetu koncentrata [Lynch et al. (1981)]. Takođe treba napomenuti da međusobna interakcija prilikom izmene više od jedne promenljive u toku kratkog vremenskog perioda može da ima poremećajno dejstvo na rad flotacijskog postrojenja u dužem vremenskom periodu.

Prema podeli koju je dao Wright, flotacijske promenljive se mogu grupisati u tri kategorije [Wright (1999)]:

- Karakteristike ulazne sirovine (kapacitet, mineralni sastav, stepen oslobođenosti, granulometrijski sastav, gustina pulpe, itd.)
- Fizičko-hemijski faktori (kvalitet vode, temperatura, tip i koncentracija reagensa, interakcija između reagenasa i mineralnih zrna, itd.)
- Hidrodinamički faktori (konfiguracija flotacijskog postrojenja, tip flotacijske ćelije, stepen aeracije, prostorni raspored mehurića i mineralnih zrna, itd.)

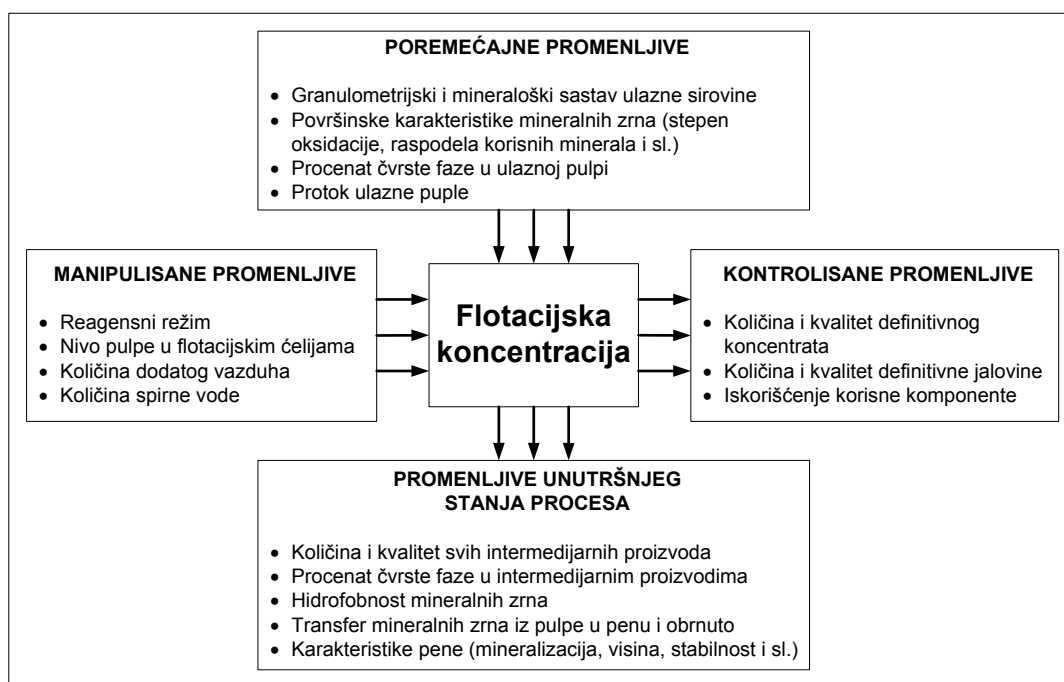
S druge strane, Hodouin definiše status i obeležje ključnih ulaznih i izlaznih promenljivih koje utiču na flotacijski proces, sa aspekta kontrole procesa. Pri tom, isti autor vrši podelu ulaznih promenljivih na:

- (1) manipulisane (tj. promenljive na koje je moguće uticati) i
- (2) poremećajne promenljive,

dok izlazne promenljive označava kao:

- (1) kontrolisane (tj. promenljive koje karakterišu performanse procesa) i
- (2) promenljive unutrašnjeg stanja procesa (koje zavise od manipulisanih i poremećajnih promenljivih) [Hodouin (2011)].

Na sličan način, definiciju i podelu ključnih flotacijskih promenljivih dao je Miljanović [Miljanović (2008b)]. Modifikovani šematski prikaz dat je na slici 3.



Slika 3. Šematski prikaz ključnih flotacijskih promenljivih [adaptirano prema Miljanović (2008b), Hodouin (2011)].

Uticaj raznovrsnih promenljivih veličina na tok i rezultate flotacijskog procesa predmet je proučavanja velikog broja istraživača [Lynch et al. (1981), Yianatos (1989), Zhang (1989), King (2001), Vera (2002), Drzymała (2007), Uçurum and Bayat (2007), Villar et al. (2010), Shammas et al. (2010), Maldonado (2010), Rahman (2012), Rath (2013)]. Iz ovih obimnih istraživanja može se izvesti zaključak da se različit stepen

uticaja promenljivih i njihove uzajamne interakcije sa jedne strane i jasna težnja da se ostvari stabilnost kvaliteta proizvoda procesa flotiranja sa druge strane sukobljavaju u domenu modelovanja i upravljanja procesom i dostizanja željenih performansi uz istovremeno održavanje svih poremećajnih dejstava pod kontrolom.

Problem dostizanja optimalnog radnog režima flotacijskog postrojenja otežan je čak i kada se flotacijska svojstva rude koja ulazi u proces neznatno menjaju. U slučaju intenzivnih i učestalih promena u flotacijskim svojstvima rude (što se u praksi skoro uvek događa), problem postaje još kompleksniji. Stoga je izbor modela i simulacionih tehnika od velike pomoći za rešavanje ovog problema [Lynch et al. (1981)].

4.0 MODELI ZASNOVANI NA KLASIČNIM METODAMA

Koncept klasičnog modelovanja procesa flotacije zasnovan je na standardnim matematičkim pravilima i izrazima kojima se opisuje ponašanje flotacijskog sistema.

4.1 EMPIRIJSKI MODELI

Kod klasičnih empirijskih modela, (tj. modela koji se baziraju na realnim podacima prikupljenim iskustvenim posmatranjem, merenjima, zaključivanju i simulacijama) utvrđuje se korelacija između ulaznih i izlaznih promenljivih preko odgovarajućih matematičkih jednačina.

Statističke metode se koriste za utvrđivanje veze između zavisnih i nezavisnih promenljivih kao i za procenu parametara koji figurišu prilikom aproksimacije odgovarajućih funkcionalnih zavisnosti. Parametri koji se dobijaju takvom analizom često nemaju fizički značaj [Polat and Chander (2000)].

Lynch smatra da empirijski modeli mogu biti pogodni za opis flotacijskih sekcija ili celih postrojenja [Lynch et al. (1981)].

Sakupljanje podataka za empirijske modele može se vršiti on-line i off-line metodama, odnosno u realnom ili proširenom vremenu. Kod off-line metoda podaci mogu biti smenski ili dnevni, ili podaci koji se dobijaju posebnim uzorkovanjem prema definisanom eksperimentalnom programu. Kod on-line metoda, sakupljanje podataka obavlja se isključivo on-line instrumentacionom tehnikom, mada se analiza podataka može obavljati i off-line. Procesna oprema koja kontinualno obezbeđuje osnovne

podatke za razvoj empirijskih modela i za njihovo kasnije ažuriranje obično se instalira na ulaznim ili izlaznim tokovima materijala flotacijske sekcije ili postrojenja.

Mogućnosti primene empirijskih flotacijskih modela još sredinom prošlog veka opisali su Faulkner i Pitt [Faulkner (1966), Pitt (1968)].

U novije vreme, nekoliko empirijskih modela za optimizaciju iskorišćenja i kvaliteta koncentrata rude bakra (u kojoj je glavni mineral nosilac bakra halkopirit) iz Severnog Vaziristana dao je Ali [Ali (2007)]. Pored toga, primere klasičnih empirijskih modela koji opisuju određene podprocese u flotacijskom sistemu (to su većinom mikroprocesi koji se dešavaju na granici faza pulpe i pene) dali su Savassi i saradnici, Gorain i saradnici, Tsatouhas i saradnici, kao i Yianatos i Contreras [Savassi et al. (1998), Gorain et al. (1999), Tsatouhas et al. (2006), Yianatos and Contreras (2010)]. Kao dodatak, empirijski modeli se često kombinuju sa fenomenološkim kako bi se ostvarila veća efikasnost simulacionog modela procesa [Kuopanportti et al. (2000), Casali et al. (2002), Bakker et al. (2010)].

Glavna prednost empirijskih modela je ta da njihova primena često iziskuje manje troškove u pogledu radne snage i vremena nego kada su u pitanju drugi tipovi modela. Ukoliko je očekivana primena modela jasno definisana, oni se mogu na zadovoljavajući način upotrebiti u inženjerskoj praksi. Ipak, sa predviđanjima koja obuhvataju ekstrapolaciju, odnosno vrednosti izvan opsega baze podataka modela treba postupati veoma pažljivo. Pored toga, modeli se mogu veoma razlikovati za različite rude i različite konfiguracije flotacijskih postrojenja, tako da je veoma teško utvrditi vezu između publikovanih empirijskih modela čak i kada je reč o postrojenjima sa sličnim tehnološkim šemama ili se radi o flotiranju ruda sličnog hemijskog i mineraloškog sastava.

Generalno, upotreba empirijskih flotacijskih modela poboljšava razumevanje tehnoloških pokazatelja tačno određene rude, odnosno konkretnog flotacijskog postrojenja [Lynch et al. (1981)].

4.2 PROBABILISTIČKI MODELI

Probabilistički modeli ili modeli zasnovani na verovatnoći su bazirani na mogućnosti dešavanja različitih podprocesa kao što su sudaranje, adhezija i razdvajanje zrna i vazdušnih mehurića. Oni mogu služiti za opis flotacijskog procesa na makro ili

mikro nivou, ili pak predstavljati spoj između ove dve vrste modela [Polat and Chander (2000)].

Uzimajući u obzir veličinu čestica, zapreminu ćelije i stabilnost pene Schumann je predložio probabilistički flotacijski model prikazan jednačinom 4 [Schumann (1942)]:

$$P_x = P_c \cdot P_a \cdot F \cdot [x] \cdot V \quad (4)$$

gde je:

P_x – verovatnoća uspešnog prelaza zrna u koncentrat,

P_c – verovatnoća sudara zrno-vazdušni mehurić,

P_a – verovatnoća adhezije zrno-vazdušni mehurić,

F – faktor stabilnosti pene,

$[x]$ – prosečna veličina zrna,

V – zapremina flotacijske ćelije.

S obzirom da su različite verovatnoće i nezavisni faktori nepoznanica u celokupnom procesu i da ne postoji efikasna metoda za merenje pojedinačnih verovatnoća i uticajnih faktora, ovaj model nije praktičan. Nakon modela verovatnoće koji je dao Schumann, Kelsall razvija alternativni pristup modelu koji omogućava jednostavnija merenja. On je smatrao da je masa određene komponente u jalovini koja se dobija flotiranjem u izolovanoj flotacijskoj ćeliji, pri stabilnom stanju procesa proporcionalna masi te komponente u ulazu. Model je predstavljen jednačinom 5 [Kelsall (1961)]:

$$W = W_0 \cdot (1 - P)^n \quad (5)$$

gde je:

W – masa tražene mineralne komponente u jalovini,

W_0 – masa tražene mineralne komponente u ulazu,

P – verovatnoća prelaska tražene mineralne komponente u koncentrat,

n – faktor koji opisuje efikasnost procesa.

Model (jednačina 5) je jednostavan za korišćenje, ali treba napomenuti da je u ovom slučaju flotacijska koncentracija razmatrana kao diskontinualan proces i da vreme nije uzeto u obzir. Sa aspekta verovatnoće, vrednost parametra P je najveća na početku procesa flotacije jer flotabilne čestice intenzivno teže da pređu u koncentrat; sa daljim odvijanjem procesa ova verovatnoća postepeno opada, što znači da se P mora posmatrati u funkciji vremena. Diferenciranjem jednačine 5 po parametru P uz uvođenje funkcionalne zavisnosti $P(t)$ i odgovarajuće matematičke transformacije, dobija se opšti model kinetike prvog reda koji se često koristi u opisu flotacijskih procesa [Zhang (1989)]:

$$\frac{dW}{dt} = -k(t) \cdot W \quad (6)$$

U ovom slučaju se konstanta brzine flotacije k računa iz odgovarajućih verovatnoća.

Primer takvog modela (jednačina 6) dali su Schulze, kao i Schulze i Stöckelhuber, gde su za proračun konstanti brzina flotacije uzeli u obzir koncentraciju vazdušnih mehurića dostupnih za adheziju mineralnih zrna, kao i frekvenciju sudara zrno–mehurić, uz odgovarajuće verovatnoće: sudara, adhezije, formiranja trofaznog kontakta i stabilnosti agregata u odnosu na dejstvo spoljašnjih sila [Schulze (1993), Schulze and Stöckelhuber (2005)]. Koristeći se istim osnovnim principima koje je izložio Schulze, Bloom i Heindel su predstavili kinetičke konstante u funkciji verovatnoća dešavanja različitih mikroprocesa u flotacijskom sistemu i razvili kompleksan model flotacije čestica tonera iz reciklažnog papira [Bloom and Heindel (1997)]. Koh i Schwarz su takođe primenili probabilistički pristup opisa flotacijskih mikroprocesa u okviru razvoja kinetičkog modela prianjanja zrna za vazdušne mehuriće u flotacijskoj pulpi [Koh and Schwarz (2006)].

Pored pomenutih probabilističkih modela kojima se proces flotacijske koncentracije opisuje na makronivou i onih koji predstavljaju dopunske segmente u sklopu složenih kinetičkih modela, u literaturi se mogu naći i probabilistički modeli koji samostalno opisuju podprocese u flotacijskom sistemu [Kirjavainen (1989), Nguyen et al. (1998), Nguyen (1998), Brožek and Młynarczykowska (2012)].

4.3 KINETIČKI MODELI

Kinetičko modelovanje flotacijskih procesa većinom se zasniva na pretpostavci da je brzina sudara čestica-vazdušni mehurić prvog reda, pri čemu broj čestica i koncentracija vazdušnih mehurića ostaju konstantni [Polat and Chander (2000)]. Iako postoje brojna razmatranja u pogledu veličine reda kinetike procesa flotacije (na primer, Somasundaran i Lin predlažu grafičke metode koje „nude relativno jednostavan i brz način određivanja reda i konstante brzine flotacijskog procesa” [Somasundaran and Lin (1973)]; Brožek i Młynarczykowska ističu da se red kinetike flotacijskog procesa menja sa vremenom odvijanja procesa [Brožek and Młynarczykowska (2007)]; Li i saradnici tvrde da prilikom flotacije uglja organska komponenta flotira u skladu sa kinetikom prvog reda, a neorganska saglasno kinetici drugog reda [Li et al. (2013a)]; dok su Hernáinz i Calero, ispitujući kinetiku procesa flotacije celestita i kalcita došli do zaključka da red kinetike flotacije nema celobrojnu vrednost [Hernáinz and Calero (1996, 2001)], ipak je u dosadašnjim istraživanjima najprihvaćeniji pristup koji uzima u obzir kinetiku prvog reda [Fichera and Chudacek (1992), Polat and Chander (2000), Sripriya et al. (2003), Natarajan and Nirdosh (2006), Oproiu et al. (2009), Yianatos et al. (2010)]. U skladu sa tim, široko je prihvaćena pretpostavka da se procesi u flotacijskoj ćeliji mogu modelovati analogno procesima u hemijskim reaktorima sa idealnim mešanjem [Yianatos et al. (2005a), Yianatos and Henríquez (2006), Yianatos (2007)], dok se transfer mineralnih zrna iz faze pulpe definiše jednačinama brzine reakcije prvog reda [Polat and Chander (2000)].

Rešenje jednačine prvog reda rezultuje klasičnim flotacijskim modelom prvog reda. Klasična jednačina prvog reda, međutim, mora biti modifikovana kako bi mogla predstaviti podatke o brzini flotiranja u širokom opsegu uslova, pri čemu se osnovni princip kinetičkih modela svodi na određivanje konstante brzine flotacije, k [Polat and Chander (2000), King (2001)].

Konstanta brzine flotacije zavisi od velikog broja faktora, kao što su protok vazduha, veličina mineralnih zrna, veličina vazdušnih mehurića, gustina i nivo pulpe, koncentracija reagenasa, dizajn flotacijske ćelije i slično [Hernáinz and Calero (2001), King (2001), Runge et al. (2003a), Duan et al. (2003), Sherrell (2004), Uçurum and

Bayat (2007), Mohammed (2007)]. Stoga je veoma teško, odnosno praktično nemoguće odrediti vrednost konstante k sa velikom preciznošću.

Ferreira i Loveday navode da se kinetički modeli diskontinualnih flotacijskih procesa mogu podeliti u dve osnovne grupe, u skladu sa raspodelom konstante brzine prvog reda. To su diskretni i kontinualni modeli. Diskretni modeli se mogu predstaviti opštom jednačinom (7) [Ferreira and Loveday (2000)]:

$$R = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot (1 - e^{-k_i t}) \quad (7)$$

gde je:

R – kumulativno iskorišćenje tražene mineralne komponente u vremenu t ,

n – broj flotabilnih frakcija,

φ_i – maseni udeo flotabilne frakcije i izražen u delovima jedinice,

k_i – konstanta brzine flotiranja prvog reda flotabilne frakcije i ,

t – vreme flotiranja.

Jedan od prvih diskretnih kinetičkih modela predložio je Kelsall. Predloženi model zasniva se na flotabilnosti dve frakcije u pulpi (sporoflotirajuća i brzoflotirajuća frakcija). Ponašanje svake frakcije opisano je pojedinačnim konstantama brzine [Kelsall (1961)]. Analogno ovom modelu, Zhang je prikazao model sa tri flotabilne frakcije, uključujući i srednje flotabilnu frakciju sa odgovarajućom konstantom brzine [Zhang (1989)]. Hay je publikovao napredni model za optimizaciju procesa flotacije rude nikla koji je baziran na Kelsalovom modelu, dok su Welsby i saradnici predložili metodu za klasifikaciju flotabilnih frakcija olovo-cinkove rude (pri čemu su dali njihova masena učešća i odgovarajuće konstante brzine flotiranja) na osnovu veličine mineralnih zrna i stepena oslobođenosti galenita i istakli njen značaj pri izradi Kelsalovog i sličnih modela [Hay (2008), Welsby et al. (2010)]. Razvojem diskretnih kinetičkih flotacijskih modela bavili su se i Runge i saradnici, Dehghani i saradnici i Saleh [Runge et al. (2003b), Dehghani et al. (2011), Saleh (2010)].

Modeli sa kontinualnom raspodelom konstante brzine flotiranja koji opisuju diskontinualni proces flotacije, mogu se predstaviti opštom jednačinom (8) [Yianatos et al. (2010)]:

$$\frac{R}{R_{\infty}} = \int_0^{\infty} (1 - e^{-kt}) F(k) dk \quad (8)$$

gde je:

R – iskorišćenje tražene mineralne komponente u vremenu t ,

R_{∞} – maksimalno iskorišćenje tražene mineralne komponente u beskonačnom vremenu,

k – kinetička konstanta brzine koja uključuje sve mikroskopske podprocese,

$F(k)$ – funkcija raspodele konstante brzine za mineralne vrste sa različitim brzinama flotiranja.

Izraz $(1 - e^{-kt})$ predstavlja iskorišćenje tražene mineralne komponente u procesu prvog reda sa invarijantnom konstantom brzine k kao funkcijom vremena.

Različiti autori predlažu različite funkcije raspodele za k . Neke od njih su gama raspodela [Saleh (2010), Yianatos et al. (2010), Kalinowski and Kaula (2013)] pravougaona raspodela [Runge et al. (2003b), Yianatos et al. (2005b), Yianatos and Henríquez (2006), Xian-ping et al. (2011), Saleh (2010), Yianatos et al. (2006), Yianatos et al. (2010)], Vejbulova raspodela [Yianatos et al. (2010)], dvostruka normalna raspodela [Ferreira and Loveday (2000)]. Pored toga, Polat i Chander u svom obimnom izlaganju o kinetičkim modelima prvog reda navode mogućnost korišćenja i trougaone i sinusoidne raspodele konstante brzine flotacijskog procesa [Polat and Chander (2000)]. Ispitujući kompatibilnost različitih funkcija raspodele konstante brzine pri modelovanju procesa flotacije bakra Yianatos je, između ostalog, uvrstio i Dirakovu delta funkciju [Yianatos et al. (2010)], što se u suštini svodi na diskretni model sa jednom flotabilnom frakcijom.

Ipak, uprkos mnogim pokušajima da se konstanta k odredi što tačnije i samim tim formira što adekvatniji model flotacijskog procesa, opšteprihvaćeno mišljenje je da ne postoji jedinstven model koji dovoljno dobro opisuje kinetiku flotacije.

U kontinualnim flotacijskim procesima iskorišćenje tražene mineralne komponente se generalno može predstaviti jednačinom (9) [Yianatos et al. (2007), Yianatos (2012)]

$$\frac{R}{R_{\infty}} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (1 - e^{-kt}) F(k) E(t) dk dt \quad (9)$$

gde je:

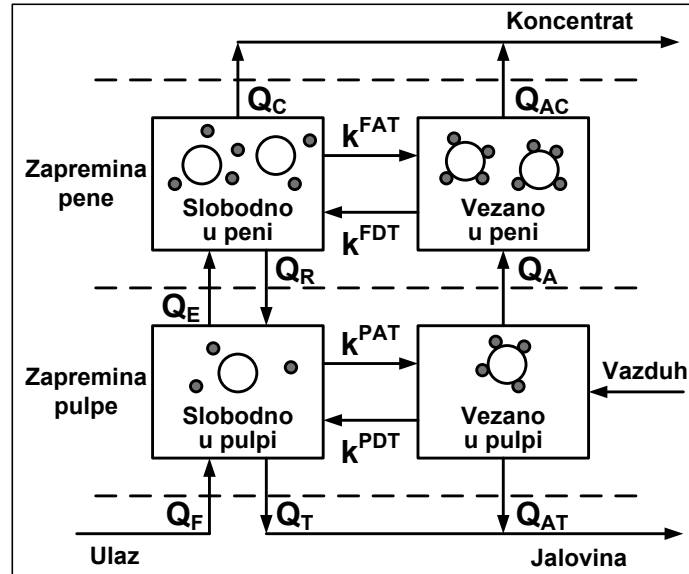
$E(t)$ – funkcija raspodele vremena zadržavanja flotabilne komponente za kontinualne procese sa neujednačenim mešanjem

Ostali parametri imaju isto značenje kao u jednačini (8).

Funkcija raspodele vremena zadržavanja $E(t)$ zavisi od hidrodinamičkog režima, koji je povezan sa dizajnom flotacijskih ćelija kao i njihovim rasporedom u flotacijskom ciklusu. Yianatos je predložio relativno jednostavan model za određivanje funkcije $E(t)$ za samostalnu flotacijsku ćeliju velike zapremine (130 m³). Model je pokazao dobru saglasnost sa eksperimentalnim podacima koji su dobijeni ispitivanjem vremena zadržavanja tečne i tri čvrste frakcije (sitna, srednja i krupna) u flotacijskom sistemu. Isti autor je definisao modele za determinaciju $E(t)$ za flotacijsku sekciju od N ćelija i kolona flotacijsku ćeliju [Yianatos (2007)].

4.4 POPULACIONO-BILANSNI MODELI

Poseban vid diskretnih kinetičkih modela čine populaciono-bilansni modeli. Populaciono-bilansni pristup polazi od koncepta da su mineralna zrna podeljena u grupe, pri čemu se zrna u okviru jedne grupe odlikuju sličnim dimenzijama i mineralnim sastavom [King 2001]. Osnovne principe populaciono bilansnog modelovanja flotacijskog procesa opisali su Herbst i Harris [Herbst and Harris (2007)]. U skladu sa ovim modelom, koncentracija mineralnih zrna u flotacijskoj ćeliji razmatra se za svaku definisanu grupu u zavisnosti od stanja zrna u ćeliji (tj. da li je ono slobodno u pulpi, vezano za vazdušni mehurić u pulpi, slobodno u peni ili vezano za vazdušni mehurić u peni, kao što je šematski prikazano na slici 4) [Herbst and Harris (2007), Herbst and Flintoff (2012)]. Matematički, to se generalno može predstaviti skupom diferencijalnih jednačina, a opšti oblik jedne diferencijalne jednačine dat je izrazom (10) (prilagođeno prema Herbst and Harris (2007)):



Slika 4. Šematski prikaz različitih stanja čestica u flotacijskoj ćeliji (Značenje simbola na slici: Q_F , Q_C , Q_T – protok vode u ulazu, koncentratu i jalovini, respektivno; Q_A , Q_{AC} , Q_{AT} – protok vazduha na ulazu, koncentratu i jalovini, respektivno (u praksi $Q_{AT} \approx 0$); Q_R – protok vode koja se vraća iz pene u pulpu, Q_E – protok vode koja prelazi iz pulpe u penu; k^{PAT} , k^{PDT} – brzina prianjanja i razdvajanja zrna i vazдушnih mehurića u pulpi, respektivno; k^{FAT} , k^{FDT} – brzina prianjanja i razdvajanja zrna i vazдушnih mehurića u peni, respektivno) [Herbst and Flintoff (2012)].

$$\frac{d(V\psi_{ij})}{dt} = \psi_{ij}^{IN} Q_{IN} - \psi_{ij}^{OUT} Q_{OUT} + k_{ij}^{IN} \psi_{ij}^{IN} V - k_{ij}^{OUT} \psi_{ij}^{OUT} V \quad (10)$$

gde je:

ψ_{ij} – koncentracija mineralnih zrna (masa zrna po jedinici zapremine vode ili vazduha) u razmatranom stanju (svako od četiri moguća razmatrana stanja se definiše jednom diferencijalnom jednačinom),

V – odgovara zapremini vode ili vazduha u pulpi ili peni, u zavisnosti od stanja u kome se nalaze mineralna zrna,

Q_{IN} – zapreminski protok ulaznog materijala (vode ili vazduha) u fazu pulpe ili fazu pene (videti sliku 4),

Q_{OUT} – zapreminski protok izlaznog materijala (vode ili vazduha) iz faze pulpe ili faze pene (videti sliku 4),

ψ_{ij}^{IN} – koncentracija mineralnih zrna koja su u razmatranom stanju ili će zbog određenih mehanizama preći u razmatrano stanje

ψ_{ij}^{OUT} – koncentracija mineralnih zrna koja nisu u razmatranom stanju, ili će zbog određenih mehanizama napustiti razmatrano stanje,

k_{ij}^{IN} – brzina transfera između stanja prema bilo kom od mehanizama (tj. prijanjanje ili razdvajanje čestice i vazdušnog mehurića u pulpi ili peni – videti sliku 4) koji dovode do prelaza mineralnih zrna u razmatrano stanje

k_{ij}^{OUT} – brzina transfera između stanja prema bilo kom od mehanizama (tj. prijanjanje ili razdvajanje čestice i vazdušnog mehurića u pulpi ili peni – videti sliku 4) koji dovode do napuštanja razmatranog stanja

i – odgovara veličini mineralnog zrna,

j – odgovara sastavu mineralnog zrna.

Nakon postavljanja skupa diferencijalnih jednačina određuju se konstante brzine transfera na osnovu matematičkih jednačina i eksperimentalnih podataka. Ovakav pristup može biti veoma komplikovan, zato u praksi postoje tendencije ka pojednostavljenju uslova modelovanja metodama populacionog bilansa.

Pérez-Correa i saradnici prikazali su model za opis dinamike flotacijskog postrojenja zasnovan na masenom bilansu koji uzima u obzir kinetiku flotiranja prvog reda. Ključne pretpostavke modela su:

- (a) dve faze u flotacijskoj ćeliji (pulpa i pena);
- (b) dve mineraloške vrste (korisni minerali (uglavnom halkopirit) i minerali jalovine);
- (c) faze u ćelijama su savršeno izmešane;
- (d) transfer materijala se odvija u oba smera;
- (e) gustine pulpe i pene su konstante;
- (f) samo jedna krupnoća utiče na brzinu flotiranja (mada se ona može menjati);
- (g) nizovi ćelija se smatraju jednom superćelijom ekvivalentne ukupne zapremine.

Promenljive veličine u okviru modela klasifikovane su na sledeći način:

- ulazne promenljive:
 - manipulisane, tj. promenljive čije se vrednosti regulišu: doze kolektora, brzina dodavanja penušača, nivo pulpe;
 - poremećajne, tj. promenljive čije se vrednosti ne regulišu: sadržaj bakra u ulazu, protok ulazne sirovine, prosečan granulostav ulazne sirovine, sadržaj gvožđa u ulazu i pH vrednost ulazne pulpe.

- izlazne promenljive:
 - koje se mere: sadržaj bakra u koncentratu, sadržaj bakra u jalovini, iskorišćenje
 - koje se ne mere: maseni protok koncentrata i jalovine [Pérez-Correa et al. (1998)]

Populaciono-bilansni pristup u modelovanju procesa flotacije u celini takođe su primenili i Bloom i Heindel, Sosa-Blanco i saradnici, Casali i saradnici, Sbarbaro i saradnici [Bloom and Heindel (1997), Sosa-Blanco et al. (1999), Casali et al. (2002), Sbarbaro et al. (2008)]. Osim toga, postoje i modeli koji se odnose na opis podprocesa u flotacijskom sistemu populaciono-bilansnim pristupom, i koji se, prema dostupnoj literaturi, uglavnom svode na predviđanje raspodele vazdušnih mehurića u sistemu [Deglon et al. (1999), Sawyerr et al. (1998), Koh and Schwarz (2008)].

4.5 KRATAK OSVRT NA MODELE ZASNOVANE NA KLASIČNIM MATEMATIČKIM JEDNAČINAMA

Iako su pokušaji modelovanja procesa flotacije klasičnim matematičkim jednačinama brojni, uz postojanje značajnih varijacija u pristupima, dosadašnja istraživanja na ovom polju nisu dala zadovoljavajuće rezultate. Naime, sama priroda procesa, zasnovana na interakciji čvrste, tečne i gasovite faze čini primenu klasičnih jednačina veoma teškom. Prema Zhangu, svaki pojedinačni model je ograničen precizno definisanim procesnim uslovima. Dalje, različit stepen kompleksnosti postojećih modela utiče na to da se tačnosti i preciznosti rezultata modelovanja međusobno razlikuju, čak i kada su modeli formirani na osnovu istih eksperimentalnih podataka. Uvođenjem više parametara u model povećava se tačnost rezultata, ali se smanjuje značajnost svakog od parametara [Zhang (1989)].

Imajući u vidu trenutnu situaciju kada je reč o klasičnom modelovanju procesa flotacijske koncentracije, neophodno je razmotriti i mogućnosti inovativnih pristupa u ovoj oblasti, koje nude metode soft kompjutinga.

5.0 MODELI ZASNOVANI NA PRAVILIMA SOFT KOMPJUTINGA

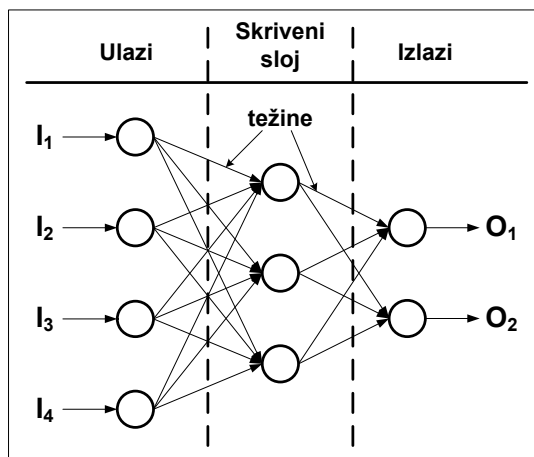
Modeli koji se zasnivaju na metodama soft kompjutinga rezultat su razvoja savremenog pristupa modelovanju flotacijskih procesa. Sa intenzivnim razvojem soft kompjutinga od ranih devedesetih godina prošlog veka, pružila se prilika za razvoj adekvatnijih modela sistema koji se odlikuju visokom neizvesnošću, nepreciznošću, nemogućnošću sagledavanja potpunih informacija i potrebom za aproksimacijom, kakav je upravo flotacijski sistem.

Tehnike soft kompjutinga predstavljaju pouzdano sredstvo za pomoć u dizajnu, razvoju i radu inteligentnih sistema koji poseduju sposobnost adaptacije, učenja i samostalnog delovanja. Pored toga, ove tehnike omogućavaju dizajneru modela procesa da iskoristi prednosti znanja akumuliranog u sistemu koji se modeluje (u lingvističkom obliku ili u obliku drugačijih podataka), da kontinualno uči iz operativnog iskustva i da iskoristi mogućnosti inteligentnih algoritama za optimizaciju procesa [Karray and De Silva (2004)].

Prema dostupnoj literaturi, najviše korišćene metode soft kompjutinga u modelovanju flotacijskih procesa i flotacijskih postrojenja su fazi logika, veštačke neuronske mreže, genetski algoritmi, metode potpornih vektora, stabla odlučivanja koja uče, kao i hibridi navedenih metoda.

5.1 VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

Veštačke neuronske mreže, skraćeno ANN (engl. artificial neural networks) su mreže velikog broja povezanih računarskih „neurona” i predstavljaju paralelno distribuirane procesne strukture. Inspiracija za veštačke neuronske mreže potekla je od biološke građe neurona u ljudskom mozgu. Ključna karakteristika neuronskih mreža je njihova sposobnost aproksimacije proizvoljne nelinearne funkcije. Neuronska mreža se sastoji od skupa čvorova, koji su obično organizovani u slojeve i povezani preko težinskih elemenata zvanih sinapse. U svakom čvoru ponderisani ulazi se sumiraju (grupišu), određuje im se vrednost praga (engl. threshold) i podvrgavaju funkciji aktivacije, kako bi se generisao izlaz iz tog čvora [Karray and De Silva (2004)]. Pojednostavljeni dijagram veštačke neuronske mreže prikazan je na slici 5.



Slika 5. Pojednostavljeni dijagram veštačke neuronske mreže [adaptirano prema Gupta and Yan (2006), Fyfe (2005)].

Razvojni proces za aplikaciju veštačkih neuronskih mreža sastoji se od 9 koraka [Turban (1995)]:

- 1) Prikupljanje podataka koji se koriste za trening i testiranje mreže. Prilikom prikupljanja kvalitetnih podataka mora se voditi računa o minimiziranju nejasnoća (dvosmislenosti), grešaka i slučajnosti u podacima. Podaci moraju biti prikupljeni tako da pokriju:
 - najširi opseg domena problema;
 - ne samo rutinske operacije već i izuzetke;
 - uslove na granicama domena posmatranog problema.
 Posmatrani problem treba da bude pogodan za rešavanje metodologijom ANN³.
- 2) Identifikacija i razdvajanje podataka u skup za trening i skup za testiranje performansi mreže.
- 3) Definisanje arhitekture mreže. Mnogi autori klasifikuju veštačke neuronske mreže u dva osnovna tipa. To su:
 - neuronske mreže sa „feedforward” pristupom⁴, kao što je, na primer, višeslojni perceptron, čiji je pojednostavljeni prikaz dat na slici 5;
 - rekurentne mreže, tj. neuronske mreže sa „feedback” pristupom⁵, kao što je, na primer, Hopfieldova mreža [Karray and De Silva (2004), Atiya (1991), Fyfe (2005), Yao (1999)].

³ Prema Heatonu, postoji nekoliko slučajeva kada problemi nisu pogodni za rešavanje ANN metodom. Na primer, kada algoritam treba da sadrži jasno definisane korake ili nepromenljiva logička pravila. Takođe, neuronske mreže nisu pogodne u slučaju da se mora tačno znati kako se došlo do rešenja [Heaton (2008)].

⁴ Engl. feedforward – predviđanje reakcije sistema unapred; upravna sprega

Tip neuronske mreže koja će se koristiti, u suštini, zavisi od raspolaganja određenim razvojnim alatom ili obučeniosti projektanata. Pri tom je uobičajeno posvetiti posebnu pažnju izboru broja neurona i broju slojeva u mreži. U okviru modelovanja flotacijskih procesa uglavnom su prihvaćene veštačke neuronske mreže sa „feedforward” pristupom [Al-Thyabat (2008), Marais (2010), Бумаженко (2011), itd.], koje se značajno razlikuju po broju slojeva i neurona.

4) Izbor algoritma učenja. Algoritmi za učenje ANN mogu se svrstati u dve osnovne kategorije zasnovane na formatu ulaza. To su:

- binarni/diskretni algoritmi (koji koriste binarne vrednosti ulaza (0 ili 1));
- kontinualni algoritmi (ulazi sa kontinualnim vrednostima).

Svaka od kategorija se potom deli u dve osnovne vrste: (a) nadgledano učenje – gde se mreži saopštavaju ulazni podaci i korektni odgovori (tj. izlazi koji se žele dobiti za date ulazne podatke) i (b) nenadgledano učenje – gde se mreži saopštavaju samo ulazni podaci, a mreža treba da se „samoorganizuje” (tj. da se obuči) zavisno od određene strukture u ulaznim podacima [Karray and De Silva (2004), Fyfe (2005)].

Jedan od najčešće korišćenih algoritama učenja neuronskih mreža (prvenstveno za obučavanje višeslojnih perceptrona) je metoda povratnog rasprostiranja greške (engl. backpropagation method) [Turban (1995)].

- 5) Inicijalizacija težina i parametara mreže, koju sledi modifikacija parametara kada se primi povratna informacija o performansama.
- 6) Transformacija aplikacionih podataka u tip i format koji zahteva neuronska mreža. Veza između nivoa aktivacije neurona i izlaza izražava se funkcijom transfera i ona može biti linearna i nelinearna. Jedna od popularnih nelinearnih funkcija transfera je sigmoidna funkcija.
- 7) Trening mreže. Ova faza se sprovodi kao iterativni proces prezentovanja ulaznih i željenih izlaznih podataka mreži. Mreža računa aktuelne izlaze i podešava težine, sve dok se ne dobije konzistentan skup težina koje funkcionišu za sve podatke za trening (tj. sve dok aktuelni izlazi ne dostignu željene vrednosti).

⁵ Engl. feedback – korišćenje informacija dobijenih iz reakcije sistema za podešavanje i poboljšanje njegovih radnih parametara; povratna sprega

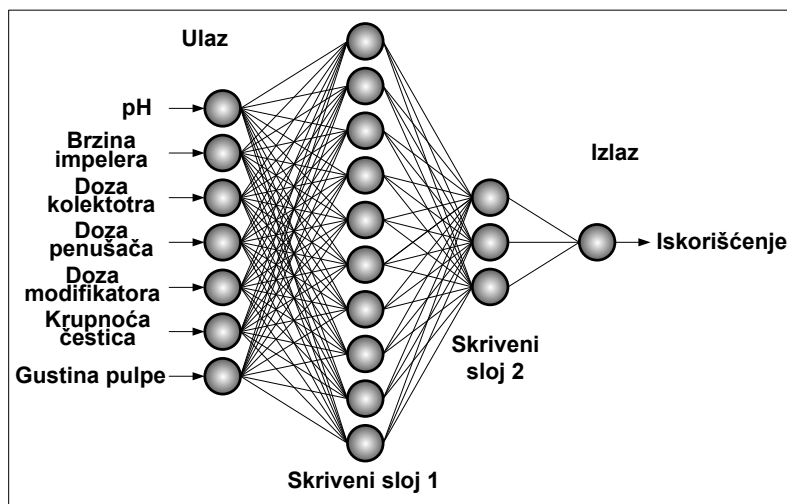
- 8) Testiranje mreže. Pošto je trening završen, potrebno je testirati mrežu. Testiranjem se proveravaju performanse mreže (koristeći dobijene težine), i to merenjem kapaciteta mreže da korektno klasifikuje podatke za testiranje. Crna kutija testiranja (upoređenje rezultata testiranja sa aktuelnim istorijskim rezultatima) je osnovni pristup verifikacije da li ulazne veličine proizvode odgovarajuće izlaze.
- 9) Implementacija, odnosno korišćenje mreže u novim okolnostima. Mreža je spremna za korišćenje kao samostalan sistem ili kao deo nekog drugog softverskog sistema.

5.1.1 Primena veštačkih neuronskih mreža u modelovanju flotacijskih procesa

Kao što je već napomenuto, u modelovanju flotacijskih procesa, dominantan tip neuronske mreže je višeslojni perceptron. Al-Thyabat je razmatrao uticaj tri ulazna parametra (srednji prečnik zrna u ulaznoj pulpi, doza kolektora i brzina obrtanja impelera flotacijske mašine) na iskorišćenje i kvalitet koncentrata dobijenog postupkom flotacijske koncentracije jordanskih fosfata. U tu svrhu autor je ispitao pogodnost različitih arhitektura višeslojnih perceptrona i došao do zaključka da je najpogodnija arhitektura mreže [3-9-11-5-9-2] (sa 4 skrivena sloja) koja daje najmanju srednju kvadratnu grešku. Rezultati simulacija ostvarenih pomoću ANN pokazali su da optimalno iskorišćenje i kvalitet koncentrata iznose 92,97% i 83,47%, respektivno. Optimalne vrednosti parametara koje daju pomenute rezultate su: srednji prečnik zrna 321,28 μm ; potrošnja kolektora 735,4 g/t i broj obrtaja impelera 1225,25 min^{-1} [Al-Thyabat (2008)]. Godinu dana kasnije, isti autor je izvestio o ispitivanju uticaja ova tri parametra na konstantu brzine flotacije (k) i efikasnost separacije, upotrebom identične arhitekture neuronske mreže [Al-Thyabat (2009)]. Na sličan način, Farghaly i saradnici su koristili ANN model za ispitivanje uticaja vremena flotiranja, doze kolektora, doze penušača i brzine obrtanja impelera na iskorišćenje i kvalitet koncentrata uglja dobijenog postupkom flotacije. Autori su odredili optimalne vrednosti ulaznih parametara pri kojima se postiže optimalno iskorišćenje i kvalitet koncentrata [Farghaly et al. (2012)]. S druge strane, Kalyani i saradnici su predložili ANN model za procenu iskorišćenja korisne komponente u flotacijskom koncentratu uglja, gde su pored doze

kolektora i penušača uzeli u obzir i gustinu pulpe kao ulazni parametar [Kalyani et al. (2008)].

Razvojem modela procesa flotacije uglja bavili su se i Jorjani i saradnici. Oni su formirali dve neuronske mreže sa „feedforward” pristupom, arhitekture [7-10-3-1] i [5-30-2-1], za predviđanje iskorišćenja (slika 6) i kvaliteta koncentrata uglja, respektivno. Pokazano je da ANN modeli mogu predvideti izlazne vrednosti na zadovoljavajućem nivou, pri čemu vrednosti koeficijena korelacije (R) iznose 0,91 za kvalitet koncentrata i 0,95 za iskorišćenje [Jorjani et al. (2008)]. Nešto kasnije, Jorjani je sa svojim saradnicima razvio ANN model arhitekture [6-8-12-11-2-1] za predviđanje iskorišćenja i kvaliteta flotacijskog koncentrata uglja na osnovu mineralnog sastava polaznih uzoraka uglja [Jorjani et al. (2009)].



Slika 6. ANN model za predviđanje vrednosti iskorišćenja korisne komponente u flotacijskom koncentratu uglja [adaptirano prema Jorjani et al. (2008)].

Još jedan primer modelovanja flotacijskog procesa u sistemu koji sadrži sirovinu organskog porekla nedavno su opisali Vasseghian i saradnici. U pitanju je ANN model koji predviđa količinu uklonjenog pepela i sumpora iz koncentrata bitumena dobijenog postupkom flotacije [Vasseghian et al (2014)].

S druge strane, Nakhaei i saradnici su predložili dva ANN modela za predviđanje sadržaja bakra (arhitektura mreže [3-13-6-1]) i molibdena (arhitektura mreže [4-4-8-1]) u koncentratu bakra. Rezultati su pokazali da je greška prilikom predviđanja ovih parametara prihvatljiva, pri čemu su vrednosti koeficijena korelacije

kod testiranja neuronskih mreža iznosile 0,93 i 0,97 za sadržaj Cu i Mo, respektivno [Nakhaei et al. (2013a)]. Kroz još jedno istraživanje, Nakhaei je sa saradnicima poredio dve vrste modela za procenu tehnoloških pokazatelja prečišćavanja koncentrata bakra i molibdena – model na bazi multivarijabilne nelinearne regresije i modele na bazi veštačkih neuronskih mreža. Višeslojni perceptroni sa arhitekturom [8-12-8-2] i [8-9-12-2] formirani su za predviđanje sadržaja i iskorišćenja Cu i Mo u koncentratu, respektivno. U svojstvu ulaznih parametara korišćen je čitav niz promenljivih, merodavnih za proces prečišćavanja koncentrata u flotacijskoj koloni. Prema izveštaju autora, ANN modeli su pokazali bolje performanse od modela zasnovanog na statističkim metodama [Nakhaei et al. (2012)]. Kao nastavak ovih istraživanja, Nakhaei i Irannajad su izvršili dodatno poređenje četiri modela koji predviđaju kvalitet i iskorišćenje bakra u koncentratu flotacijske kolone. To su modeli na bazi: klasičnog višeslojnog perceptrona (BPNN), neuronske mreže sa radijalnim baznim⁶ funkcijama (RBFNN), multivarijabilne linearne regresije (MLR) i multivarijabilne nelinearne regresije (MNLR) (tabela 1).

Tabela 1. Evaluacija različitih modela u predviđanju tehnoloških pokazatelja flotacijske koncentracije [Nakhaei and Irannajad (2013a)].

Model	Srednja kvadratna greška		Koeficijent korelacije, R	
	Sadržaj Cu u koncentratu	Iskorišćenje Cu u koncentratu	Sadržaj Cu u koncentratu	Iskorišćenje Cu u koncentratu
MLR	1,00	0,96	0,87	0,85
MNLR	0,98	1,09	0,9	0,86
BPNN	0,71	0,48	0,92	0,92
RBFNN	0,75	0,66	0,91	0,90

Razmatranjem performansi samih neuronskih mreža, ukazano je da RBFNN brže konvergira ka optimalnom rešenju, dok višeslojni perceptron ima veću tačnost predviđanja. U svakom slučaju, autori zaključuju da su se neuronske mreže ponovo pokazale kao superiornija tehnika u odnosu na statističke metode [Nakhaei and Irannajad (2013a)].

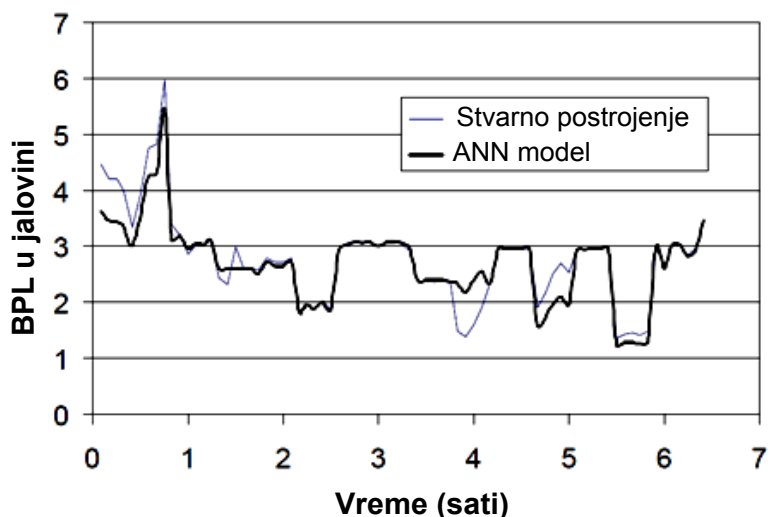
Do istog zaključka je došao i Jahedsaravani sa saradnicima, poredeći statističke (nelinearna regresija) i inteligentne (višeslojni perceptron i ANFIS) tehnike modelovanja procesa flotacijske koncentracije sulfidnih minerala bakra [Jahedsaravani

⁶ Realna funkcija čije vrednosti zavise samo od udaljenosti od koordinatnog početka

et al. (2016)]. Takođe, Massinaei i saradnici izveštavaju o većoj efikasnosti neuronskih mreža u odnosu na druge tipove modela, kada se radi o modelovanju zavisnosti tehnoloških pokazatelja procesa flotacije bakra od različitih procesnih parametara (sadržaj bakra u ulazu, doza reagenasa, granulostav sirovine i sl.) [Massinaei et al. (2014)].

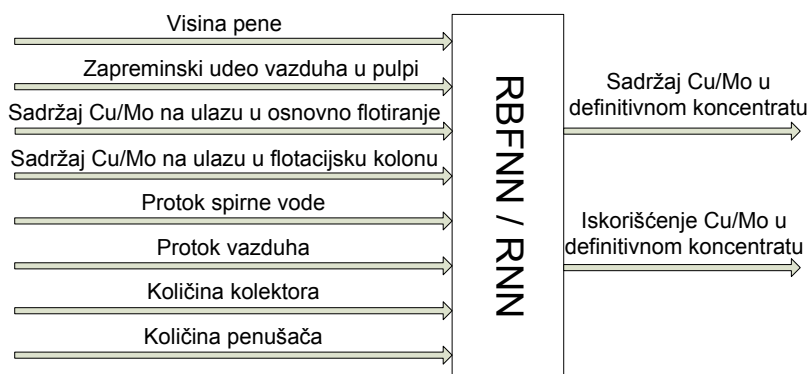
Çilek je opisao postupak formiranja ANN modela za predviđanje rezultata flotacijskog ciklusa sa promenljivim brojem stadijuma flotacije: grubo flotiranje, jednostepeno ili dvostepeno dopunsko flotiranje otoka grubog flotiranja i različit broj prečišćavanja (maksimalno pet). U postupku treniranja i testiranja ANN modela, kao ulazni skup podataka (nezavisno promenljive) korišćeni su podaci iz eksperimentalnog postupka, dok su kao izlazni skup podataka (zavisno promenljive) korišćeni rezultati dobijeni putem simulacija (pri čemu su u svojstvu izlaznih promenljivih posmatrana masena iskorišćenja koncentrata i jalovine i sadržaji bakra u koncentratu i jalovini). Autor je zaključio da se dobijeni model ne može koristiti za poboljšanje predviđanja stvarnih rezultata flotacijskog ciklusa, ali da se može uspešno upotrebiti u simulaciji različitih tipova flotacijskih ciklusa sa greškom manjom od 4% [Çilek (2002)].

Scheiner i saradnici su razvili šest različitih modela za simulaciju ciklusa flotacije fosfata među kojima je i model baziran na veštačkim neuronskim mrežama. Svi modeli su testirani na osnovu podataka dobijenih iz industrijske prakse flotiranja fosfata u Floridi, tj. izvršeno je poređenje stvarnih rezultata iz postrojenja i rezultata dobijenih prema svakom od modela. Autori su istakli da bez obzira na nesavršenosti, svi modeli imaju manji ili veći potencijal primene u kontrolnim sistemima [Scheiner et al. (1996)]. U nastavku istraživanja Karr i Scheiner su izvršili dodatnu evaluaciju ovih modela i zaključili da je model na bazi veštačke neuronske mreže (višeslojni perceptron) najadekvatniji za primenu u okviru optimizacionog adaptivnog kontrolnog sistema dizajniranog za postrojenje flotacijske koncentracije fosfata Swift Creek Mine, White Springs, Florida. Oni ističu kako robusna priroda i fleksibilnost ANN modela u kombinaciji sa tačnošću sa kojom neuronska mreža može da modeluje dato postrojenje čine ovaj model najpogodnijim i najefikasnijim u ovom slučaju. Shodno navedenom, autori tvrde da je model u stanju da vrlo precizno predvidi performanse flotacijskog postrojenja (izražene procentualnim učešćem trikalcijum fosfata (tzv. BPL vrednost) u jalovini) tokom šest i po sati rada, što je prikazano na slici 7 [Karr and Scheiner (2000)].



Slika 7. Poređenje performansi stvarnog rada flotacijskog postrojenja i performansi koje predviđa ANN model [Karr and Scheiner (2000)].

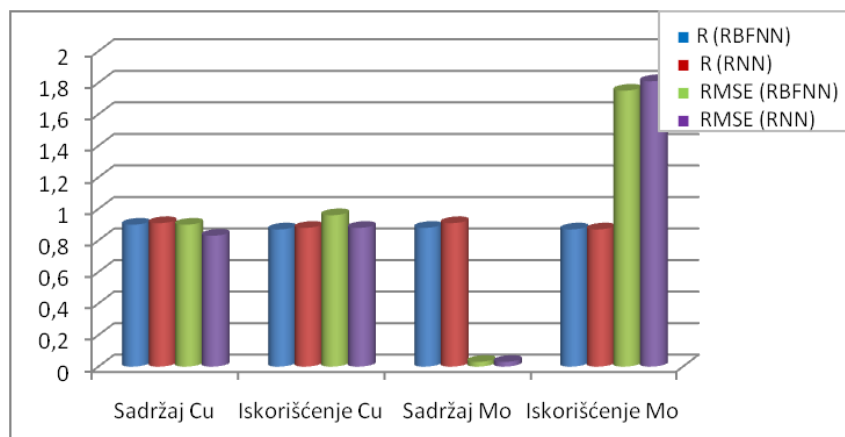
Još jedno istraživanje na temu mogućnosti predviđanja generalnih pokazatelja flotacijskog procesa sprovedli su Nakhaei i Irannajad. Ovo istraživanje je posebno interesantno, jer za razliku od dosadašnjih pomenutih istraživanja, ne uključuje višeslojni perceptron, već razmatra potencijal dve neuronske mreže čija je primena u modelovanju flotacijskih procesa (za sada) znatno ređa. To su neuronska mreža sa radijalnim baznim funkcijama (RBFNN) i rekurentna neuronska mreža (RNN). Uopšteni postupak modelovanja prikazan je na slici 8.



Slika 8. Opšti postupak modelovanja performansi flotacijske kolone. (Napomena: osnovno flotiranje se odvija u klasičnim mehaničkim ćelijama, dok se prvo prečišćavanje nakon domeljavanja odvija u flotacijskoj koloni. Koncentrat prvog prečišćavanja je definitivni koncentrat)[adaptirano prema Nakhaei and Irannajad (2013b)].

Prema ovim autorima, predloženi modeli su pokazali dobre sposobnosti predviđanja sadržaja i iskorišćenja Cu i Mo u definitivnom koncentratu dobijenom u

flotacijskoj koloni, a tačnost predviđanja je slična kod oba modela (slika 9). RBFNN mreža zahteva manje vreme izračunavanja nego RNN mreža, ali je osetljivija na dimenzionalnost problema (tj. na broj ulaznih promenljivih) [Nakhaei and Irannajad (2013b)].



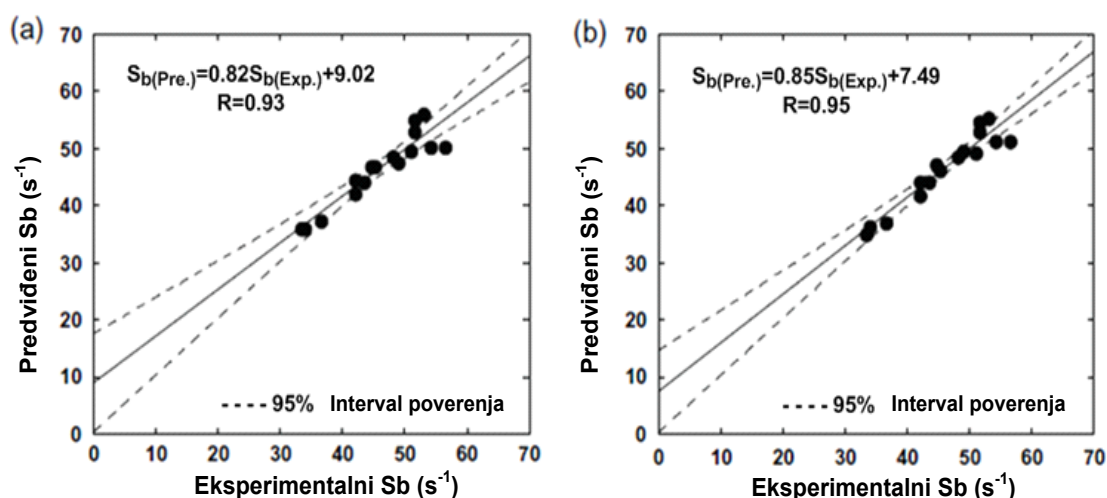
Slika 9. Evaluacija RBFNN i RNN modela. *R* – koeficijent korelacije; *RMSE* – koren srednje kvadratne greške [prilagođeno iz Nakhaei and Irannajad (2013b)].

Pored modela kojima se predviđaju iskorišćenje i kvalitet koncentrata kao tehnološki pokazatelji efikasnosti celokupnog procesa flotacije razvijeni su i modeli na bazi veštačkih neuronskih mreža koji opisuju određene flotacijske podsisteme, odnosno procesne parametre koji ne daju direktan uvid u efikasnost procesa, ali svakako imaju značajnog uticaja na istu. Na primer, Mohanty je razvio dinamički model na bazi višeslojnog perceptrona za predviđanje buduće vrednosti nivoa pulpe (izlazna promenljiva) u flotacijskoj koloni. Kao ulazne promenljive usvojene su dve prošle i jedna trenutna vrednost veličine otvora ventila za jalovinu kao i dve prošle i jedna trenutna vrednost nivoa pulpe. Za optimizaciju težina tokom treninga mreže korišćeni su metoda propagacije greške unazad i metoda konjugovanih gradijenata. Pokazano je da ovaj dinamički model dobro opisuje nelinearnost posmatranog sistema i da se može uspešno koristiti u okviru MPC strategije za kontrolu nivoa pulpe u flotacijskoj koloni, podešavanjem protoka jalovine [Mohanty (2009)].

Massinaei i Doostmohammadi su predložili ANN model (višeslojni perceptron) za predviđanje vrednosti površinskog fluksa vazдушnih mehurića (S_b – površina vazдушnih mehurića koja prođe kroz površinu poprečnog preseka flotacijske kolone u vremenu, $\frac{cm^2}{cm^2 \cdot s}$), uzimajući u obzir tri ulazne promenljive (gustinu pulpe, količinu

penušača i površinsku brzinu kretanja vazduha (zapreminski protok vazduha po jedinici poprečnog preseka flotacijske kolone u vremenu)).

Neuronska mreža (sa jednim skrivenim slojem) je formirana uzimajući u obzir skup podataka dobijenih u postupku koncentracije minerala bakra u flotacijskoj koloni. Autori su uporedili ovaj ANN model sa modelom razvijenim na bazi statističkih tehnika (nelinearna regresija) i došli do zaključka da ANN pristup nudi pouzdanije predviđanje rezultata od statističke metode (slika 10) [Massinaei and Doostmohammadi (2010)].



Slika 10. Poređenje rezultata primene (a) statističke i (b) ANN metode u predviđanju površinskog fluksa vazdušnih mehurića (S_b) [Massinaei and Doostmohammadi (2010)].

Modelovanjem podprocesa u flotacijskom sistemu uz pomoć veštačkih neuronskih mreža bavili su se i drugi autori. Bhunia i saradnici su predložili ANN model (sa 4 ulazne promenljive i jednim skrivenim slojem) za predviđanje vrednosti zapreminskog udela vazduha u pulpi tokom flotacije sfalerita. Autori izveštavaju da rezultati dobijeni pomoću neuronske mreže u dobroj meri odgovaraju eksperimentalnim rezultatima [Bhunia et al. (2014)]. Mogućnostima predviđanja vrednosti zapreminskog udela vazduha u pulpi flotacijske kolone posredstvom ANN modela bavili su se i Liu i saradnici [Liu et al. (2012)].

Dalje, Pérez i saradnici [Pérez et al. (1993)] su razvili model na bazi neuronskih mreža za procenu visine pene u flotacijskoj koloni, dok su Perez i del Villar [Perez and del Villar (1997)] ispitali vezu između količine spirne vode koja silazi kroz penu i profila provodljivosti, koristeći ANN model.

5.1.2 Primena veštačkih neuronskih mreža u sistemima kompjuterske vizuelizacije

Oblast u kojoj se veštačke neuronske mreže intenzivno koriste je identifikacija, kategorizacija i interpretacija slika flotacijske pene u okviru sistema koji koriste tehnike kompjuterske vizuelizacije. Aldrich i saradnici su u značajnom obimu diskutovali na ovu temu [Aldrich et al. (2010)].

Jedna od mogućnosti primene neuronskih mreža u okviru ove oblasti jeste ekstrakcija svojstava iz slika pene⁷. Prema Moolmanu i saradnicima višeslojni perceptron u formi autoasocijativne neuronske mreže predstavlja pogodno sredstvo za ekstrakciju statističkih karakteristika iz slika flotacijske pene [Moolman et al. (1995b)]. Estrada-Ruiz i Pérez-Garibay su predložili metodu za procenu srednjeg prečnika i raspodele mehurića na površini mineralizovane pene (flotacija sfalerita), koja se takođe zasnivala na primeni višeslojnog perceptrona [Estrada-Ruiz and Pérez-Garibay (2009)]. Ipak, Aldrich i saradnici tvrde da višeslojni perceptroni, uprkos popularnosti, nemaju veliku primenu u ekstrakciji svojstava iz slika flotacijske pene, navodeći da je jedan od razloga taj što su neuronske mreže sa velikim brojem skrivenih slojeva komplikovane za trening, te stoga ne mogu dati dosledne ili robusne rezultate [Aldrich et al. (2010)].

Uzimajući u obzir podatke iz dostupne literature, moguće je zaključiti da se u postupku ekstrakcije svojstava obično primenjuje neka druga metoda, a da se ekstrahovane veličine u vidu ulaznih promenljivih inkorporiraju u ANN model, koji zatim vrši klasifikaciju struktura pene ili predviđanje performansi flotacijskog procesa. Svaki ovakav pristup može se smatrati hibridnim modelovanjem procesa flotacije. Ipak, imajući u vidu obim i raznovrsnost istraživanja posvećenih ovoj metodologiji, kao i rastući svetski trend razvoja sistema mašinske vizuelizacije u flotacijskim postrojenjima, smatram da je prikladnije prikazati odgovarajući literaturni pregled u ovom delu teksta, a ne u poglavlju o hibridnim metodama (poglavlje 5.7).

Moolman i saradnici su utvrdili da se identifikacija i klasifikacija struktura flotacijske pene može ostvariti posredstvom LVQ⁸ neuronske mreže, pri čemu je

⁷Nešto više o svojstvima ekstrahovanim iz slika pene biće dato u poglavlju 6.4.3.1

⁸ Engl. LVQ – Learning vector quantization – Kvantizacija vektora učenja.

ekstrakcija svojstava izvršena pomoću GLCM⁹ algoritama [Moolman et al. (1995c)]. Kroz dalje istraživanje, isti autori su pokazali da je za klasifikaciju struktura flotacijske pene pogodna ne samo LVQ metoda (kao tip neuronske mreže čije se učenje nadgleda), već i samoorganizujuće mape¹⁰ (kod kojih se učenje ne nadgleda) [Moolman et al. (1995d), Aldrich et al. (1995)]. Kao dodatak, Aldrich i saradnici su ispitali (između ostalog) mogućnost klasifikacije struktura flotacijske pene pomoću višeslojnog perceptrona (u postrojenjima za flotaciju bakra i platine) i došli do zaključka da je neuronska mreža u stanju da izvrši klasifikaciju različitih struktura pene u najmanju ruku kao i ljudski ekspert [Aldrich et al. (1997)].

Poslednjih godina, sve je više istraživanja posvećeno matematičkom opisu korelacije između izgleda flotacijske pene i tehnoloških pokazatelja flotacijskog procesa. Jedan od kompjuterskih alata koji se koristi za tu svrhu je višeslojni perceptron. Na primer, Moolman i njegovi saradnici su ukazali na mogućnost dobijanja dobrih rezultata pri modelovanju zavisnosti između svojstava ekstrahovanih iz slika pene i performansi flotacijskog procesa koncentracije bakra i pirita u laboratorijskim uslovima, posredstvom ovog tipa neuronske mreže [Moolman et al. (1995a)].

Višeslojni perceptron se pokazao i kao pogodna tehnika za direktno predviđanje kvaliteta koncentrata platine na osnovu svojstava ekstrahovanih iz slika flotacijske pene [Marais and Aldrich (2011a,b)]. Deo rezultata ovih istraživanja prikazan je u tabeli 2.

Tabela 2. Performanse ANN modela za procenu iskorišćenja i kvaliteta koncentrata na osnovu svojstava iz slika pene [Marais and Aldrich (2011b)].

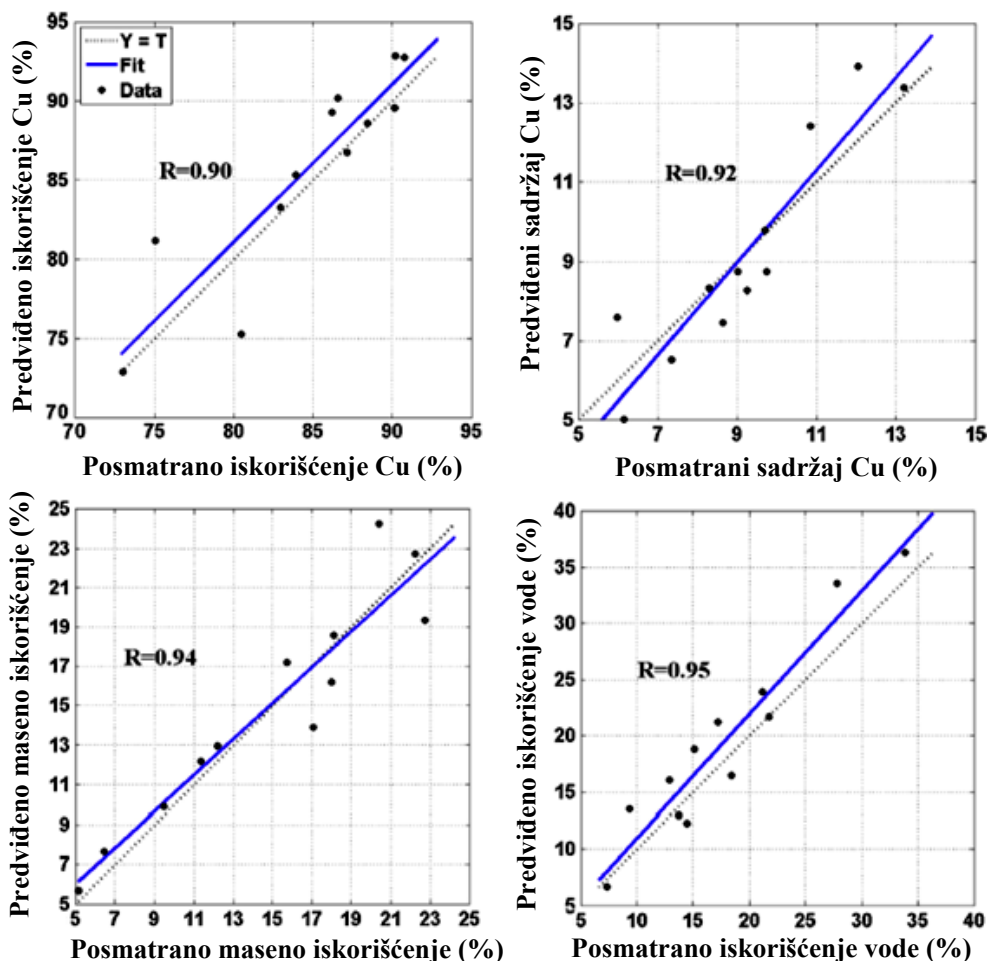
Struktura	Funkcija aktivacije skrivenog sloja	Funkcija aktivacije izlaznog sloja	R ² kvalitet	R ² iskorišćenje
MLP 3-8-2	Logistička	Logistička	0.884	0.882
MLP 3-3-2	Logistička	Logistička	0.881	0.877
MLP 3-7-2	Tangensna	Linearna	0.881	0.878

Poređenjem tri različite tehnike modelovanja procesa flotacijske koncentracije platinske grupe metala (višestruka linearna regresija, višeslojni perceptron i random forest klasifikacija – svaka u kombinaciji sa računarskom vizuelizacijom) Marais je

⁹ Engl. GLCM – Grey level co-occurrence matrix – Matrica združenog pojavljivanja nivoa sivog. U datom slučaju primenjena su dva algoritma koji razmatraju prostornu i susednu zavisnost između piksela.

¹⁰ Engl. SOM – Self-organizing map

ustanovila da višeslojni perceptron daje najbolje rezultate u predviđanju kvaliteta koncentrata [Marais (2010)].



Slika 11. Posmatrane i predviđene vrednosti performansi testnog skupa podataka [Jahedsaravani et al. (2014a)].

Jahedsaravani je sa saradnicima ispitao zavisnost između karakteristika pene i tehnoloških performansi diskontinualnog procesa flotacije sulfidnih minerala bakra. U tom cilju razvijena su četiri modela bazirana na višeslojnom perceptronu koji predviđaju tehnološko iskorišćenje bakra, kvalitet koncentrata bakra, maseno iskorišćenje koncentrata i iskorišćenje vode u koncentratu. Svaki od modela sadržao je po četiri ulazne promenljive, ekstrahovane iz slika flotacijske pene: veličinu mehurića, brzinu kretanja pene, boju pene i brzinu kolapsa mehurića. Na osnovu poređenja rezultata dobijenih u realnim ispitivanjima i pomoću modela autori izveštavaju da ANN modeli veoma dobro predviđaju performanse datog procesa, uz visoke vrednosti koeficijenta

korelacije (slika 11). Oni takođe ističu značaj ovakvih i sličnih ispitivanja koja mogu doprineti razvoju industrijskih kontrolnih sistema baziranih na kompjuterskoj vizuelizaciji [Jahedsaravani et al. (2014a)].

Istraživanjima koja uključuju primenu višeslojnog perceptrona za predviđanje tehnoloških pokazatelja flotacijske koncentracije na osnovu svojstava ekstrahovanih iz slika flotacijske pene bavili su se i drugi istraživači, kao na primer Hales i saradnici, Saghatoleslami i saradnici i Hosseini i saradnici – pri modelovanju procesa flotacije bakra; Wang i saradnici – pri modelovanju procesa flotacije gvožđa; odnosno Haiyang i saradnici – pri modelovanju procesa flotacije uglja [Hales et al. (1999), Saghatoleslami et al. (2004), Hosseini et al. (2015), Wang et al. (2014a), Haiyang et al. (2014)].

Pored višeslojnog perceptrona, za opis korelacije između izgleda flotacijske pene i performansi flotacijskog postrojenja predlagani su i drugi tipovi veštačkih neuronskih mreža, kao što je na primer, primena samoorganizujuće mape u modelovanju industrijskog procesa koncentracije PGM [Moolman et al. (1996a)].

5.1.3 Primena veštačkih neuronskih mreža pri modelovanju nekonvencionalnih procesa flotacije

Modelovanje pomoću veštačkih neuronskih mreža primenljivo je i kod nekonvencionalnih postupaka flotacije. Na primer, Pauck je detaljno opisao i ispitao mogućnosti korišćenja neuronskih mreža za predviđanje performansi procesa flotacije mastila prilikom reciklaže papira [Pauck (2011)]. Takođe, Labidi i saradnici su se bavili ispitivanjem uticaja različitih operativnih parametara na efikasnost procesa uklanjanja mastila postupkom flotacije. Kao ulazne veličine ANN modela autori su usvojili konzistenciju suspenzije, protok vazduha, brzinu obrtanja impelera i vreme flotiranja, dok su kao izlazne veličine posmatrali bistrinu pulpe i efektivnu koncentraciju rezidualnog mastila. Razmatrajući podatke dobijene laboratorijskim putem i podatke dobijene simulacijom uz pomoć ANN, autori izveštavaju da simulirane vrednosti prilično dobro odgovaraju eksperimentalnim rezultatima. Pored toga, oni tvrde da ANN model tačno reprodukuje sve uticaje operativnih promenljivih i da se može koristiti u simulaciji postrojenja za flotaciju mastila sa ciljem nalaženja optimalnih radnih uslova [Labidi et al. (2007)].

5.2 FAZI LOGIKA

Fazi logiku je u matematiku i inženjerstvo prvi uveo L.A. Zadeh sredinom 60-ih godina prošlog veka, kako bi objasnio određene tipove aproksimativnog rezonovanja koji se ne mogu objasniti klasičnim – oštrim (engl. crisp) metodama. U klasičnoj Bulovoj logici tačan iskaz ima vrednost 1, dok netačan ima vrednost 0. Fazi logika predstavlja nadskup (proširenje) Bulove logike u cilju održanja koncepta „delimične istine”, odnosno vrednosti iskaza između „potpuno tačno” i „potpuno netačno” (u opsegu od 0 do 1). Fazi logika se bazira na teoriji fazi skupova na sličan način kao što se klasična logika bazira na teoriji klasičnih skupova [Karray and De Silva (2004), Wong et al. (2002), Kostović and Gligorić (2014)].

Fazi skup je skup bez jasnih ili oštrih granica, odnosno bez binarnih karakteristika pripadnosti.

Neka je X skup koji sadrži svaki interesni skup u kontekstu date klase problema, ili tzv. univerzum diskursa, čiji su elementi označeni sa x . Fazi skup A u univerzumu diskursa X može se predstaviti Venovim dijagramom kao što je dato na slici 12a.

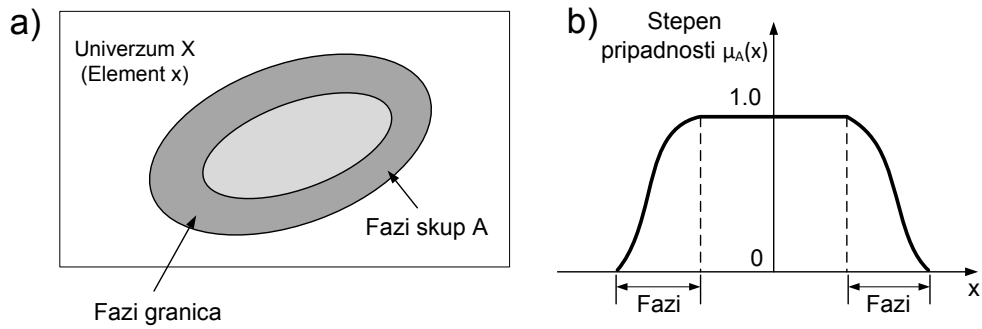
Funkcija pripadnosti $\mu_A(x)$ daje ocenu (stepen) mogućnosti da neki element x iz X pripada fazi skupu A . Funkcija pripadnosti elementima iz univerzuma diskursa dodeljuje numeričke vrednosti iz intervala $[0, 1]$. Odnosno,

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (11)$$

Drugim rečima, fazi skup A je skup uređenih parova:

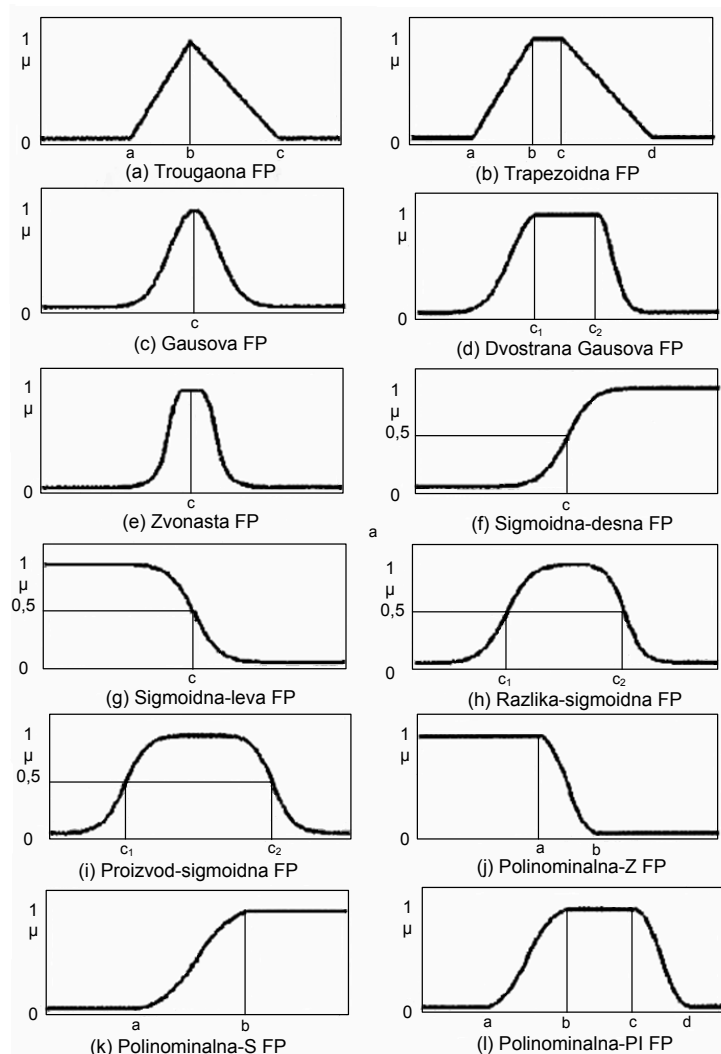
$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X, \mu_A(x) \in [0,1]\} \quad (12)$$

Što je $\mu_A(x)$ bliže jedinici, to dati element više pripada skupu A . Slično tome, što je $\mu_A(x)$ bliže nuli, dati element manje pripada skupu A . Tipična funkcija pripadnosti prikazana je na slici 12b.



Slika 12. Osnovni fazi logički pojmovi: (a) Venov dijagram fazi skupa; (b) Funkcija pripadnosti fazi skupu [Karray and De Silva (2004)].

U praksi se koriste različiti oblici funkcija pripadnosti (slika 13), a izbor oblika funkcije zavisiće od pogodnosti reprezentacije pripadnosti elementa datom skupu i opredeljenja istraživača.



Slika 13. Različiti tipovi funkcija pripadnosti [Zhao and Bose (2002)].

Operacije na fazi logičkim skupovima (kao što su presek, unija, komplement, itd.) kao i njihova svojstva definisani su na način koji odgovara fazi logici i fazi rezonovanju. Neke od važnih osobina fazi skupova sumirane su u tabeli 3.

Tabela 3. Neke osobine fazi skupova [Karray and De Silva (2004)]¹¹.

Osobina	Relacija
Komutativnost	$A \cap B = B \cap A$ $A \cup B = B \cup A$
Asocijativnost	$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$ $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$
Distributivnost	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
Asorptivnost	$A \cup (A \cap B) = A$ $A \cap (A \cup B) = A$
Idempotentnost	$A \cup A = A$ $A \cap A = A$
Ekskluzivnost: Zakon isključenja trećeg Zakon protivrečnosti	$A \cup A' \subset X$ $A \cap A' \supset \emptyset$
De Morganovi zakoni	$(A \cap B)' = A' \cup B'$ $(A \cup B)' = A' \cap B'$
Granični uslovi	$A \cup X = X$ $A \cap X = X$ $A \cup \emptyset = A$ $A \cap \emptyset = \emptyset$

Osnovni koncept praktične primene fazi logike je korišćenje lingvističkih varijabli, kao na primer, „nizak”, „srednji”, „visok”. Veza između ulaznih i izlaznih promenljivih se može opisati preko fazi AKO–TADA pravila gde su premisa i konsekvenca predstavljani u lingvističkoj formi [Wong et al. (2002)]. Na primer:

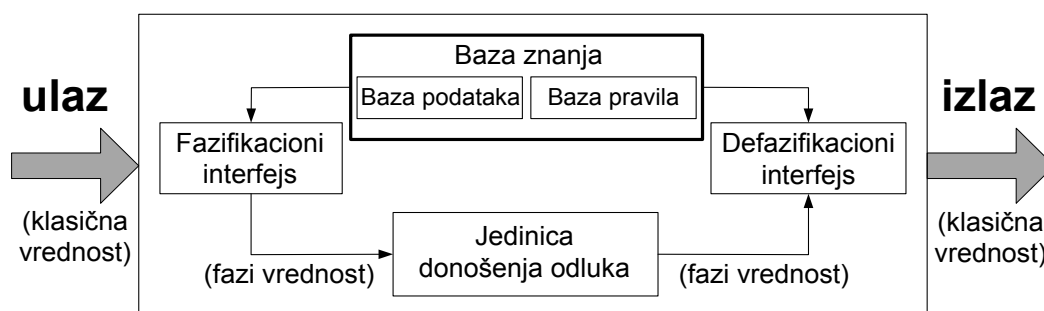
AKO je [sadržaj metala u rudi = visok] I [potrošnja kolektora = niska] $TADA$ je [iskorišćenje = nisko]

prvi deo premise
drugi deo premise
konsekvenca

Fazi modelovanje procesa odvija se prema principima fazi zaključivanja. Arhitektura fazi sistema zaključivanja prikazana je na slici 14 i obuhvata sledeće celine [Sivanandam et al. (2007)]:

¹¹Interesantno je napomenuti da zakoni ekskluzivnosti koji su zadovoljeni kada su u pitanju klasični skupovi, nisu zadovoljeni kada se radi o fuzzy skupovima. Konkretno, unija fuzzy skupa A i njegovog komplementa (tj. $A \cup A'$) nije jednaka domenu nego njegovom podskupu (tj. $\subset X$). Dalje, presek fuzzy skupa A i njegovog komplementa (tj. $A \cap A'$) nije prazan skup i može sadržati elemente čija vrednost pripadnosti nije jednaka nuli, tako da je $A \cap A' \supset \emptyset$.

1. *baza pravila* koja sadrži određeni broj fazi AKO–TADA (IF–THEN) pravila
2. *baza podataka* koja definiše funkcije pripadnosti koje se koriste u fazi pravilima
3. *mehanizam donošenja odluka* koji izvršava proceduru zaključivanja na osnovu pravila
4. *fazifikacioni interfejs* koji transformiše klasične ulazne veličine u fazi vrednosti
5. *defazifikacioni interfejs* koji transformiše izlazne fazi veličine u klasične vrednosti



Slika 14. Fazi sistem zaključivanja [Sivanandam et al. (2007)].

Postoji više sistema fazi zaključivanja od kojih se u praksi najčešće primenjuju dva: Mamdani i Takagi–Sugeno. Prema Mamdani sistemu, fazi zaključivanje podrazumeva sledeći niz koraka [Miljanović (2008b), Jain (2013)]:

1. **Fazifikacija ulaznih promenljivih.** Prvi korak je razmatranje ulaznih promenljivih i utvrđivanje njihovog stepena pripadnosti svakom od odgovarajućih fazi skupova, posredstvom funkcija pripadnosti. Fazifikacijom se ostvaruje tranzicija iz klasičnih numeričkih vrednosti u fazi vrednost. Izlaz je *fazi stepen pripadnosti* u kvalifikujućem lingvističkom skupu (uvek u intervalu između 0 i 1).
2. **Primena fazi operatora I/ILI (AND/OR) na formirane promenljive.** Kada je ulaz fazifikovan, poznat nam je stepen pripadnosti koji odgovara svakom delu premise, i to za svako pravilo. Fazi operator se primenjuje na pravila čija premisa sadrži više od jednog dela. Cilj je dobiti jedan broj (jednu istinitosnu vrednost) koji predstavlja ishod premise tog pravila. Dakle, ulaz u fazi operator čine dve ili više vrednosti pripadnosti iz fazifikovanih ulaznih promenljivih, a izlaz (rezultat premise) je *jedna istinitosna vrednost*. (Videti primer na slici 16 gde je primenjen AND (*minimum*) fazi operator).

3. **Implikacija.** Pre nego što se primeni metoda implikacije, mora se voditi računa o „težini” pravila. Svako pravilo ima težinu (broj između 0 i 1), koja se primenjuje na vrednost dobijenu iz premise. Generalno, uzima se da je težina pravila 1, tako da ista nema uticaja na proces implikacije. Međutim, moguće je, prema potrebi, promeniti relativnu težinu jednog pravila u odnosu na drugo, tako što će njegova težina biti različita od 1. Kada se odgovarajuće težine dodele svakom pravilu, pristupa se implementaciji metode implikacije.

Konsekvenca u pravilu je takođe fazi skup predstavljen funkcijom pripadnosti (određen u postupku fazifikacije). Primenom metode implikacije konsekvenca će biti *preoblikovana* pridruživanjem ishoda premise. U skladu sa navedenim, ulaz u proces implikacije je jedna istinitosna vrednost kao rezultat premise, dok je izlaz *fazi skup*. Implikacija se primenjuje za svako pravilo. (U primeru na slici 16 korišćena je *minimum* metoda implikacije koja kao rezultat daje „zarubljene” izlazne fazi skupove).

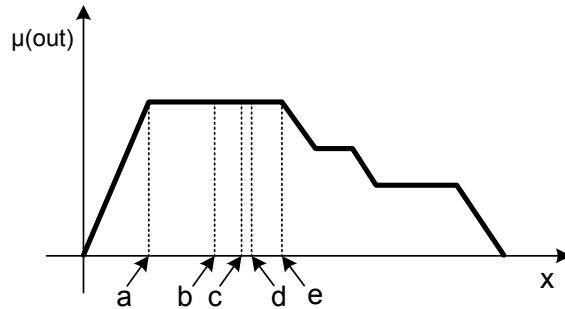
4. **Agregacija.** S obzirom da se odluka bazira na testiranju svih pravila u fazi sistemu zaključivanja, pravila se moraju kombinovati na određeni način da bi se došlo do odluke. Agregacija je proces u kome se fazi skupovi koji predstavljaju izlaze svakog pravila kombinuju u jedan fazi skup. Agregacija se radi samo jednom za svaku izlaznu promenljivu, neposredno pre petog i konačnog koraka, defazifikacije. Ulaz u proces agregacije je lista preoblikovanih izlaznih funkcija koje je izbacio proces implikacije za svako pravilo. Izlaz iz procesa agregacije je jedan *agregirani fazi skup* za svaku izlaznu promenljivu.

5. **Defazifikacija.** Ulaz u proces defazifikacije je fazi skup (agregirani izlazni fazi skup), a izlaz iz procesa je *klasičan broj*. Najčešće korišćen metod za defazifikaciju naziva se centar gravitacije ili izračunavanje centroida koji „vraća” centar oblasti ispod krive. Postoje i mnoge druge metode defazifikacije, kao što su bisektor oblasti, srednji od maksimuma, najmanji ili najveći od maksimuma, itd. (slika 15) [Miljanović (2008b), Jain (2013)].

Takagi–Sugeno sistem je po mnogo čemu sličan Mamdani sistemu. Glavna razlika između njih je u konsekvenci fazi pravila. Naime, tipično fazi pravilo kod Takagi–Sugeno sistema ima oblik:

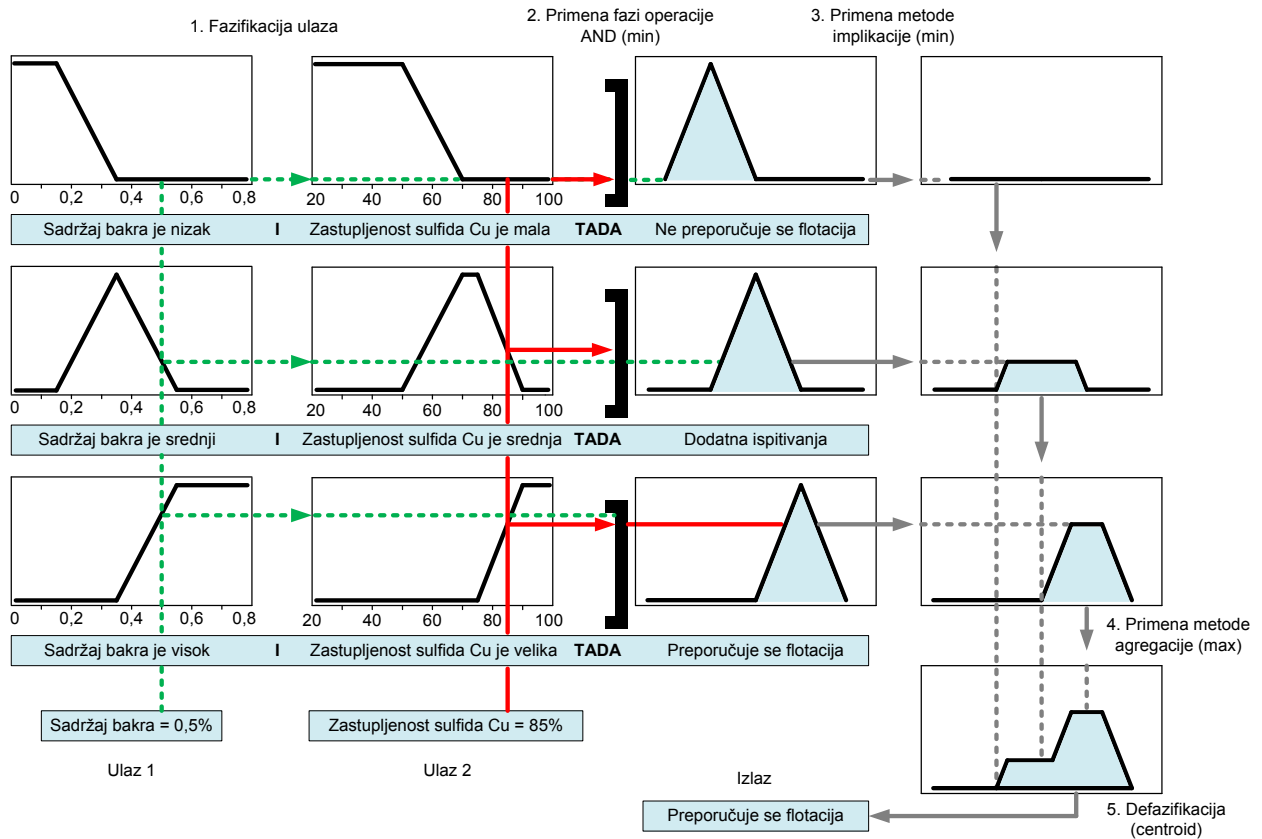
AKO [x je A] **I** [y je B] **TADA** je [Z = f(x,y)],

gde su A i B fazi skupovi u premisi, a Z = f(x,y) je klasična funkcija u konsekvenci.



Slika 15. Metode defazifikacije: a – najmanji od maksimuma; b – srednji od maksimuma; c – bisektor oblasti; d – centar gravitacije; e – najveći od maksimuma [adaptirano prema Mikkili and Panda (2014)].

Na slikama 16 i 17 prikazani su fazi procesi zaključivanja prema Mamdani i Takagi–Sugeno modelu, respektivno.

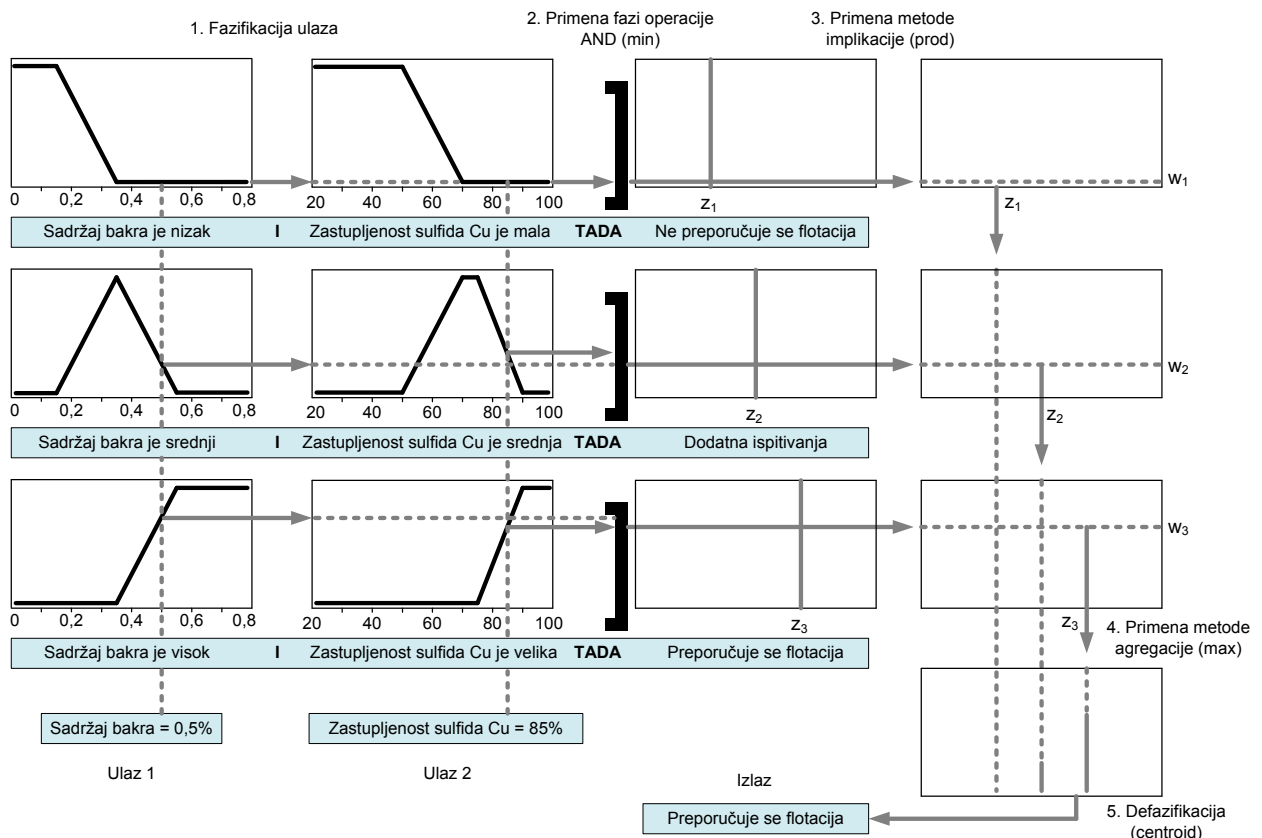


Slika 16. Proces fazi zaključivanja prema Mamdani modelu.

Mamdani sistem je široko prihvaćen među istraživačima za akumuliranje ekspertskog znanja. On omogućava opisivanje ekspertize na intuitivniji način koji je

blizak ljudskom poimanju. Međutim, Mamdani metoda zahteva obimna kompjuterska izračunavanja. S druge strane, Takagi–Sugeno sistem je računarski efikasan i funkcioniše dobro kada su u pitanju optimizacione i adaptivne tehnike, što ga čini veoma pogodnim za rešavanje upravljačkih problema, a naročito kad je reč o dinamičkim nelinearnim sistemima. Ove adaptivne tehnike mogu da se koriste za prilagođavanje funkcije pripadnosti, tako da fazi model na najbolji način opiše proces.

Kao što je već rečeno, osnovna razlika između ova dva sistema je način generisanja klasične izlazne veličine na osnovu fazi ulaznih veličina. Dok Mamdani sistem koristi metode defazifikacije fazi izlaza, Takagi–Sugeno sistem koristi težinske proseke za izračunavanje klasičnog izlaza. Snaga izražavanja i interpretacije Mamdani izlaza se gubi kod Takagi–Sugeno sistema, s obzirom da konsekvenca pravila nije fazi. Međutim, Takagi–Sugeno metod obezbeđuje siguran kontinuitet izlazne površi i ima prednost u pogledu vremena procesuiranja, jer je dugotrajan proces defazifikacije zamenjen težinskim prosekom.



Slika 17. Proces fazi zaključivanja prema Takagi–Sugeno modelu.

Zbog interpretabilne i intuitivne prirode baze pravila, Mamdani tip fazi sistema zaključivanja se široko primenjuje, naročito kod sistema za podršku odlučivanju. Ipak, Mamdani sistem je manje fleksibilan u dizajniranju kontrolnih sistema jer se Takagi–Sugeno sistem kasnije može integrisati u ANFIS alat (o kome će više reči biti u poglavlju 5.7) sa ciljem optimizacije izlaznih parametara [Kaur and Kaur (2012)].

Pored pomenuta dva, najčešće korišćena sistema fazi zaključivanja, biće ukratko reči i o Cukamoto sistemu fazi zaključivanja. Prema Cukamoto sistemu, konsekvencu svakog fazi AKO–TADA pravila je predstavljena fazi skupom sa monotonom funkcijom pripadnosti. Kao rezultat toga, izlaz svakog pravila je definisan numeričkom vrednošću koja je indukovana snagom svakog pravila. Iako prema ovom sistemu ne postoji potreba za defazifikacijom, za razliku od Mamdani i Takagi–Sugeno sistema, Cukamoto sistem se retko koristi usled svoje netransparentnosti [Castillo and Melin (2008)] i slabije softverske podrške.

5.2.1 Primena fazi logike u modelovanju flotacijskih procesa

Kako fazi logika podržava sposobnost ljudskog uma da efikasno izrazi način rezonovanja koji je radije aproksimativan nego egzaktan, ista predstavlja pogodan instrument za modelovanje kompleksnih i slabo definisanih sistema. Stoga nisu izostali pokušaji da se flotacijski procesi modeluju fazi logičkim pristupom, bilo da se radi o modelima koji se odnose na celokupni flotacijski sistem ili na određene podsisteme koji su njegov sastavni deo.

Jedan od modela na bazi Mamdani sistema fazi zaključivanja predložili su Carvalho i Durão. Model je razvijen u okviru kontrolnog sistema za stabilizaciju rada flotacijske kolone pri čemu je flotacijska kolona posmatrana kao dvofazni sistem koji se sastoji samo iz vazduha i vode. Kao kontrolisane promenljive ovi autori su usvojili: zapreminski udeo vazduha u zoni kolekcije (ϵ_c), visinu zone kolekcije (H) i količinu spirne vode koja silazi kroz penu (Q_B). Kao manipulirane promenljive usvojene su: protok vazduha (Q_A), količina spirne vode (Q_W) i protok materijala na izlazu iz kolone (Q_U) [Carvalho and Durão (1999)]. Baza fazi pravila je formirana na način koji je dat u tabeli 4.

Tabela 4. Baza pravila fazi sistema zaključivanja [adaptirano prema Carvalho and Durão (1999)].

Kontrolisane promenljive		Manipulisane promenljive	
AKO je	H nizak	TADA je	Q_U nizak
AKO je	H srednji I Q_B nizak	TADA je	Q_U visok
AKO je	H srednji I Q_B srednji	TADA je	Q_U srednji
AKO je	H srednji I Q_B visok	TADA je	Q_U nizak
AKO je	H visok	TADA je	Q_U visok
AKO je	H nizak	TADA je	Q_W visok
AKO je	H srednji	TADA je	Q_W srednji
AKO je	H visok	TADA je	Q_W nizak
AKO je	ε_c nizak	TADA je	Q_A visok
AKO je	ε_c srednji	TADA je	Q_A srednji
AKO je	ε_c visok	TADA je	Q_A nizak

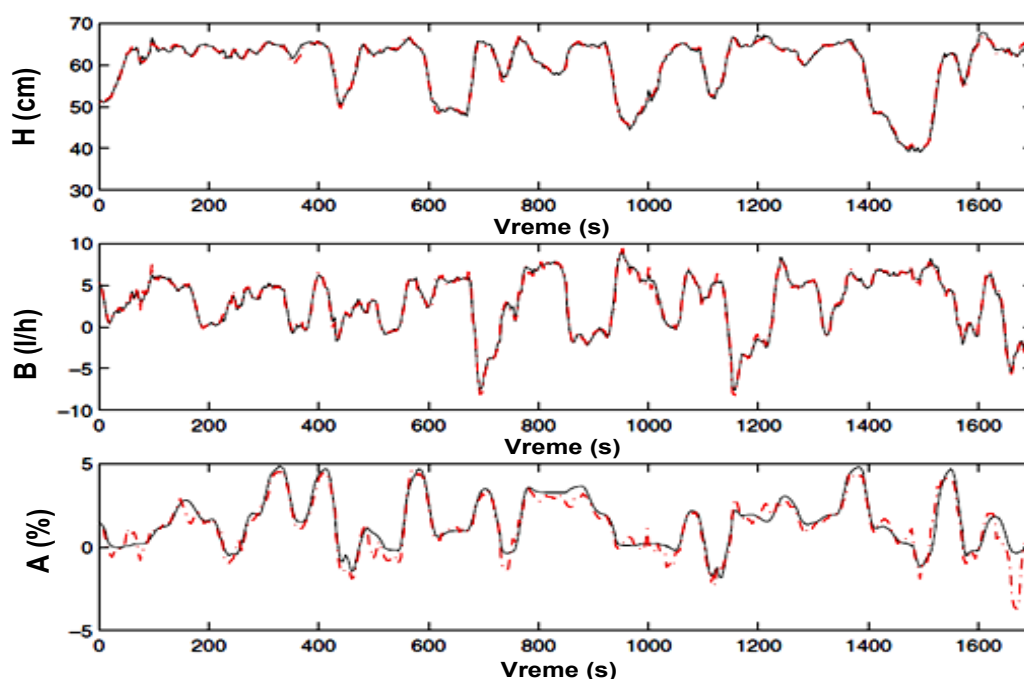
Tokom detaljnijih istraživanja, isti autori su potpunije opisali implementaciju ovog modela u kontrolnom sistemu poluindustrijskog flotacijskog postrojenja [Carvalho and Durão (2002)]. Na osnovu odziva kontrolisanih i manipulisanih promenljivih na različite poremećaje u radu flotacijske kolone oni su zaključili da kontroler baziran na fazi logičkim principima može biti rešenje za procesnu kontrolu datog sistema. Kao jednu od osnovnih prednosti primene fazi sistema zaključivanja naveli su lako razumevanje od strane procesnih inženjera [Carvalho and Durão (1999, 2002)]. Kroz još jedno istraživanje na istu temu ovi autori su poredili pet različitih baza fazi pravila: bazu pravila koja predstavlja ekvivalent klasičnoj kontrolnoj strategiji (tri nezavisne SISO¹² petlje); jednostavnu bazu sa 11 fazi pravila, predstavljenu u tabeli 4; dve složene baze pravila sa više lingvističkih opisa (svaka sadrži 81 pravilo) i bazu fazi pravila koja razmatra dinamičku kompenzaciju. Pri tom su u svakom od pet slučajeva razmatrane iste kontrolisane i manipulisane promenljive (tabela 4). Zaključeno je da dati kontrolni sistem pokazuje slične performanse, bilo da su u pitanju kompleksne baze fazi pravila ili jednostavna baza sa svega 11 pravila [Carvalho and Durão (2000)]. Ipak, minimizacija baze fazi pravila je kompleksan postupak i trebalo bi da obuhvati obimnija istraživanja.

Nešto skorije, Vieira i saradnici su predložili MIMO¹³ model za identifikaciju performansi flotacijske kolone koristeći tehniku fazi modelovanja. U svojstvu ulaznih parametara razmatrani su protoci spirne vode, vazduha, materijala na ulazu u kolonu i materijala na izlazu iz kolone, a u svojstvu izlaznih parametara: visina pene, količina

¹² SISO – single input/single output (engl.)

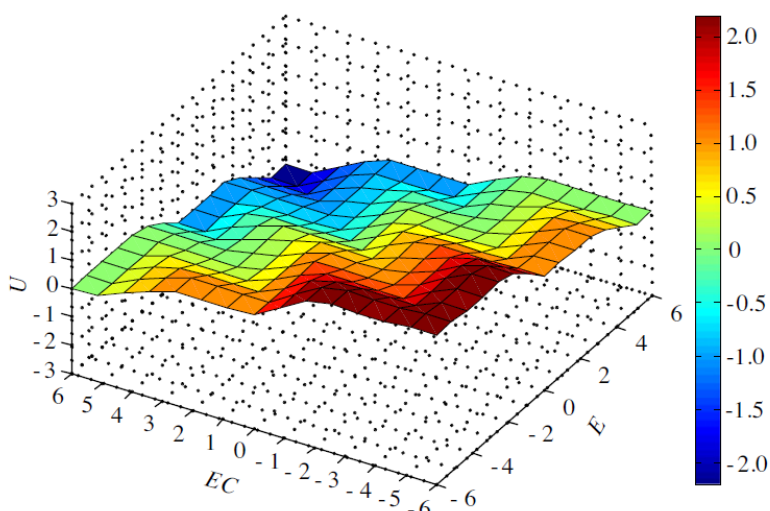
¹³ MIMO – multiple inputs/multiple outputs (engl.)

spirne vode koja silazi kroz penu i zapreminski udeo vazduha u zoni kolekcije. Tokom modelovanja primenjen je Takagi–Sugeno sistem zaključivanja, pri čemu je struktura modela određena korišćenjem definisanog kriterijuma regularnosti, a identifikacija fazi pravila izvršena primenom Gustafson–Kessel algoritma grupisanja. Na osnovu rezultata validacije modela, prikazanih na slici 18 zaključeno je da dati model veoma dobro opisuje promenu izlaznih parametara sistema [Vieira et al. (2005a)]. Detaljnija istraživanja na istu temu su takođe opisana i u drugim publikacijama ovih autora [Vieira et al. (2004, 2005b, 2005c, 2007)].



Slika 18. Validacija rezultata izlaznih parametara korišćenjem fazi logičkog pristupa modelovanja (crna kontinualna linija: izlaz modela; crvena isprekidana linija: izlaz sistema). Oznake na slici: *A* – zapreminski udeo vazduha u zoni kolekcije, *B* – količina spirne vode koja silazi kroz penu, *H* – visina pene [Vieira et al. (2005a)].

Liao i saradnici su kreirali fazi sistem zaključivanja u okviru sistema za kontrolu nivoa pulpe u flotacijskoj koloni. Poziciju ventila koji reguliše nivo pulpe (izlazna promenljiva, na slici 19 označena sa *U*) razmatrali su u zavisnosti od greške između referentnog i izmerenog nivoa pulpe i brzine promene te greške (ulazne promenljive, na slici 19 označene sa *E* i *EC*, respektivno). Pet lingvističkih atributa koji karakterišu ove promenljive u bazi fazi pravila su: negativna velika (*NB*), negativna mala (*NS*), nula (*ZR*), pozitivna mala (*PS*), pozitivna velika (*PB*) (tabela 5). Izlazna površina ovog fazi sistema zaključivanja prikazana je na slici 19 [Liao et al. (2011)].

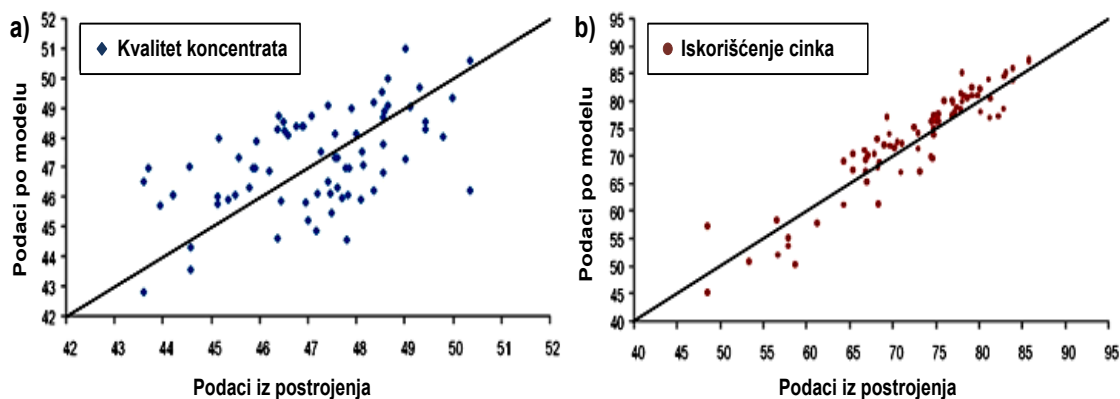


Slika 19. Izlazna površina fazi sistema zaključivanja [Liao et al. (2011)].

Tabela 5. Baza fazi pravila [Liao et al. (2011)].

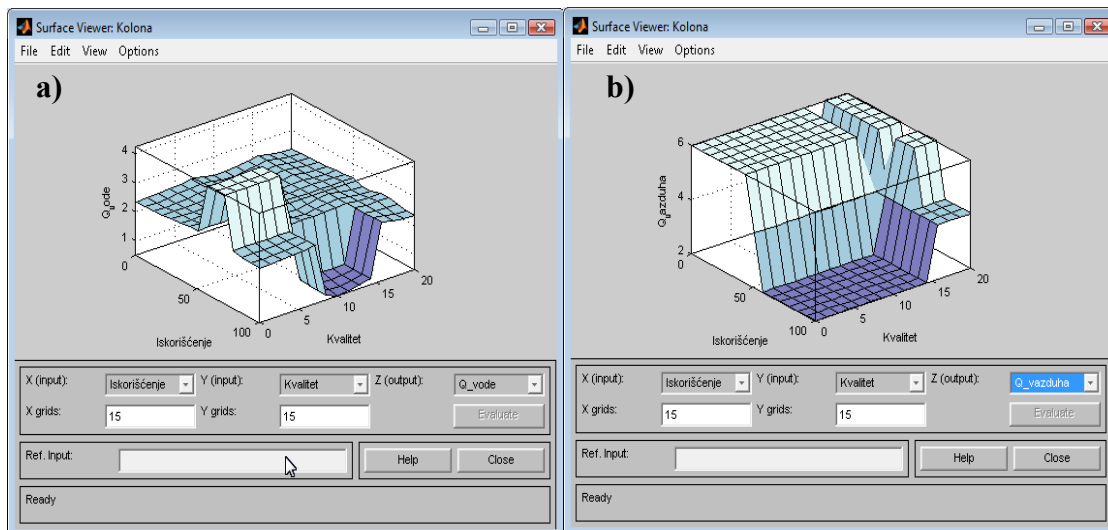
Pozicija ventila		Greška između referentnog i izmerenog nivoa pulpe				
		NB	NS	ZR	PS	PB
Promena greške	NB	PB	PB	PS	PS	ZR
	NS	PB	PS	PS	ZR	ZR
	ZR	PS	PS	ZR	ZR	NS
	PS	PS	ZR	ZR	NS	NS
	PB	ZR	ZR	NS	NS	NB

Dosadašnji pomenuti fazi modeli odnosili su se na procenu parametara koji karakterišu određene podsisteme u flotacijskim sistemima, kao što su nivo pulpe, zapreminski udeo vazduha u pulpi i slično. Međutim, analogno neuronskim mrežama, postoje fazi logički modeli kojima se flotacijski procesi interpretiraju u celini, preko sadržaja i iskorišćenja korisne komponente u koncentratu i jalovini. Jedan od takvih modela razvio je Miljanović. On je prikazao fazi logički model procesa flotacije cinka u okviru procesa koncentracije Pb-Zn rude u rudniku „Rudnik”, Srbija. Iskorišćenje i kvalitet koncentrata cinka posmatrani su u zavisnosti od: sadržaja cinka u ulaznoj rudi, potrošnje kolektora KAX, potrošnje aktivatora CuSO_4 i pH pulpe. Finoća mlevenja, gustina pulpe i vreme flotiranja smatrani su konstantnim. Rezultati dobijeni pomoću modela upoređeni su sa stvarnim rezultatima iz postrojenja (slika 20). Vizuelno se može primetiti da podaci predviđeni modelom u velikoj meri odgovaraju stvarnim podacima [Miljanović (2008a)].



Slika 20. Poređenje podataka dobijenih modelom i stvarnih podataka iz flotacijskog postrojenja rudnika „Rudnik”: (a) kvalitet koncentrata cinka; (b) iskorišćenje Zn u koncentratu [adaptirano prema Miljanović (2008a)].

Isti autor je razvio teorijski fazi logički model procesa flotiranja u flotacijskoj koloni. Kao ulazne promenljive u obzir su uzeti kvalitet koncentrata i iskorišćenje korisne komponente, dok su kao izlazne promenljive razmatrane količine vazduha i spirne vode. Tokom modelovanja primenjena je Mamdani metoda zaključivanja, a rezultati su prikazani na slici 21 [Miljanović (2008b)].

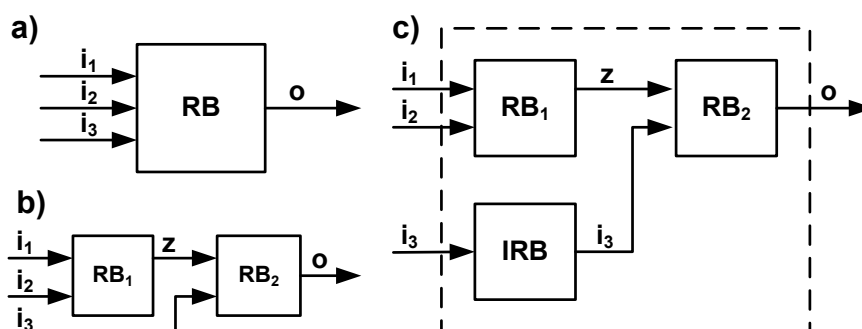


Slika 21. Grafički prikaz preslikavanja vrednosti iskorišćenja i kvaliteta koncentrata na: (a) količinu spirne vode u flotacijskoj koloni; (b) količinu vazduha u flotacijskoj koloni [adaptirano prema Miljanović (2008b)].

Osim toga, Hirajima i saradnici su primenili fazi logičke principe modelovanja u okviru sistema za kontrolu kvaliteta koncentrata cinka u procesu prečišćavanja u flotacijskoj koloni. Baza pravila formirana je u saradnji sa operaterima u flotacijskom

postrojenju rudnika Toyoha Mines, pri čemu je kvalitet koncentrata regulisan podešavanjem protoka vazduha. Autori tvrde da se uz pomoć fazi regulatora ostvaruju veće i stabilnije vrednosti sadržaja cinka u koncentratu [Hirajima et al. (1996)].

Jahedsaravani i saradnici su razvili fazi logički model koji simulira vezu između procesnih uslova (tj. brzina kretanja vazduha, procentualni sadržaj čvrstog u pulpi, doza penušača i tip penušača) i tehnoloških parametara procesa (kvalitet i iskorišćenje) tokom flotacije bakra u industrijskoj flotacijskoj koloni. Ovaj model je inkorporiran u inteligentni sistem za kontrolu procesa flotacije. Rezultati simulacije su pokazali da je ovakav sistem u stanju da održi performanse procesa na željenim vrednostima tokom prihvatljivog vremenskog perioda [Jahedsaravani et al. (2014b)]. S druge strane, Gonzalez i saradnici su prikazali nekoliko različitih vrsta modela za predviđanje kvaliteta koncentrata osnovnog flotiranja bakra u mehaničkim flotacijskim ćelijama, među kojima su i modeli zasnovani na principima fazi logičkog zaključivanja [Gonzalez et al. (2003)].



Slika 22. Blok šeme različitih fazi modela: (a) Model sa jednom bazom pravila; (b) Model sa višestrukim bazama pravila; (c) Model sa umreženim bazama pravila. Oznake na slici: i – ulazna veličina; o , z – izlazna veličina; RB – baza pravila [adaptirano prema Gegov et al. (2010)].

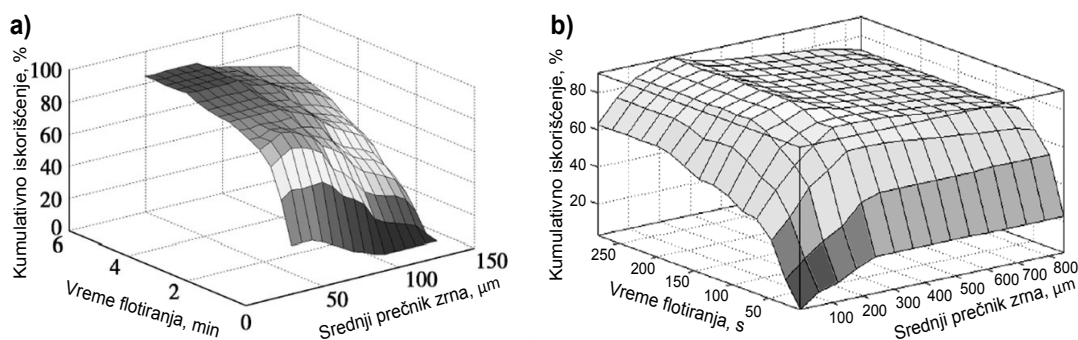
Kroz sasvim drugačiji pristup, Gegov i saradnici su poredili tri teorijska fazi modela različite strukture koji opisuju performanse procesa flotacije bakra i gvožđa. Prvi fazi model razmatran je kao klasičan fazi sistem zaključivanja sa jednom bazom pravila. Drugi model je struktuiran kao hijerarhijski fazi sistem, baziran na inferencijalnoj kompoziciji dve interaktivne baze pravila. Treći, hibridni model, sadržao je tri umrežene baze fazi pravila (slika 22). Evaluacija modela je izvršena prema srednjoj apsolutnoj procentualnoj greški i ukupnom indeksu transparentnosti. Prvi model se pokazao kao najefikasniji u pogledu preciznosti, dok su druga dva modela znatno bolja kada je u pitanju transparentnost [Gegov et al. (2010)]. Detaljnija

istraživanja na ovu temu prikazana su u radu Gegova i saradnika, novijeg datuma [Gegov et al. (2011)].

Pojedina istraživanja ukazuju na mogućnost efikasne primene fazi logičkog modelovanja u studijama vezanim za kinetiku procesa flotacije. Na primer, Li i saradnici su ispitali uticaj veličine čestica na kinetiku flotacije galenita u laboratorijskim uslovima. U tom cilju razvili su fazi logički sistem zaključivanja gde su veličina čestica i vreme flotiranja tretirani kao ulazne promenljive, dok je kumulativno iskorišćenje galenita posmatrano kao izlazna promenljiva [Li et al. (2012)]. Uzimajući u obzir iste ulazne i izlazne promenljive, Abkhoshk i saradnici su na sličan način ispitali uticaj veličine čestica na kinetiku flotacije uglja [Abkhoshk et al. (2010)]. Rezultati simulacije procesa u ovim istraživanjima (slika 23) pokazali su dobru korelaciju sa stvarnim iskorišćenjima, pri čemu su koeficijenti determinacije (R^2) prikazani u tabeli 6.

Tabela 6. Analiza simulacije rezultata kinetike flotacije.

Flotacija galenita [Li et al. (2012)]		Flotacija uglja [Abkhoshk et al. (2010)]	
Srednji prečnik čestice [μm]	Koeficijent determinacije	Srednji prečnik čestice [μm]	Koeficijent determinacije
34	0,984	37,5	0,9864
46	0,981	112,5	0,993
64	0,981	225	0,9831
87	0,993	400	0,9775
112,5	0,988	675	0,9726



Slika 23. Rezultati simulacije procesa flotacije na bazi fazi logičkog sistema zaključivanja: (a) flotacija galenita; (b) flotacija uglja [adaptirano prema Li et al (2012), Abkhoshk et al (2010)].

Primeri fazi logičkog modelovanja sreću se i kod nekonvencionalnih postupaka flotacije. Tako su Liu i saradnici opisali sistem za kontrolu nivoa pulpe i bistrine pulpe u procesu flotacije mastila. Model u okviru sistema zasnovan je na metodologiji fazi logičkog zaključivanja [Liu et al. (2006)].

5.3 GENETSKI ALGORITMI

Genetski algoritmi su heuristička metoda optimizacije koja rešava određene računarske probleme simulirajući neke od mehanizama prirodne evolucije. Za razliku od većine determinističkih algoritama, karakteristika genetskih algoritama je da započinju pretragu za optimalnim rešenjem od niza mogućih rešenja koja predstavljaju početnu populaciju genetskog algoritma. [Borak (2009)].

U prvoj fazi kreiranja genetskog algoritma donosi se odluka o genetskoj reprezentaciji mogućeg rešenja datog problema. Ovo uključuje definisanje jedinki i njihovo pridruživanje mogućim rešenjima. Osnovna ideja je da se svaka jedinka potencijalnog rešenja predstavi kao niz stringova, odnosno *hromozom*. Svaki string u hromozomu naziva se *gen*, a pozicija nekog gena *lokus*. Vrednost koju gen može imati naziva se *alela*. [Karray and De Silva (2004), Borak (2009)].

Za reprezentaciju rešenja obično se koristi binarni prikaz, tj. jedinka se predstavlja nizom binarnih cifara. Dužina ovog niza zavisi od konkretne primene. Pri tom svaki gen može imati dve moguće alele 0 i 1. Ponekad je, međutim, bolje i jednostavnije koristiti realne ili prirodne brojeve. Osim toga, u cilju prirodnijeg načina opisivanja i manipulisanja sa rešenjem, u praksi se, radi testiranja i upoređivanja, može desiti da se koristi više različitih reprezentacija odjednom [Borak (2009), Mitchell (1998)].

Genetski algoritmi, kao i svaka druga metoda optimizacije, zahtevaju neku kvantitativnu meru kvaliteta, tj. ispravnosti predloženog rešenja. Ova mera se naziva dobrota ili *prilagođenost* (engl. fitness) i govori o tome koliko je neko rešenje dobro. Prilagođenost se određuje fitness funkcijom, koja se još naziva funkcija cilja, i ista zavisi od problema koji se rešava [Borak (2009)].

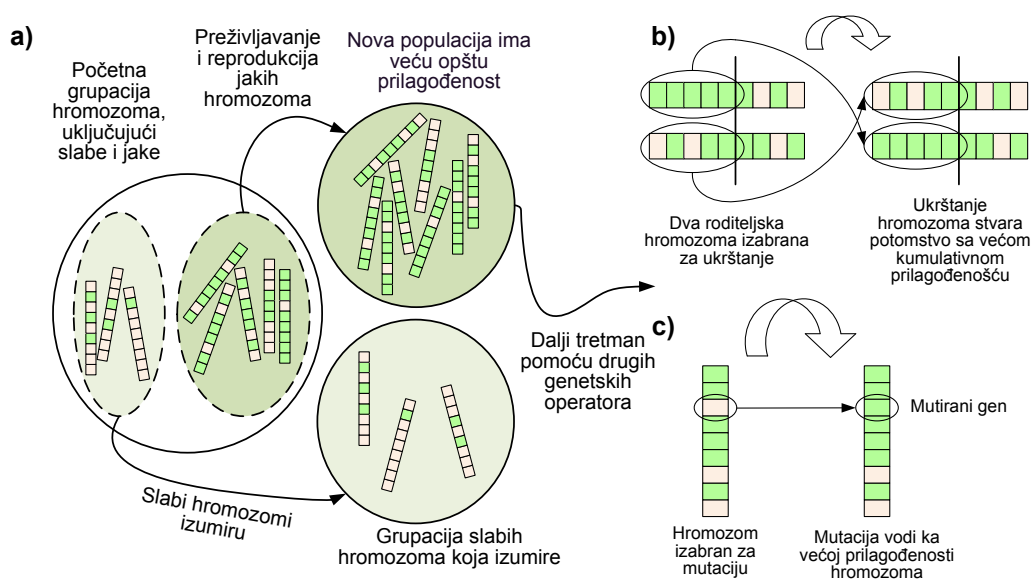
Najjednostavniji oblik genetskog algoritma uključuje tri tipa operatora: selekciju, ukrštanje (u jednoj tački) i mutaciju [Mitchell (1998)].

Selekcija (engl. selection) je odabir jedinki koje stvaraju potomstvo. Na taj način se čuvaju i prenose dobra svojstva (dobri geni) na sledeću generaciju jedinki, dok se lošija svojstva odbacuju. Funkcija cilja predstavlja ključ procesa selekcije određujući koje će se jedinke eliminisati, a koje će ostati u populaciji. Obično, što je prilagođenost jedinke veća, to jedinka ima veću verovatnoću preživljavanja. Obrnuto, jedinke s malom

prilagođenošću imaju i malu verovatnoću preživljavanja [Borak (2009)]. Primer postupka selekcije u genetskim algoritmima prikazan je na slici 24a.

Ukrštanje (engl. crossover) je osnovni operator genetskog algoritma koji omogućava stvaranje novih jedinki. Ukrštanje predstavlja razmenu genetskog materijala između dve jedinke pri čemu nastaju dva potomka koji imaju kombinovane informacije sadržane u roditeljima. Postoji više načina ukrštanja definisanih u proizvoljnom broju prekidnih tačaka. Primer najjednostavnije operacije ukrštanja u jednoj tački dat je na slici 24b.

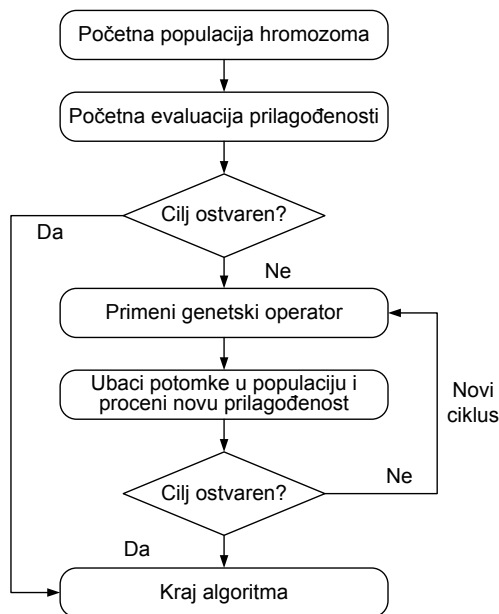
Mutacija (engl. mutation) je operator genetskog algoritma čijim delovanjem se vrši izmena slučajno izabranih gena jedinke. S obzirom da deluje nad samo jednom jedinkom, mutacija predstavlja unarni operator koji kao rezultat daje izmenjenu jedinku. Mutacijom se omogućava vraćanje korisnog genetskog materijala koji je izgubljen u selekciji i ukrštanju. Primer operacije mutacije prikazan je na slici 24c.



Slika 24. Ilustracije operatora genetskog algoritma: (a) selekcija (što je izrazitija zelena boja hromozoma, viša je fitness vrednost); (b) ukrštanje; (c) mutacija [adaptirano prema Karray and De Silva (2004)].

Klasičan genetski algoritam, kao što je već rečeno, započinje rad sa potpuno slučajno odabranom populacijom rešenja. Iterativno, biraju se parovi koji imaju veću sklonost ka jačim jedinkama u populaciji. Ovi parovi proizvode potomstvo koje je ili identično roditeljima ili je nasledilo deo svojih osobina od svakog roditelja. Potomci se podvrgavaju mutaciji, što može i ne mora nasumično promeniti njihov genetski sklop.

Celokupni proces se zatim ponavlja na potomcima, čime se formira serija generacija [Karray and De Silva (2004)]. Šematski prikaz genetskog algoritma dat je na slici 25.



Slika 25. Šematski prikaz genetskog algoritma [Karray and De Silva (2004)].

5.3.1 Primena genetskih algoritama u modelovanju flotacijskih procesa

Na polju modelovanja flotacijskih sistema genetski algoritmi se, kao samostalna metoda, najviše koriste za optimizaciju konfiguracije flotacijskog ciklusa. Prema Pirouzanu i saradnicima u projektovanju flotacijskih postrojenja se obično primenjuju iskustvena pravila ili znanje eksperta koji za rezultat mogu imati rad postrojenja van svog optimalnog režima. S obzirom na sposobnosti genetskih algoritama da pronađu optimalno rešenje u veoma kompleksnom prostoru pretrage, isti bi mogli biti pogodna tehnika za određivanje željenog rasporeda tokova materijala u flotacijskom postrojenju. Oni ističu da su tehnološki parametri kao što su iskorišćenje i kvalitet koncentrata prikladni za korišćenje u svojstvu fitnes funkcija genetskih algoritama [Pirouzan et al. (2014)].

U istraživanju koje su sproveli Guria i saradnici razvijen je elitistički NSGA-II-mJG¹⁴ algoritam koji je primenjen za optimizaciju konfiguracije sistema od dve

¹⁴ Engl. NSGA-II-mJG – Non-dominated sorting genetic algorithm with the modified jumping gene operator

flotacijske ćelije. Prema ovim autorima, NSGA-II-mJG algoritam daje bolja rešenja u poređenju sa NSGA-II i NSGA-II-JG algoritmima kada je u pitanju relativno jednostavan problem optimizacije flotacijskog ciklusa koji uključuje dve grupe mineralnih zrna, dve flotacijske ćelije i jednokriterijumsku optimizaciju (maksimizacija masenog iskorišćenja koncentrata uz uslov da kvalitet koncentrata (izražen u vidu masenog udela korisnog minerala u koncentratu) iznosi 75%, a ukupna zapremina ćelija 0,5663 m³). Svaka grupa mineralnih zrna definisana je na osnovu njihove konstante brzine flotacije (k), tako da zrna u okviru iste grupe imaju različit hemijski sastav i različitu krupnoću, ali istu konstantu k [Guria et al. (2005a)].

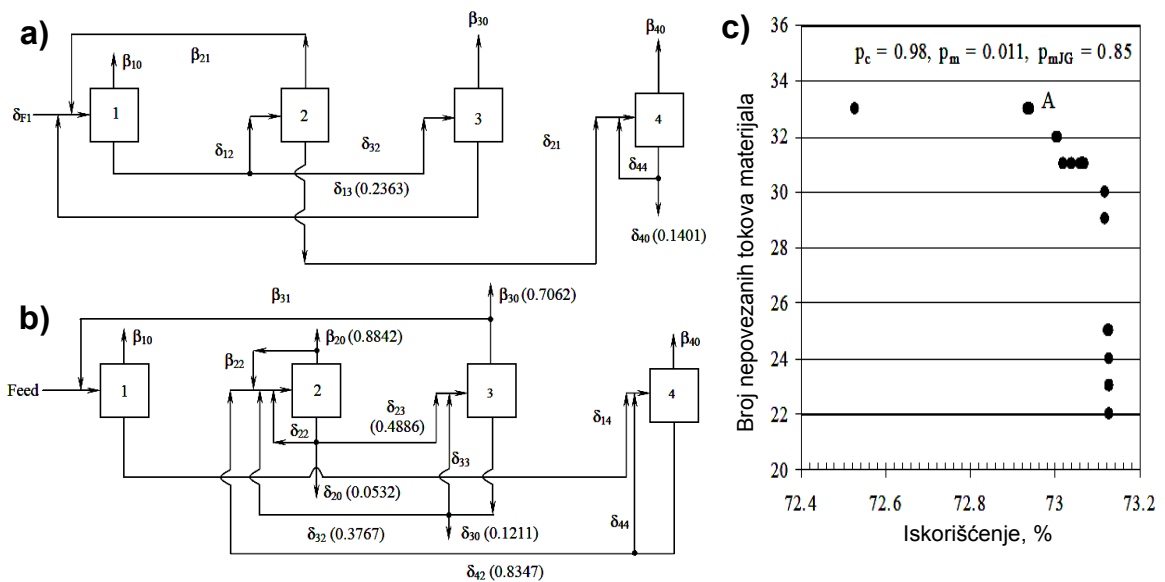
U daljem istraživanju na ovu temu, Guria i saradnici su detaljnije ispitali mogućnosti optimizacije flotacijskih ciklusa uz pomoć NSGA-II-mJG algoritma. Oni su naveli neke prednosti genetskih algoritama u odnosu na tradicionalne tehnike optimizacije ističući pri tom da primena tradicionalnih tehnika često vodi ka rešenjima koja konvergiraju ka lokalnim optimumima, za razliku od NSGA-II-mJG algoritma čija primena brzo dovodi do globalnih optimalnih rešenja. Prilikom ovog istraživanja autori su pošli od generalne šeme da se ulazni materijal može usmeriti u bilo koju od ćelija, kao i da se izlazni materijal iz svake ćelije (koncentrat i jalovina) može smatrati finalnim proizvodom ili usmeriti u bilo koju od flotacijskih ćelija. U skladu s tim, razmatrali su nekoliko slučajeva jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije ciklusa sa različitim brojem flotacijskih ćelija, mineralnih grupa (definisanih na bazi konstante brzine flotacije) i ograničenja (videti tabelu 7). Kao odlučujuće promenljive usvojeni su frakcioni protoci materijala u/iz svake ćelije i srednje vreme zadržavanja materijala u ćelijama.

Jednokriterijumska optimizacija je kao rezultate dala optimalno rešenje za svaki pojedinačni slučaj, dok su prilikom višekriterijumske optimizacije dobijeni skupovi Pareto optimalnih (nedominantnih) rešenja. Na slici 26 prikazana su rešenja koja odgovaraju problemima 2 i 2A iz tabele 7. Autori su izvršili poređenje rezultata dobijenih primenom genetskih algoritama i tradicionalnih metoda i došli do zaključka da NSGA-II-mJG algoritam daje bolja rešenja u svim posmatranim slučajevima [Guria et al. (2005b)].

Tabela 7. Neki od primenjenih uslova prilikom optimizacije konfiguracije flotacijskih ciklusa [adaptirano prema Guria et al. (2005b)].

Problem br.	Broj flotacijskih ćelija	Broj mineralnih grupa	Funkcija cilja		Ograničenja ^{a)}
			Max f_1	Max f_2	
1	2	2	M_C	/	$G_d = 35\%$ $V_d = 0,5663 \text{ m}^3$
2	4	3	M_C	/	$G_d = 35\%$ $V_d = 2,2651 \text{ m}^3$
2A	4	3	M_C	N^*	$G_d = 35\%$ $V_d = 2,2651 \text{ m}^3$
3	2	2	C_P	/	$V_d = 0,5663 \text{ m}^3$
3A	2	2	C_P	N^*	$V_d = 0,5663 \text{ m}^3$
4	3	3	R	/	$L_d(\text{Ni}) = 20\%$ $5,0\% \leq T_{Li}(\text{Ni}) \leq 150,0\%$
4A	3	3	R	N^*	$L_d(\text{Ni}) = 20\%$ $5,0\% \leq T_{Li}(\text{Ni}) \leq 150,0\%$
4B	3	3	S	N^*	$L_d(\text{Ni}) = 20\%$ $5,0\% \leq T_{Li}(\text{Ni}) \leq 150,0\%$

^{a)}Značenje simbola u tabeli 7: M_C – maseno iskorišćenje koncentrata [%]; C_P – funkcija profita [currency unit]; R – iskorišćenje nikla [%]; S – količina čvrstog u ciklusu [kg]; N^* – broj nepovezanih tokova materijala (sa protokom jednakim nuli) u ciklusu; G_d – kvalitet koncentrata; V_d – zapremina ćelija; $L_d(\text{Ni})$ – gubitak nikla u jalovini u odnosu na ulaz; $T_{Li}(\text{Ni})$ – protok nikla u jalovini i -te ćelije u odnosu na ulaz, gde je $i = 1, 2, \dots, m$, m – broj flotacijskih ćelija.



Slika 26. Rezultati optimizacije flotacijskog ciklusa sa 4 flotacijske ćelije i 3 mineralne grupe: (a) optimalni ciklus dobijen metodom višekriterijumske optimizacije; (b) optimalni ciklus dobijen metodom jednokriterijumske optimizacije; (c) skup Pareto optimalnih rešenja. Značenje simbola: β_{ij} – deo koncentrata koji se iz ćelije i transportuje u ćeliju j ; δ_{ij} – deo jalovine koja se iz ćelije i transportuje u ćeliju j ; p_c – verovatnoća ukrštanja; p_m – verovatnoća mutacije; p_{mJG} – verovatnoća transpozicije mJG operatora; A – poželjno rešenje [adaptirano prema Guria et al. (2005b)].

Kroz još detaljnije istraživanje isti autori su razmatrali veći broj kompleksnijih problema jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije konfiguracije flotacijskih ciklusa primenjujući NSGA-II-mJG algoritam. S obzirom da se kao rezultat višekriterijumske optimizacije dobijaju skupovi Pareto optimalnih rešenja, autori predlažu izbor 'najboljeg' rešenja na osnovu intuicije i iskustva eksperta [Guria et al. (2006)].

Ipak, nameće se zaključak da većina optimalnih rešenja dobijenih na ovaj način ima samo teorijski značaj. U praksi nije slučaj da se tok materijala iz jedne flotacijske ćelije (na primer koncentrat) deli na dva ili više tokova ili da se već dobijeni proizvod (koncentrat ili jalovina) ponovo vraća u istu ćeliju iz koje je dobijen. Osim toga, veliki broj povratnih tokova značajno usložnjava proces flotacije, utičući na fizičko-hemijske uslove u flotacijskoj ćeliji, što može dati loše rezultate. Takođe, povećan broj tokova materijala smanjuje mogućnost uspešne kontrole i regulacije procesa flotacije.

Dodatno, kao komentar na pomenuta istraživanja, Mendez i saradnici tvrde da uprkos tome što su rezultati optimizacije primenom genetskog algoritma bolji od tradicionalnih tehnika nema pouzdanog argumenta da je optimalno rešenje globalno rešenje [Mendez et al. (2009)].

Nešto kasnije Ghobadi i saradnici [Ghobadi et al. (2011)] su na sličan način primenili genetski algoritam pri optimizaciji šeme flotacijskog ciklusa sa dva i četiri stadijuma flotacije. Važna novina u njihovom pristupu jeste uvođenje dodatnih procesnih ograničenja u cilju pojednostavljenja konfiguracije ciklusa:

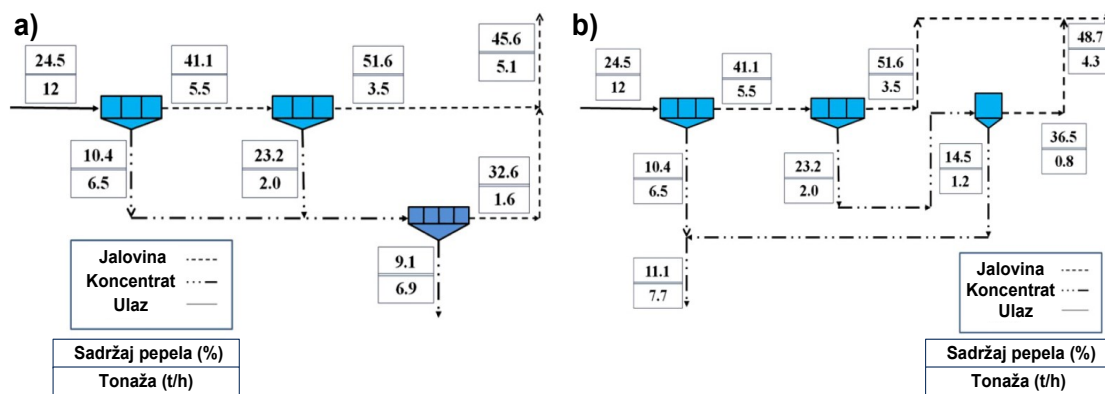
- Za dvostadijalni ciklus sveža sirovina se mora dozirati u samo jedan stadijum
- Koncentrat i jalovina iz jednog stadijuma ne mogu istovremeno ići u drugi stadijum
- Koncentrati i jalovine ne mogu recirkulisati između dva stadijuma (tj. kada se jalovina iz stadijuma 1 transportuje u stadijum 2, jalovina iz stadijuma 2 se ne sme u isto vreme transportovati u stadijum 1)
- Svaki ciklus mora imati koncentrat i jalovinu

Rezultati dobijeni u ovim istraživanjima za dvostadijalni ciklus sa dve mineralne grupe upoređeni su sa rezultatima datim u radu Gurie i saradnika [Guria et al. (2005b)]

za problem 1 (tabela 7). Ghobadi i saradnici zaključuju da u ovom slučaju predloženi genetski algoritam prilagođen procesnim pravilima smanjuje vreme izračunavanja potrebno za nalaženje optimalnog ciklusa preko 90% i daje jednostavniji optimalni ciklus sa sličnim performansama.

Osim toga, primena genetskog algoritma prilagođenog procesnim pravilima u slučaju optimizacije četvorostadijalnog ciklusa sa tri mineralne grupe (sa malom, srednjom i velikom konstantom brzine flotacije) daje veću efikasnost separacije i jednostavniju konfiguraciju ciklusa u poređenju sa uobičajenim industrijskim šemama, prema tvrdnjama ovih istraživača [Ghobadi et al. (2011)].

Nedavno su Pirouzan i saradnici takođe primenili genetski algoritam prilagođen procesnim pravilima prilikom optimizacije trostadijalnog ciklusa flotacije u postrojenju za čišćenje uglja u Zarandu, Kerman, Iran. Kao rezultat višekriterijumske optimizacije dobijen je skup Pareto optimalnih rešenja, između kojih su autori odabrali najbolje rešenje i koje je uz minimalnu modifikaciju implementirano u pomenuto industrijsko postrojenje (slika 27).

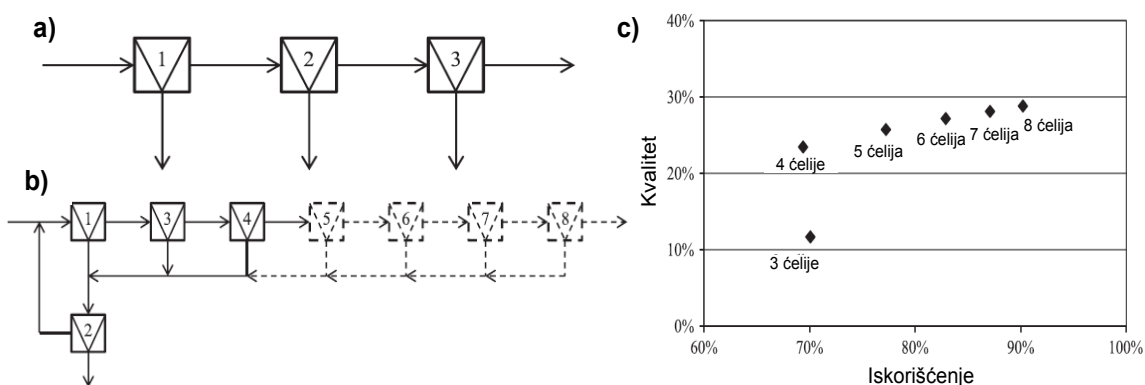


Slika 27. Poređenje konfiguracije flotacijskih ciklusa: (a) protoci materijala sa sadržajima pepela u inicijalnom ciklusu (b) protoci materijala sa sadržajima pepela u novo-implementiranom ciklusu [adaptirano prema Pirouzan et al. (2014)].

Autori izveštavaju da je nakon implementacije novog trostadijalnog ciklusa, iskorišćenje korisne komponente povećano za 6,7% u odnosu na prvobitni ciklus pri čemu se sadržaj pepela u finalnom proizvodu kreće u dozvoljenim granicama. Oni su takođe predložili još jedno rešenje dobijeno pomoću genetskog algoritma (metoda

Pareto optimuma) koje podrazumeva četvorostadijalni ciklus uz dodatno povećanje iskorišćenja korisne komponente u koncentratu [Pirouzan et al. (2014)].

U pomenutim studijama, problemi optimizacije flotacijskih ciklusa su ograničeni na dve do četiri flotacijske ćelije ili stadijuma. Prema Cisternasu i saradnicima, razlog je složenost izračunavanja genetskih algoritama [Cisternas et al. (2014)]. Za razliku od prethodnih primera, Hu i saradnici su razmatrali optimizaciju flotacijskih ciklusa koji sadrže od tri do osam flotacijskih ćelija. Pri tom su integrisali modele koji opisuju ponašanje flotacijskog sistema u fazi pulpe i fazi pene sa genetskim algoritmima. Za testiranje predložene metodologije korišćeni su podaci iz postrojenja za flotaciju bakra. Rezultati su pokazali da optimalni ciklus (tj. konfiguracija koji daje optimalni kvalitet i iskorišćenje) sa tri flotacijske ćelije podrazumeva serijski povezane ćelije, dok svaki optimalni ciklus sa četiri do osam flotacijskih ćelija zahteva uvođenje dodatnog prečišćavanja koncentrata (slika 28) [Hu et al. (2013)].



Slika 28. Rezultati optimizacije konfiguracije flotacijskog ciklusa: (a) optimalna konfiguracija za ciklus od 3 ćelije; (b) optimalna konfiguracija za ciklus od 4–8 ćelija; (c) finalno iskorišćenje i kvalitet koncentrata za optimalne cikluse sa različitim brojem flotacijskih ćelija [adaptirano prema Hu et al. (2013)].

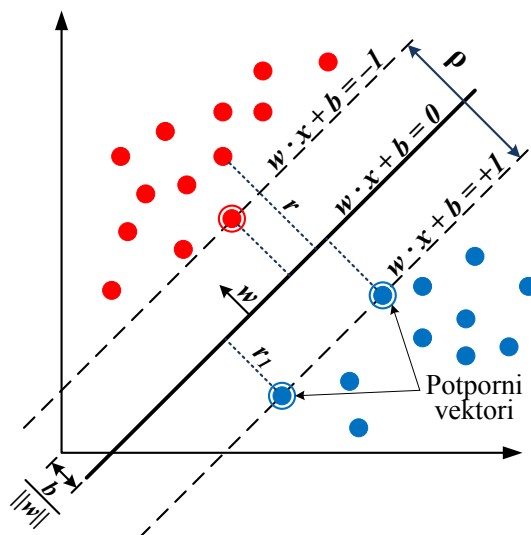
Nekoliko prezentovanih primera iz prethodnog teksta govori o potencijalu primene genetskih algoritama u optimizaciji flotacijskih ciklusa. Međutim, generalno se može se reći da je primena genetskih algoritama na ovom polju u začetku i da se nova rešenja tek mogu očekivati. S druge strane, saznanja autora disertacije su da se genetski algoritmi ređe samostalno primenjuju na drugim poljima modelovanja flotacijskih sistema, mada je jedan takav primer dat u radu koji su objavili Gouws i Aldrich [Gouws

and Aldrich (1996)] (detaljniji opis ovog istraživanja biće prikazan u poglavlju 5.5.1). Češći je slučaj da se genetski algoritmi kombinuju sa drugim metodama veštačke inteligencije, a literaturni pregled na ovu temu dat je u poglavlju 5.7.

5.4 METODA POTPORNIH VEKTORA

Metoda potpornih vektora (engl. support vector machine – SVM) je oblik mašinskog učenja i odnosi se na skup povezanih metoda nadgledanog učenja koje analiziraju podatke i prepoznaju obrasce. Koristi se za klasifikacionu i regresionu analizu. [Bharadway and Minz (2009)].

Kada su u pitanju problemi klasifikacije, osnovna ideja SVM je pronalaženje odgovarajuće hiperravni, kako bi se svi podaci iz određene klase nalašli sa iste strane te ravni. Optimalna hiperravan pomoću koje se postiže najbolja klasifikacija je ona sa maksimalnom marginom (tj. maksimalnom udaljenošću od graničnih podataka – tzv. „potpornih vektora”), jer u globalu, što je veća margina, manja je greška generalizacije klasifikatora [Čizmar et al. (2009), Raj and Sathya (2013)]. Slika 29 predstavlja jednostavan primer principa funkcionisanja SVM.



Slika 29. Šematski prikaz linearnog SVM klasifikatora.

Neka je X skup koji sadrži n trenirajućih podataka i koji je linearno razdvojev. Matematički, to se može opisati izrazom:

$$X = \{(x_i, y_i) \mid x_i \in \mathcal{R}^p, y_i \in \{-1, 1\}\}_{i=1}^n \quad (13)$$

Svaka tačka x_i predstavlja p – dimenzionalni vektor, dok y_i može imati vrednost 1 ili -1 i ukazuje na klasu kojoj x_i pripada.

Bilo koja hiperravan može se opisati sledećom jednačinom:

$$w \cdot x - b = 0 \quad (14)$$

Simbol \cdot označava skalarni proizvod, w je vektor normalan na hiperravan, a b je takav parametar da $\frac{b}{\|w\|}$ određuje odstupanje hiperravni od koordinatnog početka duž vektora w .

Optimalna hiperravan, opisana jednačinom (14) predstavljena je na slici 29. Margina (označena sa ρ) je rastojanje između paralelnih hiperravni koje su takođe predstavljene odgovarajućim jednačinama (Slika 29). Cilj SVM metode je izračunavanje parametara w i b , tako da rastojanje (ρ) između paralelnih hiperravni koje razdvajaju podatke bude maksimalno.

Rastojanje bilo koje tačke-podatka od optimalne hiperravni (r) može se predstaviti u obliku izraza:

$$r = \frac{w \cdot x + b}{\|w\|} \quad (15)$$

Parametri w i b se određuju tako da rastojanje između najbližih tačaka (potpornih vektora) i optimalne hiperravni bude jednako 1 (po apsolutnoj vrednosti). Kako je $\rho = 2r_1$, sledi da je $\rho = \frac{2}{\|w\|}$.

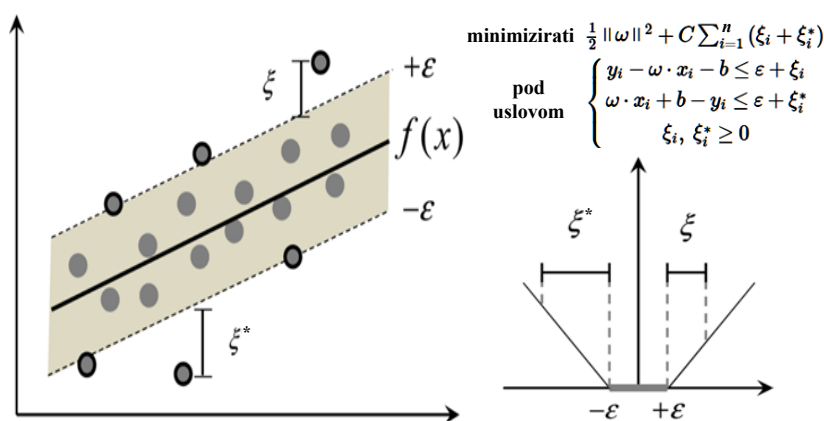
Očigledno je, iz prethodno navedenog teksta, da treba minimizirati $\|w\|$, odnosno, zbog matematičke pogodnosti minimizirati $\frac{1}{2} \|w\|^2$.

Osim toga, neophodno je uvesti ograničenja, kako bi svi podaci bili korektno klasifikovani. Ili, u ovom slučaju: $w \cdot x_i + b \geq 1$, ako je $y_i = 1$; i $w \cdot x_i + b \leq -1$, ako je $y_i = -1$.

Ako skup podataka nije linearno razdvojiv, moguće je uvesti izvesnu promenljivu (ξ_i) koja će tolerisati (male) greške pri klasifikaciji (metoda meke margine). Za komplikovanije slučajeve neophodno je preslikati osnovni (ulazni) vektorski prostor

u prostor veće dimenzije u kome su podaci linearno razdvojivi. Povratkom u osnovni prostor dobiće se nelinearna funkcija klasifikacije (*kernel trik*) [Čizmar et al. (2009)].

Regresiona metoda potpornih vektora (SVR) zasniva se na istim principima kao i klasifikaciona metoda. Njena svrha je da pronade i optimizira granice generalizacije određene za regresiju. One će biti zasnovane na definisanju funkcije gubitka koja ignoriše greške koje se nalaze u okviru datog opsega udaljenosti od prave vrednosti. Ovaj tip funkcije se često naziva epsilon-intenzivna funkcija gubitka [Suganyadevi and Babulal (2014)]. Slika 30 prikazuje primer linearne SVR metode i epsilon-intenzivnu funkciju gubitka (zatamnjeni kružići predstavljaju potporne vektore).



Slika 30. Šematski prikaz linearne SVR metode i ε -intenzivna funkcija gubitka [adaptirano prema Yu et al. (2014)].

5.4.1 Primena metode potpornih vektora u modelovanju procesa flotacijske koncentracije

Metoda potpornih vektora je sve više prihvaćena među istraživačima koji se bave modelovanjem flotacijskih procesa, naročito u poslednjih par godina. U skladu sa vrstama problema o kojima se diskutuje kroz dostupnu literaturu, regresiona varijanta je trenutno mnogo više zastupljena od klasifikacione. Skoro po pravilu, SVR se koristi za predviđanje vrednosti tehnoloških pokazatelja efikasnosti flotacijskog procesa (kvalitet koncentrata i iskorišćenje) na bazi karakteristika ekstrahovanih iz slika pene. Treba, takođe, napomenuti i da se metoda potpornih vektora često primenjuje u kombinaciji sa drugim AI metodama. Zbog toga tekst koji sledi sadrži samo nekoliko primera koji prate

samostalnu upotrebu SVM. O dodatnim istraživanjima na ovu temu biće diskutovano u poglavlju 5.7.

Jedno od svojstava metoda potpornih vektora jeste da su vrlo robusne u odnosu na male uzorke [Cui (2003)]. Ovo svojstvo je istaknuto u radu Rena i saradnika koji izveštavaju o efikasnoj proceni kvaliteta flotacijskog koncentrata bakra na bazi vrlo malih količina uzoraka (~0.6 g svaki). Uzorci su fotografisani pod mikroskopom, a analiza slika uključila je ekstrakciju različitih karakteristika: (1) crvena, zelena i plava komponenta u RGB sistemu boja; (2) komponenta nijanse u HSV sistemu; i (3) nagib vektora boje. U zavisnosti od vrste karakteristike (ulazne promenljive) formirana su tri različita modela koji predviđaju kvalitet koncentrata bakra. Modeli su razvijeni regresionom metodom potpornih vektora koja koristi tehniku najmanjih kvadrata (LS-SVR¹⁵), pri čemu je utvrđena jaka korelacija između kvaliteta koncentrata i ekstrahovanih karakteristika [Ren et al. (2015)]. Deo dobijenih rezultata prikazan je u tabelama 8 i 9.

Tabela 8. Rezltati predviđanja kvaliteta koncentrata bakra [Ren et al. (2015)].

Izabrani uzorak	Vrednost sadržaja bakra Cu% predviđena modelom			Stvarna vrednost Cu%
	Model 1 (crvena, plava, zelena)	Model 2 (nijansa)	Model 3 (nagib vektora boje)	
Uzorak 1	9,68	10,91	10,63	11,31
Uzorak 2	11,90	12,07	11,51	13,06
Uzorak 3	18,11	17,57	17,99	18,62

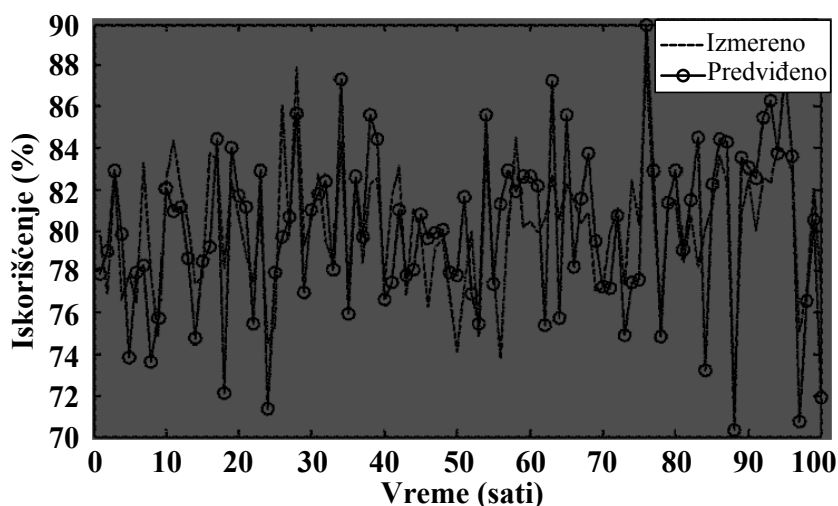
Tabela 9. Statistička analiza uspešnosti predviđanja kvaliteta koncentrata bakra pomoću LS-SVR modela [Ren et al. (2015)].

Model	Performanse LS-SVR modela		
	Vreme potrebno za predviđanje (ms)	Koren srednje kvadratne greške (%)	Koeficijent determinacije, R ²
Crvena, plava, zelena	56,455	1,1907	0,9977
Nijansa	30,243	0,8644	0,9997
Nagib vektora boje	30,362	1,0391	0,9926

Zhou i saradnici su predložili još jedan model zasnovan na regresionoj LS-SVR metodi. Model predviđa flotacijsko iskorišćenje Al₂O₃ iz rude boksita na osnovu ulaznih promenljivih ekstrahovanih iz slika pene (boja pene, veličina mehurića, mineralizacija

¹⁵ Engl. LS-SVR - Least squares support vector regression.

mehurića, brzina kretanja pene i brzina kolapsa mehurića). Autori smatraju da na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata ovaj model daje dobru procenu iskorišćenja Al_2O_3 u koncentratu (videti sliku 31) [Zhou et al. (2009a)]. Iste godine, ovi autori su objavili još jedno istraživanje na istu temu i ponovo izvestili o efikasnosti LS-SVR metode u indirektnom predviđanju flotacijskog iskorišćenja na bazi izgleda flotacijske pene [Zhou et al. (2009b)].



Slika 31. Poređenje između vrednosti stvarnog iskorišćenja i iskorišćenja dobijenog prema modelu [adaptirano prema Zhou et al. (2009a)].

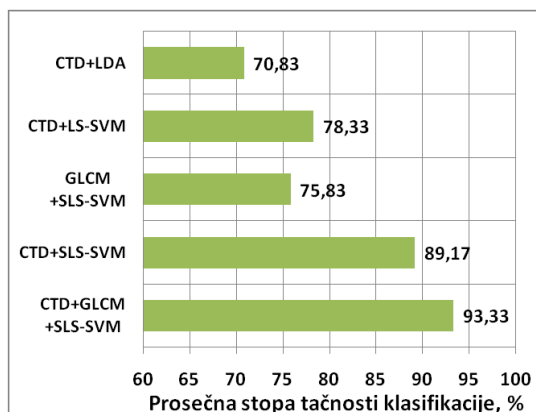
Kroz drugačiji pristup, Geng and Chai (2008) su primenili LS-SVR metodu u cilju razvoja soft senzora za procenu kvaliteta koncentrata gvožđa i jalovine u zavisnosti od uticajnih faktora (sadržaja korisne komponente u rudi, granulometrijskog sastava nakon mlevenja, gustine pulpe, protoka pulpe i doze reagenasa).

Primer korišćenja klasifikacione SVM metode dat je u radu Hea i saradnika [He et al. (2013a)]. Oni su predložili i uporedili nekoliko različitih modela koji vrše klasifikaciju slika pene iz procesa flotacije sumpora. Teksturalne karakteristike pene opisane su na dva načina: (1) posredstvom GLCM metode i (2) CTD¹⁶ metode. Modeli su razvijeni putem: (1) linearne diskriminantne analize (LDA), (2) standardne¹⁷ metode potpornih vektora koja koristi tehniku najmanjih kvadrata (LS-SVM) i (3) metode

¹⁶ Engl. CTD – Colour texture distribution. – Metoda se zasniva na učestalosti pojavljivanja teksturne jedinice definisane na osnovu digitalne kolor fotografije flotacijske pene. Teksturna jedinica je specificirana kao skup od 3×3 piksela (1 posmatrani-središnji piksel i 8 susednih piksela).

¹⁷ Sa Gausovom kernel funkcijom

potpornih vektora koja koristi tehniku najmanjih kvadrata sa retkom (engl. sparse) kernel matricom (SLS-SVM). Predloženi modeli su pokazali nejednake mogućnosti da tačno svrstaju svaku sliku pene u jednu od šest klasa (šest različitih izgleda pene), što se može uočiti sa slike 32.



Slika 32. Tačnost klasifikacije različitih modela [prilagođeno iz He et al. (2013a)].

Autori daju prednost SLS-SVM metodi nad standardnom LS-SVM, jer ista prevazilazi značajan nedostatak standardne metode – gubitak „retkosti” rešenja. Oni ističu kako je retkost važna za tačnu klasifikaciju jer omogućava brzu i korektnu procenu novih podataka. Osim toga, autori tvrde da višestruka kernel funkcija (nastala kombinacijom Gausove i polinomialne kernel funkcije), korišćena u SLS-SVM modelu, doprinosi većoj tačnosti klasifikacije [He et al. (2013a)].

5.5 STABLA ODLUČIVANJA

Stabla odlučivanja (u okviru analize podataka i mašinskog učenja) se koriste u formi prediktivnih modela pomoću kojih se na osnovu prikupljenih podataka koji karakterišu određeni problem izvode zaključci o rešenju datog problema [Huang et al. (2010)]. Drugim rečima, cilj je kreirati stablo odlučivanja koje predviđa vrednost željene izlazne promenljive na bazi određenog broja ulaznih promenljivih. Pri tom se razlikuju dva osnovna tipa stabala odlučivanja koja uče:

- Klasifikaciono stablo, gde predviđeni izlaz uzima oblik konačnog skupa (klase) vrednosti

- Regresiono stablo, gde predviđeni izlaz uzima vrednost realnog broja [Ritika (2014)].

Koliko je poznato autoru disertacije, u okviru modelovanja flotacijskih procesa za sada su uglavnom u upotrebi klasifikaciona binarna stabla odlučivanja, te će ovde biti reči o njihovom formiranju i strukturi.

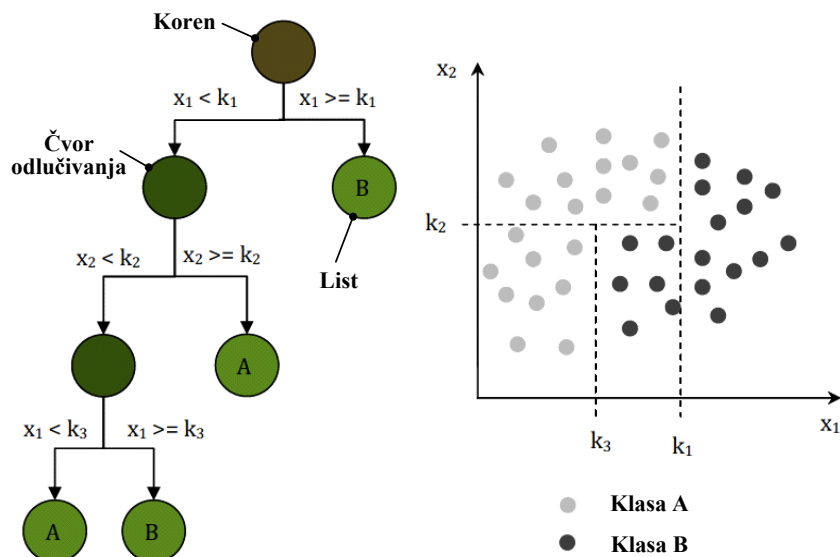
Skup podataka koji se koristi pri konstrukciji stabla odlučivanja sastoji se od tipičnih primera ponašanja određenog procesa. Svaki od ovih primera se opisuje pomoću atributa (nezavisne promenljive) i klase (zavisna promenljiva). Atributi predstavljaju određena svojstva iz posmatranog domena (kao što su, recimo, sadržaj datog minerala u nekom od proizvoda koncentracije, karakteristika ekstrahovana iz slika pene i sl.), dok klasa definiše način tretiranja posmatranog primera sa datom vrednošću atributa [Gouws and Aldrich (1996), Filipič and Junkar (2000)].

Znanje koje se predstavlja u formi stabla odlučivanja ima svojstva hijerarhijske uređenosti, tj. svako pojedinačno stablo odlučivanja predstavlja niz uzastopnih AKO–TADA pravila. Stabla odlučivanja se sastoje iz korena, čvorova odlučivanja i listova. Koren predstavlja prvi čvor prema kome se vrši početno grananje skupa podataka iz koga stablo uči. Listovi predstavljaju krajnje čvorove u stablu odlučivanja, odnosno sva moguća rešenja datog problema [Marais (2010), Rokach and Maimon (2010)].

Sam postupak indukcije stabla odlučivanja podrazumeva grananje čvorova odlučivanja na bazi testiranja vrednosti atributa. Način testiranja vrednosti atributa zavisi od primenjenog algoritma stabla odlučivanja. Na primer, ID3 algoritam (Quinlan (1986)) koristi kriterijum informacione dobiti da bi granao stablo, tj. da odluči koji atribut treba da se koristi kao čvor pri grananju stabla. Ovaj proces se radi iterativno dok se ne ispuni neki kriterijum zaustavljanja rasta stabla, odnosno dostigne list stabla [Rokach and Maimon (2010), Gouws and Aldrich (1996)]. Primer klasifikacionog stabla odlučivanja koje klasifikuje skup podataka sa dve promenljive x_1 i x_2 u dve klase A i B dat je na slici 33.

Pored pojedinačnih stabla odlučivanja postoje i savremenije metode koje se često nazivaju metodama ansambla i koje podrazumevaju formiranje više od jednog stabla odlučivanja. Na primer, metoda slučajnih šuma (random forests) uključuje čitav niz pojedinačno treniranih stabala odlučivanja. Cilj je prevazići nedostatke koje ima

pojedinačno stablo (kao što je, na primer „overfitting” skupa za trening) [Breiman (2001)].



Slika 33. Primer klasifikacionog stabla odlučivanja [Marais (2010)].

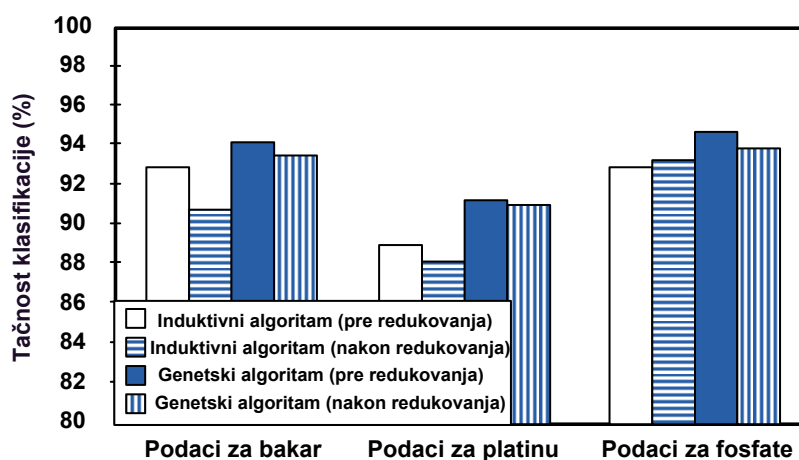
5.5.1 Primena stabala odlučivanja u modelovanju flotacijskih procesa

Prema saznanjima autora disertacije, postoji vrlo mali broj izveštaja o modelovanju flotacijskih sistema metodama koje uključuju induktivna stabla odlučivanja. Jedan od malobrojnih primera dat je u radu koji su objavili Gouws i Aldrich. Oni su predložili dve vrste algoritama (induktivni i genetski) za klasifikaciju različitih struktura flotacijske pene iz industrijskog postrojenja za flotaciju bakra i platine, kao i za klasifikaciju iskorišćenja P_2O_5 iz postrojenja za flotaciju fosfata.

Strukture pene su označene kao klasa A, B, C, itd, na osnovu veličine i oblika mehurića, mineralizacije pene, i slično. U svojstvu nezavisno promenljivih razmatrano je pet veličina, ekstrahovanih iz slika flotacijske pene. Ove veličine su ekstrahovane NGLDM metodom¹⁸ i indiciraju specifičnosti slika kao što su 'homogenost', 'finoća', 'grubost' i sl. Iskorišćenje P_2O_5 je definisano kao visoko, srednje i nisko, dok je za nezavisno promenljive usvojen čitav skup veličina koje se odnose na sastav, krupnoću sirovine, protok, itd.

¹⁸ Engl. Neighboring Gray Level Dependence Matrix - Matrica zavisnosti nivoa sivog susednih piksela

U postupku klasifikacije posredstvom induktivnog i genetskog algoritma razvijena su kompleksna binarna stabla na kojima je naknadno izvršena tehnika redukovanja (engl. pruning). Ova tehnika smanjuje veličinu stabla odlučivanja na taj način što uklanja one delove stabla koji imaju malu sposobnost da izvrše klasifikaciju primera. Prema rezultatima, oba algoritma su pokazala zadovoljavajuću sposobnost klasifikacije, ali je genetski algoritam u svakom ispitivanom slučaju ispoljio bolji učinak od induktivnog (slika 34) [Gouws and Aldrich (1996)].



Slika 34. Tačnost klasifikacije induktivnog i genetskog algoritma [adaptirano prema Gouws and Aldrich (1996)].

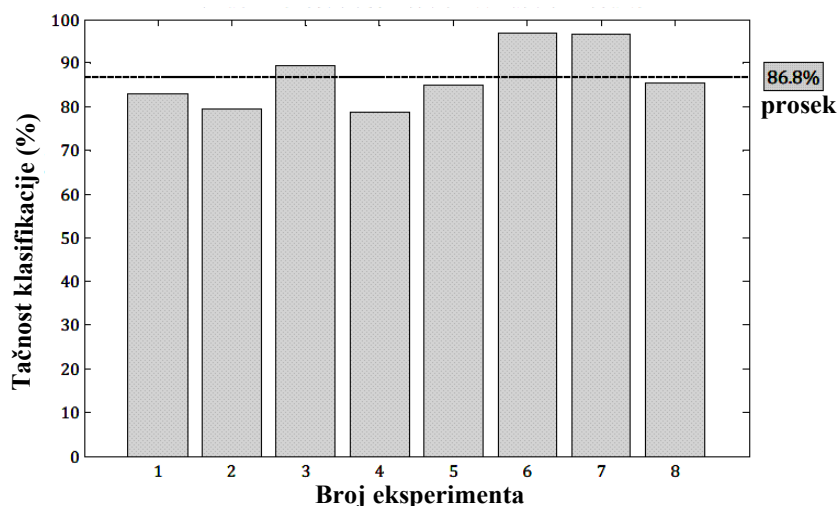
Praktično u isto vreme su Aldrich i saradnici objavili istraživanje u kome poredi induktivna stabla odlučivanja sa neuronskim mrežama. Poređenje je takođe izvršeno prema sposobnosti klasifikacije različitih struktura pene u postrojenjima za flotacijsku koncentraciju bakra i platine. Stabala odlučivanja generisana su posredstvom dva algoritma – C4.5 algoritma (Quinlan (1993)) i OC1 algoritma (Murthy et al. (1993)). Na osnovu dobijenih rezultata autori zaključuju da su induktivni algoritmi i neuronske mreže u ovom slučaju pokazali vrlo slične sposobnosti klasifikacije. Ipak, istaknuto je da induktivni algoritmi imaju prednost nad neuronskim mrežama jer generišu eksplicitna stabla odlučivanja i pravila koja se lakše interpretiraju.

Međusobnom komparacijom rezultata dobijenih putem induktivnih algoritama zaključeno je da su isti uporedivi, s tim što je nedostatak OC1 algoritma taj što generiše kompleksnija stabla odlučivanja (u smislu razumljivosti) u odnosu na C4.5 algoritam [Aldrich et al. (1997)].

Bez obzira na pozitivna iskustva u primeni stabala odlučivanja pri modelovanju flotacijskih procesa, konstatovano je da je pojedinačno stablo odlučivanja nestabilno zbog jake zavisnosti strukture stabla od datog skupa podataka [Auret (2010), Marais (2010)]. Stoga pojedini autori preporučuju primenu savremenijih tehnika kao što je metoda random forests. Na primer, Marais je primenila random forests klasifikator prilikom predviđanja kvaliteta koncentrata, dobijenog u laboratorijskom postupku flotacije platinske grupe metala, na osnovu teksturnih karakteristika ekstrahovanih iz slika pene. Kriterijum klasifikacije prikazan je u tabeli 10, dok su rezultati dati na slici 35. Prema izveštaju autorke, klasifikacija ovom metodom izvršena je sa visokim prosečnim stepenom tačnosti od 86,8% [Marais (2010)].

Tabela 10. Kriterijumi za random forest klasifikaciju [Marais (2010)].

Klasa	Kriterijum klasifikacije
Klasa 1	Relativni kvalitet $\leq 0,12$
Klasa 2	$0,12 < \text{Relativni kvalitet} \leq 0,40$
Klasa 3	Relativni kvalitet $> 0,40$

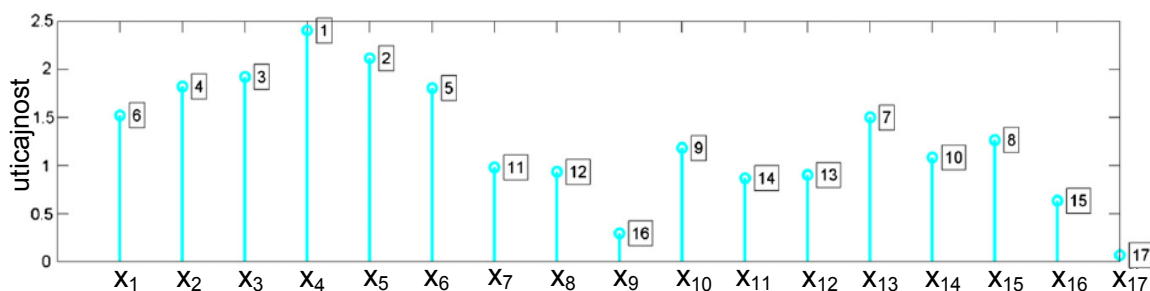


Slika 35. Rezultati random forests klasifikacije [Marais (2010)].

Dalje, Auret i Aldrich [Auret and Aldrich (2012)] su ispitali uticajnost (tj. značajnost) sedamnaest različitih promenljivih veličina, generisanih u primarnom ciklusu mlevenja, na performanse celokupnog procesa mlevenja, klasiranja i flotacije. Kao parametar indikacije uspešnosti procesa usvojen je sadržaj plemenitih metala u

finalnoj jalovini flotacijskog ciklusa. Autori tvrde da je identifikacija uticajnosti svih promenljivih efikasno izvršena random forests metodom (slika 36).

Osim toga, random forests metoda se pokazala delotvornom u pogledu uspešnosti detekcije abnormalnih procesnih stanja u procesu flotacije uglja [Auret and Aldrich (2011)].



Slika 36. Uticajnost različitih promenljivih generisanih u primarnom ciklusu mlevenja na performanse procesa prerade rude plemenitih metala. (Značenje parametara: x_1 – potrošnja energije u mlinu; x_2 – protok pulpe iz pumpe A (transportuje samleveni proizvod primarnog mlevenja); x_3 – protok pulpe iz pumpe B (transportuje prosev primarnog sita koje radi u zatvorenom ciklusu sa mlinom); x_4 – gustina pulpe iz pumpe A; x_5 – gustina pulpe iz pumpe B; x_6 – nivo zapunjenosti mlina; x_7 – protok vode; x_8 – ukupna količina materijala u mlinu (ulaz + voda + meljuća tela); x_9 – kapacitet prerade rude; x_{10} – kapacitet na ulazu u mlin; x_{11} – kapacitet prerade sitne rude; x_{12} – protok pulpe iz pumpe C (transportuje samleveni proizvod sekundarnog mlevenja); x_{13} – protok pulpe iz pumpe D (transportuje samleveni proizvod tercijarnog mlevenja); x_{14} – gustina pulpe iz pumpe C; x_{15} – gustina pulpe iz pumpe D; x_{16} – potrošnja električne energije na situ; x_{17} – slučajna promenljiva kao osnova za promenu uticajnosti promenljive.) [adaptirano prema Auret and Aldrich (2012)].

5.6 DRUGE METODE SOFT KOMPJUTINGA U MODELOVANJU FLOTACIJSKIH PROCESA

Pored metoda o kojima je diskutovano u prethodnim poglavljima, postoje i druge soft kompjuting metode koje se koriste pri modelovanju flotacijskih procesa (ali trenutno u manjoj meri). Primeri obuhvataju: algoritam roja čestica¹⁹ [Leng et al. (2010), Tian and Yang (2014), Zhu et al. (2014), Wang et al. (2014b), Wang and Han (2015)], algoritam svitaca²⁰ [Wang et al. (2013), Wang et al. (2014b)], gravitacioni pretraživački algoritam²¹ [Massinaei et al. (2011, 2013), Wang and Han (2015)], algoritam diferencijalne evolucije²² [Aldrich et al. (2000), Leng et al. (2010), Cao et al. (2013), Cao et al. (2014)], veštački imuni sistem²³ [Yong et al. (2012), Xiaoping and

¹⁹ Engl. Particle swarm optimization (PSO)

²⁰ Engl. Glowworm swarm optimization (GSO)

²¹ Engl. Gravitational search algorithm (GSA)

²² Engl. Differential evolution (DE)

²³ Engl. Artificial immune system (AIS)

Aldrich (2013)], metodu relevantnih vektora²⁴ [Gui et al. (2014)] i algoritam kukavičje pretrage²⁵ [Wang et al. (2014a)]. Skoro po pravilu, njihova primena je vezana za optimizaciju parametara različitih flotacijskih modela, a o nekima od pomenutih studija će se detaljnije diskutovati u poglavlju 5.7.

Većina ovih AI metoda se tek od nedavno koristi u modelovanju flotacijskih procesa. Shodno tome, širi dijapazon primene u ovoj oblasti se tek može očekivati, posebno zbog toga što su, u određenim slučajevima, utvrđena dobra optimizaciona svojstva datih metoda.

5.7 HIBRIDNI PRISTUP

Pojedini istraživači predlažu hibridni pristup modelovanju flotacijskih sistema, u cilju što boljeg opisa njihovih performansi. Hibridno modelovanje može uključiti samo metode soft kompjutinga ili pak kombinaciju metoda soft kompjutinga sa klasičnim matematičkim modelovanjem. Na primer, Cubillos i Lima su koristili kombinaciju fenomenološkog modela (zasnovanog na zakonima održanja mase, energije i impulsa u flotacijskom sistemu) i ANN modela, pri modelovanju procesa flotacije sulfidnih minerala bakra. Pomoću neuronske mreže izvršeno je predviđanje određenih procesnih parametara koji su zatim korišćeni kao ulazne veličine fenomenološkog modela [Cubillos and Lima (1997, 1998)]. Gupta i saradnici su predložili još jedan hibridni pristup koji je uključivao razvoj ANN modela za predviđanje konstanti brzine flotacije na osnovu operativnih promenljivih, a zatim upotrebu ovih konstanti u modelu prvog principa, kako bi se predvidele performanse procesa flotacije fosfata u flotacijskoj koloni. Autori tvrde da hibridni model uspešno opisuje dejstvo koncentracije penušača, krupnoće sirovine, protoka vazduha i prečnika vazдушnih mehurića na iskorišćenje i kvalitet koncentrata [Gupta et al. (1999)]. Na isti način, El-Shall i saradnici su razvili dve vrste hibridnih modela za predviđanje iskorišćenja i kvaliteta koncentrata fosfata u flotacijskoj koloni. Prvi tip hibridnog modela uključivao je tri neuronske mreže od kojih je svaka imala nekoliko ulaznih promenljivih (koncentracija reagenasa, površinska brzina kretanja vazduha, pH pulpe, itd.) i po jedan izlazni parametar – konstantu brzine flotacije za koncentrat, konstantu brzine flotacije za jalovinu i zapreminski udeo

²⁴ Engl. Relevance Vector Machine (RVM)

²⁵ Engl. Cuckoo search algorithm (CSA)

vazduha u pulpi. Ovi izlazni parametri su kasnije korišćeni kao ulazne veličine u modelu prvog principa. Drugi tip hibridnog modela razvijen je na sličnom principu, s tim što je uključivao četiri neuronske mreže struktuirane na dva nivoa [El-Shall et al. (2001)].

Rughooputh i Rughooputh su opisali primenu hijerarhijski konfigurisanog hibridnog ANN sistema za interpretaciju slika pene iz procesa flotacije bakra. Autori su okarakterisali ovaj sistem kao jednostavan, jeftin i vrlo pouzdan [Rughooputh and Rughooputh (2002)].

Zhu i Wang su istraživali moguću upotrebu teksturnih karakteristika ekstrahovanih iz digitalnih slika pene u postrojenju za flotaciju hematita. Na bazi ovih podataka, razvili su matematički model za identifikaciju stanja flotacijske koncentracije hematita i podešavanje količine reagenasa, korišćenjem metode grubog skupa i LVQ mreže [Zhu and Wang (2008)].

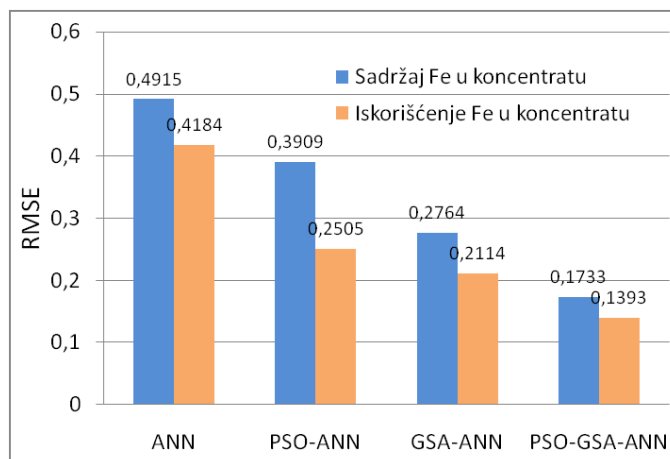
Celularne neuronske mreže se mogu smatrati hibridnim sistemima koji predstavljaju fuziju veštačkih neuronskih mreža i celularnog automata²⁶ [Sharad et al (2012)]. Postoje izveštaji o primeni ovih mreža pri modelovanju parametara flotacijske koncentracije uglja, zbog njihove sposobnosti da brzo procesuiraju slike flotacijske pene [Zimmermann and Jeanmeure (1996), Jeanmeure and Zimmermann (1998)].

Xiaoping i Aldrich su predložili hibridni model baziran na sintezi veštačkih neuronskih mreža i veštačkog imunog sistema (neuro-imuni algoritam). Model predviđa sadržaj pepela u flotacijskom koncentratu uglja i pogodan je za implementaciju u okviru optimizacione kontrole datog flotacijskog sistema [Xiaoping and Aldrich (2013)].

Wang i Han su razvili nekoliko soft senzora na bazi višeslojnog perceptrona čiji su parametri optimizirani različitim tehnikama – posredstvom algoritma roja čestica (PSO) i gravitacionog pretraživačkog algoritma (GSA). Ovi modeli predviđaju iskorišćenje i kvalitet koncentrata gvožđa na bazi nekoliko ulaznih parametara kao što su: sadržaj gvožđa u ulaznoj sirovini, protok pulpe, količine reagenasa, itd. Pokazano je da veštačka neuronska mreža (bez optimizacije parametara) ima najmanju tačnost predviđanja i da su optimizacione mogućnosti GSA veće nego kod PSO algoritma. Međutim, GSA ima malu brzinu konvergencije i veliku verovatnoću „padanja” u lokalni optimum. Stoga su najbolji rezultati postignuti integracijom sve tri AI metode (Slika 37)

²⁶ Model fizičkog sistema. Sastoji se od “mreže ćelija” koja ima konačan broj dimenzija, u kojoj svaka ćelija zauzima jedno od konačnog broja stanja.

[Wang and Han (2015)]. U nešto drugačijoj studiji, Wang i saradnici su razvili soft senzore za predviđanje kvaliteta koncentrata gvožđa na osnovu slika flotacijske pene. Parametri neuronske mreže optimizirani su pomoću algoritma kukavičje pretrage (CSA) koji je ispoljio dobra optimizaciona svojstva [Wang et al. (2014a)].



Slika 37. Koren srednje kvadratne greške predviđanja (RMSE) soft senzora [prilagođeno iz Wang and Han (2015)].

Jedna od hibridnih metoda koje se koriste pri modelovanju različitih fenomena u procesu flotacije jeste adaptivni neuro-fazi sistem zaključivanja (ANFIS). U arhitekturi ovog sistema integrisani su principi fazi logike i veštačkih neuronskih mreža [Tahmasebi and Hezarkhani (2012)]. ANFIS koristi odgovarajući algoritam učenja za podešavanje parametara u Takagi–Sugeno sistemu fazi zaključivanja²⁷. Mogućnosti primene ANFIS pri modelovanju i kontroli različitih flotacijskih parametara opisali su: Shahbazi i saradnici – za predviđanje površinskog fluksa i srednjeg prečnika vazdušnih mehurića; Sheng i Wen i Li i saradnici – za kontrolu nivoa pulpe; Wang i Zhang – za predviđanje ekonomskih i tehnoloških indikatora procesa [Shahbazi et al. (2013), Sheng and Wen (2013), Li et al. (2013b), Wang and Zhang (2006)].

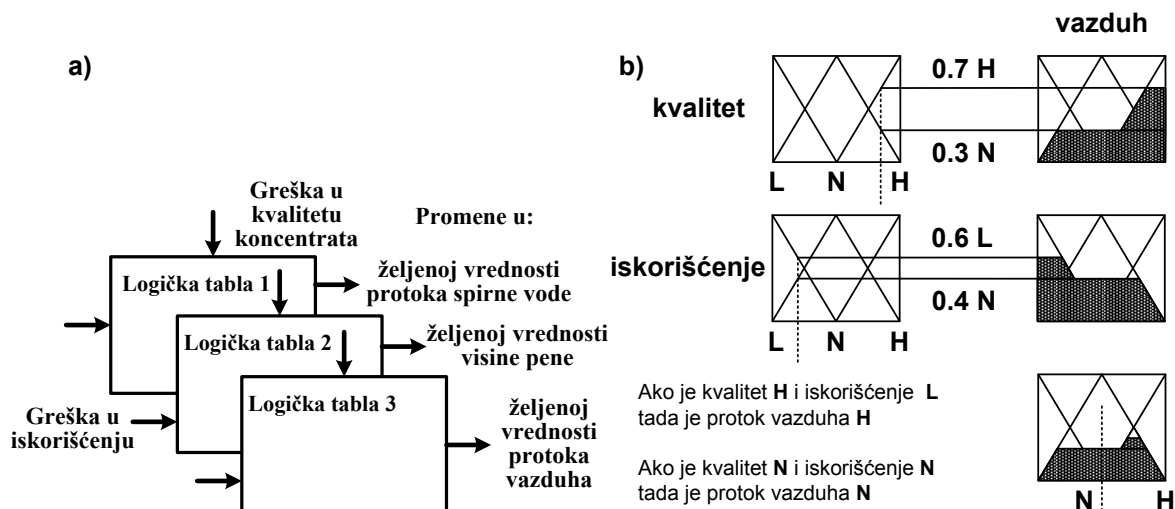
Osim sa neuronskim mrežama, fazi logički principi modelovanja procesa flotacije mogu se sresti i u kombinaciji sa drugim (najčešće klasičnim) metodama. Nije redak slučaj da su modeli, zasnovani na konceptu fazi logičkog zaključivanja, inkorporirani u razne ekspertske kontrolne sisteme. U okviru ovih ekspertskih sistema,

²⁷ Engl. ANFIS – Adaptive neuro fuzzy inference system. Osnovna ideja ANFIS algoritma je da se na osnovu poznatih ulaznih/izlaznih skupova podataka konstruiše fazi sistem zaključivanja čiji se parametri funkcija pripadnosti podešavaju samostalnim korišćenjem algoritma povratnog rasprostiranja greške, ili u kombinaciji sa metodom najmanjih kvadrata (hibridni algoritam). Prilagođavanja omogućavaju fazi sistemu da uči na temelju ulazno/izlaznih skupova podataka.

zajedno sa fazi pristupom, često je prisutan i klasični pristup modelovanju flotacijskih procesa, te se stoga ovakve metode mogu smatrati hibridnim.

Na primer, u radu koji su objavili Chuk i saradnici opisana je kombinacija klasičnog i fazi modelovanja u okviru ekspertskog sistema za prevenciju kolapsa pene u flotacijskoj koloni [Chuk et al. (2005)]. Problematikom prevencije kolapsa pene bavili su se i Hyötyniemi i saradnici, kombinujući fazi logički pristup sa klasičnim i metodama računarski podržane vizuelizacije [Hyötyniemi et al. (2000)].

S druge strane, Bergh je sa svojim saradnicima predstavio fazi sistem zaključivanja kao deo kontrolne strategije čiji je cilj optimizacija procesa flotacije bakra u flotacijskoj koloni. Fazi model je struktuiran kroz tri logičke table (tj. tri skupa pravila), gde su kao ulazi razmatrane greške u iskorišćenju i kvalitetu koncentrata, a kao izlazi promene u željenim vrednostima visine pene, protoka vazduha i protoka spirne vode (slika 38a). Pored toga, na slici 38b je dat primer postupka fazifikacije, zaključivanja i defazifikacije u okviru fazi modela. Svaka promenljiva ima tri atributa (H – visok (high), N – normalan, L – nizak (low)); funkcije pripadnosti su trougaone, a defazifikacija je izvršena metodom centra gravitacije.



Slika 38. Elementi kontrolne strategije: (a) Koordinacioni modul; (b) Primer fazifikacije, zaključivanja i defazifikacije u okviru fazi modela [adaptirano prema Bergh et al. (1998)].

U okviru date kontrolne strategije fazi sistem zaključivanja upoređen je sa sistemom koji koristi binarnu logiku. Autori zaključuju da je fazi sistem obezbedio ravnomeran dinamički odziv procesa (posebno kada su nametnuta procesna ograničenja). Međutim, zahteva podešavanja više parametara nego sistem koji koristi

binarnu logiku, i posledično više vremena prilikom započinjanja rada kontrolnog sistema. Hibridnim pristupom (tj. kombinacijom binarnog i fazi sistema) moguće je redukovati dimenzionalnost problema [Bergh et al. (1998)].

Primenjujući sasvim drugačiji pristup, Aldrich i saradnici su razvili model koji opisuje performanse procesa flotacije platinske grupe metala, kombinujući nekoliko metoda kao što su: analiza slika flotacijske pene, induktivne tehnike (stabla odlučivanja), fazi logičko rezonovanje, genetski algoritmi i algoritam diferencijalne evolucije [Aldrich et al. (2000)].

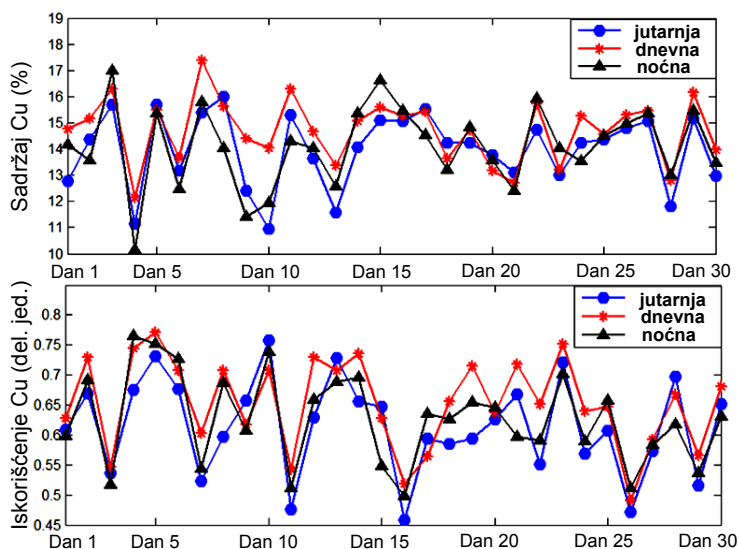
Hibridni pristup koji između ostalog uključuje i koncept fazi logičkog modelovanja flotacijskih procesa u okviru ekspertskih sistema takođe su opisali i drugi istraživači [Edwards (1990), Poirier and Meech (1993), Poirier (1995), Osorio et al. (1999), Chai et al. (2009), Rojas et al. (2009) i Núñez et al. (2010)].

Primer integracije fazi logičkih metoda sa stabilima odlučivanja pri modelovanju procesa u flotacijskoj koloni dat je u radu koji su objavili Mendoça i saradnici [Mendoça et al (2007)].

Kao što je već rečeno, metoda potpornih vektora se često kombinuje sa drugim metodama veštačke inteligencije u pokušajima da se ostvare optimalne performanse modela koji predviđaju tehnološke pokazatelje flotacijskog procesa. Jedan od ovih pokušaja je prezentovan u radu koji su objavili Zhu i saradnici [Zhu et al. (2014)].

Oni su pošli od pretpostavke da se veličina vazdušnih mehurića na površini flotacijske pene može usvojiti kao jedan od indikatora uspešnosti procesa flotacije i da zavisi od promena u količini reagenasa. Shodno tome, predložili su primenu prediktivne kontrolne strukture u postrojenju za flotaciju minerala bakra, gde se podešavanjem količine reagenasa kontroliše ciljna promenljiva – funkcija gustine verovatnoće (FGV) raspodele veličine mehurića (umesto kvaliteta i iskorišćenja).

Formiranje ovog modela obuhvatilo je nekoliko tehnika. Segmentacija slika flotacijske pene izvršena je watershed postupkom, dok je FGV raspodele veličine mehurića aproksimirana metodom B-splajna. Dinamička zavisnost između količine reagenasa i FGV raspodele veličine mehurića opisana je posredstvom LS-SVM metode uz optimizaciju hiperparametara algoritmom roja čestica. Konačno, optimalne količine reagenasa su proračunate korišćenjem optimizacionog algoritma baziranog na konceptu entropije.



Slika 39. Iskorišćenje i kvalitet koncentrata bakra u postrojenju tokom (dnevna smena) i bez (jutarnja i noćna smena) funkcionisanja predložene kontrolne strukture [adaptirano prema Zhu et al. (2014)].

Predložena prediktivna kontrolna metoda je testirana u postrojenju za flotacijsku koncentraciju bakra, tokom svake dnevne smene u periodu od jednog meseca. Za vreme trajanja ostale dve smene, primenjivan je manuelni način rada. Efikasnost ove metode je potvrđena eksperimentalnim rezultatima (slika 39) [Zhu et al. (2014)].

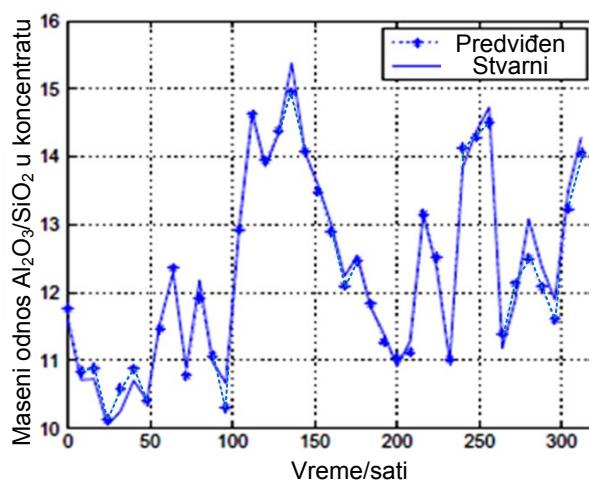
Ovaj model je naročito interesantan zbog toga što se izlazna promenljiva može praktično direktno odrediti sa flotacijske ćelije (za razliku od iskorišćenja i kvaliteta koncentrata). Ipak, prema mišljenju autora disertacije, iako veličina vazdušnih mehurića daje veoma važne informacije o performansama flotacijskog procesa, ona nije jedini indikator za regulaciju doza reagenasa, naročito kada mineralni sastav ulazne rude značajno varira.

Još jedan hibridni model koji koristi karakteristike ekstrahovane iz slika pene za predviđanje pokazatelja flotacijskog procesa (u ovom slučaju kvalitet koncentrata boksita) predložili su Cao i saradnici. U datom modelu integrisana su pozitivna svojstva dve AI metode: (1) LS-SVM sa višestrukom kernel funkcijom – za predviđanje vrednosti kvaliteta koncentrata i (2) metoda ekstremnog učenja²⁸ sa vejvlet²⁹ funkcijom – za kompenzaciju greške predviđanja. Osim toga, algoritam diferencijalne evolucije,

²⁸ Engl. ELM - Extreme learning machine. Tip “feedforward” neuronske mreže sa jednim skrivenim slojem koja nasumično bira skrivene čvorove i analitički određuje težine između skrivenih čvorova i izlaznih čvorova, što utiče na veliko povećanje brzine učenja mreže.

²⁹ Vejvlet funkcija je matematička funkcija koja se koristi za razlaganje funkcija ili neprekidnog signala na različito skalirane komponente.

kao još jedna od metoda veštačke inteligencije, poslužio je za optimizaciju izvesnih parametara modela.



Slika 40. Poređenje stvarnih vrednosti kvaliteta koncentrata i vrednosti predviđenih modelom u industrijskom okruženju [Cao et al. (2013)].

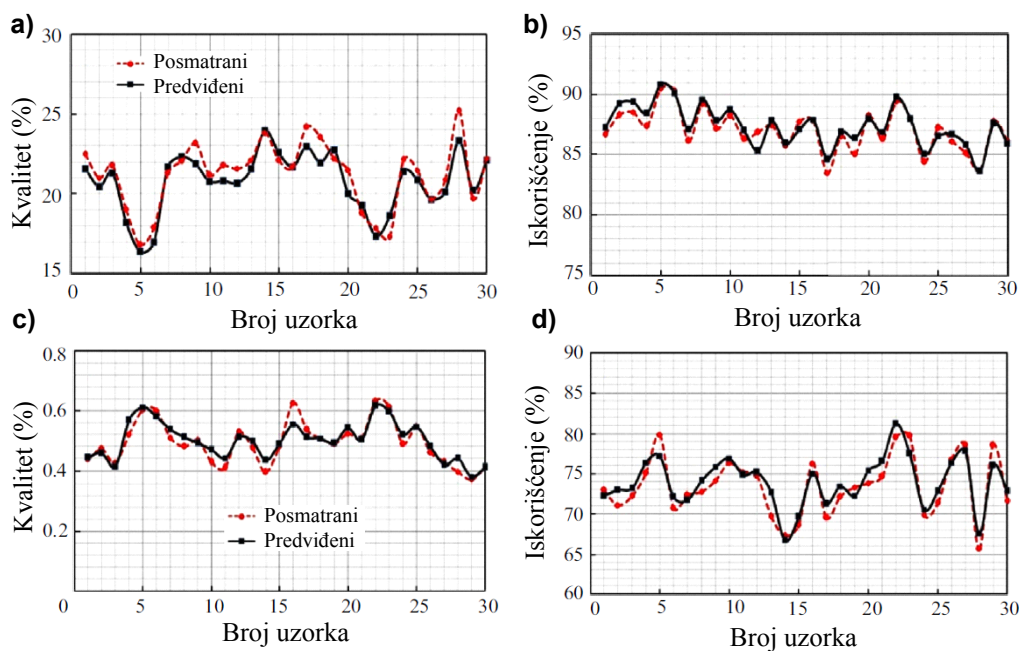
Prema ovim istraživačima, predloženi integrisani model ima dobru primenljivost u industriji jer dostiže veliku tačnost u predviđanju vrednosti kvaliteta koncentrata (izraženog masenim odnosom $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) u proizvodnim uslovima (Slika 40), uz relativnu grešku manju od 6% [Cao et al. (2013)].

Modeli flotacijskog procesa koji podrazumevaju kombinovanje metode potpornih vektora sa različitim AI tehnikama takođe se mogu naći i u drugim studijama. Na primer, Zhang i saradnici opisuju napredni LS-SVM algoritam za predviđanje flotacijskog iskorišćenja. Ovaj algoritam, pored metode potpornih vektora, obuhvata primenu fazi logike i genetskih algoritama [Zhang et al. (2012)]. Dalje, prema navodima Hea i saradnika, moguće je integrisati principe SVM i fazi logike (uz upotrebu tehnika procesiranja slike) u cilju što boljeg prepoznavanja izgleda pene iz procesa flotacije sumpora [He et al. (2013b)].

Kao dodatak ovim istraživanjima, Yang i Huang izveštavaju o potencijalu kombinovanja tri metode (SVM sa višestrukom kernel funkcijom, metoda glavnih komponenta³⁰ i algoritam roja čestica) kako bi se predvidelo iskorišćenje i kvalitet flotacijskog koncentrata [Yang and Huang (2010a,b)].

³⁰ Metoda koji se koristi za smanjivanje dimenzije skupa podataka, uz istovremeno zadržavanje maksimalno mogućeg varijabiliteta koji je prisutan u tim podacima.

Integracija genetskih algoritama sa drugim metodama veštačke inteligencije može da da dobre rezultate u modelovanju procesa. Na primer, Nakhaei i saradnici su razvili hibridni neuro-genetski algoritam (GANN) za predviđanje performansi procesa u flotacijskoj koloni iz poluindustrijskog postrojenja za flotaciju bakra u Iranu. Tip mreže koji je korišćen pri modelovanju je višeslojni perceptron, pri čemu je optimizacija arhitekture i parametara mreže (tj. određivanje optimalnog broja skrivenih slojeva, broja neurona u skrivenom sloju, momenta i stope učenja) izvršena pomoću genetskog algoritma. Na ovaj način dobijene su optimalne arhitekture neuronskih mreža [8-17-10-2] i [8-13-6-2] za predviđanje sadržaja i iskorišćenja Cu i Mo u koncentratu, respektivno. Rezultati dobijeni pomoću modela pokazali su dobru korelaciju sa stvarnim rezultatima u postrojenju (slika 41) [Nakhaei et al. (2013b)]. Slično tome, Hales i saradnici su koristili genetski algoritam za optimizaciju parametara neuronskih mreža koje predviđaju kvalitet koncentrata i jalovine u ciklusu flotacije bakra [Hales et al. (1999)].



Slika 41. Poređenje izmerenih vrednosti u flotacijskoj koloni i vrednosti dobijenih u procesu testiranja GANN modela: (a) Sadržaj Cu u koncentratu; (b) Iskorišćenje Cu u koncentratu; (c) Sadržaj Mo u koncentratu; (d) Iskorišćenje Mo u koncentratu [adaptirano prema Nakhaei et al. (2013b)].

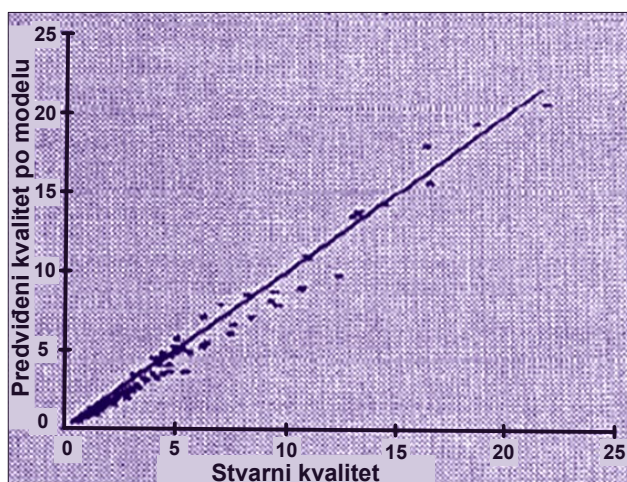
Dalje, Karr je ukazao na mogućnost primene genetskih algoritama sa ciljem podešavanja određenih parametara u klasičnim empirijskim i poluempirijskim jednačinama koje opisuju dešavanja u flotacijskoj koloni, kako bi dati klasični

empirijski model što bolje odgovarao realnom procesu. Na primer, genetski algoritam je kreiran tako da minimizira srednju kvadratnu grešku između stvarnih podataka iz flotacijskog postrojenja u Mount Isa Mines, Australija i odgovarajućih podataka dobijenih po modelu [Karr (1999)]. Deo rezultata prikazan je u tabeli 11.

Tabela 11. Poređenje stvarnih rezultata u postrojenju Mount Isa Mines i rezultata dobijenih po klasičnom modelu, čiji su parametri podešeni pomoću genetskog algoritma [adaptirano prema Karr (1999)].

	% Pb		% Zn		% Fe	
	Po modelu	Stvarni	Po modelu	Stvarni	Po modelu	Stvarni
Stadijum 1 Koncentrat	11.7	11.8	41.0	41.8	12.4	12.5
Stadijum 1 Jalovina	5.7	5.7	14.6	14.5	26.6	26.7
Stadijum 2 Koncentrat	11.1	10.7	36.5	37.4	14.0	14.2
Stadijum 2 Jalovina	5.0	5.0	11.6	11.7	28.3	28.2
Stadijum 3 Koncentrat	11.1	11.1	34.3	32.5	17.5	16.9
Stadijum 3 Jalovina	4.5	4.5	9.7	9.8	29.2	29.2

Primer tehnike modelovanja koja kombinuje fazi logičke metode sa genetskim algoritmima u cilju opisa performansi rada flotacijske kolone predložili su Vieira i saradnici [Vieira et al. (2004)]. Osim toga, Scheiner i saradnici [Scheiner et al. (1996)] su prikazali rezultate fazi-genetskog modela koji predviđa kvalitet jalovine u ciklusu flotacije fosfata (slika 42).



Slika 42. Rezultati modelovanja procesa flotacije fosfata primenom fazi logike i genetskih algoritama – poređenje stvarnih vrednosti BPL u jalovini i vrednosti dobijenih po modelu [adaptirano prema Scheiner et al. (1996)].

S druge strane, Chuk i Kuchen su opisali metodu za optimizaciju rada flotacijske kolone. Metoda predviđa maksimizaciju profita uz održavanje kvaliteta koncentrata i ostalih procesnih parametara u predviđenim granicama. Postupak je zasnovan na višekriterijumskoj optimizaciji pomoću genetskih algoritama i definisanom kriterijumu klasifikacije skupa Pareto optimalnih rešenja [Chuk and Kuchen (2011)]. S obzirom da selekcija najboljeg rešenja iz Pareto skupa podrazumeva dodatnu primenu matematičkog aparata, autor disertacije smatra ovaj pristup vrstom hibridne metode.

Još jedan, kvalitativno i metodološki potpuno drugačiji pristup prezentovan je u radu koji su objavili Yang i saradnici. Oni su predložili QSAR³¹ modele za predviđanje selektivnosti flotacije halkopirita od pirita primenom različitih kolektora. Pri formiranju modela korišćen je algoritam genetske aproksimacije funkcije koji kombinuje metodu Fridmanovih multivarijantnih adaptivnih regresionih splajnova (MARS)³² i klasične genetske algoritme [Yang et al. (2012)].

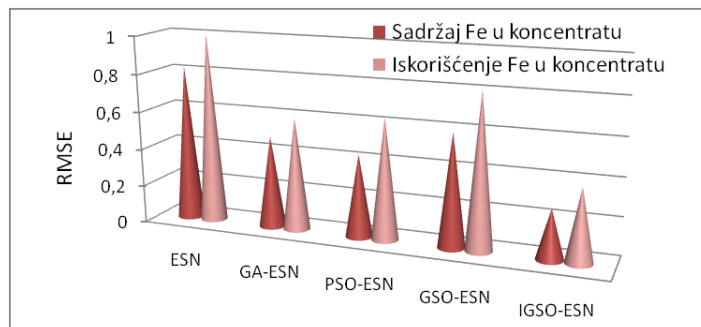
Genetski algoritmi imaju dobar optimizacioni potencijal u hibridnim metodama, što se može zaključiti iz rezultata različitih studija. Ipak, u nekim slučajevima, pokazano je da druge metode imaju bolje mogućnosti optimizacije. Na primer, Wang i saradnici su uporedili pet soft senzora baziranih na mreži sa eho stanjem (ESN)³³ koji predviđaju sadržaj i iskorišćenje gvožđa u koncentratu u zavisnosti od izgleda slika flotacijske pene. Za optimizaciju parametara neuronske mreže korišćeni su različiti algoritmi: genetski algoritam (GA), algoritam roja čestica (PSO), algoritam svitaca (GSO) i poboljšani algoritam svitaca (IGSO). (Poboljšanje GSO algoritma izvršeno je u smislu uvođenja specifičnog faktora³⁴, kako bi se izbegao fenomen lokalnog optimuma). Kao što se može videti sa slike 43) IGSO algoritam je u ovom slučaju pokazao bolju mogućnost optimizacije parametara mreže od ostalih algoritama [Wang et al. (2014b)].

³¹ Engl. Quantitative structure–activity relationship models - Modeli kvantitativnog odnosa strukture i aktivnosti

³² Vid regresione analize

³³ Engl. Echo state network – vrsta rekurentne neuronske mreže

³⁴ Engl. Crowded degree factor – faktor stepena skučenosti



Slika 43. Poređenje korena srednje kvadratne greške predviđanja (RMSE) hibridnih modela [prilagođeno iz Wang et al. (2014b)].

5.8 FINALNA RAZMATRANJA O MODELOVANJU METODAMA SOFT KOMPJUTINGA

Uzimajući u obzir da se tema ove doktorske disertacije odnosi na modelovanje flotacijskih prosa metodama soft kompjutinga, prvenstveno na fazi logičke metode, u ovom poglavlju će biti dat komentar na trenutno stanje u ovoj oblasti. Osim toga, biće predstavljene neke od ideja vezane za dalje akcije i razvoj datih modela.

5.8.1 Analiza prikazanih rezultata svetskih istraživanja

Generalno se može tvrditi da su se dosadašnja unapređenja flotacijskog procesa odvijala na dva nivoa. Na tehnološkom nivou, uprkos određenim inovacijama koje su razvijene tokom poslednjih godina, trend unapređenja je usporen. Inkrementalna poboljšanja se primenjuju sporadično još od vremena pojave kolona flotacijske ćelije i uglavnom se odnose na učinak faze oslobađanja minerala, povećanje zapremine flotacijskih ćelija, primenu novijih tipova reagenasa i sl., iz čega se može zaključiti da je sa tehnološkog aspekta, aktuelni proces flotiranja doveden u zonu svog „lokalnog” maksimuma.

Otkrića i unapređenja koja slede, na bazi novih materijala ili novih reagenasa svakako će doprinostiti daljem tehnološkom poboljšanju procesa; međutim, u oblasti modelovanja i optimizacije, na drugom, nazovimo ga procesnom nivou, značajna unapređenja se tek mogu očekivati.

Kao što se može zaključiti na osnovu svetskih istraživanja i iskustava, u matematičkom modelovanju flotacijskih procesa za sada su najviše u upotrebi veštačke

neuronske mreže, a zatim sledi primena fazi logičkih metoda. Kroz većinu izveštaja opisanih istraživanja dokumentovana su unapređenja, dobri rezultati, ponekad i značajniji uspesi u modelovanju procesa flotacije (ova konstatacija se pogotovo odnosi na neuronske mreže, koje često pokazuju superiornost u odnosu na druge metode modelovanja). Međutim, treba imati u vidu vrlo važne činjenice koje podrazumevaju sledeće:

- Mnoga istraživanja uključuju samo laboratorijska ili poluindustrijska ispitivanja koja podrazumevaju vrlo ograničen broj slučajeva, a neka od njih su čak razvijena samo na osnovu dvofaznog sistema (bez učešća čvrste faze koja, praktično, diktira uslove procesa flotacije), ili isključivo na teorijskim razmatranjima.
- Istraživanja koja koriste industrijske podatke uzimaju u obzir veoma kratak vremenski period rada postrojenja, tako da je vrlo diskutabilno da li bi isti model dobro opisivao proces, ako bi se primenio u dužem vremenskom periodu.
- Skoro sva istraživanja se odnose na samo jedan stadijum flotiranja (najčešće je to osnovno flotiranje), zanemarujući pri tom dešavanja u ostalim flotacijskim stadijumima, koja su, svakako, od izuzetnog značaja za karakterizaciju procesa flotacijske koncentracije u celini.

Dalje, stiče se utisak da je u modelovanju flotacijskih procesa, prema trenutnoj situaciji, veća pažnja posvećena flotacijskoj koloni, što sa aspekta praktične primene nije u potpunosti opravdano, s obzirom na veliko učešće mehaničkih flotacijskih ćelija u svetskim postrojenjima za pripremu mineralnih sirovina. Takođe, dosadašnja istraživanja u oblasti modelovanja flotacijskih procesa metodama soft kompjutinga još uvek nisu obuhvatila neke tipove mineralnih sirovina.

Ipak, mora se priznati da složenost samog procesa flotacije na prvom mestu, kao i drugi faktori (kao na primer, dostupnost industrijskih podataka, dostupnost ekspertskog znanja iz oblasti flotacije i soft kompjutinga, učestalost primene procesa flotiranja u industrijskoj pripremi određene sirovine itd.) u mnogome diktiraju uslove razvoja modela.

5.8.2 Neki aspekti primene metoda soft kompjutinga u modelovanju flotacijskih procesa

Višedimenzionalna složenost sirovine i činjenica da je flotacijski sistem sam po sebi kompleksan jer se odvija na granici tri faze, čine da se u istraživanjima, na određeni način, još uvek intuitivno odnosimo prema njemu. To je razlog zašto se metode soft kompjutinga često smatraju veoma pogodnim za tumačenje i optimizaciju flotacijskih sistema. Da li su onda, barem prema dostupnim rezultatima istraživača širom sveta te metode našle svoje mesto?

U skladu sa prethodno navedenim, ne čini se da je tako. Ili bar ne u očekivanom obimu. Štaviše, moglo bi se zaključiti da je sistem tu, da su alati takođe tu, ali da ne postoji odgovarajući mehanizam ili da alati zahtevaju dodatno „brušenje”.

Zajednička karakteristika primene ovih ideja je da za sada nema pokušaja da se razvije *generalizovani pristup, ili opšti model procesa flotacijske koncentracije* što je jasan pokazatelj da je upotreba metoda soft kompjutinga u istraživanjima flotacijskih sistema još uvek u početnim fazama. Delimično se može tvrditi da izuzetak ovog pravila predstavlja komercijalizovani softver za kontrolu i upravljanje u flotacijskim postrojenjima koji koristi principe fazi logike i metodu veštačkih neuronskih mreža [Shean and Cilliers (2011)]. Ali ni ovakvi softverski paketi nisu sveobuhvatni, jer se primenjuju samo na pojedine podsisteme u okviru flotacijskog postrojenja. Gledano sa ovog aspekta, tendencija generalizacije, odnosno tendencija ka pronalaženju opštijih oblika soft kompjuting flotacijskog modela se tek može očekivati.

Naime, u problematici matematičkog modelovanja u rudarskom inženjerstvu uopšte, a posebno u pripremi mineralnih sirovina, obično se barata stohastičnošću kao opštom karakteristikom. Međutim, takođe se često zanemaruje činjenica da je u flotacijskom sistemu, npr. (a u drugim vrstama procesa situaciju obično smatramo još jednostavnijom) samo jedna komponenta (mineralni sastav sirovine) nepredvidiva i to najčešće samo u određenom intervalu vrednosti. Kada su u pitanju drugi učesnici flotacijskog sistema (voda, vazduh, reagensi, itd.), može se tvrditi da ih „poznajemo” i da na njih možemo uticati prilikom kreiranja tog sistema.

Prema tvrdnjama koje je izložio Fuerstenau, zbog smanjenja kvaliteta i krupnoće sirovine, odnosno usložnjavanja sastava rude, postoji potreba za istraživanjem

ponašanja smesa minerala koje nastaju u uslovima pripremnih procesa, a ne samo za testiranjem njihove sposobnosti flotiranja. U smislu produktivnosti i efikasnosti procesa, potrebno je zauzeti odgovarajuću strategiju. U dugoročnom istraživačkom smislu, mada paradoksalno zvuči, daleko je značajnije izvesti pravilnu karakterizaciju mineralne sirovine nego utvrditi okolnosti u kojima se dobijaju najbolji rezultati procesa koncentracije [Fuerstenau (2007)]. Na osnovu toga se može izvesti zaključak da je potreba za poopštavanjem pristupa izraženija nego što se to proučavajući ovde pobrojana iskustva čini.

Međutim, ne sme se izgubiti iz vida činjenica da čak i potpun uvid u svojstva mineralne sirovine nije garancija za optimalno odvijanje procesa. Naime, i tada bismo bili u mogućnosti da samo delimično vladamo flotacijskim sistemom u celini (kao primer se mogu uzeti procesi na granici faza kao što su: sudar, prianjanje ili odvajanje mineralnih zrna od vazdušnih mehurića, prelazak jalovine u fazu pene i sl. koji će se uvek odvijati sa značajnim stepenom nepredvidivosti). U tom smislu se može očekivati da metode soft kompjutinga koje tolerišu nepreciznost i delimično poznavanje procesa bitno doprinesu generalizaciji flotacijskih modela.

Stanovište koje je u suprotnosti (ali ne sasvim) sa prethodno razmatranim jeste potpuno fokusiranje *na samo jedan flotacijski sistem*, odnosno na konkretno postrojenje. U tom slučaju, mišljenje autora disertacije je da bi se adekvatan metod razvoja modela sastojao u sledećem:

Pre svega, neophodno je prikupiti što više podataka o radu konkretnog postrojenja, što se postiže praćenjem njegovog rada u dugom vremenskom periodu. U tom smislu, trebalo bi obuhvatiti sve stadijume prerade rude, od mlevenja do finalnog stepena prečišćavanja. Raspolaganje velikim brojem podataka omogućava da se na adekvatan način uspostave zavisnosti između promenljivih veličina koje su od uticaja na proces flotacije i odbace one veličine čiji je dejstvo zanemarljivo. Tačno je da bi ovakav pristup bio veoma komplikovan i da bi vodio razvoju izuzetno kompleksnog modela, ali složenost samog sistema na neki način diktira i kompleksnost pristupa modelovanju. Jedan od primera bi bilo definisanje „svih mogućih varijanti” slika flotacijske pene i utvrđivanje svih uticajnih faktora i načina na koji dovode do stvaranja pene preciziranih svojstava, kao i njihovo „povezivanje” sa tehnološkim pokazateljima procesa. Pri kreiranju takvog modela svakako bismo se morali osloniti na današnje savremene

računarske tehnike, među kojima bi i soft kompjuting metode dale svoj doprinos, pogotovo u slučajevima gde se nepreciznost i neizvesnost ne mogu zaobići. Takođe, ovakav model bi trebalo da bude podložan korekcijama, odnosno da poseduje sposobnost učenja, što je inače svojstvo veštačkih neuronskih mreža.

Kasnije bi se takav model mogao primeniti i u kontrolnim sistemima za ista ili slična flotacijska postrojenja, što bi značilo usmerenje ka generalizaciji pristupa modelovanju flotacijskih procesa.

Najzad, filozofija procesa flotacijske koncentracije kakav trenutno egzistira u postrojenjima je „ne držimo situaciju (u flotacijskoj mašini) pod kontrolom, ali uslove podešavamo tako da dobijemo rešenje koje je dovoljno blisko optimalnom”. Drugim rečima, princip ekonomskog „zadovoljstva” odnosno *ekonomski zadovoljavajućeg* rešenja jednoznačno određuje potrebu za poznavanjem mehanizama u jednom procesu. Samim tim, logično je pretpostaviti da se proces generalizacije ili iznalaženja tj. razvoja opšteg modela pokrene u okolnostima koncentracije sirovina visoke vrednosti.

Još jedan aspekt razmatranja primene soft kompjuting metoda je i *adekvatnost primene u skladu sa karakteristikama metode*. Sve prikazane metode smatraju se pogodnim da budu osnova inteligentnog, odnosno ekspertskog sistema, međutim, metode se znatno razlikuju po svojim kvalitetima (tabela 12)

Tabela 12. Poređenje različitih soft kompjuting metoda [adaptirano prema Abraham (2003)].

	Fazi logika	Veštačke neuronske mreže	Genetski algoritmi
Sposobnost učenja	–	+	+(-)
Prezentacija znanja	+	–	-(+)
Ekspertsko znanje	+	–	–
Nelinearnost	+	+	+
Sposobnost optimizacije	–	+(-)	+
Tolerancija greške	+	+	+
Tolerancija nepreciznosti	+	+	+
Rad u realnom vremenu	+	+(-)	-(+)

Posmatrajući pojedinačno aspekte istraživanja prikazanih u ovom radu, stiče se utisak da se istim alatima istovremeno pokušavaju „pokriti” mnogobrojne vrste problema sa kojima se sreću istraživači i inženjeri u svakodnevnom radu. Međutim, imajući u vidu tabelu 12, teško je zaključiti da različite soft kompjuting metode mogu pokriti, odnosno rešiti iste ili slične probleme. Logičnije je pretpostaviti da odgovor na

pitanje optimalne primene ovih metoda leži u određenoj kombinaciji ili čak sintezi ovih metoda, iz čega i slede pojave hibridnih pristupa.

Međutim, pitanje hibridnosti modela je osetljivo. Jednostavno kombinovanje upotrebe dve metode u različitim „fazama” modela moglo bi se nazvati „nižim nivoom hibridizacije”. Pravi hibridni pristup bi odgovarao situaciji u kojoj se metode soft kompjutinga međusobno dopunjuju i takvih pristupa je u praksi malo. Osnovni razlog za ovakvu situaciju je pre svega nedovoljno poznavanje mogućih ishoda i rezultata. Ipak, hibridni pristup svakako predstavlja pravac mogućeg unapređenja primene soft kompjuting metoda u cilju optimizacije procesa flotiranja.

Jedan od mogućih pravaca istraživanja svakako bi bio i „obrnuti postupak”. Naime, inženjeri sa radnim zadacima u pripremi mineralnih sirovina se, pomoću metoda soft kompjutinga, uz sve prednosti i nedostatke pomenutih metoda, uče i navikavaju da razmišljaju van okvira nametnutih klasičnim inženjerskim obrazovanjem (pre svega u oblasti matematike). Zašto, s tim u vezi, stručnjaci iz oblasti flotiranja ne bi formulisali problem i postavili ga pred stručnjake iz oblasti soft kompjutinga: koji alati postoje (ili se mogu razviti) za rešavanje našeg problema? U flotacijskoj ćeliji odvijaju se događaji koji su naizgled haotični, ali su do izvesne mere kontrolisani; koji se delimično pokoravaju kinetici hemijskih reakcija, ali ne sasvim, jer je proces limitiran na vrlo ograničenu površinu; koji prate zakone klasične fizike, ali se praktično odvijaju u specifičnoj faznoj sredini – flotacijskoj pulpi, itd. Često se dešava da se u matematici razvije alat čija se primena u određenim inženjerskim disciplinama u početku samo nazire, da bi se tokom godina potpuno usvojila. Prema tome, problem se može posmatrati i sa druge strane: zašto ne bismo poznavajući ciljeve i opšte crte ponašanja sistema tragali za *matematičkim alatom potrebnih karakteristika* za njegovo konačno savladavanje.

Ako fazi logički sistemi unose nijanse u klasično logičko rasuđivanje, veštačke neuronske mreže predstavljaju simulaciju rada ljudskog mozga, genetski algoritmi simulaciju procesa prirodne selekcije, kakav bi alat posedovao potencijal za tumačenje ili simulaciju „kontrolisanog” haosa kakav vlada u flotacijskoj ćeliji?

Konačno, može se reći da istraživačima i praktičarima u flotacijskim sistemima praktično preostaju dva pravca: jedan, koji je praktično i aktuelan, da istražuju rešenja

primenljiva na lokalnom nivou (na jednom ležištu ili čak na jednoj partiji rude) i očekuju matematički odgovor, kao i drugi, da koristeći raspoložive alate rade na slagalici koja bi dovela do opštijih oblika rešenja problema modelovanja procesa flotacijske koncentracije.

6.0 TEHNIKE UPRAVLJANJA FLOTACIJSKIM POSTROJENJIMA SA MEHANIČKIM FLOTACIJSKIM ČELIJAMA

Uspešno upravljanje flotacijskim postrojenjima u savremenim uslovima predstavlja izazov i složen zadatak koji tek treba ostvariti. Broj pokušaja da se pronade odgovarajuća upravljačka tehnika kojom bi u potpunosti bio obuhvaćen dinamički, složen i nedovoljno definisan flotacijski sistem je ogroman; međutim, trenutna situacija na ovom polju govori u prilog jedino inkrementalnim poboljšanjima.

Ipak, novi trendovi u oblasti procesa flotiranja, posebno kada je reč o automatizaciji i kontroli procesa, nagoveštavaju da se flotacija suočava sa novom erom, pre svega zbog:

- Smanjenja složenosti šema flotiranja, čime se smanjuju bezbednost i stabilnost, ali sa druge strane proces postaje lakši za regulisanje i optimizaciju;
- Trenda povećanja zapremine flotacijskih ćelija, usled čega se smanjuje broj neophodnih mernih mesta i instrumenata i pojednostavljuje projekat, ali sa druge strane povećava potreba za pouzdanošću i preciznošću instrumenata;
- Razvoja tehnologije u pravcu eksploatacije „pametne” merne i regulacione opreme (pre svega vizuelna analiza procesa i digitalni prenos i obrada podataka) čime se obezbeđuje kvalitetniji i veći protok informacija, kao i mogućnost samodijagnostikovanja [Laurila et al. (2002)].

Prema tome, značajan napredak u oblasti upravljanja flotacijskim procesom se svakako može očekivati u budućim istraživanjima.

Pošto se tematika ove disertacije odnosi na modelovanje procesa flotacije u mehaničkim ćelijama, ovo poglavlje sadrži pregled svetskih iskustava o upravljanju procesom flotacije koji se odvija u ovoj vrsti ćelija. Upravljanje procesom u flotacijskoj koloni nije razmatrano, iz razloga što se procesni parametri (koji se prate tokom upravljanja) obično razlikuju u odnosu na mehaničke flotacijske ćelije.

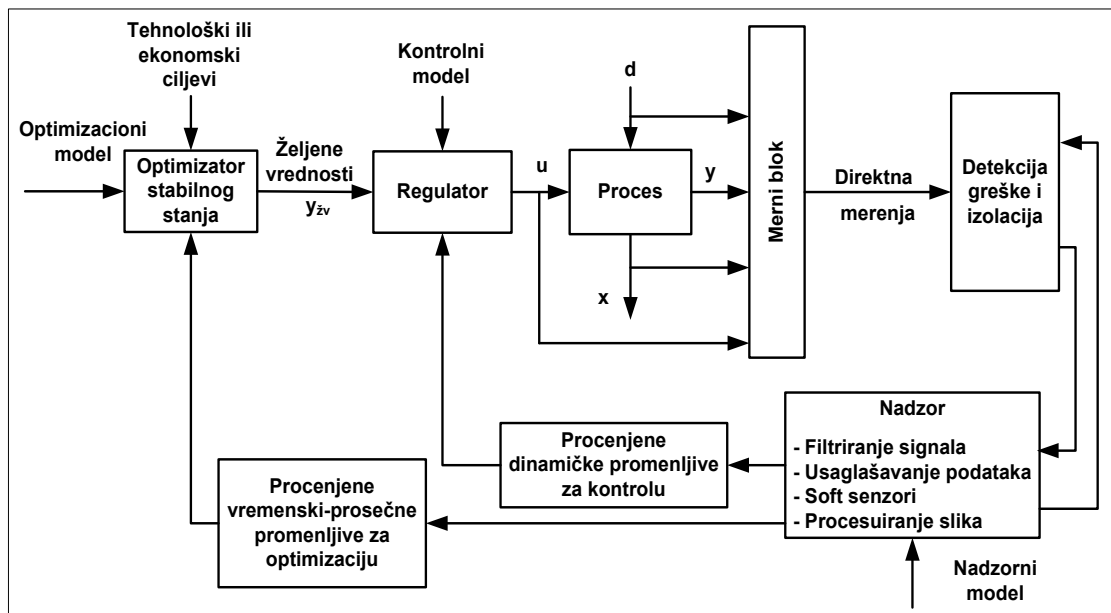
6.1 STRATIFIKACIJA UPRAVLJAČKIH NIVOVA I CILJEVI UPRAVLJANJA

Prvi korak u upravljanju industrijskim procesima je pažljivo definisanje ciljeva proizvodnje i ograničenja. Na primer, cilj može biti samo održavanje stabilnosti procesa pri određenim fiksnim vrednostima ili vrednostima koje se retko menjaju.

Kada je reč o evaluaciji uspešnosti procesa flotacijske koncentracije, sa proizvodnog aspekta, dominantne su dve veličine: (1) kvalitet finalnog proizvoda, tj. koncentrata i (2) iskorišćenje korisne komponente (ili korisnih komponentata) u koncentratu. Van Schalkwyk navodi da kvalitet koncentrata i iskorišćenje čine dva stepena slobode kojima se označavaju ciljevi koje treba ostvariti u jednom flotacijskom ciklusu [Van Schalkwyk (2002)]. Ponekad se, u tradicionalnom smislu, evaluacija flotacijskog procesa vrši na osnovu iskorišćenja korisnih komponentata u osnovnom koncentratu, koje se postiže u određenom vremenskom intervalu. Uzimajući u obzir da je iskorišćenje proporcionalno vremenu flotiranja, pojedini autori opisuju proces flotacije jedino kao vremensku funkciju iskorišćenja [Uçurum and Bayat (2007)]. Međutim, sa upravljačkog aspekta, uobičajeno je da se u obzir uzme i kvalitet koncentrata, a u nekim slučajevima i jalovine.

U skladu sa prethodno navedenim, za cikluse flotiranja cilj upravljanja se obično formuliše kroz održavanje određene vrednosti u granicama ravni definisane krivama kvalitet koncentrata – iskorišćenje [Hodouin (2011)].

Nakon definisanja kontrolnih ciljeva, neophodno je izabrati i razviti pogodan i pouzdan model procesa. Naime, alati koji se primenjuju u bilo kom segmentu ciklusa upravljanja zasnovani su na procesnim modelima. Po segmentima ciklusa flotiranja definišu se modeli sa specifičnim namenama kao što su sistematizacija podataka, zatim praćenje stanja, upravljanje, optimizacija, detekcija grešaka (slika 44) [Hodouin (2011)]. O modelima i modelovanju flotacijskih procesa bilo je reči u prethodnim poglavljima.



Slika 44. Detalji bloka za obradu podataka generalizovanog upravljačkog ciklusa (u – manipulisane promenljive; d – poremećajne promenljive; x – promenljive unutrašnjeg stanja procesa; y – kontrolisane promenljive) [Hodouin (2011)].

6.1.1 Hijerarhija upravljačkih (kontrolnih) nivoa

Ostvarivanje ciljeva upravljanja procesom flotiranja (tj. regulisanje svojstava ulaznog materijala i održavanje procesnih parametara u skladu sa zadatim ograničenjima) moguće je implementacijom upravljanja kroz odgovarajuće strukture, odnosno hijerarhijske nivoe. Postoje različita mišljenja u pogledu broja i povezanosti ovih struktura. Većina autora opisuje kontrolu procesa kao hijerarhijsku, kroz 3 do 4 nivoa [Laurila et al. (2002), Gupta and Yan (2006), Liu and MacGrogor (2008)].

Stratifikacija od dva nivoa

Prema mišljenju koje su izložili Sbárbaro i del Villar osnovni cilj kontrolnih sistema u svakom postrojenju pripreme mineralnih sirovina je da obezbedi: a) pravovremene informacije i b) preduzimanje hitnih mera radi održavanja stabilnog rada postrojenja. Ostvarivanje ovog cilja postiže se preko niza operacija koje se prema svojoj funkciji mogu grupisati u (1) osnovne (interfejs čovek-mašina, prikupljanje i obrada podataka, komunikacija i regulacija) i (2) napredne (procesna analiza, optimizacija i detekcija grešaka) [Sbárbaro and del Villar (2010)].

Stratifikacija od tri nivoa

U okviru osnovnih sistema upravljanja Jakhu pominje regulaciono, nadzorno i optimizaciono upravljanje. Isti autor navodi da ovi kontrolni nivoi mogu biti povezani na takav način, da niži nivoi mogu i dalje biti u funkciji, čak i ako viši nivoi nisu [Jakhu (1998)].

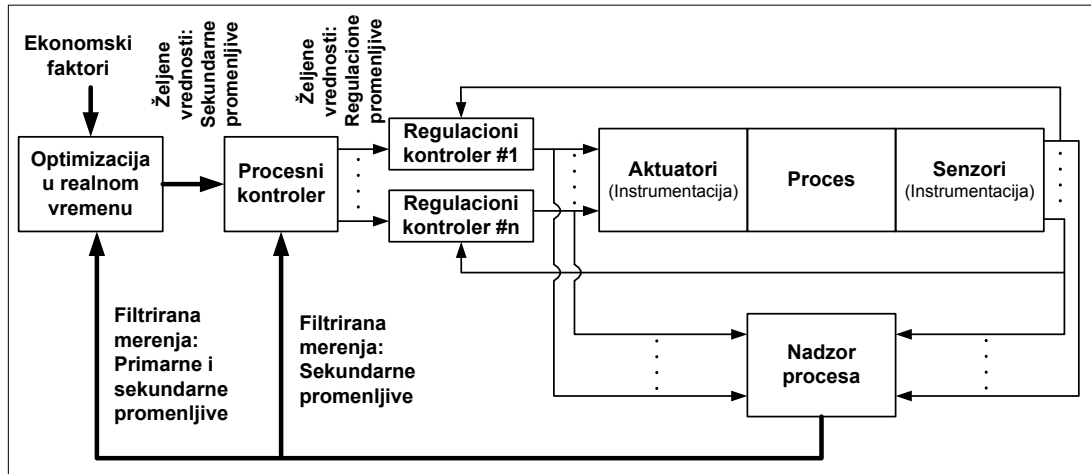
Hijerarhijsku podelu koja se funkcionalno zasniva na ciljevima upravljanja flotacijskim procesom predložili su i Liu i MacGregor [Liu and MacGregor (2008)]: (1) stabilizacija procesa minimiziranjem učestalosti promena i intenziteta poremećajnih činilaca, (2) postizanje nominalnih vrednosti kvaliteta koncentrata i iskorišćenja i (3) maksimiziranje ekonomskih performansi procesa.

Stratifikacija od četiri nivoa

Laurila i saradnici su predstavili stratifikaciju upravljanja procesom flotacije. Osnovni nivo je instrumentacioni i obuhvata senzore, komunikacione puteve i analizatore. Sledeći nivo je nivo bazne kontrole koji se sastoji iz procesnih kontrolera (nivoa pulpe, protoka vazduha i dinamike dodavanja reagenasa). Na trećem nivou odvija se napredna kontrola procesa održavanjem kvaliteta koncentrata i iskorišćenja u željenim granicama, dok se na četvrtom nivou ceo proizvodno-poslovni proces optimizuje maksimizacijom profita [Laurila et al. (2002)]

Del Villar i saradnici [Del Villar et al. (2010)] na sličan način opisuju stratifikaciju kontrolnih nivoa u postrojenju sa kolona flotacijskom ćelijom (koja se takođe može primeniti na flotacijska postrojenja sa mehaničkim flotacijskim ćelijama). Autori su izdvojili sledeće slojeve ili nivoe: (1) instrumentacija i regulaciona kontrola, (2) nadzor procesa, (3) procesna kontrola i (4) optimizacija u realnom vremenu (slika 45).

Gupta i Yan daju nešto drugačiju podelu koja se u većoj meri zasniva na operativnosti celog postrojenja: na prvom nivou se nalaze sve instrumentacione i regulacione strukture; na drugom se vrši stabilizacija procesa i njegova optimizacija manipulacijom ulaznih promenljivih; treći nivo se sastoji u maksimiziranju kapaciteta i ograničavanju količine svih međuproizvoda, dok četvrti nivo preuzima nadzornu ulogu nad funkcionisanjem celokupnog postrojenja [Gupta and Yan (2006)].

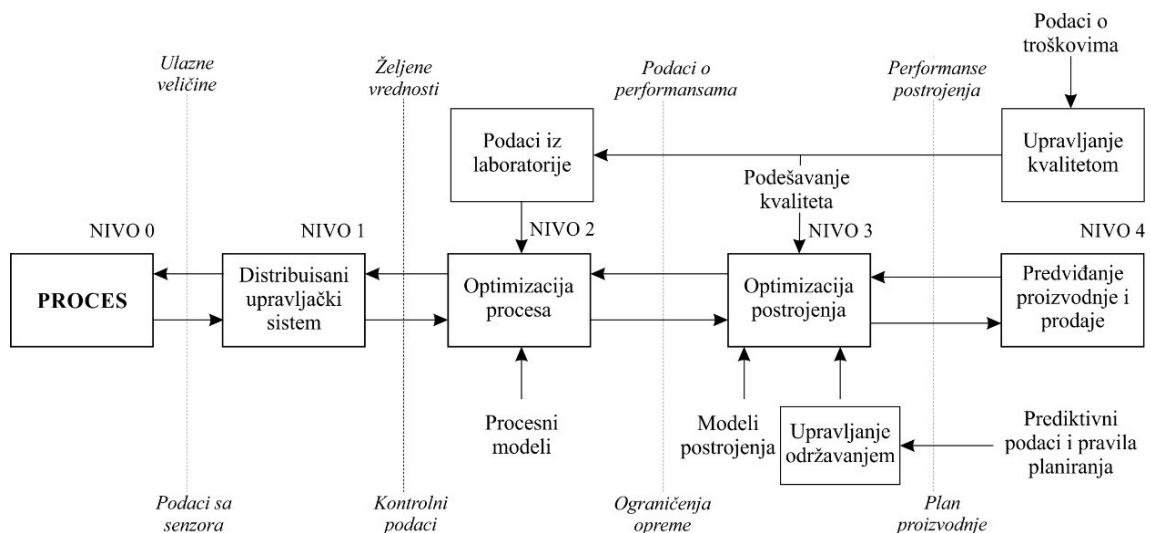


Slika 45. Kontrolna hijerarhija u upravljanju procesima pripreme mineralnih sirovina [Del Villar et al. (2010)].

Stratifikacija od pet nivoa

Integracijom procesnih i proizvodnih funkcija u jedinstveni poslovni ambijent Flintoff izdvaja pet nivoa upravljanja procesom.

Elementi – činioци upravljanja procesom flotiranja – se, prema Flintoffu, izdvajaju na način prikazan na slici 46. U istraživačkom fokusu nalaze se instrumentaciona tehnika (senzori, regulatori), hardver (PLC, periferni uređaji) i strategije upravljanja (algoritmi, dijagnostika), koje se često nazivaju trijada upravljanja [Flintoff (2002)].



Slika 46. Integracija procesnih i proizvodnih funkcija i mesto modela u domenu upravljanja procesima [adaptirano prema Flintoff (2002)].

Imajući u vidu pomenute strukture, može se zaključiti da stratifikacija procesa upravljanja zauzima istaknuto mesto u svim diskusijama vezanim za strategije upravljanja procesima u flotacijskom postrojenju. Na osnovu predstavljenih primera, izdvajaju se tri grupe stratifikacija: (1) pozicione, prema kojima se upravljanje procesima organizuje kroz nivoe povezane sa tehnološkim procesnim mestom, (2) stratifikacije zasnovane na realizaciji ciljeva procesa i (3) integrisano proizvodno-poslovne stratifikacije. Bez obzira na tip stratifikacije, odnosno usmerenje upravljačke strategije, u stručnom pogledu, krajem XX veka, ekspanzija upravljačkih strategija usmerena je u novom pravcu. U sve većoj meri razvijaju se strategije zasnovane na inteligentnom modelovanju, ekspertskim sistemima i sl.

6.1.2 Izbor kontrolne strategije

Izbor odgovarajuće kontrolne strategije je ključni element za procesnu kontrolu određenog flotacijskog postrojenja. Stoga je važno identifikovati prednosti i mane izabrane kontrolne strategije i biti siguran da je usvojena strategija najbolje rešenje za kontrolu datog postrojenja.

Na primer, Bergh i Yianatos su identifikovali kritične aspekte upravljačkih strategija koje čine: merni instrumenti, usaglašavanje podataka, prepoznavanje obrazaca, dijagnoza i detekcija zastoja, soft senzori i praćenje performansi kontrolera. Prema njima, uspešna primena upravljačkih strategija zasnovanih na znanju (kada je reč o mlevenju i flotiranju) uglavnom zavisi od kvaliteta informacija i poznavanja procesa [Bergh and Yianatos (2011)]. Shodno tome, Remes i saradnici tvrde da je frekvencija i tačnost podataka koji se dobijaju sa on-line analizatora u postrojenju od velikog značaja za upravljanje flotacijskim ciklusom [Remes et al. (2007)].

Hodouin i saradnici smatraju da kvalitet strategije upravljanja i optimizacije zavisi od pouzdanog matematičkog modela koji opisuje statičke i dinamičke karakteristike procesa u celom operativnom opsegu. Oni ističu dva poznata razloga zašto matematički modeli često nisu odgovarajući. Prvi je činjenica da je ruda izuzetno složen sistem, suštinski okarakterisan nepreciznostima, a drugi da fizička i hemijska svojstva potprocesa nisu dovoljno izučena [Hodouin et al. (2001)].

Kada je reč o unapređenju rada postrojenja i njegove profitabilnosti, *napredne tehnike* upravljanja igraju sve veću ulogu. U radu koji su objavili Jonas i Craw izložena su pitanja pogodnosti i održivosti ovih tehnika u postrojenjima za flotacijsku koncentraciju mineralnih sirovina:

- Izabrana tehnika odgovara procesu u okviru postrojenja
 - Da li tehnika efikasno rešava probleme varijabilnih uslova u procesu?
 - Da li je izabrana tehnika funkcionalna sa postojećim instrumentima i kontrolama?
 - Da li se mogu ostvariti odgovarajući efekti u poređenju sa drugim tehnikama?
- Implementacija i podrška napredne tehnike za moderna postrojenja
 - Da li se podrazumeva implementacija ekspertskog znanja?
 - Da li se može brzo implementirati?
 - Da li se napredno upravljanje može implementirati primenom lokalnih resursa?
- Održivost naprednih tehnika upravljanja obzirom na udaljenost lokacija postrojenja
 - Da li je često potrebna tehnička podrška?
 - Da li je moguće ostvariti podršku na udaljenim lokacijama, u zemljama u razvoju i sa smanjenim brojem osoblja [Jonas and Craw (2012)]?

Pred napredne tehnike upravljanja postavljaju se zahtevi da:

- imaju stabilizujuće dejstvo (brža i kvalitetnija reakcija na smetnje);
- učestvuju u optimizaciji procesa u realnom vremenu (max/min, postizanje željenog cilja, izračunavanje optimalnih ciljeva na bazi troškova ili vrednosti);
- iziskuju minimalna ulaganja za implementaciju i podršku (komercijalan proizvod sa minimalnim prilagođavanjem, laka implementacija i jednostavna podrška sa udaljenih lokacija).

Shodno navedenim zahtevima, isti autori ističu da postoji više strategija za rešavanje problema upravljanja u postrojenjima za flotacijsku koncentraciju mineralnih sirovina:

- Klasične tehnike upravljanja (nisu odgovarajuće za dinamičke sisteme ili višestruke interakcije objekata u postrojenju)

- Multivarijabilno prediktivno upravljanje (uglavnom se koristi kod sistema sa složenom dinamikom i više interakcija u procesu)
- Inteligentne tehnike upravljanja (kod ovih tehnika je posebno složena implementacija prediktivnog upravljanja i uzimanje u obzir složenih interakcija) [Jonas and Craw (2012)].

Razmatrajući ovu podelu, kao i ostale navedene činjenice, nameće se zaključak da se tokom poslednje dve decenije mogu izdvojiti određena, jasna istraživačka usmerenja kada je reč o upravljanju procesima u flotacijskim postrojenjima sa mehaničkim flotacijskim ćelijama, procesnim modelima i optimizaciji procesa. U skladu s tim, u narednom delu teksta dat je pregled svetskih istraživanja, shodno odgovarajućim usmerenjima, pri čemu je akcenat stavljen na tehnike naprednog upravljanja.

6.2 KRATAK PREGLED METODA KLASIČNOG UPRAVLJANJA

Klasično upravljanje flotacijskim procesom zasnovano je na primeni tradicionalnih proporcionalno-integralno-derivativnih (PID) regulatora na bazi povratne sprege i upravne sprege³⁵. Uobičajeno je da se PID regulatori implementiraju u distribuirani sistem upravljanja, što znači da se u praksi sistem kontrole flotacijskog procesa ne implementira centralizovano, već se sastoji od više međusobno povezanih jedinica. [Gupta and Yan (2006), Bergh and Yianatos (2013)].

Iako Chai i saradnici ističu da su PID regulatori praktični, jednostavni za rad i veoma pouzdani [Chai et al. (2009)], mnogi autori smatraju da se PID regulatori nisu pokazali pogodnim za napredno upravljanje flotacijskim ciklusima [Pérez-Correa et al. (1998), Shean and Cilliers (2011), Suichies et al. (2000)]. U skladu s tim, Desbiens i saradnici tvrde da glavni problem upravljanja flotacijskim ciklusom pomoću konvencionalnih SISO PID regulatora leži u činjenici da postoji veliki broj manipuliranih procesnih promenljivih, dok je broj ciljnih (kontroliranih) promenljivih relativno mali (uglavnom su to kvalitet i iskorišćenje) [Desbiens et al. (1994)].

³⁵ Engl. feedback control and feedforward control

Prema nekim autorima, za kontrolu pojedinih segmenata flotacijskog procesa pogodniji su MIMO regulatori. Na primer, poređenje uspešnosti SISO i MIMO kontrolne strategije za kontrolu nivoa pulpe u flotacijskoj sekciji od šest ćelija izvršili su Kämpjärvi i Jämsä-Jounela. Performanse MIMO sistema bile su znatno bolje od performansi SISO regulatora [Kämpjärvi and Jämsä-Jounela (2003)].

Osim toga, da bi se pružio uvid u performanse PID regulatora, predstavljeni su i različiti nadzorni sistemi. Jämsä-Jounela i saradnici tvrde da ovakvi sistemi mogu poboljšati kontrolu flotacijskog procesa i kvalitet proizvoda. Međutim, prema dobijenim rezultatima, čini se da PID kontroleri i dalje ostaju pogodni samo za niže hijerarhijske nivoje upravljanja flotacijskim procesom [Jämsä-Jounela et al. (2003)].

Tako, Bergh i saradnici navode da distribuirani sistemi upravljanja nisu dovoljni za dostizanje odgovarajućeg kriterijuma za kvalitet koncentrata, te se u praksi ukazuje potreba za nadzornim upravljačkim sistemima sa adaptivnim svojstvima na različitim računarskim platformama, koji bi trebali da uzmu u obzir module za: validaciju i usaglašavanje procesnih podataka, detekciju problema u radu postrojenja i procesnoj opremi i koordinaciju lokalnih upravljačkih petlji kao deo celokupne strategije [Bergh et al. (1999)]. Suichies i saradnici sugerišu da multivarijabilna i visoko nelinearna priroda flotacijskog procesa, kao i komplikovana dinamika procesa sa dugim vremenskim konstantama i znatnim zakašnjenjima čine PID regulatore nepogodnim za kontrolu kvaliteta flotacijskog koncentrata. Shodno tome, ovi autori predlažu primenu naprednijih kontrolnih strategija [Suichies et al. (2000)]. Osim toga, Osorio i saradnici dodaju da nepotpuno fenomenološko poznavanje flotacijskog procesa, kao i nedostatak odgovarajuće i precizne instrumentacione tehnike čine nadzor i upravljanje flotacijskim ciklusom još težim. U takvim postrojenjima, konvencionalni PID regulatori ispoljavaju slab učinak, uz nedostatke robusnosti i validnosti u okviru uskih operativnih opsega [Osorio et al. (1999)]. I drugi istraživači takođe ističu da napredne tehnike, kao što su, na primer, ekspertsko i prediktivno upravljanje, obezbeđuju mnogo bolje rezultate u upravljanju flotacijskim procesom [Pérez-Corea et al. (1998), Rojas and Cipriano (2011)], dok Thwaites navodi da izbor između PID i MPC kontrolne strategije zavisi od stepena razumevanja procesa i svih interakcija u procesu [Thwaites (2007)].

6.3 MODELSKO PREDIKTIVNO UPRAVLJANJE

6.3.1 Koncept, struktura i algoritmi

Postupci koji se klasifikuju u grupu prediktivnog upravljanja zasnovanog na modelu (ili modelsko prediktivno upravljanje, skraćeno MPC) razvijeni su krajem sedamdesetih godina XX veka [Camacho and Bordons (1999)]. Termin ne označava određenu upravljačku strategiju, već širi spektar upravljačkih metoda, odnosno klasu računarskih upravljačkih algoritama koji koriste *eksplicitni model procesa* u cilju predviđanja rada postrojenja. U svakom kontrolnom intervalu se algoritmom modelskog prediktivnog upravljanja (MPC algoritam) vrši pokušaj optimizacije budućeg ponašanja postrojenja izračunavanjem redosleda budućih podešavanja manipuliranih promenljivih. Nakon definisanja optimalnog redosleda, prvi ulaz se šalje u postrojenje, a zatim se celokupno izračunavanje ponavlja u subsekventnim intervalima [Qin and Badgwell (2003)].

Drugim rečima, iza koncepta prediktivnog upravljanja na bazi modela stoji nekoliko ideja:

- Eksplicitno korišćenje modela za predviđanje izlaza iz procesa u određenom budućem vremenskom intervalu;
- Proračun upravljačke sekvence minimizacijom funkcije cilja i
- Primena pogodnih strategija kako bi se stalno vršila re-evaluacija ostvarivanja željenog ishoda i odgovarajuće usklađivanje [Camacho and Bordons (1999)].

Osnovna struktura modelskog prediktivnog upravljanja data je na slici 47.

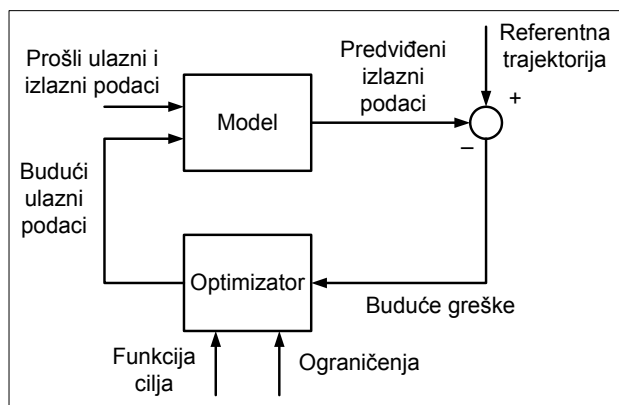
Dizajn najznačajnijih MPC algoritama, prema pojedinim autorima [Camacho and Bordons (1999), Holkar and Waghmare (2010)] obuhvata sledeće strategije: upravljanje na bazi dinamičke matrice (DMC)³⁶, modelsko prediktivno heurističko upravljanje (MPHC)³⁷, prediktivno funkcionalno upravljanje (PFC)³⁸, prošireno

³⁶ Engl. DMC – Dynamic Matrix Control

³⁷ Engl. MPHC – Model Predictive Heuristic Control

³⁸ Engl. PFC – Predictive Functional Control

samopodešavajuće prediktivno upravljanje (EPSAC)³⁹, adaptivno upravljanje na bazi proširenja horizonta (EHAC)⁴⁰ i generalizovano prediktivno upravljanje (GPC)⁴¹.



Slika 47. Osnovna struktura MPC [Camacho and Bordons (1999)].

Osim toga, prediktivno upravljanje zasnovano na modelu može se klasifikovati kao robusno i adaptivno (integracija među njima je takođe moguća) [DeHaan and Guay (2010)]. Ova klasifikacija se bazira na prethodnom poznavanju granica neizvesnosti parametara procesa ili njihove vremenske promenljivosti u sistemu.

Adaptivno upravljanje obuhvata skup tehnika koje pružaju sistematski pristup za automatsko podešavanje regulatora u realnom vremenu, u cilju postizanja ili održavanja željenog nivoa kontrole performansi sistema, kada su parametri dinamičkog modela postrojenja nepoznati ili se menjaju u vremenu. Dok je, na primer, klasična „feedback” kontrola primarno orijentisana na eliminaciju uticaja poremećaja, delujući na kontrolne promenljive, adaptivni kontrolni sistem je uglavnom orijentisan ka eliminaciji uticaja parametarskih poremećaja na performanse kontrolnog sistema.

Robusni sistem upravljanja je efikasan način održavanja poznatih parametarskih neizvesnosti u oblasti oko nominalnog modela i predstavlja dobru osnovu za adaptivno upravljanje, ali on sam po sebi nije adaptivan [Landau et al. (2011)].

S obzirom da adaptivni pristup dozvoljava ponovno podešavanje kontrolnih parametara i, shodno tome, kontrolu procesa sa vremenski varijabilnim ili neizvesnim promenljivim, zaključuje se da je adaptivno prediktivno upravljanje zasnovano na

³⁹ Engl. EPSAC – Extended Prediction Self-Adaptive Control

⁴⁰ Engl. EHAC – Extended Horizon Adaptive Control

⁴¹ Engl. GPC – Generalized Predictive Control

modelu posebno važno u pogledu kontrole procesa flotacije, za koji je karakteristično nelinearno, kompleksno ponašanje. Zbog toga, mnogi prediktivni sistemi kontrole procesa flotacije često (ali ne uvek) obuhvataju aspekte adaptivnog upravljanja [Shean and Cilliers (2011)].

Tabela 13 prikazuje neke od prednosti i mana MPC tehnike.

Tabela 13. Prednosti i nedostaci MPC tehnike [adaptirano prema www.open.umich.edu].

<i>Prednosti</i>	<i>Nedostaci</i>
Može se koristiti za rukovanje multivarijabilnim kontrolnim programima.	Neki od MPC algoritama su ograničeni samo na stabilne sisteme otvorene petlje.
Može uzeti u obzir ograničenja aktuatora	Često je potreban veliki broj koeficijenata u modelu kako bi se opisao odziv sistema.
Može povećati profit, dozvoljavajući rad sistema u blizini sistemskih ograničenja.	Ako su modeli formulisani za izlazne poremećaje, nemaju mogućnost dobre manipulacije ulaznim poremećajima.
Može brzo obavljati on-line izračunavanja.	Ako horizont predviđanja nije korektno formulisani, kontrolne performanse će biti slabe, čak i ako je model odgovarajući.
Može se koristiti za sisteme neminimalne faze i nestabilne procese.	Kod sistema sa širokim opsegom operativnih uslova koji se često menjaju (kakav je i flotacijski sistem), MPC tehnika zasnovana na linearnom modelu procesa neće biti u stanju da podrži dinamičko ponašanje procesa. Da bi se postigle bolje kontrolne performanse, neophodno je koristiti nelinearni model.
Jednostavna za podešavanje; u stanju da manipuliše strukturnim promenama.	–

Opsežan prikaz postojeće primene modelskog prediktivnog upravljanja u industriji dali su Qin i Badgwell. Ovi autori su istakli tehničke mogućnosti različitih MPC tehnologija i kroz istorijski aspekt predočili njihove prednosti i mane. Pored toga, dali su sumarni pregled linearnih i nelinearnih MPC aplikacija u raznim granama industrije [Qin and Badgwell, (2003)].

6.3.2 Modelsko prediktivno upravljanje u flotacijskom sistemu

Koncept modelskog prediktivnog upravljanja, prema Lundhu i saradnicima, u flotacijskom sistemu obuhvata tri glavna segmenta. To su: (1) dinamički model, (2) kombinacija funkcije cilja i ograničenja i (3) poznavanje trenutnog dinamičkog stanja procesa. Buduće ponašanje procesa predviđa se upotrebom pouzdanog dinamičkog modela flotacijskog ciklusa, pri čemu se proces modelovanja odvija u skladu sa jednom od dve paradigme:

- Modeli prvog principa – opis veza između promenljivih ostvaruje se pomoću jednačina na bazi poznavanja sistema, pri čemu se odabrani parametri adaptivno prilagođavaju on-line;
- Modeli sive kutije – modeli se generišu na osnovu podataka iz postrojenja. Promenljive moraju proći kroz proces „pobuđivanja” da bi algoritmi bili uspešni [Lundh et al. (2009)].

Linearnost procesnog modela igra značajnu ulogu u razvoju MPC strategije. Do sada se većina primenjenih MPC kontrolnih sistema zasnivala na linearnim empirijskim modelima [Qin and Badgwell (2003)]. Međutim, uzimajući u obzir činjenicu da je flotacijski sistem visoko nelinearan, mnogi autori se slažu da se proces flotacije bolje opisuje nelinearnim modelima [Desbiens et al. (1998), Delpont (2005), Maldonado et al. (2007), Preez et al. (2013)]. Na primer, Casali i saradnici su razvili nelinearni dinamički model koji opisuje ciklus grubog flotiranja sulfidne rude bakra, populaciono-bilansnim pristupom, i istakli da bi ovaj model mogao naći primenu u GPC upravljačkoj strategiji [Casali et al. (2002)]. Desbiens i saradnici formirali su prediktivni kontrolni algoritam na osnovu nelinearnog dinamičkog modela procesa grubog flotiranja. Parametri nelinearnog modela dobijeni su interpolacijom parametara tri lokalna linearna modela koji opisuju tri različita radna režima procesa. Ovi autori izveštavaju da „s obzirom da nelinearni algoritam koristi više informacija o procesu, isti pokazuje bolje performanse i robusnost od linearnih algoritama” [Desbiens et al. (1998)]. S druge strane, Camacho i Bordons navode da razvoj adekvatnog nelinearnog procesnog modela može biti veoma komplikovan i diskutuju o poteškoćama korišćenja ovakvih modela u MPC strategijama [Camacho and Bordons (1999)].

Ukratko, oba tipa modela imaju svoje prednosti i mane, a primena datog tipa modela (linearnog ili nelinearnog) u upravljanju procesom flotacijske koncentracije zavisice od izabranog naučnog pristupa istraživača.

6.3.3 Neke od predloženih MPC strategija

Kao što je već pomenuto, u flotacijskim postrojenjima, modelsko prediktivno upravljanje se koristi kao alternativa klasičnim metodama upravljanja. Na primer, u kontroli simuliranog flotacijskog ciklusa, kao zamena za PID regulatore, testirana je multivarijabilna prediktivna kontrolna strategija zasnovana na modelu sa fiksnim

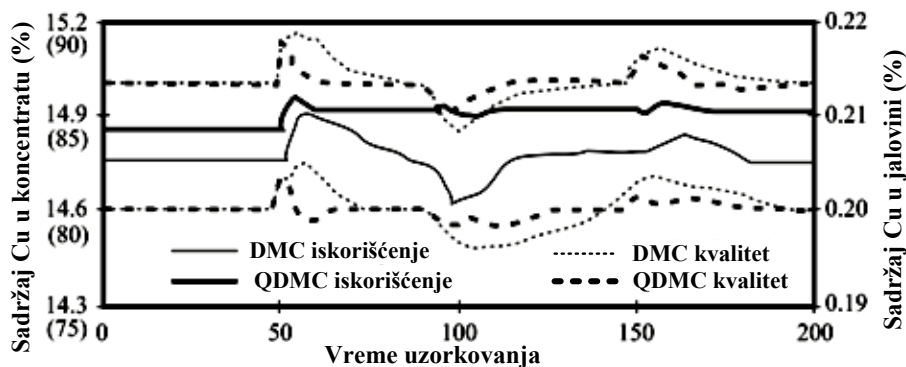
parametrima [Hodouin (1993)]. Ipak, pokazano je da su ovakvi modeli veoma osetljivi na operativne uslove i karakteristike rude, te stoga Desbiens i saradnici ističu da je potrebno usvojiti adaptivne upravljačke strategije kako bi se sprečile loše performanse. Shodno tome, oni su razmatrali primenu GPC algoritma pri kontroli simuliranog ciklusa grubog flotiranja u flotacijskoj sekciji. Kompleksna dinamika ciklusa prikazana je linearnim diskretizovanim I/O modelom, pri čemu su kao kontrolne promenljive uzete protok vazduha i količina kolektora. Ova adaptivna kontrolna strategija pokazala se boljim i jednostavnijim rešenjem od multivarijabilnih regulatora, kada je reč o upravljanju datim flotacijskim sistemom [Desbiens et al. (1994)].

S druge strane, Zavala i saradnici poredili su tri kontrolna algoritma u okviru simulacije rada postrojena za flotaciju bakra: (1) multivarijabilni prediktivni algoritam na bazi dinamičke matrice (DMC algoritam), (2) ekspertski algoritam zasnovan na pravilima i (3) nadzorni sistem višestrukih SISO PI regulatora. DMC algoritam je pokazao najbolje performanse, uz nedostatak da njegova uspešna primena zahteva pouzdan linearni model procesa, što je izuzetno teško ostvariti u industrijskim uslovima. Stoga su autori predložili kombinovanu kontrolnu strategiju zasnovanu na ekspertskom i multivarijabilnom prediktivnom upravljanju [Zavala et al. (1995)].

Slično tome, Pérez-Correa i saradnici razmatrali su ekspertске i multivarijabilne kontrolne algoritme u ciklusu flotiranja bakra u klasičnim flotacijskim ćelijama (grubo flotiranje i prečišćavanje), putem simulacija. Ove simulacije su izvedene korišćenjem nelinearnog dinamičkog modela izvedenog iz masenih bilansa i empirijskih odnosa koji u kvalitativnom smislu dobro oslikavaju dinamičko ponašanje realnog postrojenja. Multivarijabilno prediktivno upravljanje ostvareno je posredstvom DMC i QDMC⁴² algoritama (algoritam kvadratne dinamičke matrice). U svojstvu manipulisanih promenljivih razmatrane su: doze kolektora, protok penušača i nivo pulpe, dok su kao poremećajne promenljive usvojeni: sadržaj bakra u ulazu, kapacitet ulazne sirovine, granulometrijski sastav, sadržaj gvožđa u ulazu i pH pulpe. Merene izlazne promenljive su bile iskorišćenje i sadržaj bakra u koncentratu, kao i sadržaj bakra u jalovini. Masena iskorišćenja koncentrata i jalovine nisu merena. (Treba napomenuti da su izvršene određene empirijske modifikacije u pogledu kinetike flotacije, kako bi se doze kolektora i penušača, kao i poremećajni faktori uzeli u razmatranje.) Pri istim parametrima

⁴² Engl. QDMC – Quadratic Dynamic Matrix Control

podešavanja procesa i ciljnim vrednostima, kao i slabim ograničenjima u pogledu kvaliteta koncentrata i jalovine (ali striktnim u pogledu iskorišćenja) QDMC je dao zadovoljavajuće rezultate u održavanju iskorišćenja na željenom nivou (slika 48).



Slika 48. Dinamički odziv postrojenja u kome su primenjeni prediktivni algoritmi [adaptirano prema Pérez-Correa et al. (1998)].

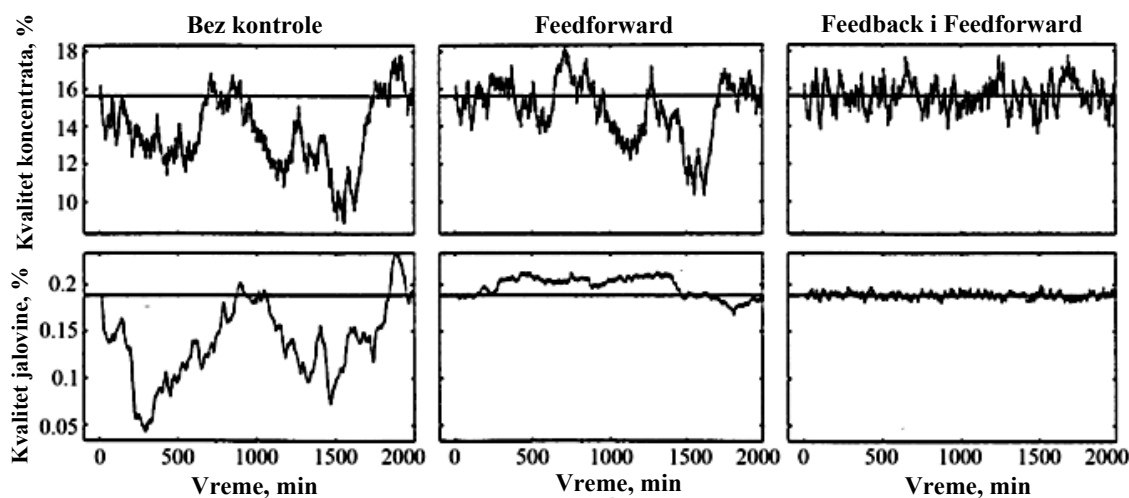
Osim toga, ovi istraživači izveštavaju da je DMC algoritam pokazao dobre performanse uz mala izlazna odstupanja i „glatku” kontrolu. QDMC algoritam postigao je čak i bolje performanse, međutim, zahteva mnogo složeniji matematički aparat nego DMC. Važna dodatna prednost QDMC je njegova fleksibilnost [Pérez-Correa et al. (1998)]. Ipak, kao i u prethodnom primeru (Zavala et al. (1995)), glavni nedostatak DMC i QDMC algoritama je taj da iziskuju pouzdan linearni model procesa.

Kao rešenje kojim se prevazilazi potreba za linearnim modelima procesa Gupta i Yan predlažu primenu adaptivnijih kontrolnih algoritama (na primer, EPSAC ili EHAC) usled nelinearne prirode flotacijskog sistema [Gupta and Yan (2006)].

Razmatrajući eksperimente obavljene u okviru postrojenja za grubo flotiranje i prečišćavanje bakra, Rio Tinto Northparkes, Australija, Runge i saradnici navode da kvalitet proizvoda dobijen iz flotacijskih ćelija direktno zavisi od interakcije dve suštinski nezavisne klase svojstava: (1) od radnih uslova u ćeliji (na primer, protok vazduha, visina pene, brzina obrtanja impelera) i (2) svojstava materijala koji dospeva u ćeliju (na primer, krupnoća zrna, mineralni sastav). Oni ističu da je ova interakcija bila polazna osnova za razvoj strukture modela koja povezuje konstantan skup flotacijskih parametara sa tokovima materijala u procesu, na osnovu čega se vrši transformacija u odziv ciklusa flotiranja u zavisnosti od operativnih uslova. Ovakvi modeli obično obuhvataju utvrđivanje parametara modela za svaku jedinicu u procesu (na primer,

grubo flotiranje, kontrolno flotiranje, prečišćavanje). U skladu s tim, razvijena su dva različita tipa modela za robusno prediktivno upravljanje industrijskim ciklusom flotiranja bakra. Prvi tip modela uzimao je u obzir razliku između dejstva operativnih promenljivih u procesnim jedinicama i tokovima materijala, dok kod drugog tipa modela ta razlika nije uzeta u obzir. Zaključeno je da drugi tip modela nije podesan za predviđanje tehnoloških performansi datog flotacijskog procesa [Runge et al. (2003b)].

Hodouin i saradnici su izvestili o prediktivnom regulatoru na osnovu koga su procenjene prednosti kombinovanja „feedforward” i „feedback” pristupa u kontroli simuliranog procesa flotacije bakra. Prema ovim autorima, primenom „feedforward” pristupa smanjen je uticaj sastava i varijacija u protoku ulazne sirovine na proces i poboljšane su performanse tradicionalne „feedback” petlje (kao što je prikazano na slici 49). Međutim, oni dalje ističu da neadekvatno podešena „feedback” kompenzacija može pogoršati kontrolnu akciju dobro podešenog „feedforward” regulatora [Hodouin et al. (2000)].



Slika 49. Simulacija kontrolnih strategija [adaptirano prema Hodouin et al. (2000)].

Muller i saradnici su opisali strategiju upravljanja sistemom za flotaciju platinske grupe minerala koja se bazira na tri upravljačka nivoa. Osnovni nivo kontrole postignut je implementacijom klasičnih PID kontrolera (sa svrhom stabilizacije procesnih parametara), dok je na nadzornom upravljačkom nivou kontrola masenog iskorišćenja proizvoda ostvarena primenom fazi logičkog ekspertskog kontrolera. Optimizacija procesa realizovana je kroz modelsko prediktivno upravljanje, korišćenjem DMC algoritma. Kontrolni cilj MPC strategije fokusiran je na održavanje

kvaliteta koncentrata (merenog online) u okviru željenog opsega, manipulacijom vrednosti masenog iskorišćenja proizvoda. Zaposleni u flotacijskom postrojenju kompanije Anglo American Platinum prihvatili su ovo rešenje kojim se savladava multivarijantna priroda optimizacije procesa u realnom vremenu. Zahvaljujući stalnom vođenju procesa u optimalnom režimu, analiza proizvodnih podataka pre i posle instalacije pokazala je povećanu stabilnost kretanja masa, kao i povećanje ukupnog iskorišćenja za 1,71% tokom jednogodišnjeg praćenja. Međutim, treba napomenuti da Anglo Platinum ima dobro razvijen nadzorno-upravljački nivo koji je čvrsto integrisan sa osnovnom upravljačkom šemom. Nadzorni kontrolni nivo masenog iskorišćenja sastoji se od ekspertske fazi logičkog regulatora čiji je cilj da stabilizuje kako rad pojedinačnih ćelija tako i celokupno maseno iskorišćenje ciklusa.

Problematika koja je prikazana u ovom radu je od posebne važnosti zbog hibridnog pristupa datom kompleksnom problemu. Fazi sloj je u sredini „kontrolnog sendviča” što doprinosi fleksibilnosti celokupne strategije i održivosti performansi postrojenja. Čak i bez uvođenja fazifikacije na svim nivoima, poboljšanja u funkcionisanju postrojenja govore u prilog usvojenom kontrolnom pristupu [Muller et al. (2010)].

6.3.4 Modelsko prediktivno upravljanje kao sredstvo za optimizaciju procesa i maksimizaciju profita

Optimizacija flotacijskog procesa je veoma značajan zadatak u pripremi mineralnih sirovina zbog znatnih fluktuacija u profitu koje su posledica promena u iskorišćenju. Čak i najmanje promene iskorišćenja od svega 0,5% mogu biti ekonomski veoma značajne [Ferreira and Loveday (2000)].

Maldonado je sa saradnicima proučavao optimalno rešenje upravljanja ciklusom grubog flotiranja na bazi dinamičkog programiranja, pod različitim operativnim uslovima. Cilj optimizacije je bio minimizacija sadržaja Cu u jalovini u svakoj flotacijskoj sekciji (ukupno 5 sekcija), čime bi se postigao željeni sadržaj bakra u koncentratu. Eksplicitni model procesa kojim se opisuje funkcionalna zavisnost sadržaja Cu u koncentratu od razmatranih procesnih parametara razvijen je populaciono bilansnim pristupom. Istovremeno, autori su definisali funkcionalnu zavisnost između

optimalnog profita i kvaliteta koncentrata i jalovine (za svaku od flotacijskih sekcija). Oni ističu da se „ovaj sistem upravljanja može smatrati hijerarhijskom upravljačkom strategijom najvišeg reda i može se primeniti direktno uz bilo koju regulacionu upravljačku strategiju”. Nedostatak ovog pristupa bio je u velikom broju generisanih stanja čime se znatno povećava broj izračunavanja na osnovu upravljačkog algoritma [Maldonado et al. (2007)].

Muñoz i Cipriano su razvili upravljačku strategiju na dva nivoa, zasnovanu na principima prediktivnog upravljanja. Ova upravljačka strategija je primenjena u simulaciji postrojenja za mlevenje i flotiranje. Nivo regulacione kontrole baziran je na multivarijabilnim prediktivnim kontrolerima koji koriste linearne modele procesa. Linearni multivarijabilni dinamički modeli razvijeni su za svaki sistem mlevenja (ukupno tri mlina) i povezuju potrošnju električne energije, sadržaj čvrstog u mlinu i granulost ulazne sirovine sa kapacitetom i potrošnjom vode koja se dodaje na izlazu iz mlina. Na optimizacionom nivou, maksimizacija profita je predviđena kroz primenu nelinearnih dinamičkih modela procesa. U flotacijskom sistemu, kvaliteti koncentrata i jalovine su povezani sa ukupnom tonažom proizvoda i statičkom nelinearnom funkcijom srednjeg prečnika čestice u proizvodu, korišćenjem nelinearnih modela Hamerštajnovog tipa. Funkcija cilja (F), koja predstavlja profit postrojenja za mlevenje i flotaciju u dolarima na čas (US\$/h) je formulisana prema sledećoj jednačini:

$$F = \sum_{k=1}^{N_f} \left[\beta_1 - \phi - \beta_2 \widehat{g}_t(k_0 + k + \kappa_f) T(k_0 + k) - \gamma \sum_{i=1}^{N_s} \widehat{W}_i(k_0 + k + \kappa_g) \right] - C_{fix} \quad (16)$$

gde je:

k – diskretna vremenska promenljiva,

k_0 – aktuelno vreme,

κ_g i κ_f – procesno (mlevenje i flotiranje) vremensko kašnjenje izraženo u funkciji broja uzoraka,

N_f – horizont predviđanja,

N_s – broj mlinskih sekcija,

\widehat{g}_t i \widehat{W}_i – predviđene vrednosti sadržaja korisne komponente u jalovini i potrošnje energije za svaki mlin,

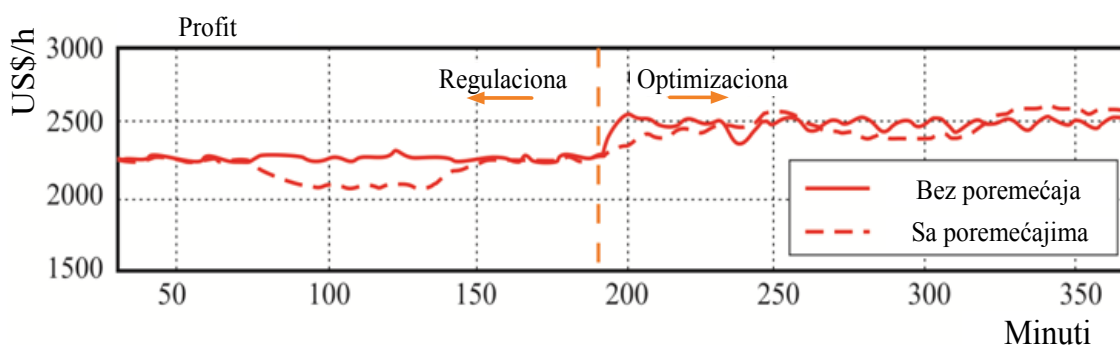
γ – parametar koji zavisi od troškova utrošenog čelika i električne energije tokom mlevenja,

β_1 and β_2 – parametri koji zavise od dobijenih prihoda koncentracije bakra, cene katodnog bakra, topioničkog iskorišćenja bakra i (samo za β_1) kvaliteta ulazne sirovine,

ϕ – parametar koji zavisi od potrošnje i troškova flotacijskih reagenasa,

T – protok ulazne sirovine; C_{fix} – fiksni troškovi u postrojenju.

Ova optimizaciona kontrolna strategija je testirana kroz dva pristupa (sa i bez poremećaja u tvrdoći minerala). U početku, rad postrojenja je razmatran uz korišćenje regulacione kontrolne strategije 190 minuta, nakon čega je aktivirana optimizaciona kontrolna strategija. Rezultati, dobijeni na osnovu simulacija, pokazali su da predložena optimizaciona strategija doprinosi značajnom napretku profita u poređenju sa regulacionom (slika 50).



Slika 50. Profit postrojenja pri regulacionoj i optimizacionoj kontrolnoj strategiji [adaptirano prema Muñoz and Cipriano (1999)].

Rojas i Cipriano su poredili tri različite kontrolne strategije – sa aspekta njihovih performansi i ekonomske koristi – čiji je cilj bio upravljanje procesom osnovnog flotiranja kako bi se maksimiziralo iskorišćenje i održavao kvalitet koncentrata iznad minimalne vrednosti. Prva strategija je podrazumevala fiksno upravljanje koje nije osetljivo na ulazne poremećaje, dok su druge dve strategije zasnovane na modelskom prediktivnom upravljanju (i uključuju linearne modele procesa). U prvoj od MPC strategija razmatrani su kvaliteti definitivnog koncentrata i jalovine, dok su u drugoj kontrolnoj strategiji uzeti u obzir i kvaliteti koncentrata u intermedijarnim ćelijama. Prema rezultatima simulacije, primenom obe MPC strategije moguće je održavati bolje performanse procesa (uz prisustvo poremećajnih faktora) i dobiti za 1,7% veće

iskorišćenje u odnosu na fiksnu kontrolu. Ipak, ekonomska korist ostvarena primenom druge MPC strategije je veća, što ukazuje na važnost razmatranja kvaliteta proizvoda dobijenih u intermedijarnim ćelijama pri kreiranju kontrolnih sistema [Rojas and Cipriano (2011)].

6.3.5 Nešto drugačiji pristup modelskom prediktivnom upravljanju u flotacijskim sistemima

Postizanje zadovoljavajućih performansi kontrole flotacijskog procesa u određenom broju slučajeva zahteva primenu više različitih strategija. Tako su, na primer, Suichies i saradnici opisali implementaciju jednostavnog GPC algoritma u ekspertski sistem za kontrolu kvaliteta flotacijskih proizvoda u industrijskom postrojenju za flotaciju sulfidnih minerala olova i cinka [Suichies et al. (2000)]. Lundh i saradnici su takođe opisali implementaciju MPC regulatora u ekspertski sistem za kontrolu flotacijskog ciklusa cinka u postrojenju Boliden Garpenberg, Švedska [Lundh et al. (2009)]. Osim toga, eksplicitni modeli procesa za prediktivno upravljanje flotacijskim procesom mogu biti bazirani na metodama veštačke inteligencije [Cipriano and Ramos (1994), Marais and Aldrich (2011a), Xiaoping and Aldrich (2013), Al-Thyabat (2008)].

Još jedan interesantan pristup je predložio Bushell (2012). Performanse flotacijskog procesa (izražene preko iskorišćenja platinske grupe metala u koncentratu) predviđene su na osnovu sastava mineralnih zrna u ulaznoj rudi. Autor navodi da ovaj postupak predstavlja način da se prate i otklone nedostaci u postrojenju na bazi mineralnog sastava ulazne rude.

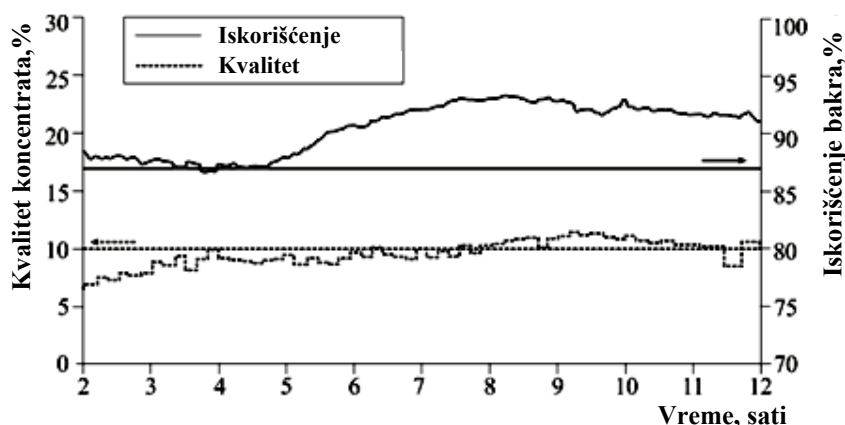
6.3.6 Komercijalna primena prediktivnog upravljanja zasnovanog na modelu

U današnje vreme razvijen je veći broj komercijalnih sistema za kontrolu procesa flotacije. Prema saznanjima autora disertacije, jedan od najuspešnijih naprednih kontrolnih sistema je FloatStar softverski paket koji je razvila kompanija Mintek. Ovaj paket obuhvata nekoliko kontrolnih modula za simulaciju procesa, monitoring, stabilizaciju i optimizaciju. U pogledu napredne procesne kontrole posebno treba spomenuti FloatStar Flow Optimiser, FloatStar Grade–Recovery Optimiser i FloatStar

Reagent Optimiser. Ovi moduli, između ostalog, koriste principe modelskog prediktivnog upravljanja.

FloatStar Flow Optimiser je multivarijabilni prediktivni regulator čije su manipulirane promenljive nivo pulpe i protok vazduha [Cipriano (2010)]. FloatStar Grade-Recovery Optimiser koristi online analizu kvaliteta proizvoda kako bi osigurao maksimizaciju iskorišćenja pri specificiranom kvalitetu koncentrata preko: podešavanja nivoa pulpe, protoka vazduha, vremena zadržavanja pulpe u ćeliji/količine povratnih tokova materijala i režima doziranja reagenasa u kompletnom postrojenju. FloatStar Reagent Optimiser primenjuje kombinaciju kontrolnih pristupa (kao što je fazi logika i nelinearno modelsko prediktivno upravljanje) u cilju automatizacije doziranja reagenasa [Shean and Cilliers (2011)].

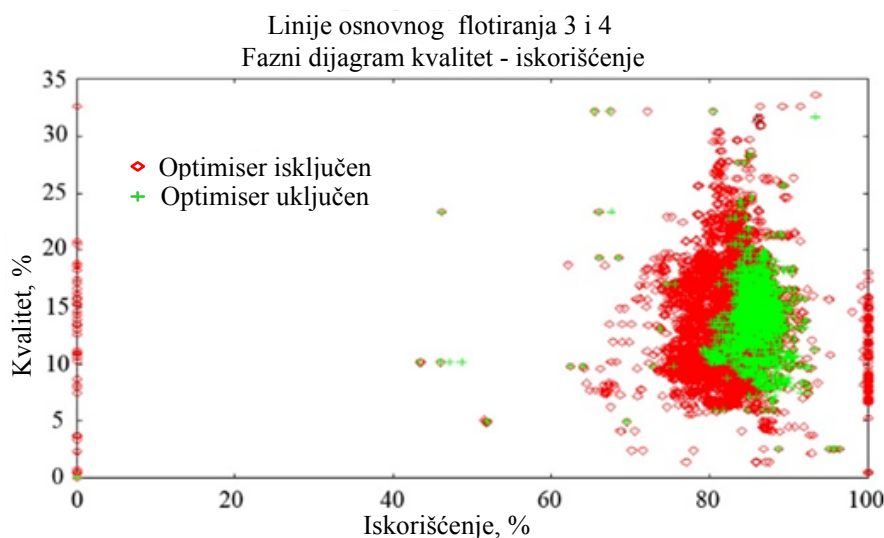
Uspešna primena ovih modula je dokumentovana kroz literaturu. Na primer, Mantsho i saradnici opisuju rad FloatStar Grade-Recovery Optimiser-a (uz korišćenje novih, pouzdanih onlajn analizatora) u BCL-ovom (Bougainville Copper Limited) postrojenju za flotaciju nikla u Bocvani. Oni izveštavaju da je Grade-Recovery Optimiser obezbedio stalna povećanja u flotacijskom iskorišćenju nikla u poređenju sa periodom kada je bio isključen [Mantsho et al. (2013)].



Slika 51. FloatStar kontrola kvaliteta i iskorišćenja u ciklusu flotiranja bakra [adaptirano prema Smith et al. (2005)].

Smith i saradnici takođe izveštavaju o efikasnom testiranju FloatStar Grade-Recovery Optimiser-a u postrojenju za osnovno flotiranje bakra u Južnoj Americi. Regulacija kvaliteta koncentrata je uspešno izvršena oko željene vrednosti, dok je iskorišćenje bilo čak iznad optimuma (slika 51) [Smith et al. (2005)].

Iorio i saradnici su prikazali dijagram koji sadrži skup podataka dobijenih iz jednog južnoameričkog postrojenja za flotaciju bakra (slika 52). Tačkasti dijagram prikazuje zavisnosti iskorišćenja i kvaliteta osnovnog koncentrata u slučajevima kada je FloatStar Grade-Recovery Optimiser uključen i isključen. Crvene tačke predstavljaju podatke dobijene na osnovu dvonedeljnog rada postrojenja kada je Optimiser van funkcije, dok zelene tačke predstavljaju podatke dobijene na osnovu dvonedeljnog rada postrojenja kada je Optimiser u funkciji. Prema izveštaju autora, zaposleni u postrojenju smatraju da Optimiser doprinosi održavanju kvaliteta finalnog koncentrata uz maksimizaciju iskorišćenja [Iorio et al. (2003)].



Slika 52. Kvalitet koncentrata naspram iskorišćenja za liniju osnovnog flotiranja bakra [adaptirano prema Iorio et al. (2003)].

Lombardi i saradnici su izvestili o prednostima implementacije FloatStar Flow Optimiser-a u postrojenju za flotiranje bakra i zlata u rudniku Prominent Hill, Južna Australija [Lombardi et al. (2012)]. Pored toga, podatke o dobrim rezultatima u kontroli masenog protoka koncentrata i jalovine (koji se postižu primenom FloatStar Flow Optimiser-a) dali su i Singh i saradnici (u industrijskom postrojenju za flotaciju platine) i Knights i saradnici (u postrojenju za obrnutu flotaciju gvožđa u rudniku Cauê Mine, Brazil) [Singh et al. (2003), Knights et al. (2012)].

6.4 INTELIGENTNO UPRAVLJANJE

6.4.1 Potreba za sofisticiranijim kontrolnim metodama

U domenu upravljanja procesnim operacijama, brza, precizna i adaptivna reakcija sistema upravljanja predstavlja zahtev od suštinskog značaja sa aspekta performansi rada postrojenja. Sa porastom složenosti sistema i potrebe za fleksibilnošću proizvodnje i maksimiziranja iskorišćenja energije i materijala, u uslovima nelinearnosti i nedostatka određenih informacija, ukazala se potreba za razvojem i upotrebom sofisticiranih metoda upravljanja [Karray and De Silva (2004)]. Jedno od mogućih rešenja je inteligentno upravljanje.

Inteligentno upravljanje predstavlja disciplinu u kojoj su upravljačke metode razvijene na takav način da oponašaju važne karakteristike ljudske inteligencije. Ove karakteristike podrazumevaju adaptaciju i učenje, planiranje pod okolnostima visoke neizvesnosti i suočavanje sa velikim količinama podataka [Zhang (2010)]. Drugim rečima, inteligentno upravljanje obuhvata primenu metoda veštačke inteligencije (neuronske mreže, mašinsko učenje, fazi logika, evoluciono računarstvo i sl.).

Klasične metode upravljanja podrazumevaju rad sa potpunim skupom podataka, uključujući informacije sa senzora i vrednosti svih procesnih parametara. Međutim, ukoliko svi neophodni podaci nisu u potpunosti poznati, potrebno je uzeti u obzir i odgovarajuće procene. Takođe, ako su dostupne informacije rasplinute (fazi), kvalitativne ili nejasne, klasični regulatori i upravljanje zasnovano na nepotpunim informacijama ne može dati zadovoljavajuće rezultate. Osim toga, klasične tehnike upravljanja se uvelikoj meri zasnivaju na pretpostavkama da je rad postrojenja linearan i vremenski nepromenljiv, što ne odgovara većini realnih procesa.

Za razliku od klasičnog upravljanja, tehnike inteligentnog upravljanja omogućavaju uspešno savladavanje nepotpunih informacija o postrojenju i njegovom okruženju, kao i lakše savladavanje neočekivanih i nepoznatih uslova rada postrojenja [Karray and De Silva (2004)].

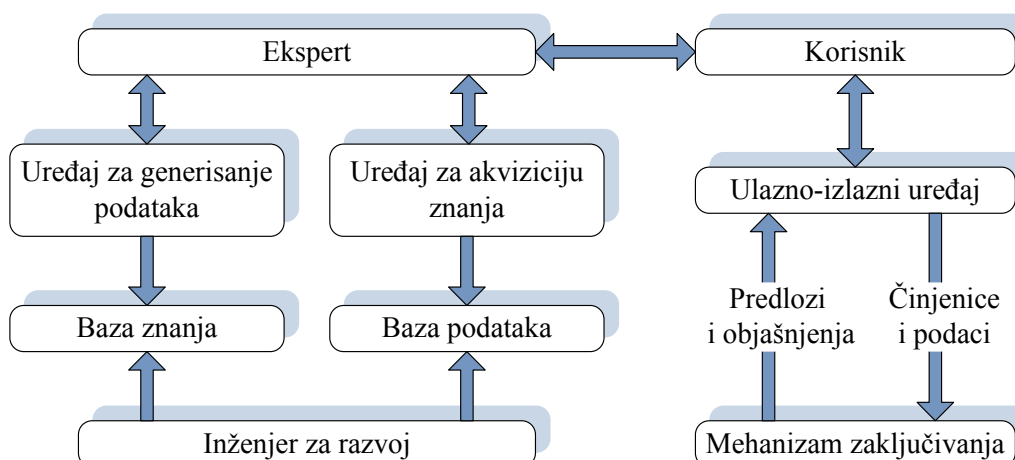
U skladu s tim, inteligentne metode nalaze sve veću primenu u inženjerskoj praksi, kroz različite pristupe: upravljanje procesima u realnom vremenu, dijagnostika, modelovanje i analiza procesa, optimizacija, itd. Iako su primene različite, na više nivoa

primećuju se analogije: sposobnost za procesiranje nepreciznih, neizvesnih i nejasnih informacija, primena sličnih mehanizama zaključivanja i dr. [Leiviskä (2001a, 2001b)].

Može se, dakle, tvrditi da inteligentne tehnike doprinose upravljanju flotacijskim postrojenjima ostvarivanjem sistemskog pristupa. Drugim rečima, radi se o relativno novoj paradigmi po kojoj se flotacijsko postrojenje smatra dinamičkim sistemom i po kojoj se komponente sistema i zakonitosti kojima se one pokoravaju više ne smatraju teorijski potpuno determinisanim i definitivnim, a optimalno vođenje procesa ne ostvaruje rešavanjem jedne jednačine ili čitavog sistema jednačina, već sistemskim pristupom i odgovarajućim reagovanjem na realna dinamička stanja izlaznih i ulaznih promenljivih.

6.4.2 Ekspertski sistemi u okviru inteligentnog upravljanja

Ekspertski sistem se može definisati kao računarski sistem baziran na znanju koji emulira sposobnost ljudskog eksperta da donosi odluke. Cilj njegovog rada je dostavljanje preciznog rešenja pri rešavanju problema bilo koje vrste (planiranje, projektovanje, proizvodnja, kontrola kvaliteta i sl.) [Leondes (2001), Narayanan (2010)]. Svakako, ekspertski sistem nije u stanju da potpuno zameni čoveka, naročito kada je u pitanju opšte znanje, ali može da pruži pomoć čoveku (na primer operateru u postrojenju) prilikom donošenja odluka i preuzimanja odgovarajućih upravljačkih akcija – kao jedan vid sistema za podršku odlučivanju. Arhitektura ekspertskog sistema predstavljena je na slici 53.



Slika 53. Osnovna arhitektura ekspertskog sistema [adaptirano prema Narayanan (2010)].

Upravljačke tehnike zasnovane na ekspertskim sistemima predstavljaju jednu od varijanti koje se primenjuju u uslovima veće složenosti, nelinearnosti i ubrzane dinamike procesnih sistema (što, svakako, važi i za proces flotacije). Upravljačke strategije koje se zasnivaju na ljudskom znanju vezanom za rad postrojenja, heuristici, zdravom razumu, ili stručnom mišljenju često pružaju novu perspektivu i rešenje za ovakve probleme [Karray and De Silva (2004)].

Poznato je iz prakse upravljanja procesom flotacije da se uključivanjem inženjera kao eksperata za praćenje i kontrolu procesa mogu postići značajna poboljšanja u radu sistema. Poboljšanja u radu se postižu kroz upravljačka dejstva visokog nivoa (naročito akcije podešavanja procesnih parametara) koje sprovodi vešt i iskusan operater. Podešavanja procesnih promenljivih i kontrolna podešavanja, usaglašavanje i ostale kontrolne akcije koje sprovodi operater uglavnom se implementiraju kao kvalitativna lingvistička pravila, zasnovana na zdravom razumu, heuristici, znanju i iskustvu, a ne kao klasični algoritmi.

Upravo iz navedenih razloga, treba istaći da je fazi logika jedna od najpogodnijih metoda veštačke inteligencije za razvoj ekspertskih sistema. Karray i De Silva su dali kratak rezime na ovu temu koji uključuje sledeće stavke:

- Baza znanja ekspertskog sistema obuhvata znanje ljudskih eksperata.
- Ljudsko znanje je često negzaktno i kvalitativno, a fazi deskriptori (tj. veliko, malo, brzo, slabo, fino) se uobičajeno koriste u ljudskoj komunikaciji.
- Opis problema koji daje korisnik može biti neegzaktan.
- Baza znanja dobijena od eksperata može biti nekompletna – ipak se očekuje da zadovoljavajuća odluka bude donešena
- U nekim situacijama mora se primeniti „edukovano nagađanje” [Karray and De Silva (2004)].

Postoji veći broj istraživanja čija se problematika odnosi na primenu fazi logike u flotacijskim ekspertskim sistemima. Više o tome dato je u poglavljima 5.7. i 6.4.4. Potencijal drugih metoda u razvoju flotacijskih ekspertskih sistema (stabla odlučivanja, neuronske mreže i sl.) takođe je ispitan, ali u manjem obimu.

Ipak, primena ekspertskih sistema u upravljanju flotacijskim postrojenjima podleže određenim ograničenjima. Na primer, Gouws i Aldrich dovode u pitanje raspoloživost eksperata i kvalitet interpretacije svih, pa i najsuptilnijih poremećaja u

postrojenju. Oni, takođe, navode mogućnost pojave kognitivnih predrasuda u smislu pojednostavljenja procesa. Kako ovi autori ističu, potrebni su meseci, pa čak i godine da bi se razvio sveobuhvatni ekspertski sistem za određeno flotacijsko postrojenje; sistem koji nije samo strategijski i konceptualno kompleksan, već iziskuje i značajna ulaganja. [Gouws and Aldrich (1996)]. Slično tome, Ghobadi i saradnici [Ghobadi et al. (2011)] navode da svaka upravljačka tehnika ima svoja ograničenja. Kao posledica toga, sveobuhvatna ekspertska metoda – koja bi zadovoljila zahteve za sve tipove flotacijskih industrijskih procesa tek treba da bude razvijena. U tabeli 14 prikazane su neke od prednosti i mana ekspertskih sistema.

Tabela 14. Prednosti i nedostaci ekspertskih sistema [adaptirano prema Turban (1992)].

<i>Prednosti</i>	<i>Nedostaci</i>
Može da usvoji deficitarno znanje jedinstveno kvalifikovanog eksperta	Znanje nije uvek lako dostupno
Može da reši komplikovane probleme u vrlo kratkom vremenskom periodu	Visoki troškovi razvoja
Pouzdanost	Dobar rad samo u uskim domenima
Rad sa nekompletnim informacijama	Nije pogodan za rešavanje svih vrsta problema
Transfer znanja korisniku	–

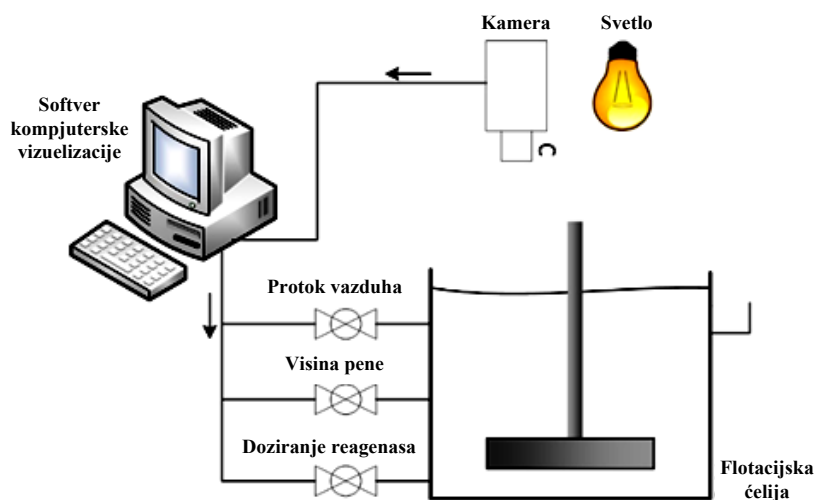
Imajući u vidu navedene činjenice i dostupnu literaturu, inteligentne upravljačke tehnike koje su trenutno zastupljene u flotacijskim sistemima (bilo da se radi o teorijskim pristupima ili o razvijenim komercijalnim strategijama) većinom se zasnivaju na klasičnim logičkim pravilima (što je ređi slučaj) ili na sledećim metodama veštačke inteligencije: računarska vizuelizacija, veštačke neuronske mreže, fazi logika, induktivna stabla odlučivanja, genetski algoritmi, metoda potpornih vektora, kao i na njihovim kombinacijama.

Koliko je poznato autoru disertacije, oblast u kojoj veštačka inteligencija za sada ima najširu primenu je identifikacija i kategorizacija slika flotacijske pene, što je i opširno dokumentovano literaturnim podacima različitih istraživača.

6.4.3 Sistemi kompjuterske vizuelizacije

Iako *računarska vizuelna analiza* flotacijske pene podrazumeva tehniku koja je se vezuje za osnovne nivoe upravljanja flotacijskim sistemom [Shean and Cilliers (2011)], ona svakako predstavlja vid veštačke inteligencije koji se implementira u

upravljačke strategije višeg nivoa. Supomo i saradnici ističu da se uvođenje sistema za računarsku vizuelizaciju⁴³ vrši u cilju zamene vizuelne analize od strane ljudi i obezbeđivanja konzistentnog monitoringa i kvantitativne determinacije svojstava pene [Supomo et al. (2008)]. Šematski prikaz tipičnog sistema računarske vizuelizacije u kontroli flotacijskog procesa dao je Forbes (slika 54) [Forbes (2007)].



Slika 54. Arhitektura sistema vizuelizacije flotacijske pene [adaptirano prema Forbes (2007)].

Uobičajeno je da se u flotacijskom postrojenju kontinualno prate samo kvaliteti ulazne rude, finalne jalovine i finalnog koncentrata, bez praćenja kvaliteta proizvoda iz ostalih stadijuma flotacije. Kao posledica toga, sistem kaskadnog postavljanja flotacijskih ćelija predstavlja otežavajuću okolnost za optimizaciju procesa. To je razlog zašto se u nekim strategijama upravljanja koriste iste vrednosti željenog nivoa pulpe za različite kaskade. Tehnike računarske vizuelizacije mogu biti rešenje za ovaj problem jer daju informacije o boji, prosečnoj veličini mehurića, teksturi pene, stabilnosti pene i mobilnosti pene, itd. [Moolman et al. (1994, 1995c, 1995d, 1996a)]. Međutim, Herbst i Flintoff ističu da bez obzira na mnoštvo informacija koje obezbeđuju sistemi za vizuelnu analizu pene, u većini slučajeva oni nisu uključeni u šeme procesne kontrole. Oni takođe navode da u pogledu dodate vrednosti (kod dobre kontrolne strategije) sistemi vizuelne analize pene obezbeđuju približno 1,5% veće iskorišćenje metala u

⁴³Termin računarska (kompjuterska) vizuelizacija usvojen je u duhu jezika. Inače, ispravniji termin bi bio "mašinska vizuelizacija" (engl. Machine Vision) s obzirom da se radi o industrijskoj primeni metode u svrhu automatizacije procesa

osnovnom koncentratu uz, praktično, isti kvalitet koncentrata [Herbst and Flintoff, 2012].

Kao i svaka kontrolna metoda, primena sistema računarske vizuelizacije ima prednosti i mane. U svojoj master tezi na temu multivarijabilne kontrole ciklusa osnovnog flotiranja Van Schalkwyk daje određene prednosti i nedostatke analize slika flotacijske pene, koji su dati u tabeli 15 [Van Schalkwyk (2002)].

Tabela 15. *Prednosti i nedostaci vizuelne analize slika flotacijske pene [adaptirano prema Van Schalkwyk (2002)].*

<i>Prednosti</i>	<i>Nedostaci</i>
100% dostupnost uz niske zahteve održavanja.	Ne meri direktno tehnološke pokazatelje flotacijskog procesa (kvalitet i iskorišćenje).
Relativno niski kapitalni troškovi.	Na neke od parametara dobijenih uz pomoć kamere (tj. boju) utiče ambijentalno svetlo.
Merenja su moguća na svake 2 sekunde	–
Neintruzivni soft senzor.	–
Mogućnost kontinualnog razvoja.	–

Bez obzira na nedostatke, ova tehnika je široko prihvaćena među istraživačima. Shodno tome, tekst koji sledi sadrži generalne principe primene ove tehnike u flotacijskim sistemima.

6.4.3.1 Kratak opis svojstava ekstrahovanih iz slika pene

Detaljan pregled svojstava (tj. promenljivih veličina od značaja za flotacijski proces) koje se mogu dobiti ekstrakcijom iz slika flotacijske pene, kao i specifičnih računarskih tehnika kojima se postiže njihova identifikacija prikazali su Aldrich i saradnici. Prema njima, svojstva pene se mogu grupisati kao: (1) fizička (oblik i veličina mehurića, boja pene); (2) statistička (koeficijenti brze Furijeove transformacije, vejevlet koeficijenti, teksturalne promenljive, promenljive matrice združenog pojavljivanja nivoa sivog, fraktalni deskriptori, latentne promenljive); (3) dinamička (mobilnost i stabilnost pene). Isti autori su detaljno opisali mogućnosti primene ovih svojstava (izdvojenih iz slika pene u kontrolnim sistemima) pri čemu su naveli i nekoliko glavnih komercijalnih kontrolnih sistema baziranih na računarskoj vizuelizaciji [Aldrich et al. (2010)].

Izbor svojstva koje će se posmatrati i pripadajuća računarska metoda ekstrakcije zavisi od pristupa istraživača. Na primer, Sadr-Kazemi i Cilliers ističu da tačna i brza detekcija raspodele veličine i oblika mehurića na površini flotacijske pene predstavlja važan uslov za indikaciju flotacijskih pokazatelja [Sadr-Kazemi and Cilliers (1997)].

Gui i saradnici i He i saradnici smatraju da izgled površinske teksture flotacijske pene obezbeđuje ključne informacije o performansama flotacijskog procesa. Oni su zaključili da klasične GLCM metode za ekstrakciju teksturnih parametara nisu u potpunosti odgovarajuće i stoga predlažu druge, poboljšane metode za opis teksturnih karakteristika slika flotacijske pene [Gui et al. (2013), He et al. (2013a)].

Bonifazi i saradnici su isprobali mogućnosti primene nekoliko tehnika za procesiranje slika flotacijske pene u automatskom određivanju boje i strukture mehurića. Slike flotacijske pene su dobijene iz flotacijskog postrojenja Bolidenovog rudnika Garpenberg, Švedska. Analiza boje obavljena je uzimajući u obzir referentne RGB, HSV i HSI sisteme⁴⁴, dok su morfološka merenja dobijena nakon prilagođavanja i segmentacije slika. Utvrđene su dobre korelacije između sadržaja Cu, Zn i MgO u flotacijskoj peni i ekstrahovanih parametara iz digitalnih slika pene. [Bonifazi et al. (2001)].

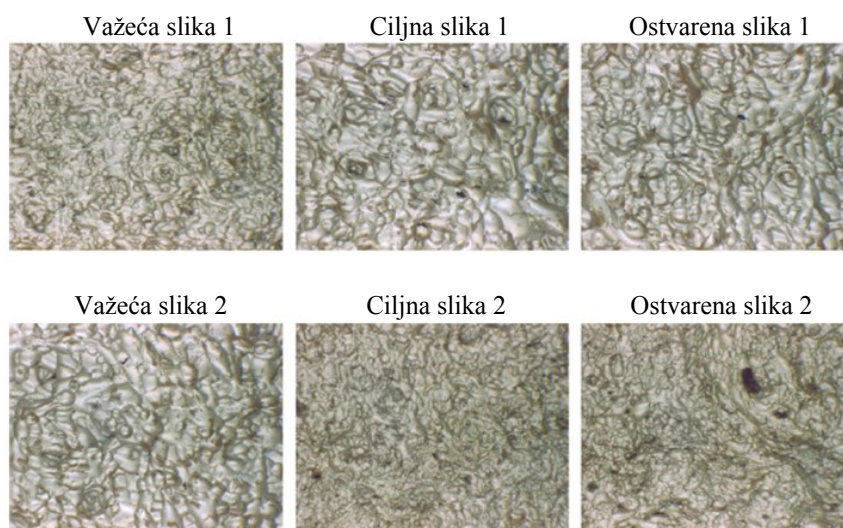
6.4.3.2 Neke od predloženih strategija računarske vizuelizacije

Prema Liu i saradnicima kvalitetna vizuelna analiza flotacijske pene treba da pruži detaljan opis morfologije pene, omogući korelaciju u RGB sistemu, obezbedi robusnost sa aspekta osvetljenja i da ne bude računski zahtevna. U skladu s tim, pokazano je da multirezoluciona multivarijantna analiza slike (skraćeno MR-MIA⁴⁵) predstavlja odgovarajući alat za vizuelnu analizu pene. Ova tehnika je primenjena u Agnico-Eagle-ovom postrojenju za flotaciju cinka Laronde, Kvebek, u cilju dobijanja informacija o stanju flotacijske pene (tj. praćena je raspodela veličine mehurića, kao i prisustvo i količina „crnih polja” na peni) [Liu et al. (2005)]. Nekoliko godina kasnije, Liu i MacGregor su utvrdili da rezultati dobijeni posredstvom pomenute MR-MIA tehnike mogu biti direktno korišćeni u modelovanju i kontroli izgleda flotacijske pene.

⁴⁴ Pojmovi se odnose na načine predstavljanja piksela u RGB sistemu: RGB – red, green blue, HSV – hue, saturation, value, HSI – hue, saturation, intensity),

⁴⁵ Od engleskog pojma multi-resolutional multivariate image analysis

Stoga su razvili metodu (baziranu na kauzalnom modelu procesa) za predviđanje izgleda flotacijske pene. Oni su koristili svojstva dobijena MR-MIA tehnikom kao izlazne parametre (zavisne promenljive), a ostale parametre (kao što su: protok CuSO_4 , protok KAX, sadržaj čvrstog i sadržaji Fe, Cu, Zn, Pb, Ag u ulazu) kao nezavisne promenljive. Autori su zaključili da se ova metoda može koristiti kao deo sveobuhvatnijeg kontrolnog sistema flotacijskog procesa. Neki od rezultata prikazani su na slici 55 [Liu and MacGregor (2008)].



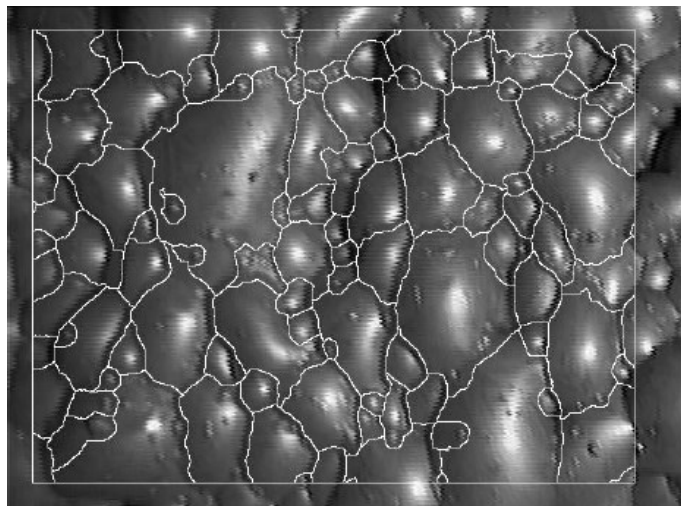
Slika 55. Rezultati kontrolne metode [adaptirano prema Liu and MacGregor (2008)].

Núñez i Cipriano su razvili metodu za karakterizaciju i identifikaciju vizuelnih informacija o flotacijskoj peni korišćenjem tehnika dinamičke teksture (niz slika kojima se opisuje kretanje flotacijske pene, a koje prikazuju određene stacionarne osobine u vremenu). Pored toga, razvili su virtuelni senzor na bazi modela dinamičke teksture koji ima mogućnost predviđanja brzine kretanja pene dajući virtuelna merenja za ekspertsku kontrolu ciklusa grubog flotiranja [Núñez and Cipriano (2009)].

Xu i saradnici su predložili metodu za detekciju greške doziranja reagenasa u industrijskom flotacijskom procesu, zasnovanu na tehnikama računarske vizuelizacije. Autori su istražili gustinu verovatnoće raspodele veličine mehurića i njen uticaj na identifikaciju hemijskog statusa flotacije boksita. Takođe su istražili i zavisnost između raspodele veličine mehurića i raspodele veličine filma. Korišćenjem kernel aproksimacije problem detekcije greške je rešen prema kriterijumu koji definiše prag rezidualnog signala. Oni tvrde da se primenom predložene metode postiže

zadovoljavajuća detekcija greške doziranja reagenasa u industrijskim uslovima [Xu et al. (2012)].

Wright smatra da oblik i veličina mehurića koji čine flotacijsku penu nose važne informacije o performansama flotacijskog procesa. Stoga je razvio sistem računarske vizuelizacije koji identifikuje mehuriće u peni, a segmentaciju slika je izvršio Fast Watershed Transform tehnikom (videti sliku 56).



Slika 56. Automatska segmentacija slike pene [Wright (1999)].

Autor navodi da se informacije o obliku i veličini mehurića, ekstrahovane iz segmentiranih slika pene, mogu povezati sa tehnološkim pokazateljima (kao i drugim parametrima iz postrojenja) što ukazuje na korelaciju između izgleda pene i rada postrojenja. Predloženi sistem računarske vizuelizacije testiran je u flotacijskom postrojenju za koncentraciju platine i u stanju je da identifikuje i okarakteriše varijacije u izgledu pene, kao odziv na promene u ulaznim parametrima [Wright (1999)].

Van Schalkwyk je istraživao kontrolni sistem sa zatvorenom petljom (baziran na računarskoj vizuelizaciji) u ćelijama za osnovno flotiranje, sa ciljem poboljšanja performansi procesa flotacijske koncentracije platinske grupe metala. On je utvrdio linearnu zavisnost između izlaznih parametara sistema računarske vizuelizacije (brzina kretanja i boja mehurića) i drugih procesnih parametara (kao što su protok vazduha, nivo pulpe, početni kvalitet koncentrata, itd.). Autor je ustanovio da se brzina kretanja pene može dobro regulisati promenom protoka vazduha, dok merenje boje mehurića i njena regulacija promenom nivoa pulpe nisu pogodni za industrijsku implementaciju [Van Schalkwyk (2002)].

Morar je prikazao detaljnu studiju o korišćenju računarske vizuelizacije pri evaluaciji osobina pene u flotacijskom sistemu. Testiranje je obavljeno u dva flotacijska postrojenja sa različitom hidrofobnošću minerala – postrojenje za flotaciju bakra (visoko hidrofobni minerali) i postrojenje za flotaciju platine (manje hidrofobni minerali). U okviru istraživanja urađena su dva tipa analiza:

- 1) Analiza uticaja operativnih promenljivih (protok vazduha, visina pene, koncentracija penušača) na merene promenljive koje se odnose na penu (mineralizacija, veličina mehurića, stopa pucanja mehurića, brzina kretanja pene) i flotacijske pokazatelje (maseno iskorišćenje i kvalitet koncentrata)
- 2) Analiza uticaja promenljivih koje se odnose na penu na flotacijske pokazatelje

Deo rezultata dobijenih u ovom istraživanju dat je u tabeli 16 koja sadrži sumarni prikaz odnosa (veza) između parametara. Strelice pokazuju smer promene (povećanje ili smanjenje vrednosti) pojedinih promenljivih koji dovodi do povećanja masenog iskorišćenja i kvaliteta koncentrata u različitim flotacijskim ćelijama, pod različitim operativnim uslovima. Prema autoru, veza između brzine kretanja pene i flotacijskih pokazatelja (u posmatranim uslovima) nije robusna i funkcioniše samo u uskom opsegu operativnih uslova.

Tabela 16. Prikaz smera promene operativnih promenljivih, kako bi se postigao porast masenog iskorišćenja i kvaliteta koncentrata u flotacijskim ćelijama [adaptirano prema Morar (2010)].

Operativni uslovi	Iskorišćenje čvrste faze		Kvalitet koncentrata	
	Faktor stabilnosti	Operativna promenljiva*	Faktor stabilnosti	Operativna promenljiva
Visoka hidrofobnost Visoka koncentracija čvrstog (Osnovno flotiranje Cu, ćelija 1)	↑ Veličina mehurića ↓ Mineralizacija –	↑AR, ↑FH ↑FH ↑FH, ↓FC	↑ Mineralizacija ↑ Veličina mehurića –	↓AR, ↓FH ↑AR, ↑FH ↑AR, ↑FC
Visoka hidrofobnost Niska koncentracija čvrstog (Osnovno flotiranje Cu, ćelija 3)	↑ Stopa pucanja ↑ Mineralizacija ↓ Veličina mehurića –	↑AR, ↓FC ↓AR, ↓FH ↓FH ↑AR, ↓FH, ↑FC	↑ Stopa pucanja ↓ Mineralizacija ↑ Veličina mehurića –	↑AR, ↓FC ↑AR, ↑FH ↑FH ↑FH, ↑FC
Niska hidrofobnost Visoka koncentracija čvrstog (Osnovno flotiranje Pt, ćelija 1)	↑ Stopa pucanja ↑ Mineralizacija –	↑AR, ↓FH, ↑FC ↓AR, ↑FH, ↓FC, ↑AC ↑AR, ↓FH, ↑FC, ↓AC	↑ Stopa pucanja ↑ Veličina mehurića –	↑AR, ↓FH, ↑FC ↑AR, ↑AC ↑AR
Niska hidrofobnost Niska koncentracija čvrstog (Osnovno flotiranje Pt, ćelija 3)	↓ Stopa pucanja ↑ Veličina mehurića –	↓FH, ↑FC ↑FH, ↓FC ↑FH, ↑FC	↑ Stopa pucanja ↑ Mineralizacija ↓ Veličina mehurića –	↑FH, ↓FC ↑FH, ↓FC, ↑AC ↑FH, ↑FC ↑FC

*AR – Protok vazduha; FH – Visina pene; FC – Koncentracija penušača; AC – Aktivator.

Kao finalni zaključak, autor navodi da podaci dobijeni posredstvom računarske vizuelizacije doprinose razumevanju odnosa između parametara koji fizički opisuju

površinu pene, stabilnosti pene i pokazatelja procesa, ali je za kompleksniju interpretaciju ovih odnosa neophodno bolje razumevanje celokupnog ponašanja flotacijske pene [Morar (2010)].

6.4.3.3 Komercijalna primena računarske vizuelizacije

Tabela 17 daje pregled savremenih komercijalnih softvera za analizu pene. Iako su različiti u mnogim aspektima, svi ovi softverski paketi se zasnivaju na istoj ideji – računarskoj vizuelizaciji. Neki od navedenih primera biće detaljnije opisani u narednom tekstu.

Tabela 17. Komercijalni softveri za analizu pene, bazirani na računarskoj vizuelizaciji.

	<i>Naziv sistema</i>	<i>Kompanija; zemlja porekla</i>	<i>Postrojenje, ruda</i>
1.	Aceflot	Dictuc S.A. (Chile)	Copper, (Chile)
2.	Froth Image Analyser	IMSOC (Sweden)	Pyhäsalmi, Copper/Zinc, (Finland)
3.	Froth Sensor	Stonethree (South Africa)	Amplats, Mogalakwena, PGM, (S. Africa)
4.	Frothmaster Advanced Control Tool (ACT) / FrothSense	Outotec (Finland)	Cadia Hills, Gold, (Australia), Macraes, Gold, (New Zealand), Alumbreira Copper/Gold (Argentina), Newcrest, Gold, (Australia)
5.	JK FrothCam	JKMRC (Australia)	Porgera Gold Mine (Papua New Guinea), Peak Downs, Saraji, (Australia), Escondida, (Chile)
6.	OPTVision Froth	Cemi, (Brazil)	Timbopeba, Fabrica Nova, Iron, (Brazil)
7.	SmartFroth	University of Cape Town (S. Africa)	Kennecott Utah, Copper, (USA)
8.	VisioFroth	Metso-CISA (Finland)	PT Freeport, Copper/Gold, (Indonesia)
9.	Canty	JM Canty (USA)	-
10.	ECS/Process Expert FrothVision	FL Smidth (Denmark)	-
11.	ITS Flotation visualization package	Manchester (United Kingdom)	-
12.	MetCam	SBS, (Switzerland)	-
13.	Plant Vision	KnowledgeScape (USA)	-
14.	Tempotrack	Bluecube (South Africa)	-
15.	WipFroth	WipWare	-

Uspešnu primenu jednog od pomenutih komercijalnih sistema detaljno su opisali Supomo i saradnici. To je kontrolni softver VisioFroth, čiji je proizvođač kompanija Metso Minerals, instaliran u rudniku PT Freeport Indonezija, za kontrolu masenog iskorišćenja osnovnog koncentrata bakra. Kamere su postavljene na pojedinačnim ćelijama i mere brzinu kretanja pene, kako bi se odredilo maseno iskorišćenje. Na osnovu izmerene brzine podešava se visina pene u ćeliji, da bi se postigla željena brzina kretanja pene i željeno maseno iskorišćenje. Prema njihovom izveštaju, primena

softvera je neposredno rezultirala povećanjem iskorišćenja bakra u grubom koncentratu [Supomo et al. (2008)]. Instalacija VisioFroth sistema planirana je i u pogonima flotacije RTB Bor.

Cipriano i saradnici su predstavili ekspertski sistem zasnovan na pravilima, koji uključuje podsistem računarske vizuelizacije, za kontrolu procesa osnovnog flotiranja u rudniku bakra, Čile. Nadzorna kontrolna struktura (pod komercijalnim nazivom ACEFLOT) je u mogućnosti da identifikuje karakteristike pene (na primer: boju, broj, veličinu, oblik i stabilnost mehurića, brzinu kretanja pene i sl.), a zatim predloži akciju koju treba da preduzme operater [Cipriano et al. (1998)].

Holtham i Nguyen opisali su implementaciju još jednog komercijalnog sistema baziranog na računarskoj vizuelizaciji. Radi se o sistemu JKFrothCam (proizvedenom od strane JKMRC, Australija), koji, prema tvrdnjama ovih autora, značajno doprinosi poboljšanju performansi postrojenja u kojima je instaliran [Holtham and Nguyen (2002)].

Hyötyniemi i saradnici su predstavili sistem vizuelne analize koji je instaliran u postrojenju za flotaciju bakra i cinka u rudniku Pyhäsalmi, Finska, a zatim integrisan u kontrolni sistem sa zatvorenom petljom. Autori su okarakterisali sledećih pet promenljivih (koje se odnose na penu) kao najvažnije: brzina kolapsa mehurića, transparentnost mehurića, veličina mehurića, intenzitet crvene boje i brzina kretanja pene. Kao manipulirana promenljiva usvojena je doza CuSO_4 . Kontrolna akcija u okviru upravljačkog algoritma zasnovanog na pravilima (tabela 18) bila je vrlo jednostavna: doza CuSO_4 se ili povećava („+“) ili smanjuje („-“) za fiksnu količinu. Sistem je bio u stanju da uspešno spreči kolaps pene [Hyötyniemi et al. (2000)].

Tabela 18. Baza pravila u flotacijskom postrojenju rudnika Pyhäsalmi, Finska [Hyötyniemi et al. (2000)].

Rangiranje	Uslov	Akcija
1.	AKO je visina pene $< dg^*$	-
2.	AKO je brzina kolapsa mehurića ILI transparentnost mehurića $< dg$	-
3.	AKO je sadržaj cinka u jalovini osnovnog flotiranja $> gg$	+
4.	AKO je sadržaj cinka u jalovini dopunskog flotiranja $> gg$	+
5.	AKO je visina pene $> gg$	+
6.	AKO je brzina kolapsa ILI transparentnost ILI veličina mehurića $> gg$	+
7.	ELSE	-

* dg – donje ograničenje, gg – gornje ograničenje

Kao nastavak ovog istraživanja, Kaartinen i saradnici su opisali rad sistema zasnovanog na kombinaciji podsistema višestrukih kamera i ekspertskih kontrolera, instaliranog u ciklusu flotacije cinka u rudniku Pyhäsalmi Mine, Finska. Autori navode da je instalacija ovog sistema doprinela značajnim poboljšanjima u iskorišćenju cinka u koncentratu (ukupno za 1,3%). Pored toga, postoji snažna korelacija između promenljivih dobijenih na osnovu slika pene i kvaliteta koncentrata/jalovine [Kaartinen et al. (2006)].

Unapređenje kontrole flotacijskog procesa pomoću informacija dobijenih na osnovu slika flotacijske pene istraživali su, između ostalih i Saghatoleslam i saradnici [Saghatoleslam et al. (2004)], Citir i saradnici [Citir et al. (2004)], Bartolacci i saradnici [Bartolacci et al. (2006)], Lin i saradnici [Lin et al. (2008)], Yang i saradnici [Yang et al. (2009)], Kaartinen [Kaartinen (2009)], Marais i Aldrich [Marais and Aldrich (2011a)], Morar i saradnici [Morar et al. (2012)], Liu i saradnici [Liu et al. (2013)], Cao i saradnici [Cao et al. (2013)], Kistner i saradnici [Kistner et al. (2013)], Uusi-Hallila [Uusi-Hallila (2014)].

Na osnovu dostupne literature, postoji mnogo izveštaja o uspešnoj ili delimično uspešnoj primeni sistema računarske vizuelizacije, posebno kada su u pitanju minerali platinske grupe metala, cink i bakar. Ipak, pitanje njihovog uspeha u industrijskim okvirima još uvek ostaje otvoreno. Na primer, diskutujući o efikasnosti sistema računarske vizuelizacije Marais i Aldrich navode: „Uprkos njihovoj potencijalnoj koristi kao on-line senzora, sistemi kompjuterske vizuelizacije koji vrše monitoring flotacijskih sistema još uvek nemaju značajnog uticaja na automatsku kontrolu flotacijskih postrojenja. To se naročito odnosi na industrijska postrojenja za flotaciju platine, jer veza između svojstava pene i ključnih pokazatelja flotacijskog procesa (tj. kvaliteta i iskorišćenja) još uvek nije dovoljno dobro uspostavljena. Smatra se da je ovaj problem najveća prepreka u razvoju naprednih upravljačkih sistema. Za razliku od baznih metala, gde boja pene ili njena teksturalna svojstva mogu ukazati na korisnu mineralizaciju (kao što je slučaj kod boksita, bakra, cinka i sl.) čini se da je penu koja je nosilac platinskih minerala teško interpretirati. Razlog je taj što boja pene u najmanju ruku daje slabe indikacije o mineralizaciji” [Marais and Aldrich (2011b)].

Međutim, može se reći da potpuno efikasna primena sistema računarske vizuelizacije takođe nije zaživela ni u drugim vrstama flotacijskih postrojenja (za koncentraciju bakra, cinka, itd). Na primer, Forbes takođe diskutuje o sporoj implementaciji sistema kompjuterske vizuelizacije za analizu pene u postrojenjima pripreme mineralnih sirovina. On ističe da se kroz istraživačke projekte na temu kompjuterske vizuelizacije koriste snimci samo jedne industrijske operacije, uz ograničen opseg operativnih uslova (često su to ekstremni uslovi koji se generalno retko događaju pri normalnom radu postrojenja). Kao rezultat toga, sistemi kompjuterske vizuelizacije mogu raditi dobro pod uslovima pod kojima su dizajnirani, ali ne i kada se uslovi promene [Forbes (2007)].

Takođe, jedan od mogućih razloga je i taj što se u istraživanjima ne uzimaju u obzir svi značajni parametri koji utiču na svojstva pene. Moolman i saradnici su naveli čitav niz promenljivih koje mogu uzrokovati razlike u izgledu pene. Neke od njih se vrlo retko uzimaju u obzir prilikom ispitivanja (kao što su turbulencije u okolnoj pulpi, jonska sila rastvora, veličina čestica, itd.) [Moolman et al. (1996b)].

Iskustva su pokazala da iako svi procesi flotacije koriste iste osnovne principe, postoje velike razlike u karakteristikama pene u različitim postrojenjima. To je, generalno, rezultat prerade različitih rudnih tela, ali i specifičnosti operativnih uslova. Stoga se rezultati brojnih studija na ovu temu, prema kojima se kvalitet koncentrata može predvideti u kratkom vremenskom periodu, ne mogu permanentno primeniti na industrijske uslove [Forbes (2007)].

6.4.4 Kontrolne metode izvan pravila klasične logike

Kao što je već pomenuto, inteligentne metode se sve više koriste u pokušajima kreiranja kontrolnih sistema u flotacijskim postrojenjima. U tabeli 19 date su prednosti i nedostaci najčešće korišćenih AI metoda i mogu služiti kao instrukcija u izboru odgovarajuće kontrolne tehnike.

Napomena: O upotrebi metoda veštačke inteligencije u modelovanju flotacijskih procesa opširno je diskutovano u poglavlju 5.0. U narednom delu teksta će biti reči o primeni ovih metoda sa aspekta kontrole procesa flotacije u postrojenjima sa mehaničkim celijama.

Tabela 19. Prednosti i mane AI metoda [adaptirano prema Xu (2011), Mihajlović (2014), www.academia.edu, Man et al. (1996), Gayathri and Malathi (2013), Nagendra et al. (1996), Gao et al. (2009), Horning (2010), www.slideplayer.com].

Prednosti	Nedostaci
Veštačke neuronske mreže (višeslojni perceptron)	
Mogu izvršiti zadatke koje linearni programi nisu u stanju da obave	Da bi neuronska mreža radila, potreban je trening
Kada neki element neuronske mreže podbaci, mreža može nastaviti rad bez problema, zbog svoje paralelno distribuirane strukture	Arhitektura neuronske mreže se razlikuje od arhitekture mikroprocesora; stoga je potrebna emulacija mreže
Neuronska mreža uči i ne mora da bude reprogramirana	Sve ulazne promenjive posmatra samo u jednom opsegu
Može se implementirati u širokom opsegu aplikacija i bez velikih poteškoća	Teško je primenom ANN metode uraditi replikaciju modela na nekom sličnom sistemu
Fazi logika	
<i>Univerzalna aproksimacija funkcije</i> – a) ukoliko na raspolaganju ima dovoljno pravila, fazi sistem može aproksimirati bilo koju funkciju sa bilo kojim stepenom preciznosti; b) broj potrebnih pravila je manji nego kod aproksimacije funkcije zasnovane na klasičnim pravilima	<i>Kompleksnost izračunavanja</i> – a) uključuje više izračunavanja: fazifikacija, fazi operatori, kompozicija u cilju dobijanja izlaznog fazi skupa, defazifikacija; b) kompleksna funkcija pripadnosti može povećati ovaj problem
<i>Paralelno izvršavanje pravila</i> – a) izlaz se računa jednom na kraju ciklusa; b) pravila se procenjuju paralelno; c) redosled nije bitan; d) nema potrebe za metodama vršenja selekcije	<i>Definisanje pravila</i> – a) kako formirati pravila?; b) osnovni problem sa sistemima zasnovanim na pravilima; c) potreba za dovoljnim brojem pravila kako bi se postigla odgovarajuća tačnost; d) pravila treba da budu jasna; e) pravila treba da budu tačna
<i>Modularnost</i> – a) pravila mogu biti dodata ili uklonjena ukoliko je potrebno; b) pojednostavljen razvoj (zbog manjeg broja početnih pravila); c) dodavanje pravila ako je potrebno poboljšati performanse; d) uklanjanje suvišnih pravila, radi povećanja brzine izvršenja; e) optimizacija pojedinačnih pravila	<i>Optimizacija</i> – a) promene u funkciji pripadnosti mogu zahtevati i promene u pravilima; b) promene u pravilima mogu zahtevati i promene u funkciji pripadnosti; c) svaki parametar/izbor utiče na ostale; d) problem višeparameterske optimizacije
<i>Neodređenost</i> – a) pravila se mogu pokrenuti čak i ako sve premise ne odgovaraju sadržaju radne memorije; b) mogućnost rada sa nepreciznim informacijama; c) svako pravilo odgovara širem opsegu ulaznih vrednosti	–
<i>Razumljivost</i> – a) dobro osmišljena fazi pravila su laka za razumevanje; b) fazi ekspertski sistem postaje „bela kutija”	–
Genetski algoritmi	
Mogućnost rešavanja svakog problema optimizacije koji se može predstaviti u vidu kodiranog hromozoma	Određeni problemi optimizacije se ne mogu rešiti usled nedovoljnog poznavanja fitnes funkcije koja generiše loše hromozomske blokove, bez obzira na činjenicu da se ukrštanje odvija samo na dobrim hromozomskim blokovima.
Veoma su jednostavni za razumevanje i, praktično, ne zahtevaju dobro poznavanje matematike.	Ne postoji potpuna garancija da će genetski algoritam pronaći globalni optimum. To se događa vrlo često kada populacija sadrži mnogo jedinki.
Tehnika izvršavanja ne zavisi od površine greške, stoga se mogu rešiti i višedimenzionalni, nediferencijalni, diskontinualni, pa čak i neparametarski problemi	Ne mogu da obezbede konstantno optimizaciono vreme odziva. Štaviše, razlika između najdužeg i najkraćeg optimizacionog vremena odziva je mnogo veća nego kada su u pitanju konvencionalne metode gradijenta.
Imaju mogućnost rešavanja problema vezanih za strukturu rešenja i parametre rešenja u isto vreme.	Primena u kontrolnim sistemima čiji se rad odvija u realnom vremenu je ograničena zbog slučajnih rešenja i konvergencije. To znači da se karakteristike celokupne populacije poboljšavaju, što se ne može reći za jedinku u okviru populacije. Stoga genetski algoritmi najpre moraju biti testirani putem simulacije.
Mogućnost rešavanja problema sa višestrukim rešenjima	Obično zahtevaju veoma kompleksna izračunavanja.
Jednostavan transfer u postojeće simulacije i modele	–

<i>Prednosti</i>	<i>Nedostaci</i>
Stabla odlučivanja (random forests – metoda slučajnih šuma)	
Za mnoge skupove podataka obezbeđuju veoma tačnu klasifikaciju.	Zbog načina na koji su izgrađena regresiona stabla, nisu moguća predviđanja izvan opsega vrednosti odziva pri treningu.
Mogućnost rada sa veoma velikim brojem ulaznih promenljivih.	Kod regresije, ima tendenciju da tokom predviđanja preceni niske vrednosti i potceni visoke vrednosti
Procena značaja promenljivih pri klasifikaciji.	–
Daje internu nepristrasnu procenu greške generalizacije sa napretkom razvoja šume.	–
Uključuje dobru metodu procene nedostajućih podataka i zadržava preciznost kada proporcionalno veći broj podataka nedostaje	–
Može stabilizovati grešku u klasi neuravnoteženog skupa podataka.	–
Metoda potpornih vektora	
Pravi izbor kernel funkcije omogućava rešavanje širokog spektra problema.	Ako granični podaci (tj. „potporni vektori”) nisu dovoljno informativni (zbog elektronskog šuma) metoda neće dobro funkcionisati.
Robusnost prema malom broju podataka (malim uzorcima)	Selekcija odgovarajućih parametara kernel funkcije može predstavljati problem.
SVM metoda daje jedinstveno rešenje (nema lokalnog minimuma)	Visoka kompleksnost izračunavanja algoritma i dugo vreme treninga.

Nekoliko objavljenih istraživanja, kao i struktura *veštačkih neuronskih mreža* govore u prilog tezi da veštačke neuronske mreže mogu u flotacijskim sistemima predstavljati metodu pogodnu za interpretaciju i klasifikaciju slika pene dobijenih računarskom vizuelizacijom.

Moolman i saradnici su pokazali da je korišćenjem *veštačkih neuronskih mreža* (LVQ algoritam) moguće identifikovati različite strukture pene sa visokim stepenom tačnosti. Pri tom, autori ističu da se ova sposobnost prepoznavanja (klasifikacije) značajnih struktura pene može implementirati u on-line kontrolne sisteme ili off-line operativne procedure na različite načine. Na primer, izlazna veličina iz klasifikatora (tj. određena klasa pene) može se dalje uvrstiti u jednostavan kontrolni sistem baziran na znanju koji bi mogao identifikovati odgovarajuće kontrolne mere koje treba preduzeti. Ovaj kontrolni sistem bi služio kao podrška odlučivanju operaterima u flotacijskom postrojenju [Moolman et al. (1995c, 1995d)]. Marais i Aldrich su predložili kontrolni postupak za predviđanje kvaliteta koncentrata platine na osnovu slika flotacijske pene posredstvom *veštačkih neuronskih mreža* [Marais and Aldrich (2011a, 2011b)].

Predviđanje pokazatelja efikasnosti flotacijskog procesa na bazi izgleda pene ostvareno je i posredstvom *metode potpornih vektora*. Nekoliko predloženih kontrolnih

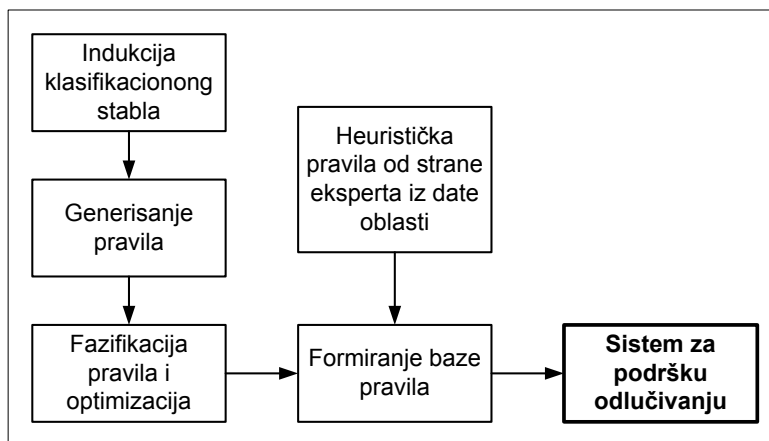
struktura koje uključuju ovu metodu uspešno je testirano u industrijskom okruženju (u kraćem vremenskom periodu) [Cao et al. (2013), Zhu et al. (2014)].

Jedna od strategija koje se koriste za ekstrakciju i analizu podataka iz flotacijskih postrojenja su *induktivna stabla odlučivanja*. U studiji koja razmatra primenu random forests metode pri monitoringu procesa u postrojenju za flotaciju uglja, Auret i Aldrich zaključuju da se ova metoda pokazala uspešnom u pogledu efikasne detekcije abnormalnih procesnih stanja [Auret and Aldrich (2011)].

Aldrich i saradnici su testirali i uporedili metodu povratne propagacije signala (trening veštačkih neuronskih mreža) sa dve tehnike induktivnih stabala odlučivanja u industrijskim uslovima. Utvrđeno je da su sve tehnike pogodne za konstrukciju kontrolnog sistema baziranog na znanju koji može zameniti ljudskog eksperta u domenu karakterizacije flotacijske pene. Autori dodaju da je prednost indukovanih stabala odlučivanja njihova transparentnost i generisanje pravila koja operater može lako razumeti, dok je prednost veštačkih neuronskih mreža u tome da se lako mogu inkorporirati u ljusku ekspertskog sistema. [Aldrich et al. (1997)].

Analogno tome, Gouws i Aldrich su ispitali pogodnost primene induktivnih stabala odlučivanja i *genetskih algoritama* za razvoj sistema baziranog na znanju za monitoring i upravljanje procesom flotacijske koncentracije. Induktivni i genetski algoritmi korišćeni su za klasifikaciju različitih struktura pene u industrijskim flotacijskim postrojenjima za flotaciju bakra i platine, kao i klasifikaciju iskorišćenja P_2O_5 iz postrojenja za flotaciju fosfata. Utvrđeno je da su oba algoritma u mogućnosti da klasifikuju podatke u najmanju ruku jednako uspešno kao i ljudski ekspert. Genetski algoritam je pokazao bolje performanse od induktivnog, međutim, bila su neophodna detaljnija podešavanja pre dobijanja optimalnih rezultata. Klasifikaciona pravila dobijena iz oba algoritma mogu se lako inkorporirati u okvir sistema za podršku odlučivanju operatera u flotacijskom postrojenju [Gouws and Aldrich (1996)]. U skladu s tim, isti autori su nekoliko godina kasnije razvili sistem za podršku odlučivanju zasnovan na *fazi logičkim pravilima*, za upravljanje procesom flotacije u industrijskom postrojenju (slika 57). Pravila su dobijena probablističkom indukcijom, na osnovu karakteristika flotacijske pene i fizičkih parametara procesa kao ulaznih veličina i kvaliteta flotacijskog koncentrata kao klasifikacione izlazne veličine. Pravila su fazifikovana i inkorporirana u ljusku fazi logičkog ekspertskog sistema, zajedno sa

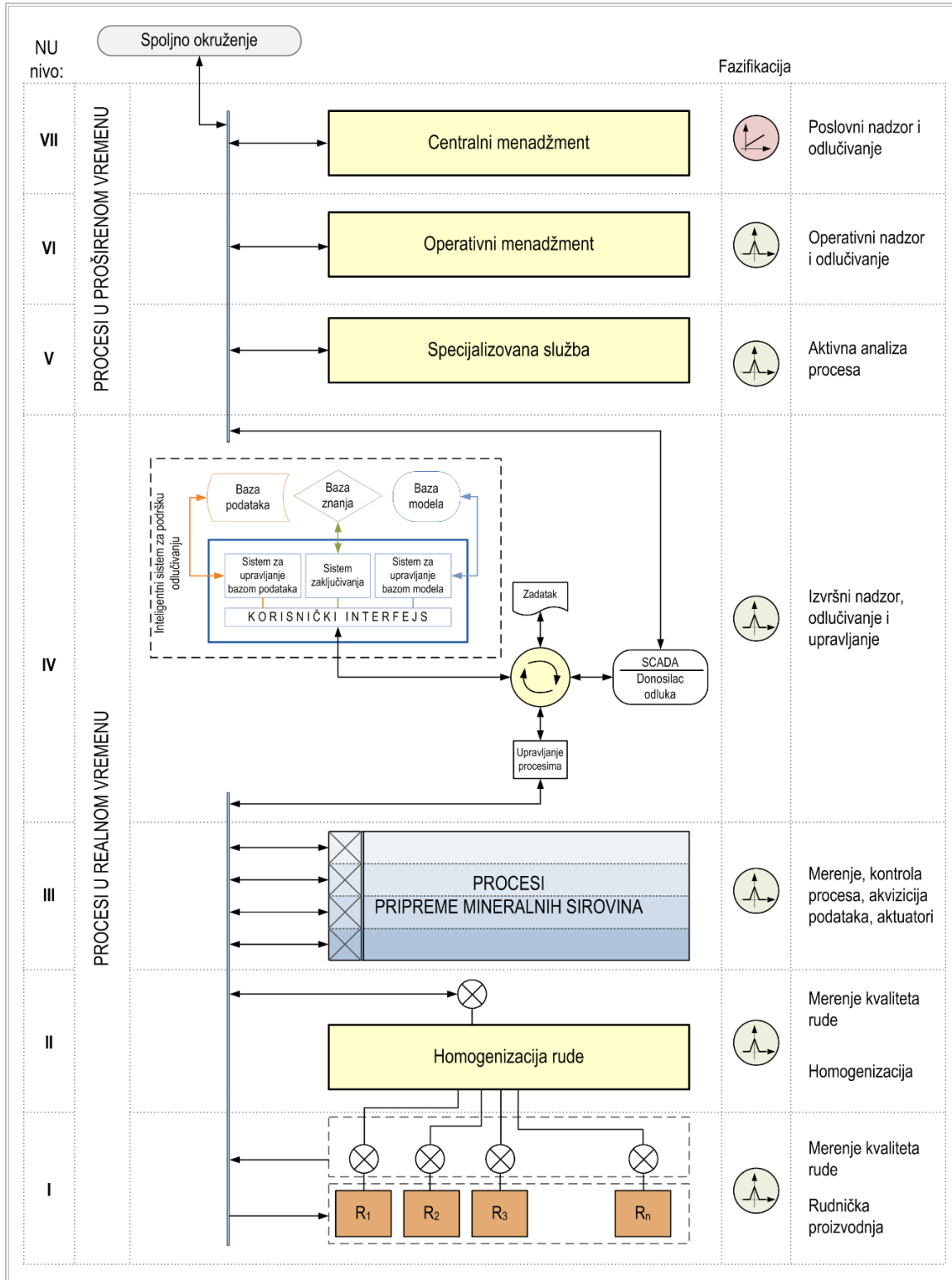
heurističkim pravilima dobijenim od strane eksperta iz domena flotacije. Prema predstavljenim rezultatima, sistem je u stanju da tačno predvidi performanse flotacijskog postrojenja on-line [Aldrich et al. (2000)].



Slika 57. Metodologija razvoja sistema za podršku odlučivanju zasnovanom na fazi pravilima [Aldrich et al. (2000)].

Fazi logički pristup modelovanju procesa zauzima značajno mesto u formiranju ekspertskih sistema za kontrolu flotacijskih ciklusa. Računarski integrisani sistem za podršku odlučivanju i upravljanju u pripremi mineralnih sirovina predložio je Miljanović [Miljanović (2008a)]. Model integriše sedam fazifikovanih nadzorno-upravljačkih nivoa: proizvodnja rude (radilišta/rudnici); homogenizacija; proizvodni proces PMS kompleksa (uključujući i flotacijsku koncentraciju); izvršni nadzor, odlučivanje i upravljanje; aktivna analiza procesa; operativni nadzor i odlučivanje; poslovni nadzor i odlučivanje (slika 58).

Prema autoru, za uspostavljanje predloženog fazi modela upravljanja u PMS neophodan je odgovarajući algoritam upravljanja, koji predstavlja uređen skup fazi instrukcija čijim se izvršavanjem dobija približno rešenje fokusiranog problema. Fazifikacija slojeva modela upravljanja ima punu opravdanost zbog složenosti realnog sistema, zbog nepostojanja preciznog matematičkog opisa faza procesa realnog sistema, zbog dinamičnosti procesa, promenljivosti obeležja procesa i spoljnih uticaja u vremenu i zbog, u osnovi, nelinearnosti kriterijumske funkcije upravljanja. Uspostavljanje sistema za fazi zaključivanje u okviru modela, podrazumeva i defazifikaciju, odnosno pretvaranje fazi zaključka u konkretnu realnu (brojnu) vrednost, pošto upravljački signal koji se šalje ka objektu upravljanja mora biti determinisana diskretna veličina.



Slika 58. Model računarski integrisanog sistema za podršku odlučivanju i upravljanju u PMS [Miljanović (2008a)].

Sedmostepena fazifikovana slojna struktura predloženog modela stvara uslove za: (1) optimalno vođenje PMS procesa (na podsistemskom i sistemskom nivou); (2)

efikasno korektivno reagovanje na moguća poremećajna dejstva u realnom sistemu; (3) povećanje efikasnosti rada na podsistemskom i sistemskom nivou; (4) lakšu harmonizaciju rada podсистema; (5) donošenje efikasne prognoze i dijagnoze stanja, procesnih trendova i poremećajnih uticaja; (6) ostvarivanje efikasne kontrole operativnih troškova; (7) lakše ispunjenje brojnih zahteva iz domena zaštite životne sredine i sl.

U okviru inteligentnog sistema za podršku odlučivanju (IV nivo upravljačkog sistema predstavljenog na slici 58) isti autor je razvio teorijski fazi model flotacijskog procesa koncentracije minerala cinka u postrojenju za flotacijsku koncentraciju olova i cinka, rudnika Rudnik, Srbija. Više detalja koji se odnose na ovaj model dato je u poglavlju 5.2.1 [Miljanović, (2008a)].

Osorio i saradnici su razvili i uporedili tri kontrolna algoritma (klasični ekspertske algoritam, fazi algoritam i fazi/ekspertske algoritam) za postrojenje sa grubim flotiranjem bakra u tri sekcije i jednostepenim prečišćavanjem. Cilj rada klasičnog ekspertske algoritma bio je održavanje željenog kvaliteta koncentrata iznad određene minimalne vrednosti i sadržaja korisne komponente u jalovini ispod određene maksimalne vrednosti. Operativni cilj postrojenja definisan je operativnim zonama (ukupno 9 zona) uspostavljenim prema dijagramu kvalitet koncentrata – procenat korisne komponente u jalovini. Radi ostvarivanja predviđenih ciljeva, vršeno je manipulisanje nivoom pulpe u skladu sa definisanim protokolom. Heuristički pristup radu postrojenja nije predvideo manipulisanje drugim promenljivim veličinama, kao što su protok vazduha ili brzina dodavanja reagenasa.

Fazi algoritam razvijen je kombinacijom baze znanja klasičnog ekspertske algoritma i fazi logičkih principa kako bi se izvršila identifikacija zona i kontrolna izračunavanja. Autori tvrde da se inkorporiranjem fazi logičkih zakonitosti u algoritam postiže: (1) skladniji prelaz između susednih zona, (2) poboljšanje upravljanja neizvesnostima zajedno sa definisanjem zona, (3) odgovarajuća reakcija na međusobni uticaj veličina manipulisanje promenljive između susednih zona i (4) pojednostavljenje interakcije između operatera i kontrolnog sistema.

Slika 59 prikazuje devet operativnih zona i trougaone i trapezoidne funkcije pripadnosti koje su korišćene u fazi algoritmu. Strelice na dijagramu označavaju smer

kontrolnog dejstva koji treba preduzeti kako bi se rad postrojenja doveo u optimalnu zonu, tj. zonu 2. Pri tom, opšte kontrolno pravilo ima sledeću formu:

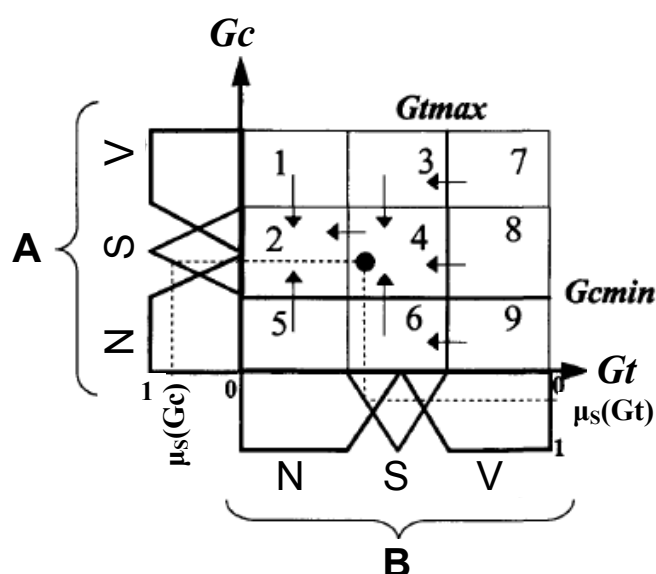
AKO je rad postrojenja u zoni Z, TADA povećaj (smanji) Gc ili Gt

gde je:

Z – bilo koja zona rada postrojenja od 1 do 9

Gc – kvalitet koncentrata

Gt – kvalitet jalovine



Slika 59. Zonski dijagram i pridruženi fazi skupovi. Značenje simbola na slici: A – pridruženi fazi skup za kvalitet koncentrata; B – pridruženi fazi skup za kvalitet jalovine; N – nizak, S – srednji, V – visok; μ – funkcija pripadnosti [adaptirano prema Osorio et al. (1999)].

Fazi/ekspertski algoritam formiran je kao pokušaj da se iskombinuju glavne prednosti druga dva algoritma.

Analize su pokazale da je klasični ekspertski algoritam najrobusniji a njegova primena je rezultirala najvećim iskorišćenjem. Fazi algoritam je održao rad postrojenja u okviru predviđenih granica duže nego drugi algoritmi, pri čemu je postignuto skoro identično iskorišćenje kao i upotrebom klasičnog algoritma. Fazi algoritam se takođe pokazao fleksibilnim i intuitivnim prilikom kontrolnih podešavanja. Njegov glavni nedostatak je generisanje snažnih upravljačkih akcija. Posmatrano sa skoro svih aspekata, kombinovani algoritam ima nešto lošije performanse od prethodna dva, ali je

obezbedio, sa gledišta praktične primene, najjednostavnije kontrolne akcije [Osorio et al. (1999)].

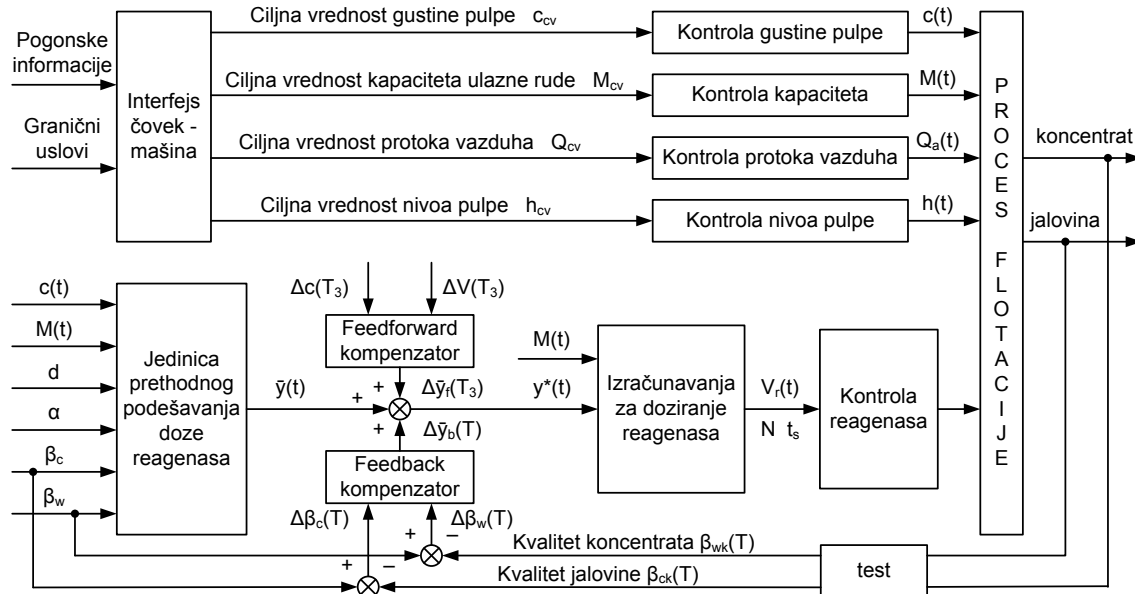
Poirier i Meech su, korišćenjem fazi logičkih pravila, razvili ekspertski sistem u realnom vremenu za upravljanje ciklusom flotiranja bakra. Sistem učestvuje u detekciji značajnih promena vrednosti (povećanje ili smanjenje) procesnih varijabli. Kada se takva promena detektuje, operateru se prosleđuje poruka koja ukazuje na trend i odgovarajući vremenski interval promene. Sistem je u stanju da eliminiše izuzetke, kao što je na primer isključenje opreme iz rada [Poirier and Meech (1993)].

Rojas i saradnici opisali su dve multivarijabilne ekspertске fazi logičke kontrolne strategije u ciklusu grubog flotiranja bakra. Prva strategija bazirana je samo na merenjima kvaliteta jalovine i koncentrata, dok druga uključuje i merenja kvaliteta proizvoda intermedijarnih ćelija. Rezultati simulacije su pokazali da se primenom ovih strategija iskorišćenje može povećati za 2,5% u poređenju sa fiksnim upravljanjem [Rojas et al. (2009)].

Iako se u današnje vreme inteligentno upravljanje uglavnom vezuje za metode veštačke inteligencije i praktične realizacije ideja viševrednosne logike, ekspertski sistemi koje su predložili pojedini istraživači baziraju se na *klasičnim logičkim pravilima*. Na primer, dva ekspertska algoritma koje su prikazali Pérez-Correa i saradnici za ciklus grubog flotiranja i prečišćavanja bakra zasnovana su na pravilima klasične logike. Jedan od ovih algoritama razvijen je u saradnji sa operaterima i inženjerima u postrojenju sa ciljem održavanja sadržaja bakra u koncentratu iznad minimuma i sadržaja bakra u jalovini ispod maksimuma. Kontrola procesa postignuta je regulacijom nivoa pulpe u ćelijama. Drugi algoritam je specijalno dizajniran da bi se izbegla kontrolna zasićenja. Pokazano je da su ovi ekspertski algoritmi u mogućnosti da održavaju rad postrojenja u definisanoj operativnoj zoni (na dijagramu kvalitet koncentrata/kvalitet jalovine) u određenom vremenskom periodu bez potpunog kontrolnog zasićenja [Pérez-Correa et al. (1998)]. Ipak, u radu koji su objavili Osorio i saradnici [Osorio et al. (1999)] (ova kontrolna strategija je ukratko opisana u prethodnom tekstu) pokazano je da je za održavanje rada postrojenja u okviru predviđenih granica u dužem vremenskom periodu pogodniji fazi algoritam.

Na slici 60 prikazana je strategija inteligentnog upravljanja procesom flotiranja koju su izložili Geng i saradnici⁴⁶.

Prikazana strategija integriše modelovanje i upravljanje u cilju ostvarivanja vrednosti kvaliteta koncentrata i iskorišćenja u okviru željenih granica. Sistem se sastoji od podсистema upravljanja gustinom pulpe, količinom ulaznog materijala, protokom vazduha, nivoom pulpe u ćelijama i hibridnog sistema za upravljanje reagensnim režimom.



Slika 60. Strategija inteligentnog upravljanja procesom flotiranja ($c(t)$ – gustina pulpe; $M(t)$ – masa ulazne rude; $Q_a(t)$ – protok vazduha; $h(t)$ – nivo flotacijske pulpe; d – srednji prečnik čestice; α – sadržaj korisne komponente u rudi; β_c , β_w – željeni sadržaj korisne komponente u koncentratu i jalovini, respektivno; $\beta_{ck}(T)$, $\beta_{wk}(T)$ – stvarni sadržaj korisne komponente u koncentratu i jalovini, respektivno; $\Delta c(T_3)$, $\Delta V(T_3)$, $\Delta \beta_c(T)$, i $\Delta \beta_w(T)$ – razlika između stvarne i željene vrednosti gustine pulpe, protoka pulpe, sadržaja korisne komponente u koncentratu i jalovini, respektivno; $\bar{y}(t)$ – inicijalna doza reagenasa; $y^*(t)$ – optimalna doza reagenasa; $\Delta \bar{y}_b(T)$, $\Delta \bar{y}_r(T_3)$ – signali koje generišu kompenzatori sa povratnom i upravnom spregom, respektivno; T , T_3 – intervali uzorkovanja kompenzatora sa povratnom i upravnom spregom, respektivno; $V_r(t)$ – brzina doziranja reagenasa; t_s – interval doziranja reagenasa; N – broj ventila) [Geng et al. (2008)].

Upravljanje segmentima sistema vrši se PID kontrolerima (slika 60), osim u slučaju hibridnog upravljanja sistemom za doziranje reagenasa koji je formiran na bazi modela, a sastoji se iz kompenzatora sa povratnom spregom, kompenzatora sa

⁴⁶Treba istaći da je sistem testiran u postrojenju sa flotacijskim kolonama, međutim autor disertacije smatra da ne postoji smetnja da se ovakav sistem primeni i u postrojenjima sa mehaničkim flotacijskim ćelijama, posebno zbog toga što u okviru sistema, kao značajne veličine nisu uzeti u obzir parametri specifični za kolona flotaciju (kao što je, recimo, količina spirne vode koja silazi kroz penu ili zapreminski udeo vazduha u zoni kolekcije).

upravnom spregom, računskog modela za doziranje reagenasa i kontrolera. Model je formiran na bazi pravila zaključivanja i kao izlaz daje vrednost jedinice reagensa određenu na osnovu gustine pulpe, mase rude, krupnoće sirovine, kvaliteta ulazne sirovine, ciljnog kvaliteta koncentrata i ciljnog sadržaja korisne komponente u jalovini.

Predloženi model testiran je u procesu katjonske reverzne flotacije magnetita u postrojenju za pripremu rude gvožđa u Kini. Proces se sastoji iz tri stadijuma: grubog flotiranja i dva stadijuma kontrolnog flotiranja. Predloženi sistem za inteligentno upravljanje sa uspehom održava vrednosti kvaliteta definitivnog koncentrata i sadržaja korisne komponente u jalovini [Geng et al. (2008)].

Komercijalna primena sistema koji se zasnivaju na metodama soft kompjutinga uglavnom je vezana za softvere o kojima je već diskutovano u prethodnim poglavljima (kao što je FloatStar Reagent Optimiser, na primer). U grupi sistema koji primenjuju fazi logiku i neuronske mreže su takođe i Optimizing Control System (OCS) koji je razvila kompanija Metso i Expert Optimiser, koji je razvila kompanija ABB group. OCS je ekspertski kontrolni sistem koji se bazira na fazi pravilima i uključuje procesuiranje slika, virtuelne senzore, statističke modele, neuronske mreže, optimizacione module i adaptivne prediktivne modele. Expert Optimiser uključuje modelovanje prvog principa, ekspertski sistem, fazi logiku i neuronske mreže kako bi generisao optimalnu krivu kvalitet–iskorišćenje, poboljšao kvalitet koncentrata, izvršio stabilizaciju protoka i minimizirao doze reagenasa [Cipriano (2010)].

Na osnovu istraživanja kojima se bavi ova disertacija i izvedenih zaključaka, na polju kontrole flotacijskog procesa pomoću metoda veštačke inteligencije učinjen je važan korak napred (posebno kada su u pitanju neuronske mreže). Međutim, može se reći da su tehnike bazirane na veštačkoj inteligenciji još uvek u ranom stadijumu razvoja i da se njihova ekspanzija može očekivati u budućnosti.

6.5 FINALNA RAZMATRANJA O TEHNIKAMA UPRAVLJANJA FLOTACIJSKIM SISTEMOM

Nakon izlaganja svih primera u prethodnom tekstu, nameće se pitanje o tome koji je sistem najbolji ili možda koji sistem ima najveći potencijal za budući razvoj.

Trenutno stanje u industriji ne opisuje uvek prisutne istraživačke trendove, ali može ukazati na dolazeći pravac razvoja. Čini se da je za sada modelsko prediktivno upravljanje lider na polju upravljanja flotacijskim sistemima. Prema Villar i saradnicima, MPC je daleko najprihvaćeniji multivarijabilni kontrolni algoritam koji se koristi u procesnoj industriji [Del Villar et al (2010)].

Međutim, poznavajući dinamiku razvoja, ili usvajajući trendove u oblasti flotacijske kolone kao indikativne, moguće je pretpostaviti da će metode veštačke inteligencije i ekspertski sistemi preuzeti vođstvo u pogledu kontrole procesa flotacije.

U tabeli 20 rezimirani su zaključci koji su izvedeni na osnovu razmatranja kontrolnih metoda i koncepcija prikazanih u poglavlju 6.0. Kategorije su namerno opisne, s obzirom da se kvantifikacija kontrolnih aspekata može dovesti u pitanje. Takođe, kroz diskusiju na ovu temu, moguće je razmatrati još neke kontrolne karakteristike kao što su troškovi, brzina odziva, količina potrebnih podataka, itd. Međutim, autor disertacije smatra da su prikazanih pet karakteristika, zajedno sa vrstom rude, najbitniji kada je reč o implementaciji pomenutih tehnika upravljanja u flotacijskim postrojenjima.

Tabela 20. Poređenje tri upravljačka koncepta u flotacijskim sistemima sa mehaničkim ćelijama.

	<i>Implementacija</i>	<i>Optimizacioni potencijal</i>	<i>Osetljivost na poremećaje</i>	<i>Robusnost</i>	<i>Održavanje</i>	<i>Tip rude</i>
<i>Klasični</i>	Laka	Nizak	Visoka	Niska	Lako do srednje teško	Širok dijapazon
<i>Model prediktivni</i>	Kompleksna	Srednji do visok	Srednja do visoka	Srednja	Srednje teško do teško	Bakar/PGM
<i>Inteligentni</i>	Kompleksna	Visok	Niska do srednja	Visoka	Lako do srednje teško	Cink/bakar/PGM

Postoji još nekoliko napomena koje treba dodati u vezi sa poređenjem: (1) razmatranje konvencionalnih metoda je dato sa svrhom uvida u istorijski kontrast, jer su ove metode trenutno primenljive samo na nižim hijerarhijskim nivoima; (2) metode koje su do danas našle najveću primenu (MPC i kompjuterska vizuelna analiza) su i najbolje opisane kroz literaturu, čime se pruža jasniji uvid u njihove prednosti i nedostatke; (3) izbor primera je sužen uglavnom na sulfidne rude, s obzirom da su primeri vezani za druge tipove ruda dosta oskudniji.

Važno pitanje o kome treba diskutovati je i uvođenje novih sistema u flotacijska postrojenja i njihovo prihvatanje od strane zaposlenih u postrojenjima. Prema Almondu i saradnicima, tokom prethodne dekade učinjen je značajan pomak na polju informacionih sistema i automatizacije postrojenja za PMS. Neke od postojećih koncepcija, rešenja i automatskih tehnologija koje su pre 2000. godine smatrane riskantnim i nepouzdanim evoluirale su i postale prihvatljive. Kao osnova za ovakve tvrdnje autorima je poslužila tajna anketa koju je sprovedla kompanija FLSmidth i koja je rezultirala podelom zaposlenih prema njihovom afinitetu i iskustvu sa automatskim sistemima na „stratege” (najveći afinitet i iskustvo), „implementatore” i „one koji prihvataju” (najmanji afinitet i iskustvo). Pri tom su identifikovane sledeće glavne interesne oblasti: (a) Operativni izazovi, (b) Poznavanje automatizacije i strategije, (c) Trenutna praksa u pogledu automatizacije, (d) Prednosti koje se stiču, (e) Procena kvaliteta i budući planovi, (f) Pristup, obrazloženje i investicioni kriterijumi i (g) Adaptivnost strategije [Almond et al. (2013)]. Ovakav tip ankete bi mogao biti polazna osnova pri razmatranju alternative uvođenja kontrolnih metoda.

Još jedno pozitivno iskustvo o prihvatanju ekspertskog sistema od strane zaposlenih u flotacijskom postrojenju dokumentovali su Karhu i saradnici. Oni izveštavaju da je sistem pomogao operaterima da vode proces na stabilniji i profitabilniji način, pružajući potrebna uputstva u slučaju značajnih dešavanja i kritičnih stanja u procesu. Oni takođe tvrde da je osoblje entuzijastično u pogledu ovog sistema i uvereno u njegovu korisnost [Karhu et al. (1992)].

Međutim, postoje i izveštaji o problemima u radu kontrolnih sistema u flotacijskim postrojenjima. Na primer, Li i saradnici prikazali su rezultate studije (sprovedene sa stanovišta ljudskog faktora) koja istražuje trenutni status operatera u kontrolnoj sobi, kao i fundamentalne „barijere” u njihovom radnom okruženju. Studija je uključivala operatere koji rade u dva različita tipa postrojenja za pripremu mineralnih sirovina u Australiji. Sakupljanje podataka ostvareno je na različite načine, uključujući osmatranja kontrolne sobe, intervjuje, ankete i preglede dokumentacije.

Rezultati su pokazali nekoliko ozbiljnih nedostataka u integrisanju ljudskog faktora u sistem automatike u okviru kontrolne sobe. Operateri su uglavnom pasivni u kontroli procesa, postoji sumnja u alarme ili je čak prisutno njihovo ignorisanje, a prema celokupnoj tehnologiji se odnose sa nepoverenjem, odbacivanjem i nedovoljnim

razumevanjem. Autori su mišljenja da glavne razloge za ovakvu situaciju čine: prikaz informacija u kontrolnoj sobi koji ne podržava ljudske potrebe sa aspekta nadzorne kontrole i različiti organizacioni problemi kao što su nedovoljna obučenosn operatora, loša primopredaja smene, nepravilna raspodela zadataka i sl. Ipak, oni na kraju zaključuju da povećanje sposobnosti operatora stvara više prostora za kontrolu procesa pripreme mineralnih sirovina. Razvoj efikasnog čovek–mašina interfejsa i alarma, poboljšana obuka operatora i optimizacija organizacionih faktora navode se kao ključne preporuke za postizanje bolje integracije između operatora i sistema automatizacije procesa [Li et al. (2011)].

Konačno, bitno je istaći da se opisane upravljačke tehnike, čak i ako se pokažu optimalnim za određeno postrojenje, za sada ne mogu preporučiti za rad sa drugim tipovima ruda ili tipovima flotacijskih procesa. Stoga bi bilo najlogičnije zaključiti da „sveobuhvatno” rešenje, koje podrazumeva razvoj kontrolne strategije primenljive u svim flotacijskim postrojenjima sa mehaničkim ćelijama (čak i sa manjim ili umerenim modifikacijama) još uvek nije ostvarivo.

S druge strane, pretpostavka da je krajnji cilj u pogledu kontrole procesa flotacije možda nemoguće dostići, može dovesti do menjanja celokupnog aspekta strategije. Na primer, pogodna alternativa bi mogla biti revitalizacija koncepta empirijskih rešenja (koji uključuje inteligentne metode), iako je poznato da se ovakav pristup vezuje za jedno ili vrlo mali broj postrojenja, često u ograničenom vremenskom intervalu. Pa čak i uz pomenutu konstataciju (a imajući u vidu objavljena istraživanja na temu upravljanja procesom flotacije) inteligentne metode, sa primenom u praksi upravljanja, povećaće opštu fleksibilnost postojećih pristupa i rešenja i doprineti formulaciji generalnih zaključaka.

Takođe, može se reći da je budući sagledivi razvoj baziran na inkrementalnim poboljšanjima koja se zasnivaju na prethodnom znanju akumuliranom tokom godina. Primeri koji odgovaraju ovom stanovištu su današnja proizvodnja flotacijskih ćelija velikih dimenzija, korišćenje inteligentnih tehnologija, pojednostavljenje procesa smanjenjem broja mernih mesta, itd. Slično tome, pojam hibridnog pristupa nije fokusiran na potrebu za specifičnim višestrukim kontrolnim entitetima, već na jednostavnije metode zasnovane na ekspertskom znanju, koje će naći svoje mesto u

postojećim šemama. Dobar primer ovog principa su sistemi kompjuterske vizuelizacije, gde relativno nov pristup zamenjuje „stari“.

Ovakve i slične pravce razvoja i poboljšanja treba očekivati na polju upravljanja flotacijskim sistemima, s obzirom da je u poslednje dve dekade ukazano na mogućnosti inovativnih pristupa, što je bitan korak napred ka pozicioniranju sve savremenijih i efikasnijih metoda.

7.0 POSTAVKA MODELA INTELIGENTNOG SISTEMA

7.1 UVODNE NAPOMENE

Savremeni industrijski flotacijski pogoni i zahtevi za kvalitetnim tehnološkim proizvodima iziskuju obavljanje složenih zadataka sa visokom preciznošću, pod nedovoljno definisanim uslovima. Klasični modeli procesa i klasične kontrolne tehnike ne daju dovoljno efikasne rezultate kada su u pitanju ovakvi sistemi. Naprotiv, svakodnevno se ukazuje potreba za uključivanjem ljudskog faktora (eksperata i/ili operatera) u praćenje procesa, kao i kontrolu i regulaciju tehnoloških parametara. Upravo zbog ovakvih i sličnih razloga, tokom izrade ove doktorske disertacije prednost je data inteligentnim sistemima i modelovanju zasnovanom na metodama soft kompjutinga (pre svega fazi logici i veštačkim neuronskim mrežama) koje karakteriše izvestan stepen intuitivnosti u izvođenju zaključaka – analogno ljudskim ekspertima.

Motivacija za korišćenje metoda soft kompjutinga u modelovanju procesa flotacije je i mogućnost inkorporiranja ekspertskog heurističkog znanja u modele kao i povećana fleksibilnost pri interpretaciji dobijenih rezultata.

Za razvoj matematičkih modela procesa izabrano je flotacijsko postrojenje u Velikom Krivelju, koje je sastavni deo kompleksa Rudarsko-topioničarskog basena Bor.

RTB Bor predstavlja jednu od vodećih kompanija u Srbiji i jedini je proizvođač bakra i plemenitih metala u našoj zemlji. Shodno tome, značaj uvođenja inteligentnog sistema u proces flotacije mogao bi se sagledati kroz više aspekata (tehnološkog, ekonomskog, edukativnog, socijalnog (u smislu olakšica pri radu operatera u postrojenju) i sl.); posebno zbog toga što je do nedavno kontrola i regulacija procesa u postrojenju „Veliki Krivelj” bila zasnovana skoro isključivo na manuelnom načinu rada.

U okviru ove doktorske disertacije razvijeno je deset modela procesa flotacijske koncentracije, čija je kratka sistematizacija prikazana u tabeli 21. Eksperimentalna istraživanja izvedena su u virtuelnim uslovima, korišćenjem programskog jezika MATLAB. Validacija predloženih modela izvršena je u programu Microsoft Excel.

Pored toga, predložena je i struktura inteligentnog sistema upravljanja u koju je moguće implementirati izabrani model flotacijskog procesa.

Tabela 21. Osnovni podaci o razvijenim modelima.

Oznaka modela	Vrsta metode koja je korišćena pri razvoju modela	Broj ulaznih parametara	Parametar koji se predviđa modelom		
			Sadržaj Cu u koncentratu	Iskorišćenje Cu u koncentratu	Sadržaj Cu u jalovini
EMM	Mamdani sistem	5	+	+	+
ESM	Takagi-Sugeno sistem	5	+	+	+
PMM	Mamdani sistem	3	+	+	+
PSM	Takagi-Sugeno sistem	3	+	+	+
ANF1	ANFIS	3	+		
ANF2	ANFIS	3		+	
ANF3	ANFIS	3			+
VNM1	Veštačke neuronske mreže	5	+		
VNM2	Veštačke neuronske mreže	5		+	
VNM3	Veštačke neuronske mreže	5			+

7.2 OPIS TEHNOLOŠKE ŠEME PROCESA

Podaci za izradu modela procesa flotacijske koncentracije prikupljeni su iz industrijskog postrojenja „Veliki Krivelj”, u periodu novembar 2009 – februar 2012. godine. U skladu s tim, u narednom delu teksta biće dat opis tehnološke šeme procesa prerade rude koja se odnosi na posmatrani period. Treba napomenuti da je u periodu od februara 2012. godine do sada izvršen niz rekonstrukcija u flotacijskom postrojenju u Velikom Krivelju, odnosno postojeća oprema i prateće instalacije zamenjeni su novom opremom i instalacijama. Ipak, principijelna tehnološka šema procesa prerade rude je praktično ostala ista i obuhvata:

- trostepeno drobljenje sa prosejavanjem,
- dvostepeno mlevenje i klasiranje,
- osnovno flotiranje minerala bakra,
- domeljavanje i klasiranje osnovnog koncentrata i koncentrata dopunskog flotiranja,

- trostepeno prečišćavanje koncentrata bakra, uz stadijum dopunskog flotiranja nakon prvog prečišćavanja koncentrata.

Takođe, reagensni režim koji se trenutno primenjuje u novo instaliranom postrojenju flotacije „Veliki Krivelj” ne razlikuje se značajno od onog koji je primenjivan u periodu prikupljanja podataka, jer se kao osnovni kolektor i dalje koristi kalijum etil ksantat, a kao penušač Dowfroth 250. Osim toga, prema projektovanoj novoj tehnološkoj šemi, nije došlo do promena u finoći mlevenja rude, niti u finoći domeljavanja koncentrata⁴⁷.

Ruda koja se prerađuje u flotaciji „Veliki Krivelj” eksploatiše se iz istoimenog ležišta „Veliki Krivelj”⁴⁸, metodom površinske eksploatacije. Ležište „Veliki Krivelj” predstavlja porfirsko ležište bakra u kome je glavni nosilac bakra mineral halkopirit, dok su u manjim količinama prisutni bornit, enargit, halkozin, kovelin, i sl. Sadržaj bakra u ulaznoj rudi se u proseku kreće oko 0,3% Cu.

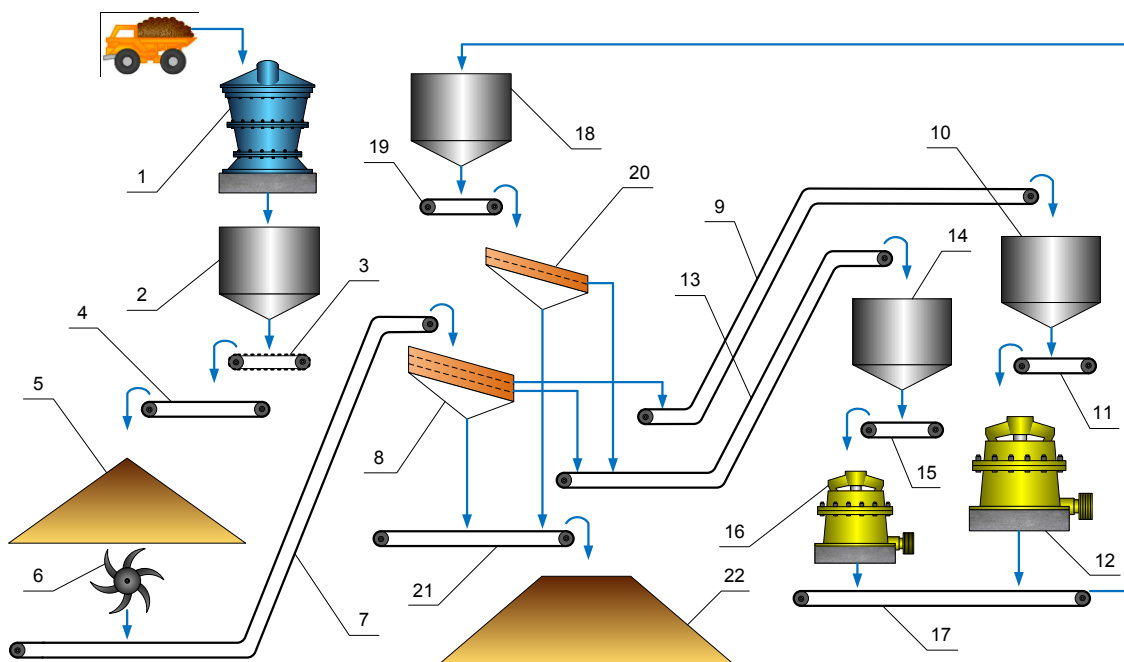
7.2.1 Drobljenje i prosejavanje

Pojednostavljena tehnološka šema procesa drobljenja i prosejavanja prikazana je na slici 61. Ruda gornje granične krupnoće 1000 mm se sa površinskog kopa transportuje kamionima i istovara u kružnu drobilicu za primarno drobljenje tipa „Allis Chalmers” Hydrocone 48×74" (poz. 1.). Primarno izdrobljena ruda, gornje granične krupnoće ~200 mm gravitacijski dospeva u prihvatni bunker (poz. 2), odakle se dalje posredstvom člankastog dodavača (poz. 3) i sistemom transportnih traka (poz. 4) doprema na otvoreni sklad (poz. 5). Sa otvorenog sklada, izdrobljena ruda se uz pomoć zvezdastih dodavača (poz. 6), dozira na transportne trake (poz. 7). Sa transportnih traka (poz. 7) ruda gravitacijski pada na dva vibraciona sita za primarno prosejavanje (poz. 8). Primarna sita su sa po dve prosevne površine. Nadrešetni proizvod gornje prosevne površine (krupnoće –200+60 mm) transportuje se sistemom transportnih traka (poz. 9) u prihvatni bunker (poz. 10) na sekundarno drobljenje. Nadrešetni proizvod donje

⁴⁷ Podaci su preuzeti iz Dopunskog rudarskog projekta rekonstrukcije flotacije Veliki Krivelj u cilju povećanja kapaciteta od $8,0 \times 10^6$ na $10,6 \times 10^6$ t/god. vlažne rude; Knjiga 1: Konceptijsko rešenje sa tehničkim opisom tehnološkog procesa od mlevenja do odvodnjavanja i skladištenja koncentrata; Sveska 2: Tehnološki projekat – ITNMS, Beograd (2013).

⁴⁸ Od 2013. godine u flotaciji Veliki Krivelj prerađuje se i ruda iz ležišta "Cerovo".

prosevne površine sita na poziciji 8, čija krupnoća iznosi $-60+20$ mm, se sistemom transportnih traka (poz. 13) dalje odvodi u prihvatni bunker (poz 14) na tercijarno drobljenje. Podrešetni proizvod sita (poz. 8), krupnoće $-20+0$ mm, pada na transportnu traku (poz. 21) i predstavlja definitivni proizvod drobljenja.



Slika 61. Tehnološka šema procesa drobljenja i prosejavanja.

Iz prihvatnog bunkera (poz. 10), ruda se posredstvom dva trakasta dodavača (poz. 11) dozira u sekundarne drobilice (poz. 12). Sekundarno drobljenje se odvija u dvema konusnim drobilicama tipa „Allis Chalmers” Hydrocone 13×84". Proizvod sekundarnog drobljenja (krupnoće $-60+0$ mm) se dalje, sistemom trakastih transporterata (poz. 17) doprema u bunker na poziciji 18.

Iz prihvatnog bunkera (poz. 14), ruda se posredstvom četiri trakasta dodavača (poz. 15) dozira u tercijarne drobilice (poz. 16). Da bi se obavio treći stepen drobljenja rude, u funkciji su četiri konusne drobilice tipa „Allis Chalmers” Hydrocone 3×84". Ove drobilice daju finalni proizvod krupnoće $-32+0$ mm, pri čemu je učešće klase $-32+20$ mm maksimalno 20%. Proizvod tercijarnog drobljenja spaja se sa proizvodom sekundarnog drobljenja, i trakastim transporterima (poz. 17) šalje u prihvatni bunker na poziciji 18.

Iz prihvatnog bunkera (poz. 18), ruda se dozira na sekundarna sita (poz. 20) uz pomoć trakastih dodavača (poz. 19). Sekundarno prosejavanje vrši se na 6 jednoetažnih

vibro sita. Nadrešetni proizvod ovih sita (poz. 20), čija je krupnoća $-60+20$ mm, spaja se sa nadrešetnim proizvodom donjih prosevnih površina primarnih sita (poz. 8) i preko transportnih traka (poz. 13) transportuje do do bunkera (poz. 14).

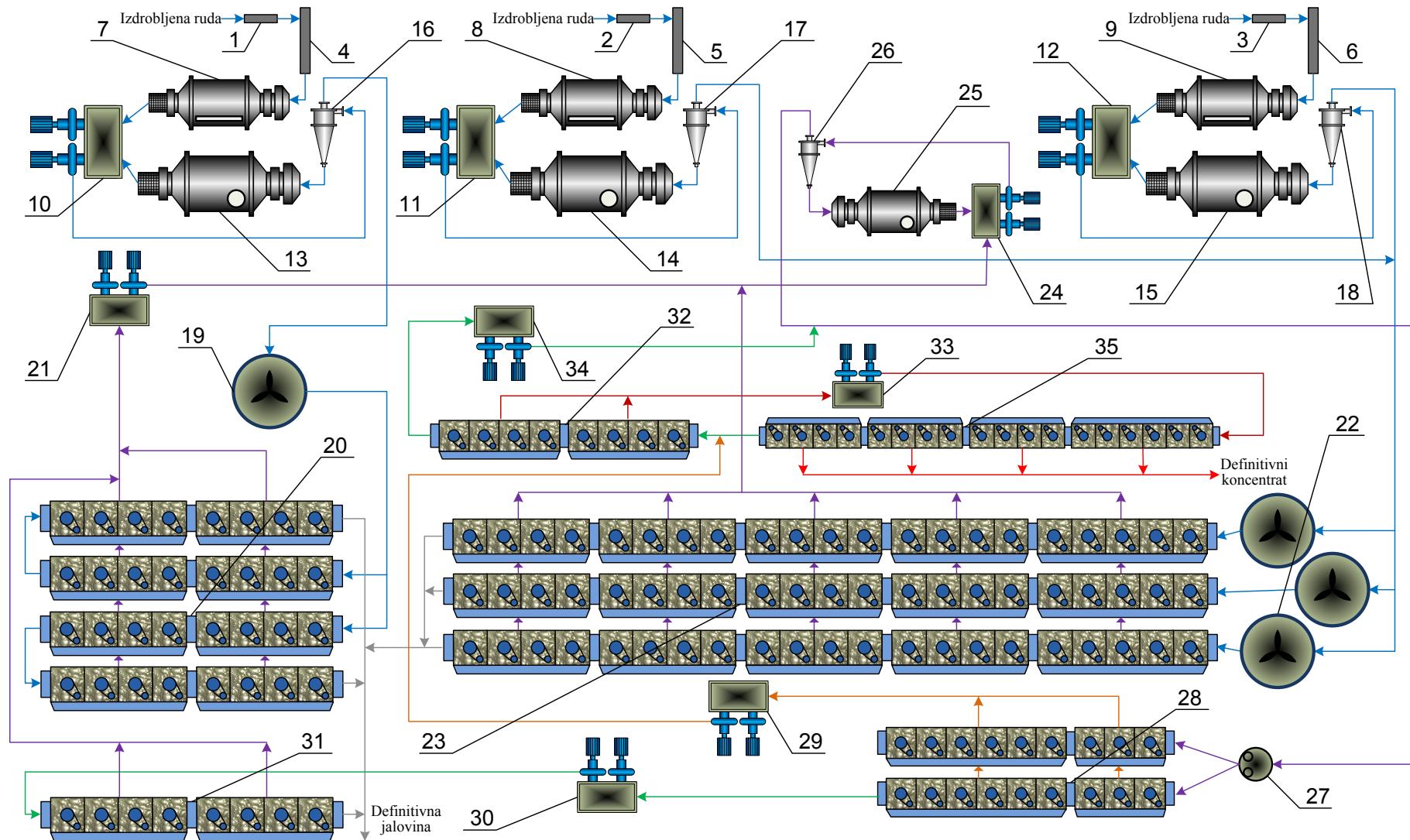
Podrešetni proizvod sita (poz. 20), kao definitivni proizvod drobljenja ima definitivnu krupnoću $-20+0$ mm, spaja se sa podrešetnim proizvodom sita (poz. 8) i sistemom trakastih transportera (poz. 21), doprema do bunkera sitne rude (poz. 22)

7.2.2 Mlevenje i klasiranje

Principijelna tehnološka šema procesa mlevenja, klasiranja i flotacijske koncentracije prikazana je na slici 62.

Mlevenje izdrobljene sirovine i njena dalja klasifikacija odvijaju se u tri identične mlinske sekcije. Izdrobljena ruda, gornje granične krupnoće 20 mm, se sa po četiri trakasta dodavača (poz. 1, 2, 3) doprema iz bunkera sitne rude na pripadajuće transportne trake (poz. 4, 5, 6) i dalje u mlinove sa šipkama (poz. 7, 8, 9).

Na transportnim trakama ugrađene su automatske vage koje služe za kontrolu kapaciteta prerade. Preko ručnih i automatskih ventila, na ulazu u mlinove sa šipkama, pored rude dodaje se krečno mleko (sa sadržajem kreča od 6%) za regulaciju pH vrednosti, kao i voda za pripremu pulpe. Proizvodi mlevenja iz mlinova sa šipkama dospevaju u pripadajuće koševе ciklonskih pumpi (poz. 10, 11, 12) gde se spajaju sa proizvodima mlevenja iz mlinova sa kuglama (poz. 13, 14, 15). Mlinovi sa šipkama su tipa „Litostroj Ljubljana” $4,30 \times 6,10$ m, dok su mlinovi sa kuglama tipa „Allis Chalmers” $5,37 \times 8,09$ m. Nakon dodavanja vode, ciklonske pumpe (poz. 10, 11, 12) transportuju materijal u odgovarajuće hidrociklonske baterije (poz. 16, 17, 18) na klasiranje. Pesak hidrociklona (razređen vodom) vraća se u drugi stepen mlevenja u mlinove sa kuglama. Preliv hidrociklona koji sadrži oko 58% klase $-0,074$ mm se, kao definitivni proizvod mlevenja, gravitacijski transportuje na osnovno flotiranje.



Slika 62. Tehnološka šema procesa mlevenja, klasiranja i flotacijske koncentracije:

- | | |
|-----------------------------------|--|
| — ruda; | — osnovni koncentrat, koncentrat dopunskog flotiranja; |
| — otok I, II i III prečišćavanja; | — definitivna jalovina; |
| — koncentrat prvog prečišćavanja; | — koncentrat drugog prečišćavanja; |
| — definitivni koncentrat. | |

7.2.3 Osnovno flotiranje minerala bakra

Preliv hidrociklona prve sekcije (poz. 16) se kanalima transportuje u kondicioner (poz. 19) i dalje u ćelije za osnovno flotiranje minerala bakra (poz. 20). Osnovno flotiranje preliva prve sekcije odvija se u dve linije flotacijskih mašina sa po 16 flotacijskih komora. Osnovni koncentrat se pumpom (poz. 21) transportuje u ciklus domeljavanja i klasiranja.

Prelivi hidrociklona druge i treće sekcije (poz. 17 i 18, respektivno) spajaju se i gravitacijski odvođe u kondicionere (poz. 22), a odatle u tri reda flotacijskih mašina sa po 21 komorom (poz. 23). Dobijeni osnovni koncentrat, koji sadrži 3–5% bakra, se dalje gravitacijski doprema u ciklus domeljavanja i klasiranja.

Kolektivni otok celokupnog osnovnog flotiranja predstavlja finalnu jalovinu koja se gravitacijski, betonskim kanalom transportuje na jalovište.

Za osnovno flotiranje koriste se flotacijske ćelije tipa „Denver DR-500”, zapremine 14,3 m³. Flotacija se odvija pri gustini pulpe 1190–1220 kg/m³ (što se reguliše dodavanjem potrebne količine vode), dok se njena pH vrednost kreće između 9,5 i 10,5. Kalijum etil ksantat⁴⁹ dozira se u količini 30–40 g/t, a penušač u količini 5–7 g/t. Vreme flotiranja iznosi približno 21 minut.

7.2.4 Domeljavanje osnovnog koncentrata, prečišćavanje i dopunsko flotiranje

U košu pumpe (poz. 24) spajaju se objedinjeni kolektivni osnovni koncentrat i koncentrat dopunskog flotiranja minerala bakra sa proizvodom mlevenja mlina za domeljavanje (poz. 25). Ciklonska pumpa (poz. 24) transportuje materijal u hidrociklonsku bateriju (poz. 26). Pesak hidrociklona, razređen vodom, vraća se u mlin za domeljavanje tipa „Allis Chalmers” 3,66×5,05 m (poz. 25), dok preliv hidrociklona, finoće 85–90 % –0,074 mm, gravitacijski odlazi do razdeljivača (poz. 27), na čelo prvog prečišćavanja.

Prvo prečišćavanje koncentrata bakra obavlja se u dva reda flotacijskih mašina, sa po 9 komora (poz. 28). pH vrednost u prvom prečišćavanju iznosi 11,0–11,5, a vreme flotiranja približno 10 minuta. Otok prvog prečišćavanja transportuje se pumpom (poz.

⁴⁹ Povremeno se na osnovnom flotiranju dodaje i natrijum izopropil ksantat u cilju povećanja iskorišćenja zlata i srebra u koncentratu.

30) na dopunsko flotiranje, dok se koncentrat šalje na drugo prečišćavanje uz pomoć pumpe (poz. 29).

Dopunsko flotiranje otoka prvog prečišćavanja obavlja se u flotacijskoj mašini sa 8 komora (poz. 31) u vremenu trajanja od oko 10 minuta. U cilju postizanja što većeg iskorišćenja bakra u koncentratu, dodaje se kalijum etil ksantat u količini 5–6 g/t. Koncentrat dopunskog flotiranja transportuje se na domeljavanje, dok otok predstavlja definitivnu jalovinu koja se odvodi na jalovište.

Drugo prečišćavanje koncentrata bakra odvija se u flotacijskoj mašini sa 8 komora (poz. 32). Vreme flotiranja iznosi ~20 minuta, a pH vrednost pulpe od 11,8 do 12. Koncentrat drugog prečišćavanja se pumpom (poz. 33) transportuje na treće prečišćavanje, dok se otok, posredstvom pumpe (poz. 34) vraća na prvo prečišćavanje.

Prvo i drugo prečišćavanje odvijaju se u flotacijskim mašinama tipa „Denver DR-300”, dok se za dopunsko flotiranje koncentrata bakra koriste flotacijske mašine tipa „Denver DR-500”.

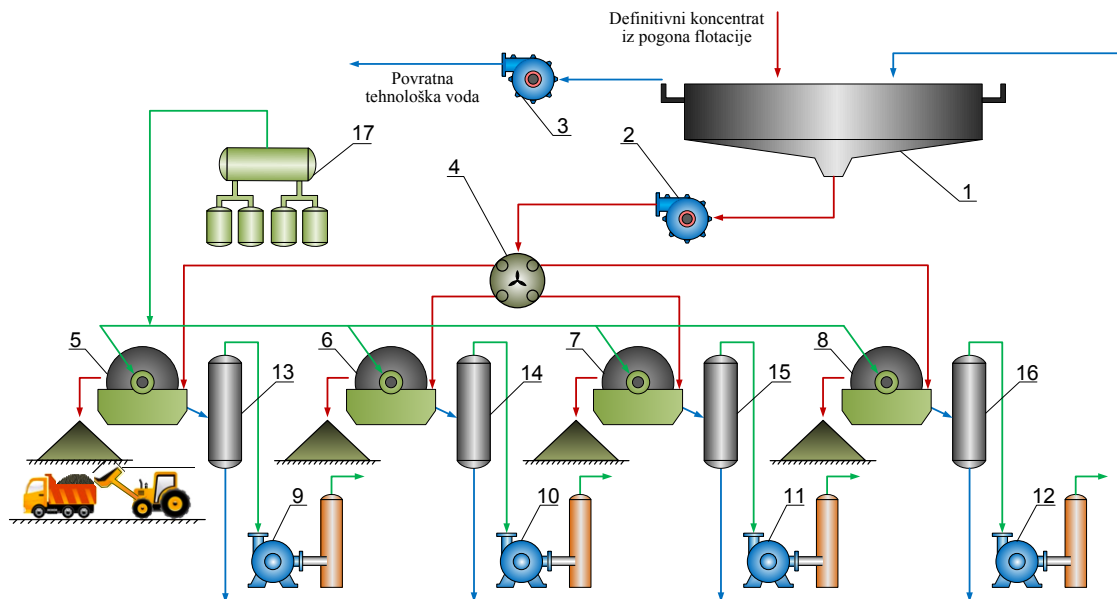
Treće prečišćavanje se vrši u dva reda flotacijskih mašina tipa „Denver DR-100”, sa po 18 komora (poz. 35). Vreme flotiranja iznosi približno 19 minuta, dok se pH vrednost pulpe kreće i preko 12. Koncentrat trećeg prečišćavanja predstavlja definitivni koncentrat koji se gravitacijski transportuje na zgušnjavanje i filtriranje. Finalni koncentrat sadrži 19–25% Cu. Otok se slobodnim padom vraća u flotacijske ćelije drugog prečišćavanja (poz. 32).

U svakom od tri stadijuma prečišćavanja koncentrata dodaje se određena količina vode, da bi se postigla željena vrednost gustine flotacijske pulpe.

7.2.5 Odvodnjavanje koncentrata bakra

Tehnološka šema procesa odvodnjavanja koncentrata bakra prikazana je na slici 63.

Definitivni koncentrat koji sadrži 19–25% bakra transportuje se sistemom cevovoda u zgušnjivač (poz. 1). Zgusnuti proizvod, sa sadržajem čvrste faze od ~55%, se uz pomoć muljne pumpe (poz. 2) transportuje u razdeljivač pulpe (poz. 4). Preliv zgušnjivača se posredstvom pumpe (poz. 3) vraća u flotacijsko postrojenje kao povratna tehnološka voda.



Slika 63. Tehnološka šema procesa odvođivanja definitivnog koncentrata.

Iz razdeljivača pulpe, zgusnuti proizvod se uvodi u vakuum filtere (poz. 5–8) na filtriranje. Filteri se snabdevaju vazduhom uz pomoć kompresora (poz. 17).

Filtrat se, posredstvom vakuum pumpi (poz. 9–12) preko riserskih sudova (poz. 13–16) vraća u zgušnjivač (poz. 1).

Isfiltrirani koncentrat bakra (kek) sadrži ~10% vlage i kao takav se kamionima transportuje u topionicu na dalju metaluršku preradu.

7.2.6 Odvođivanje jalovine

Jalovište „Veliki Krivelj” je formirano u dolini Kriveljske reke, u neposrednoj blizini rudnika. Kompletni akumulacioni prostor jalovišta „Veliki Krivelj” je, sa tri brane, podeljen u dva polja (jezera).

Transport definitivne jalovine od flotacijskog postrojenja do jalovišta vrši se gravitacijski, betonskim kanalom. Na jalovištu se nalazi 12 baterija hidrociklona koji služe za klasiranje jalovine. Pesak se odlaže na branama, čime se planski i sukcesivno izgrađuju brane, dok se preliv hidrociklona usmerava u akumulacione prostore jezera koji su ograničeni branama i reljefom rečne doline. Povratna tehnološka voda sa jalovišta se sistemom pumpi transportuje do pogona flotacije u Velikom Krivelju.

7.2.7 Kontrola i regulacija tehnoloških parametara u procesu flotacijske koncentracije

U posmatranom periodu novembar 2009 – februar 2012. sistem kontrole i regulacije u flotacijskom postrojenju uglavnom se oslanjao na manuelni način rada⁵⁰. Da bi se tehnološki proces održavao u stabilnom stanju vršena su merenja i regulacija sledećih tehnoloških parametara:

- granulometrijski sastav pulpe,
- gustina pulpe,
- nivo pulpe,
- pH vrednost pulpe,
- količine reagenasa

Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja jedan je od parametara koji daje uvid u oslobođenost mineralne sirovine. Kako bi se utvrdio granulometrijski sastav definitivno samlevenog proizvoda, uzima se uzorak preлива hidrociklona, a zatim vrši njegovo prosejavanje na sitima u Laboratoriji tehničke pripreme. Procentualni maseni sadržaj klase $-0,074$ mm treba da se kreće u određenom opsegu (tj. 58–60%). Ukoliko je sadržaj klase $-0,074$ mm niži od zahtevanog, vrši se korekcija na ulazu u mlin sa šipkama i to smanjenjem kapaciteta prerade rude ili smanjenjem gustine pulpe u granicama opsega. Ako je sadržaj klase $-0,074$ mm veći od zahtevanog, povećava se kapacitet prerade rude. Kada je u pitanju preliv hidrociklona na domeljavanju, regulacija granulometrijskog sastava vrši se smanjenjem količine vode (ako je preliv krupan) ili povećanjem količine vode (ako je preliv sitan) koja se dodaje u mlin za domeljavanje.

Osim kontrole definitivno samlevenog proizvoda, po potrebi se vrši i kontrola proizvoda mlevenja mlina sa šipkama, mlina sa kuglama i mlina za domeljavanje. S obzirom da je proces kontinualan i da se javlja potreba za brzim reagovanjem i

⁵⁰ U rekonstruisanom postrojenju ugrađeni su automatski regulatori nivoa pulpe u flotacijskim ćelijama, kao i gustinomeri na dovodnim cevima hidrociklonskih baterija. Pored toga, planirana je i instalacija VisioFroth sistema što između ostalog uključuje i postavljanje kamera na svakoj flotacijskoj ćeliji, odgovarajući hardversko-softverski paket, itd. Takođe je predviđena montaža automatskih uzimača uzoraka, analizatora krupnoće čestica, on-stream analizatora za određivanje hemijskog sastava uzoraka, itd. Ceo sistem automatske kontrole je projektovan tako da prikuplja sve pojedinačne signale sistema PLC, slaže prikupljene podatke u jedan sistem i kreira jedinstvenu kontrolnu šemu. Ipak, kontrola i regulacija pojedinih parametara (na primer potrošnja reagenasa) i dalje se vrši manuelno.

korekcijama procesa, neophodno je u toku rada obavljati i vizuelne kontrole. Ove kontrole se vrše na svakih sat vremena i sastoje se u ispiranju uzorka preliva hidrociklona na rudarskom tanjiru.

Gustina pulpe ima značajan uticaj na procese mlevenja, klasiranja i flotacije. Odgovarajuća gustina pulpe u mlinovima obezbeđuje maksimalni kapacitet mlina, dok u klasifikatoru utiče na krupnoću preliva. Optimalna gustina pulpe u flotacijskim ćelijama obezbeđuje adekvatne uslove za optimizaciju procesa flotiranja minerala bakra.

Kontrola gustine pulpe vrši se na različitim mestima u procesu, kao što su, na primer, izlazi iz mlinova, pesak i preliv hidrociklona, itd. Gustina pulpe određuje se metodom staklenih piknometara u Laboratoriji tehničke pripreme. Međutim, zbog blagovremene reakcije na promene u vrednostima gustina pulpe u procesu potrebno je vršiti brzu kontrolu iste u pogonu flotacije. Ovaj postupak se obavlja uz pomoć piknometra „Denver”, merenjem pulpe na „Denver” kantar, i to na svakih 1–2 sata.

Regulacija gustine pulpe vrši se promenom količine vode koja se dodaje u određenim tačkama procesa ili promenom kapaciteta prerade rude. Voda se u proces dodaje ručno, posredstvom ventila koji odgovara datom segmentu procesa u kome se vrši regulacija.

Optimalna vrednost *nivoa pulpe* obezbeđuje optimalno vreme koje je potrebno da hidrofobna mineralna zrna prionu za vazdušne mehuriće. Regulacija nivoa pulpe vrši se ručno – podizanjem bušona (kada je potrebno smanjiti nivo pulpe), odnosno spuštanjem bušona (kada je potrebno povećati nivo pulpe) koji se nalaze u kutijama flotacijskih mašina.

Optimalna *pH vrednost pulpe* stvara optimalne uslove za dejstvo kolektora na površinama mineralnih zrna, kao i za selektivnost procesa flotiranja. Merenje pH vrednosti vrši se pH-metrima čije su sonde uronjene u prelivnu pulpu hidrociklona. Ove vrednosti se očitavaju na ekranu na komandnom pultu.

Pored toga, određuju se i pH vrednosti otoka sva tri prečišćavanja. Uzorci se uzimaju ručno, a pH se utvrđuje ručnim pH-metrima ili metodom titracije pulpe⁵¹ u Laboratoriji tehničke pripreme.

⁵¹ Metoda određivanja slobodnog kreča u bistrom delu rastvora. Meri se zapreminska količina titranta (u ovom slučaju HCl) koja je potrebna da bi izreagovala sva količina Ca(OH)₂ u rastvoru (tzv. završna tačka titracije), a prema jednačini Ca(OH)₂+ 2HCl= CaCl₂+ 2H₂O.

Za regulaciju pH vrednosti pulpe koristi se kreč, koji se u proces dodaje u vidu krečnog mleka (6% vodeni rastvor kalcijum oksida). Kada je u pitanju proces mlevenja, smanjenje ili povećanje doze krečnog mleka, u zavisnosti od željene pH vrednosti pulpe, vrši se sa komandnog pulta, podešavanjem zazora pneumatskih ventila koji se nalaze na svakom dozirnem mestu. Regulacija potrošnje krečnog mleka u svakom od stadijuma trostepenog prečišćavanja vrši se ručno. Normativna potrošnja kreča iznosi 2 kg/t prerađene rude.

Reagensi su, kao što je poznato, jedan od ključnih elemenata za uspešnost procesa flotiranja bakra. Kontrola količine doziranja reagenasa (kolektora i penušača) vrši se merenjem protoka reagenasa i proračunom njihove potrošnje po toni prerađene rude.

U svojstvu kolektora prvenstveno se koristi kalijum etil ksantat koji se u proces dozira u vidu 10% rastvora. Regulacija potrošnje kolektora predstavlja složen zadatak koji zavisi od niza faktora u postrojenju. Pre svega, prate se informacije dobijene sa površinskog kopa o mineraloškom sastavu rude i sadržaju bakra u ulaznoj rudi. Pored toga vrši se vizuelna analiza uzoraka samlevene ulazne sirovine, koncentrata i jalovine ispiranjem na rudarskom tanjiru na svakih sat vremena (analiza međuproizvoda se takođe obavlja na ovaj način, ali sa manjom učestalošću ispitivanja). Takođe se prati i izgled flotacijske pene u smislu njene boje, veličine mehurića, mineralizacije, itd.

Prema tome, postoji veliki broj indikatora koji ukazuju na to da li je potrebno povećati ili smanjiti dozu kolektora. Iskusni operateri u postrojenju prepoznaju ove indikatore i shodno tome preduzimaju odgovarajuću upravljačku akciju. Regulacija količine kolektora vrši se ručno, pomoću ventila koji se nalaze na svakom dozirnem mestu. Normativna potrošnja KEX iznosi 30 g/t.

Dowfroth 250 primenjuje se u svojstvu penušača i u proces se dodaje u tečnom stanju, koncentrovan. Potrošnja penušača će prvenstveno zavisiti od stabilnosti flotacijske pene (tj. da li pena „buja” ili je sklona kolapsu), zatim od prisustva aluminata u ulazu i sl. Regulacija protoka penušača vrši se na jednom mestu, posredstvom ručnog ventila.

Pored pomenutih parametara čija se kontrola i regulacija vrši direktno u pogonu flotacije „Veliki Krivelj”, svakodnevno se određuje granulometrijski sastav definitivno izdrobljene rude koji može ukazati na efikasnost procesa drobljenja i eventualnu

potrebu za regulacijom kapaciteta prerade u mlevenju. Osim toga, hemijskom analizom se određuje i sadržaj bakra u ulaznoj rudi, koncentratu i jalovini čime se dobija uvid u efikasnost procesa flotacije. Takođe, zbog ekonomskih potreba i potreba topioničke prerade, utvrđuje se i sadržaj vlage u definitivnom koncentratu.

7.3 FORMIRANJE BAZE PODATAKA

Za izradu doktorske disertacije autoru su na raspolaganju bili realni industrijski podaci dobijeni iz procesa flotacijske koncentracije u pogonu „Veliki Krivelj”.

Podaci o ulaznim parametrima tehnološkog procesa se prikupljaju svakodnevnim praćenjem i ažuriranjem dobijenih vrednosti u odgovarajućoj evidencionoj dokumentaciji. Podaci se unose tabelarno, na početku i na kraju svake smene, a svaka tabela sadrži informacije o sledećim tehnološkim parametrima:

- kapacitet prerade svake sekcije mlevenja [t/h]
- granulosastav izdrobljene sirovine (ostatak na situ otvora 20 mm) [%]
- gustina preliva hidrociklona na svakoj sekciji mlevenja [g/l]
- gustina preliva hidrociklona na domeljavanju [g/l]
- gustina krečnog mleka [g/l]
- prirodna pH vrednost ulazne rude
- pH vrednost preliva hidrociklona na svakoj sekciji mlevenja
- pH vrednost preliva hidrociklona na domeljavanju
- rezultati titracija na otocima i krečnom mleku [ml]
- potrošnja kolektora na osnovnom flotiranju [g/t]
- potrošnja kolektora na dopunskom flotiranju [g/t]
- potrošnja penušača [g/t]

Takođe, evidencionna dokumentacija sadrži i podatke o granulosastavima preliva hidrociklona na mlevenju i domeljavanju, ali se oni ne ažuriraju svakodnevno, već prema potrebi.

Podaci o proizvodima koncentracije se unose na smenskom nivou u pisanom obliku i elektronski, a sadrže informacije o:

- sadržaju bakra u koncentratu
- sadržaju bakra u jalovini osnovnog flotiranja prve sekcije
- sadržaju bakra u jalovini osnovnog flotiranja druge i treće sekcije

- sadržaju bakra u jalovini dopunskog flotiranja
- sadržaju bakra u definitivnoj jalovini
- sadržaju bakra u ulaznoj rudi
- iskorišćenju bakra u koncentratu
- sadržaju vlage u ulaznoj rudi
- sadržaju vlage u koncentratu
- količini proizvedenog koncentrata

Pored navedenih parametara prati se i elektronski ažurira potrošnja normativa (kreč, kugle i šipke u mlinovima, ulja i maziva, itd.) na dnevnom/mesečnom nivou, kao i proizvodnja zlata i srebra (sadržaji i iskorišćenja Au i Ag u koncentratu i jalovini) na dekadnom nivou.

Kao što je već napomenuto u poglavlju 7.2 podaci za izradu doktorske disertacije preuzeti su iz perioda rada postrojenja od novembra 2009. do februara 2012. godine. Podaci su pohranjeni u programu Microsoft Excel koji služi za tabelarne kalkulacije, ali i za izradu jednostavnijih baza podataka. Nakon toga, izvršeno je grupisanje i aranžiranje podataka, odnosno njihovo predstavljanje u obliku koji je pogodan za razvoj modela procesa. Detalj baze podataka prikazan je na slici 64.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	
1	Datum	Smena	FCU, w(%)	CCU, %	WK(%)	j(%)	z(%)	s(%)	jsm(%)	TCU, %	RCU, %	LIM, kg/t	Q, t/h	PXS, g/t	PXR, g/t	SXR, g/t	FRT, g/t	Ore pH	RFI pH	RFII pH	RFIII pH	Ttd	TtdI	TtdII	TtdIII	GPULI	GPULII	
1161	22.11.2010	II	0.20	2.67	18.06	11.2	0.030	0.030	0.430	0.030	0.058	71.03		362.00	5.15	32.27	2.43	8.50	7.50	10.50	10.25	10.40	53.50	113.00	125.50	1.225.00	1.225.00	
1162	22.11.2010	III	0.22	6.40	16.21	10.4	0.030	0.020	0.120	0.027	0.033	85.07	3.39	351.67	5.60	35.78		7.85	7.40	10.15	10.25	10.20	87.50	115.00	122.50	1.238.33	1.236.67	
1163	23.11.2010	I	0.27	4.00	17.25	9.6	0.030	0.020	0.220	0.027	0.040	85.25		353.33	5.50	35.95		8.80	7.50	9.93	10.08	10.20	81.50	115.00	125.00	1.228.33	1.228.33	
1164	23.11.2010	II	0.21	3.00	13.60	10.4	0.030	0.020	0.240	0.027	0.042	80.35		346.67	5.90	35.90	2.45	9.23	7.50	10.28	10.20	10.28	74.50	112.50	125.50	1.216.67	1.218.33	
1165	23.11.2010	III	0.23	4.80	11.51	9.6	0.030	0.020	0.110	0.027	0.033	86.10	3.35	346.67	5.80	33.28	2.50	8.40	7.50	9.73	10.23	9.75	95.50	115.50	123.50	1.233.33	1.235.00	
1166	24.11.2010	I	0.26	2.50	14.66	9.2	0.020	0.010	0.130	0.016	0.024	90.90																
1167	24.11.2010	II	0.22	3.20	12.52	11.2	0.010	0.010	0.070	0.010	0.014	95.63		353.33	5.45	33.97		9.30	7.60	10.00	9.97			86.50	115.50	125.00	1.223.33	1.230.00
1168	24.11.2010	III	0.22	3.68	17.58	10.8	0.020	0.020	0.120	0.020	0.027	87.82	3.36	360.00	6.00	34.15		8.62	7.60	10.13	10.58	10.23	99.00	118.50	126.50	1.228.33	1.228.33	
1169	25.11.2010	I	0.22	4.00	16.90	10.4	0.010	0.010	0.110	0.010	0.017	92.33																
1170	25.11.2010	II	0.25	6.00	18.18	10.8	0.040	0.020	0.180	0.033	0.044	82.72		375.00	5.85	33.55		8.63	7.50	9.85	10.10	9.88	83.50	115.50	125.00	1.231.67	1.235.00	
1171	25.11.2010	III	0.23	4.00	16.28	11.2	0.030	0.050	0.140	0.035	0.043	81.58	3.32	380.00	5.95	33.70		8.22	7.70	10.40	10.63	10.25	109.00	119.00	126.50	1.227.50	1.231.67	
1172	26.11.2010	I	0.21	4.50	18.56	10.8	0.020	0.020	0.150	0.020	0.029	86.22		376.67	6.10	34.35		8.40	7.50	10.28	10.28	9.93	91.00	114.50	122.50	1.238.33	1.241.67	
1173	26.11.2010	II	0.27	2.07	15.30	10.4	0.040	0.030	0.130	0.037	0.043	84.22																
1174	26.11.2010	III	0.22	3.60	18.30	10.0	0.010	0.010	0.110	0.010	0.017	92.31	3.32	359.17	6.05	34.55		8.38	7.70	9.83	9.90	9.58	101.00	116.50	125.00	1.241.67	1.230.00	
1175	27.11.2010	I	0.20	4.40	21.36	11.2	0.010	0.040	0.140	0.020	0.029	85.83		366.67	6.00	33.70		8.37	7.60	10.20	10.40	10.08	76.50	109.50	121.50	1.241.67	1.241.67	
1176	27.11.2010	II	0.18	5.20	20.18	10.4	0.040	0.040	0.130	0.040	0.046	74.40																
1177	27.11.2010	III	0.27	3.20	21.52	10.8	0.020	0.020	0.140	0.020	0.029	89.56	3.32	358.33	6.00	32.45		8.12	7.60	9.90	10.10	9.98	101.00	115.50	125.00	1.231.67	1.238.33	
1178	28.11.2010	I	0.25	4.00	23.77	12.0	0.020	0.040	0.120	0.029	0.036	85.77		356.00	5.90	35.23		8.98	7.80	10.45	10.20	10.40	111.00	119.50	126.50	1.236.67	1.230.00	
1179	28.11.2010	II	0.24	1.60	21.44	11.6	0.050	0.030	0.200	0.041	0.052	78.33		348.00	5.90	35.40		8.98	7.70	10.20	10.50	10.13	98.00	116.50	124.50	1.235.00	1.250.00	
1180	28.11.2010	III	0.19	2.00	18.36	11.6	0.020	0.010	0.110	0.017	0.023	87.91	3.33															
1181	29.11.2010	I	0.26	2.00	23.71	12.4	0.020	0.020	0.170	0.020	0.031	88.33		348.00	6.40	37.50		9.08	7.80	10.10	10.80	10.23	96.00	118.00	125.50	1.221.67	1.235.00	
1182	29.11.2010	II	0.28	3.60	21.94	11.6	0.020	0.020	0.210	0.020	0.033	88.17		353.33	5.90	34.67	2.50	9.30	7.40	9.10		9.85	85.50	111.00	122.50	1.230.00		
1183	29.11.2010	III	0.26	5.50	15.89	11.6	0.020	0.130	0.020	0.028	0.028	89.46	3.34															
1184	30.11.2010	I	0.24	1.60	21.49	10.8	0.030	0.220	0.028	0.042	0.042	82.75		370.00	5.85	31.00	2.40	9.08	7.70		9.85	10.08	69.50	113.50	124.50		1.231.67	
1185	30.11.2010	II	0.28	2.67	23.47	10.5	0.050	0.040	0.170	0.047	0.055	80.41		363.33	6.25	33.95	2.50	9.05	7.60	10.53	10.60	10.65	81.00	118.50	124.50	1.221.67	1.245.00	
1186	30.11.2010	III	0.24	2.80	23.00	10.4	0.040	0.040	0.120	0.040	0.046	81.13	3.31	353.33	6.00	33.43	2.50	9.43	7.60	10.15	10.95	10.18	87.00	114.50	123.50	1.233.33	1.246.67	
1187	1.12.2010	I	0.23	1.20	19.14	10.8	0.02	0.02	0.19	0.020	0.032	86.20																
1188	1.12.2010	II	0.29	1.50	19.30	10.5	0.04	0.03	0.12	0.037	0.043	85.52																
1189	1.12.2010	III	0.26	4.40	16.24	10.4	0.02	0.01	0.14	0.016	0.025	90.46	2.97		6.25	24.65	2.70	9.27	7.80	10.30	9.73	10.50	49.00	114.50	128.00	1.208.33	1.230.00	
1190	2.12.2010	I	0.25	2.00	13.96	10.0	0.01	0.01	0.10	0.010	0.016	93.55																

Slika 64. Detalj baze podataka formirane u programu Microsoft Excel.

7.4 IZBOR I FAZIFIKACIJA PROMENLJIVIH

7.4.1 Izbor ulaznih i izlaznih parametara u modelima

Proces flotacijske koncentracije karakterističan je po velikom broju uticajnih parametara, odnosno ulaznih promenljivih veličina koje utiču na odvijanje procesa⁵². Za potrebe razvoja modela procesa u okviru ove doktorske disertacije, prilikom izbora odgovarajućih uticajnih parametara vođeno je računa o njihovoj značajnosti kao i o dostupnosti odgovarajućih podataka. Nakon sagledavanja činjenica i ekspertske analize prikupljenih podataka usvojene su sledeće ključne ulazne promenljive⁵³, prikazane u tabeli 22.

Tabela 22. Ulazne (nezavisno promenljive) veličine.

Vrsta promenljive	Oznaka u modelu	Jedinica mere
Sadržaj bakra ulaznoj rudi	FCU	%
Potrošnja kolektora na osnovnom flotiranju	PXR	g/t
Potrošnja penušača	FRT	g/t
pH vrednost na osnovnom flotiranju	PHR	–
Potrošnja kolektora na dopunskom flotiranju	PXS	g/t

Ostale veličine koje značajno utiču na efikasnost procesa flotacijske koncentracije smatrane su konstantnim i njihove vrednosti u okviru modela date su u tabeli 23. Razlozi za izbor konstantnih promenljivih su različiti. Na primer, oslobođenost mineralne sirovine, odnosno njen granulometrijski sastav nakon mlevenja i domeljavanja predstavlja važan uticajni parametar u procesu. Međutim, analiza granulometrijskog sastava na sitima ne vrši se svakodnevno, već prema potrebi, na svakih nekoliko dana. Praćenje granulometrijskog sastava sirovine pretežno se odvija na rudarskom tanjiru, tako da nije bilo dovoljno informacija o promenama ovog parametra

⁵² O datoj problematici je već diskutovano u poglavlju 3.3.

⁵³ U zavisnosti od posmatranog modela razlikuje se broj i vrsta ulaznih promenljivih. Prošireni fazilogički modeli i veštačke neuronske mreže (u tabeli 21 označeni kao PMM, PSM i VNM1, VNM2 i VNM3) sadrže svih pet ulaznih promenljivih, dok pH vrednost na osnovnom flotiranju i potrošnja kolektora na dopunskom flotiranju nisu uzete u obzir kao promenljive veličine u ostalim modelima, već kao konstante.

u toku svake smene. Dalje, kada je u pitanju gustina pulpe, postoje smenski podaci o gustini preliva hidrociklona na mlevenju i domeljavanju. Ipak, treba uzeti u obzir da se u ćelije osnovnog flotiranja, kao i u svako prečišćavanje dodaje voda sa ciljem korekcije gustine pulpe. S obzirom da ne postoji kontinualno praćenje gustine pulpe u flotacijskim ćelijama, podaci o promenama iste, u bilo kom od stadijuma flotacijske koncentracije, nisu bili dostupni.

Tabela 23. Ulazne veličine koje se smatraju konstantnim.

Parametar	Vrednost	Jedinica mere
Finoća mlevenja	58	% klase $-74 + 0 \mu\text{m}$
Finoća domeljavanja	85	% klase $-74 + 0 \mu\text{m}$
Gustina pulpe u osnovnom flotiranju	1190	g/l
Gustina pulpe u I prečišćavanju	1150	g/l
Gustina pulpe u dopunskom flotiranju	1120	g/l
Gustina pulpe u II prečišćavanju	1130	g/l
Gustina pulpe u III prečišćavanju	1125	g/l
pH vrednost na I prečišćavanju	11,5	–
pH vrednost na dopunskom flotiranju	11,5	–
pH vrednost na II prečišćavanju	11,8	–
pH vrednost na III prečišćavanju	12	–
Vreme osnovnog flotiranja	21	minuta
Vreme I prečišćavanja	10	minuta
Vreme dopunskog flotiranja	10	minuta
Vreme II prečišćavanja	20	minuta
Vreme III prečišćavanja	19	minuta
pH vrednost na osnovnom flotiranju	10	–
Potrošnja kolektora na dopunskom flotiranju	5	g/t

Razmatranjem podataka o pH vrednostima preliva hidrociklona na domeljavanju uočeno je da se one uglavnom kreću između 9 i 10. S obzirom da se prvo prečišćavanje odvija na pH vrednosti pulpe od približno 11,5, jasno je da je u stadijumu prvog prečišćavanja skoro uvek bilo potrebno dodati kreč, kako bi se postigla željena vrednost pH. Shodno tome, iako postoji redovno praćenje i vođenje evidencije o pH vrednostima preliva hidrociklona na domeljavanju, ovi podaci se ne mogu smatrati merodavnim za razvoj modela procesa. Odabir potrošnji titracionog sredstva na otocima prečišćavanja u svojstvu ulaznih promenljivih ima više smisla; ipak, sa aspekta automatske kontrole i

regulacije procesa, mnogo je efikasnije pratiti pH vrednosti pulpe (jer se mogu direktno i kontinualno meriti). Imajući u vidu ovu činjenicu, odlučeno je da se vrednosti titracija ne uzimaju u obzir pri modelovanju, već da se pH vrednosti pulpe na prečišćavanjima i dopunskom flotiranju smatraju konstantama.

Konačno, treba istaći da se pri razvoju elementarnih fazi logičkih modela zasnovanih na Mamdani i Takagi-Sugeno sistemu zaključivanja (u tabeli 21 oni nose oznaku EMM i ESM), kao i modela baziranih na hibridnom ANFIS sistemu, pH vrednost na osnovnom flotiranju i potrošnja kolektora na dopunskom flotiranju smatraju konstantnim. Njihove vrednosti u datom slučaju prikazane su u tabeli 23 i uokvirene isprekidanom linijom.

U svojstvu parametara koji opisuju performanse procesa, tj. izlaznih parametara modela, razmatrane su promenljive veličine prikazane u tabeli 24.

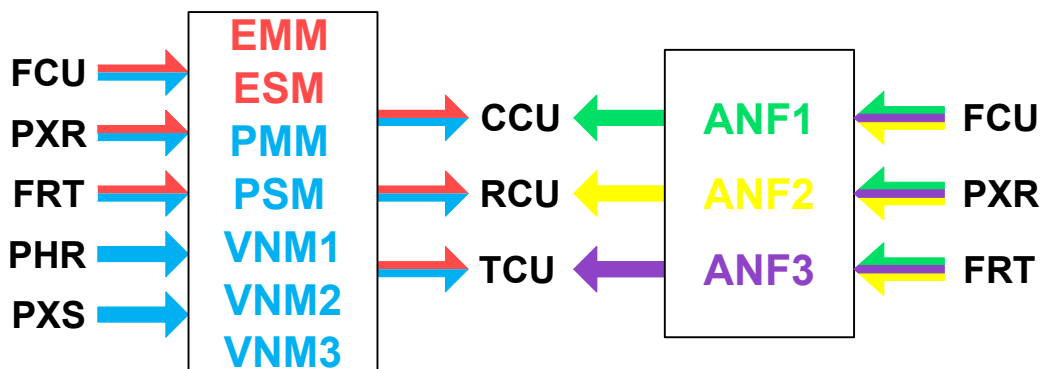
Tabela 24. Izlazne (zavisno promenljive) veličine.

Vrsta promenljive	Oznaka u modelu	Jedinica mere
Sadržaj bakra u koncentratu	CCU	%
Sadržaj bakra u jalovini	TCU	%
Iskorišćenje bakra u koncentratu	RCU	%

Da bi se stekao bolji uvid u opseg i karakteristike ulaznih i izlaznih veličina, u tabeli 25 dati su neki od statističkih pokazatelja pripadajućih skupova podataka. Kao dodatak, slika 65 prikazuje osnovne strukture razvijenih modela procesa flotacijske koncentracije sa ulaznim i izlaznim veličinama za svaki model.

Tabela 25. Statistički pokazatelji reda veličine promenljivih u flotacijskom sistemu.

Statistički pokazatelj	Ulazne promenljive					Izlazne promenljive		
	FCU	PXR	FRT	PHR	PXS	CCU	TCU	RCU
Minimum	0,12	10,00	1,02	8,44	2,50	7,91	0,009	40,78
Maksimum	0,51	49,98	16,97	11,97	7,90	28,09	0,149	96,48
Srednja vrednost	0,26	32,27	6,19	10,40	5,38	19,24	0,041	84,24
Mod	0,26	33,50	3,80	9,85	5,00	18,48	0,035	90,77
Medijana	0,26	33,30	5,87	10,45	5,25	19,34	0,038	85,18



Slika 65. Objedinjene osnovne strukture modela procesa flotacijske koncentracije.

7.4.2 Fazifikacija ulaznih i izlaznih parametara u fazi logičkim modelima

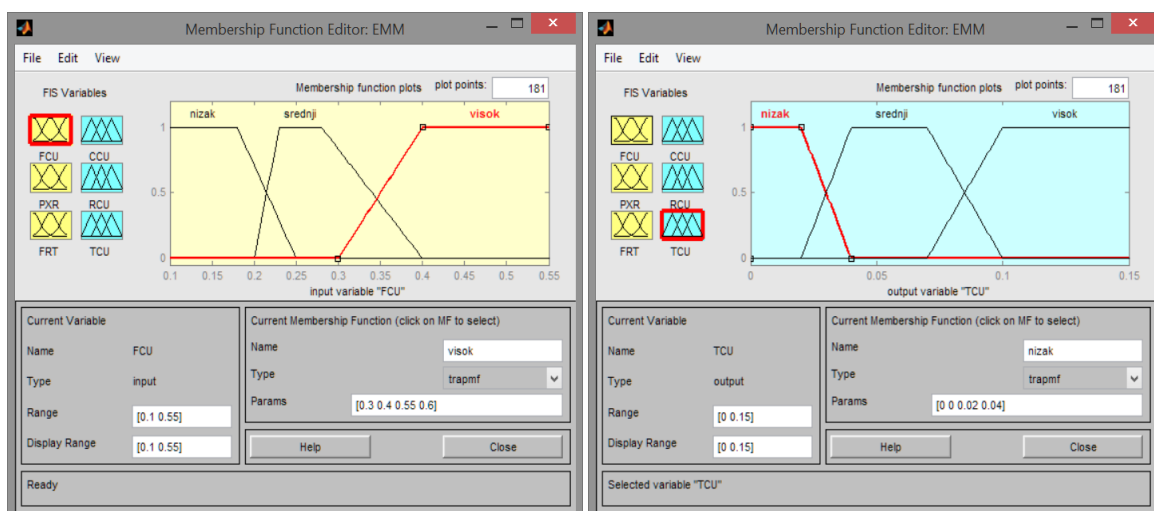
Kao što je već napomenuto u poglavlju 7.1, u cilju sagledavanja mogućnosti modelovanja procesa flotacijske koncentracije različitim metodama, razvijeno je ukupno 10 modela procesa. Ova grupa modela uključuje i četiri fazi logička modela kod kojih je najpre bilo neophodno izvršiti fazifikaciju promenljivih veličina.

Fazifikacija promenljivih izvršena je na osnovu iskustvenog poznavanja procesa flotacije kao i analize prikupljenih podataka. U okviru procesa fazifikacije određene su funkcije pripadnosti za svaku od usvojenih ulaznih i izlaznih promenljivih. Za svaku funkciju pripadnosti, utvrđen je i dodeljen odgovarajući tip i opseg. Tabele 26 – 29 prikazuju fazifikovane lingvističke vrednosti ulaznih i izlaznih promenljivih za svaki model, dok su na slikama 66 – 69 dati primeri definisanih funkcija pripadnosti u programskom modulu Fuzzy Logic Toolbox, softverskog paketa MATLAB.

Tabela 26. Fazifikacija opsega promenljivih u elementarnom Mamdani modelu (EMM).

Promenljive		Tip funkcije pripadnosti	Opseg vrednosti*	Fazifikacija opsega (lingvistička vrednost promenljive)
Ulazne (nezavisne)	FCU	Trapezna	0,09; 0,10; 0,18; 0,25	nizak
			0,20; 0,23; 0,28; 0,40	srednji
			0,30; 0,40; 0,55; 0,60	visok
	PXR	Trapezna	8; 10; 20; 30	mala
			20; 30; 34; 40	srednja
			34; 40; 50; 55	velika
	FRT	Trapezna	0; 0; 3; 6	mala
			3; 6; 7; 12	srednja
			7; 12; 18; 19	velika
Izlazne (zavisne)	CCU	Trapezna	6; 7; 12; 18	nizak
			12; 18; 21; 25	srednji
			21; 25; 30; 31	visok
	RCU	Troughaona	30; 40; 72; 80	nisko
			72; 80; 88	srednje
			80; 88; 100; 100	visoko
	TCU	Trapezna	0,00; 0,00; 0,02; 0,04	nizak
			0,02; 0,04; 0,07; 0,10	srednji
			0,07; 0,10; 0,15; 0,16	visok

*Kada su u pitanju trapezne, odnosno trougaone funkcije pripadnosti, brojevi označavaju koordinate temena trapeza ili trougla koje se očitavaju na apscisi.



Slika 66. Definisane parametara funkcija pripadnosti u elementarnom Mamdani modelu (EMM): levo – sadržaj bakra u ulaznoj rudi (FCU); desno – sadržaj bakra u jalovini (TCU).

Tabela 27. Fazifikacija opsega promenljivih u elementarnom Sugeno modelu (ESM).

Promenljive		Tip funkcije pripadnosti	Opseg vrednosti	Fazifikacija opsega (lingvistička vrednost promenljive)
Ulazne (nezavisne)	FCU	Trapezna	0,09; 0,10; 0,18; 0,25	nizak
			0,20; 0,23; 0,28; 0,40	srednji
			0,30; 0,40; 0,55; 0,60	visok
	PXR	Trapezna	8; 10; 20; 30	mala
			20; 30; 34; 40	srednja
			34; 40; 50; 55	velika
	FRT	Trapezna	0; 0; 3; 6	mala
			3; 6; 7; 12	srednja
			7; 12; 18; 19	velika
Izlazne (zavisne)	CCU	Konstantna	$z = 11,13$	nizak
			$z = 18,90$	srednji
			$z = 26,46$	visok
	RCU	Konstantna	$z = 57,92$	nisko
			$z = 80,00$	srednje
			$z = 91,98$	visoko
	TCU	Konstantna	$z = 0,0152$	nizak
			$z = 0,0579$	srednji
			$z = 0,0117$	visok

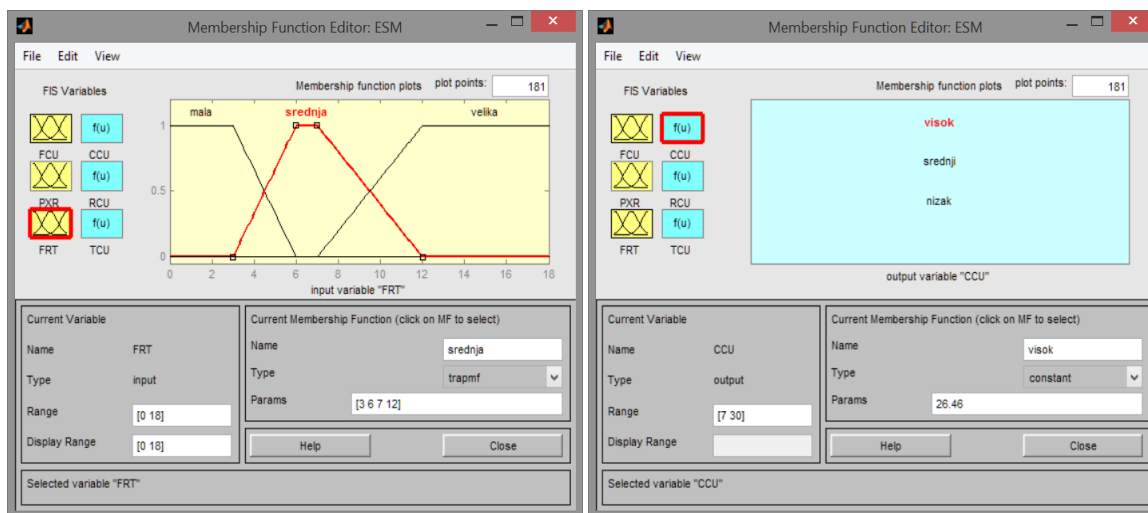
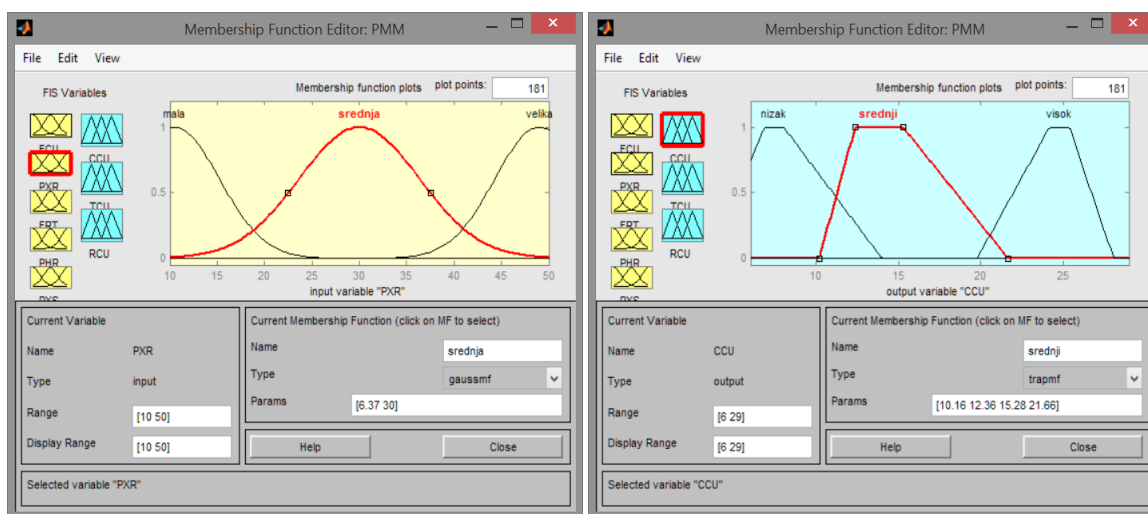
**Slika 67.** Definisanje parametara funkcija pripadnosti u elementarnom Sugeno modelu (ESM): levo – potrošnja penušača (FRT); desno – sadržaj bakra u koncentratu (CCU).

Tabela 28. Fazifikacija opsega promenljivih u proširenom Mamdani modelu (PMM).

Promenljive		Tip funkcije pripadnosti	Opseg vrednosti*	Fazifikacija opsega (lingvistička vrednost promenljive)
Ulazne (nezavisne)	FCU	Gausova	0,04778; 0,112	nizak
			0,07976; 0,3008	srednji
			0,02871; 0,492	visok
	PXR	Gausova	4,743; 10,5	mala
			6,37; 30,0	srednja
			4,678; 49,0	velika
	FRT	Gausova	1,362; 0,325	mala
			1,486; 6,5	srednja
			5,335; 17,4	velika
	PHR	Gausova	0,779; 8,08	niska
			0,598; 9,989	srednja
			1,071; 11,88	visoka
PXS	Gausova	1,225; 2,2	mala	
		0,7887; 6,0	srednja	
		0,3802; 7,9	velika	
Izlazne (zavisne)	CCU	Trapezna	3,439; 6,845; 8,015; 13,98	nizak
			10,16; 12,36; 15,28; 21,66	srednji
			19,78; 24,18; 25,38; 28,08	visok
	TCU	Trapezna	0,0124; 0,0394; 0,0461; 0,0731	nizak
			0,0609; 0,0878; 0,0946; 0,1216	srednji
			0,1227; 0,1497; 0,1565; 0,1834	visok
	RCU	Trapezna	34,32; 43,92; 54,12; 65,73	nisko
			56,05; 71,45; 76,15; 94,35	srednje
			61,90; 82,32; 89,90; 100,0	visoko

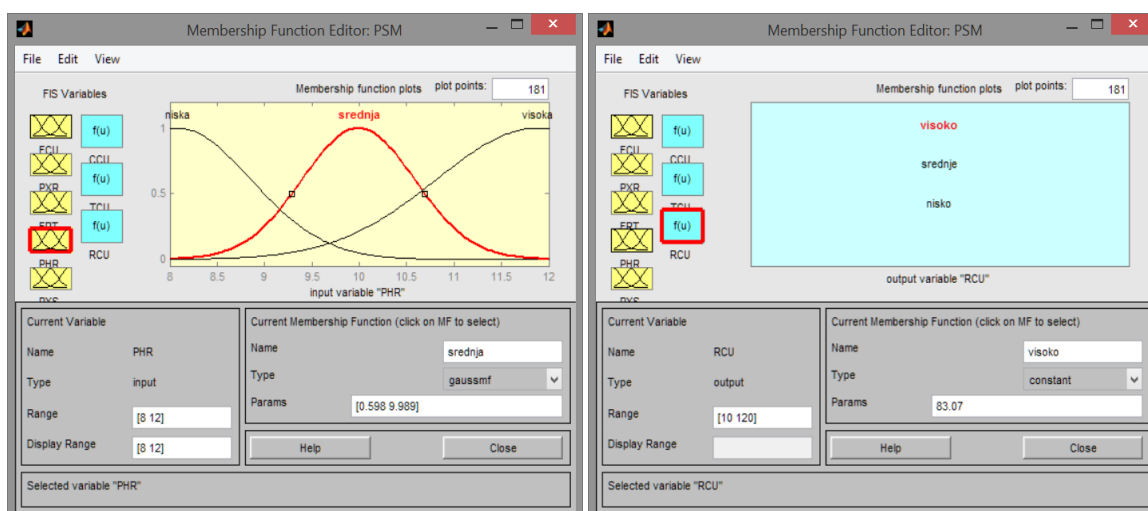
* Kod Gausovih funkcija pripadnosti, prvi broj u svakoj ćeliji predstavlja nagib funkcije, a drugi položaj vrha funkcije.



Slika 68. Definisane parametara funkcija pripadnosti u proširenom Mamdani modelu (PMM): levo – potrošnja kolektora na osnovnom flotiranju (PXR); desno – sadržaj bakra u koncentratu (CCU).

Tabela 29. Fazifikacija opsega promenljivih u proširenom Sugeno modelu (PSM).

Promenljive		Tip funkcije pripadnosti	Opseg vrednosti	Fazifikacija opsega (lingvistička vrednost promenljive)
Ulazne (nezavisne)	FCU	Gausova	0,04778; 0,112	nizak
			0,07976; 0,3008	srednji
			0,02871; 0,492	visok
	PXR	Gausova	4,743; 10,5	mala
			6,37; 30,0	srednja
			4,678; 49,0	velika
	FRT	Gausova	1,362; 0,325	mala
			1,486; 6,5	srednja
			5,335; 17,4	velika
	PHR	Gausova	0,779; 8,08	niska
			0,598; 9,989	srednja
			1,071; 11,88	visoka
PXS	Gausova	1,225; 2,2	mala	
		0,7887; 6,0	srednja	
		0,3802; 7,9	velika	
Izlazne (zavisne)	CCU	Konstantna	$z = 8,8$	nizak
			$z = 15,08$	srednji
			$z = 24,25$	visok
	TCU	Konstantna	$z = 0,0427$	nizak
			$z = 0,0912$	srednji
			$z = 0,153$	visok
	RCU	Konstantna	$z = 49,61$	nisko
			$z = 74,69$	srednje
			$z = 83,07$	visoko



Slika 69. Definisane parametara funkcija pripadnosti u proširenom Sugeno modelu (PSM): levo – pH vrednost na osnovnom flotiranju (PHR); desno – iskorišćenje bakra u koncentratu (RCU).

7.5 FORMIRANJE BAZE PRAVILA U FAZI LOGIČKIM MODELIMA

Sledeći korak u razvoju fazi logičkih modela je formiranje baze pravila. Kao polazna osnova za definisanje fazi pravila, u tabeli 30 prikazana je matrica međuzavisnosti procesnih parametara flotacijske koncentracije. Akcija, odnosno ponašanje zavisno promenljivih veličina u procesu, razmatrana je za slučaj porasta vrednosti nezavisno promenljivih faktora (podrazumeva se u okviru utvrđenog opsega).

Tabela 30. Matrica međuzavisnosti parametara u procesu flotacije.

Nezavisno promenljiva	Akcija*		
	CCU	RCU	TCU
FCU	↑	↓	↑
PXR	↑	↑	↓
FRT	↓	↑	↓
PHR	↑	↓	↑
PXS	↓	↑	↓

* ↑ – raste; ↓ – opada

Kombinacijom lingvističkih vrednosti ulaznih i izlaznih promenljivih (videti tabele 26 – 29) pomoću logičkih operatora konjunkcije (I/AND) ili disjunkcije (ILI/OR) formirana su fazi pravila tipa:

AKO je FCU “nizak” **I** potrošnja PXR “velika” **I** potrošnja FRT “srednja” **I** PHR “srednja” **I** potrošnja PXS “velika” **TADA je** CCU “srednji” **I** TCU “nizak” **I** RCU “visoko”

AKO je FCU “srednji” **I** potrošnja PXR “srednja” **I** potrošnja FRT “velika” **I** PHR “mala” **I** potrošnja PXS “srednja” **TADA je** CCU “srednji” **I** TCU “srednji” **I** RCU “visoko”

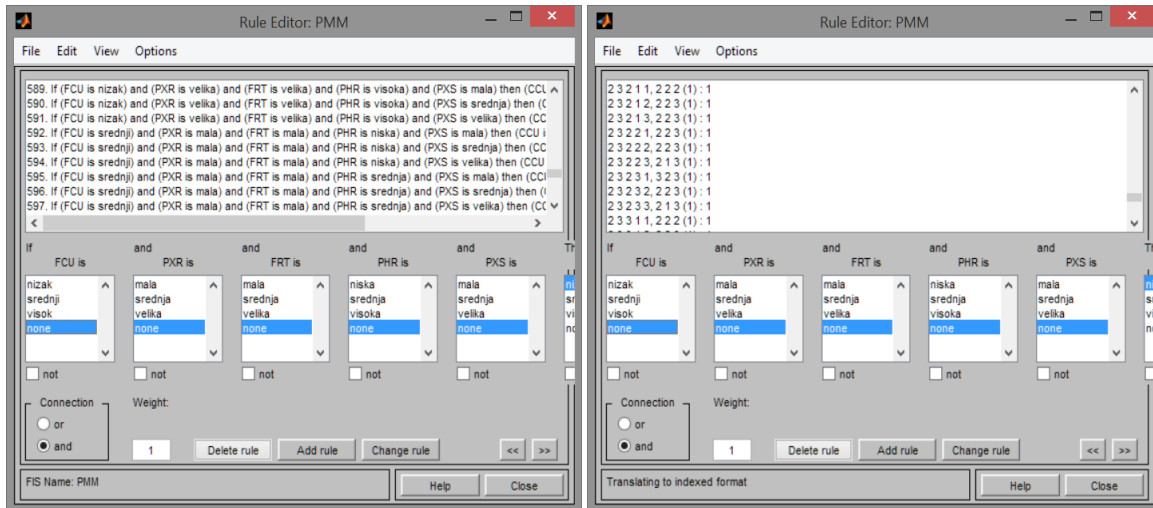
AKO je FCU “veliki” **I** potrošnja PXR “srednja” **I** potrošnja FRT “srednja” **I** PHR “visoka” **I** potrošnja PXS “mala” **TADA je** CCU “visok” **I** TCU “srednji” **I** RCU “srednje”

⋮

itd.

Fazi pravila su formirana na osnovu ekspertskog poznavanja procesa flotacije. Baze pravila su izvorno kreirane u programu Microsoft Excel, u brojnem obliku koji je

pogodan za uvoz u programski jezik MATLAB. Slika 70 prikazuje detalje baze pravila jednog od modela u programskom modulu Fuzzy Logic Toolbox u lingvističkoj i indeksnoj formi.

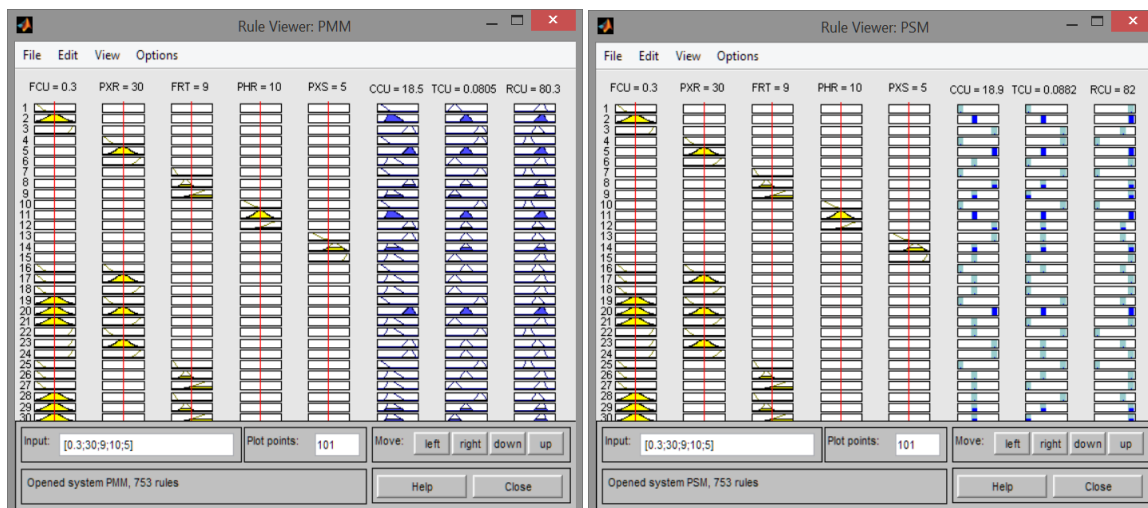


Slika 70. Formiranje baze pravila PMM modela: levo – lingvistički format; desno – indeksni format.

Kao dodatak, na slikama 71 i 72 dati su detalji baza pravila za svaki od četiri fazi logička modela, pri čemu su konstituenti pravila izraženi preko funkcija pripadnosti. Ovakav prikaz baze pravila dozvoljava mogućnost podešavanja vrednosti ulaznih parametara i uvid u rezultujuće vrednosti izlaznih promenljivih.



Slika 71. Prikaz baze pravila – EMM i ESM model.



Slika 72. Prikaz baze pravila – PMM i PSM model.

7.6 POSTUPCI RAZVOJA MODELA PROCESA FLOTACIJSKE KONCENTRACIJE

Za potrebe izrade ove doktorske disertacije, razvoj modela procesa flotacijske koncentracije obuhvatio je više metoda soft kompjutinga: fazi logiku, veštačke neuronske mreže, kao i njihov hibridni sistem – ANFIS. Svi modeli su razvijeni u softverskom paketu MATLAB, korišćenjem različitih programskih modula.

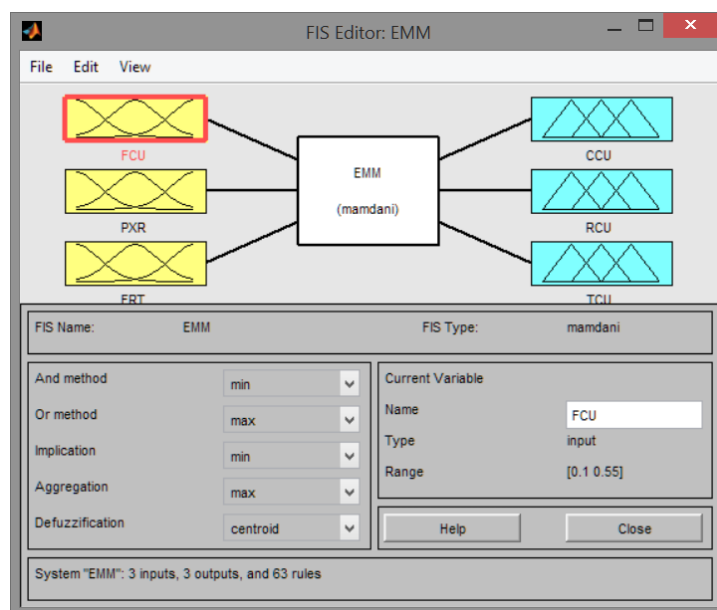
MATLAB je programski jezik i softverski paket za vizuelizaciju podataka koji se naročito koristi u obradi signala i sistemskoj analizi. Ime je dobio od engleskog izraza Matrix Laboratory, pošto kao osnovnu strukturu podataka koristi matricu (niz). Može se primeniti za matematička izračunavanja, modelovanja i simulacije, analizu i obradu podataka, grafičko prikazivanje rezultata, razvoj algoritama i sl.

U narednom tekstu biće dati osnovi procedure razvoja za svaki od modela flotacijske koncentracije u postrojenju „Veliki Krivelj”, kao i deo njihovih elementarnih performansi.

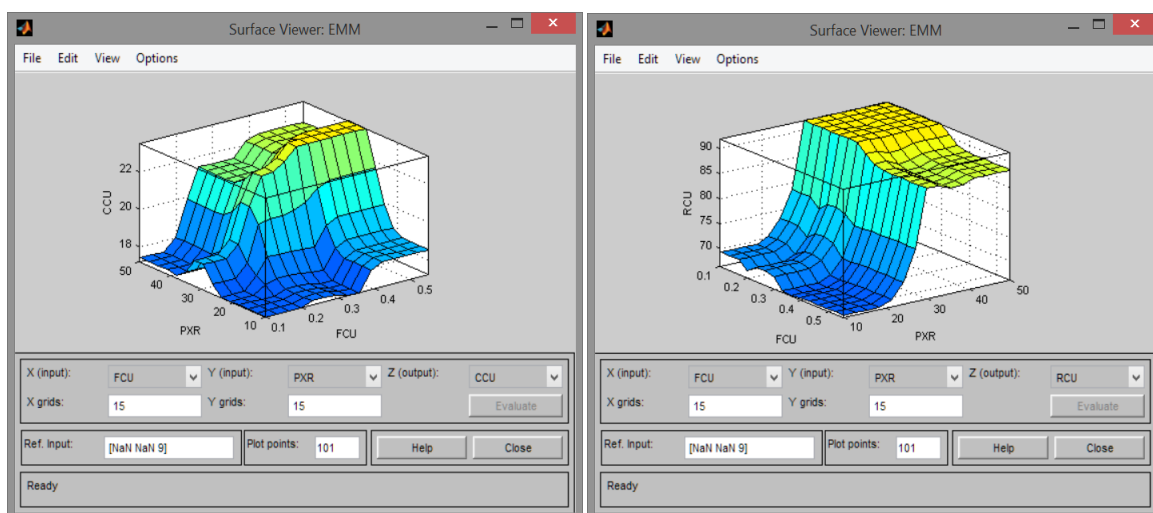
7.6.1 Elementarni fazi logički model zasnovan na Mamdani sistemu zaključivanja (EMM)

Ovaj model (kao i svi drugi fazi logički modeli) razvijen je uz pomoć programskog modula Fuzzy Logic Toolbox koji služi za generisanje fazilogičkih sistema zaključivanja. Model je nazvan elementarnim, jer sadrži svega tri ulazne promenljive i kao posledicu toga, bazu sa relativno malim brojem fazi pravila.

Osnovne metodološke odlike EMM modela su: (1) Mamdani sistem zaključivanja; (2) primena AND (minimum) fazi operatora u svim pravilima; (3) metoda implikacije – minimum; (4) metoda agregacije – maksimum; (5) metoda defazifikacije – centroid; (6) broj pravila – 63. Na slici 73 prikazana je osnovna struktura EMM modela, dok su na slici 74 predstavljene neke od rezultujućih površina koje je dao model.



Slika 73. Osnovna struktura EMM modela.



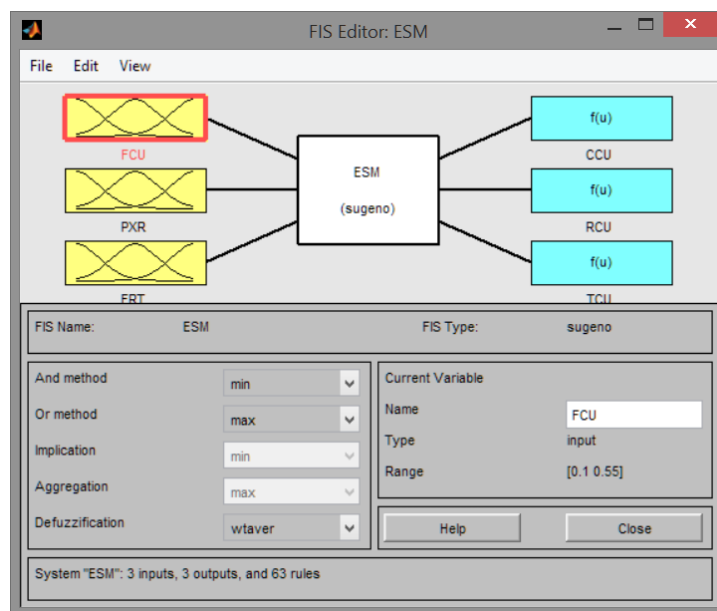
Slika 74. Rezultujuće površine EMM modela: levo – zavisnost kvaliteta koncentrata od sadržaja bakra u ulazu i potrošnje kolektora na osnovnom flotiranju; desno – zavisnost iskorišćenja bakra u koncentratu od sadržaja bakra u ulazu i potrošnje kolektora na osnovnom flotiranju.

Rezultujuće površine na slici 74 prikazuju logičan sled uzročno-posledičnih veza između razmatranih promenljivih. Naime, povećanje doze kolektora najpre dovodi do porasta, a zatim do pada kvaliteta koncentrata, dok iskorišćenje bakra u koncentratu raste.

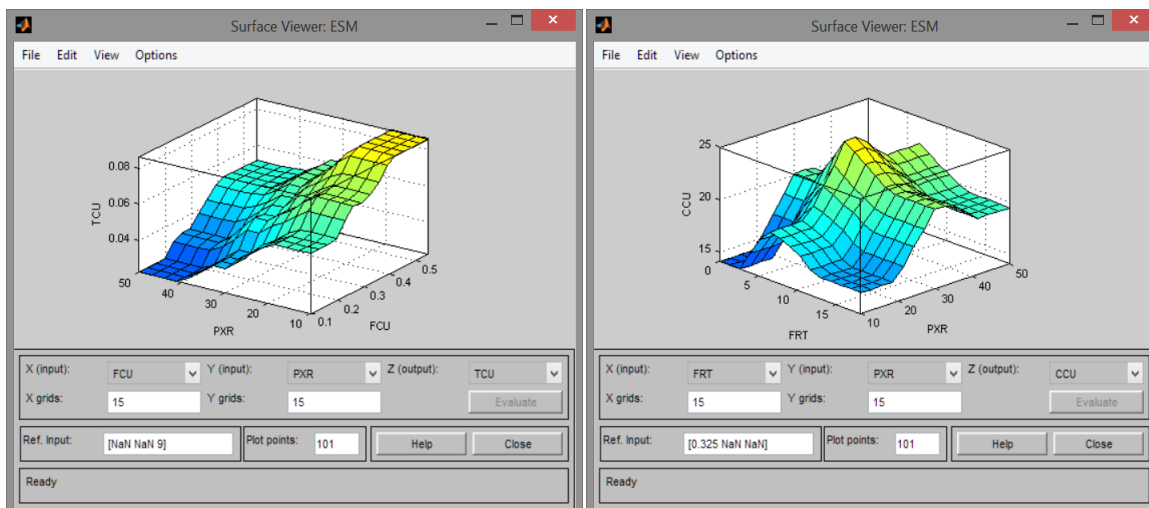
Ovakav oblik rezultujućih površina, koji po svom trendu odgovara i ostalim fazi logičkim modelima, ukazuje na adekvatnost fazi pravila, obzirom da trendovi vrednosti zavisnih promenljivih odgovaraju realnom ponašanju industrijskih flotacijskih sistema.

7.6.2 Elementarni fazi logički model zasnovan na Takagi-Sugeno sistemu zaključivanja (ESM)

Elementarni Takagi-Sugeno model formiran je odgovarajućom transformacijom EMM modela. Njegove osnovne odlike su: (1) Takagi-Sugeno sistem zaključivanja; (2) primena AND (minimum) fazi operatora u svim pravilima; (3) metoda implikacije – proizvod; (4) metoda agregacije – zbir; (5) metoda defazifikacije – težinski prosek; (6) broj pravila – 63. Slike 75 i 76 prikazuju osnovnu strukturu i rezultujuće površine ESM modela, respektivno.



Slika 75. Osnovna struktura ESM modela.



Slika 76. Rezultujuće površine ESM modela: levo – zavisnost kvaliteta jalovine od sadržaja bakra u ulazu i potrošnje kolektora na osnovnom flotiranju; desno – zavisnost kvaliteta koncentrata od potrošnje kolektora na osnovnom flotiranju i potrošnje penušača.

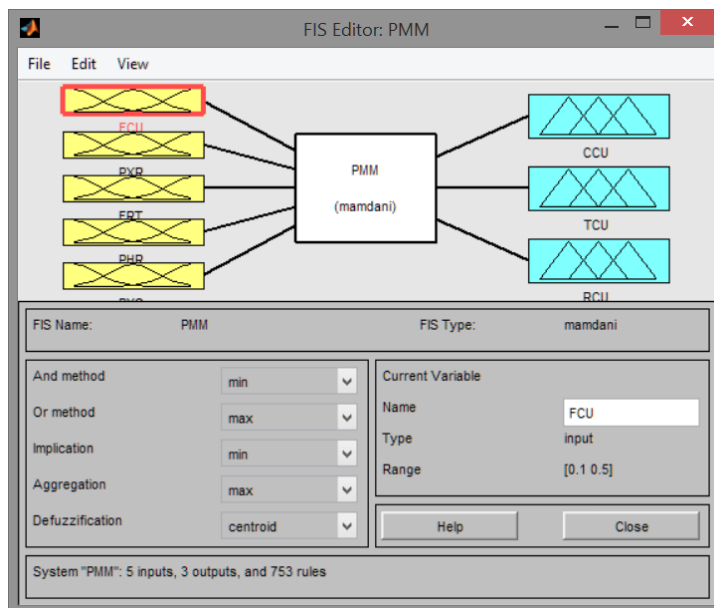
Posmatranjem površina prikazanih na slici 76 može se konstatovati da iste u dobroj meri predstavljaju realni proces. Sadržaj bakra u jalovini raste sa povećanjem sadržaja bakra u ulazu i smanjenjem potrošnje kolektora, dok se na površini desno uočava pik koji odgovara maksimalnom kvalitetu koncentrata. Ovaj pik je spregnut sa optimalnim potrošnjama kolektora i penušača, što se takođe jasno uočava na slici 76.

7.6.3 Prošireni fazi logički model zasnovan na Mamdani sistemu zaključivanja (PMM)

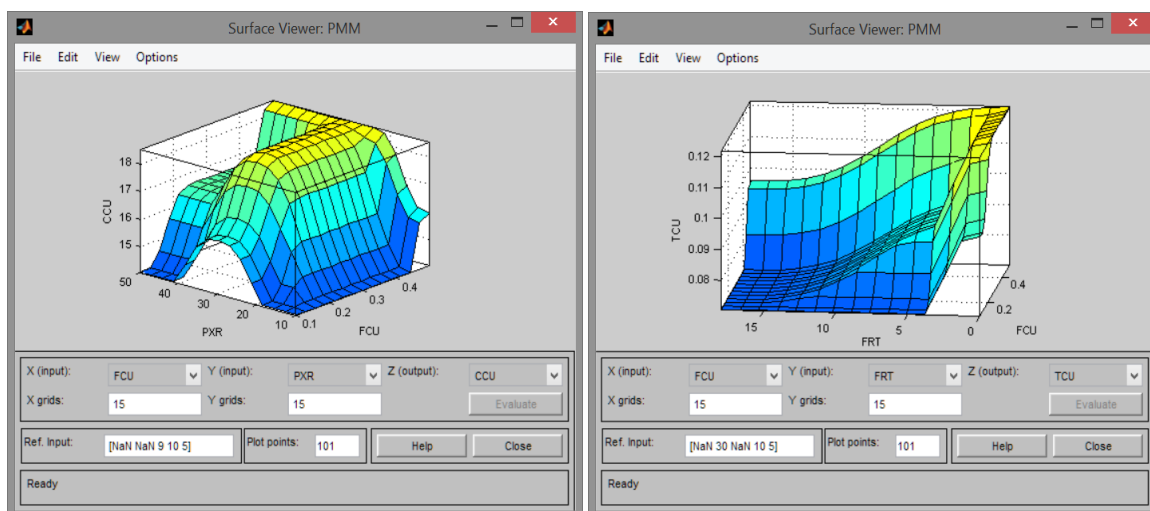
Elementarne odlike PMM modela praktično su iste kao i kod EMM modela (Mamdani sistem zaključivanja; primenjen AND operator u svim pravilima; implikacija metodom minimuma; agregacija metodom maksimuma i defazifikacija metodom centroida), s tim što PMM model, zbog postojanja većeg broja ulaznih promenljivih sadrži i znatno veću bazu od 753 pravila. Njegova osnovna struktura prikazana je na slici 77, a neke od rezultujućih površina na slici 78.

Vizuelnom analizom slike 78, zapaža se da sa povećanjem doze kolektora do određene mere kvalitet koncentrata raste, a zatim opada, što je i svojstveno procesu flotacije. Slično tome, sa porastom sadržaja bakra u ulaznoj rudi raste i kvalitet koncentrata.

Povećanje količine penušača doprinosi smanjenju sadržaja bakra u jalovini (slika 78 desno), što je takođe karakteristično za realan proces flotacije.



Slika 77. Osnovna struktura PMM modela.

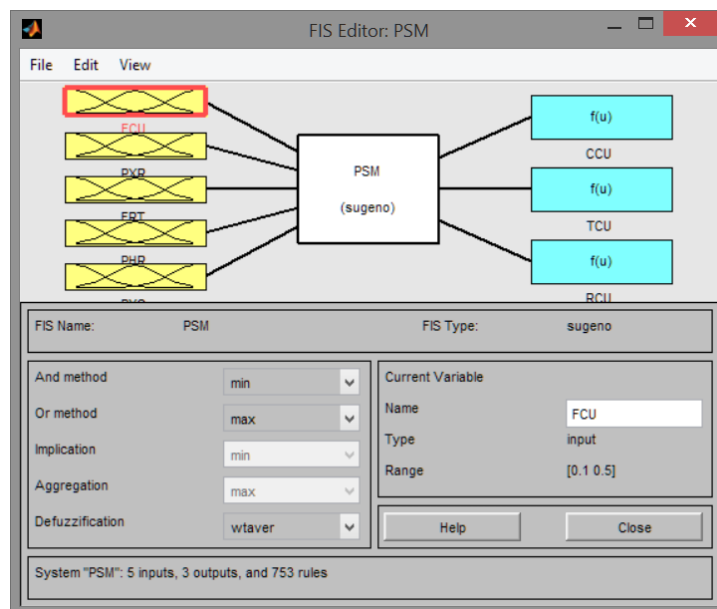


Slika 78. Rezultujuće površine PMM modela: levo – zavisnost kvaliteta koncentrata od sadržaja bakra u ulazu i potrošnje kolektora na osnovnom flotiranju; desno – zavisnost kvaliteta jalovine od sadržaja bakra u ulazu i potrošnje penušača.

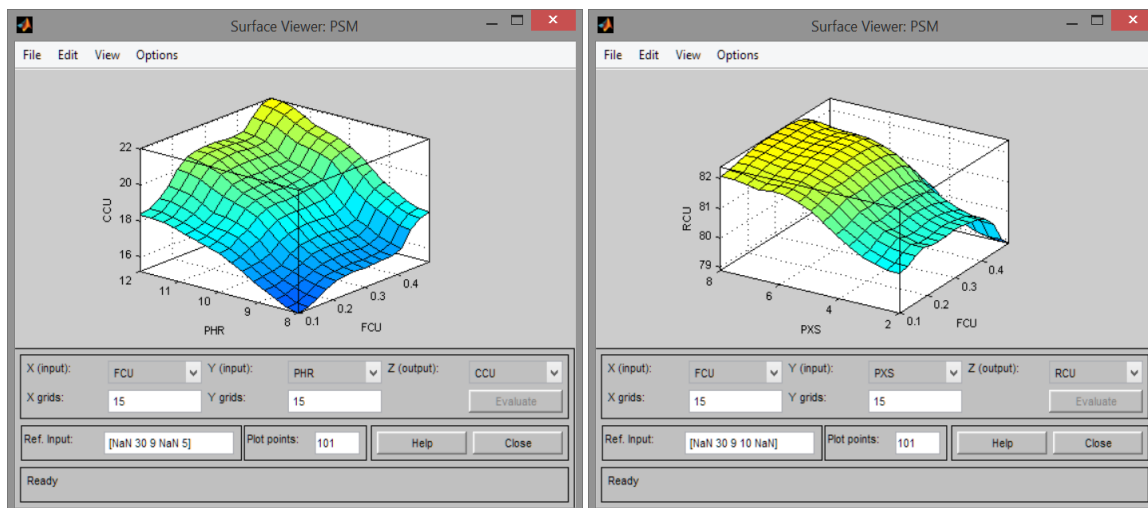
7.6.4 Prošireni fazi logički model zasnovan na Takagi-Sugeno sistemu zaključivanja (PSM)

Ovaj model je formiran primenom odgovarajuće transformacije PMM modela. Njegove osnovne metodološke karakteristike većinom se poklapaju sa karakteristikama elementarnog Sugeno modela (Takagi-Sugeno sistem zaključivanja; primenjen AND operator u svim pravilima; implikacija metodom proizvoda; agregacija metodom zbira i

defazifikacija metodom težinskog proseka) uz povećanu bazu od 753 fazi pravila, jer sadrži pet ulaznih promenljivih veličina. Osnovna struktura i rezultujuće površine PSM modela predstavljene su na slikama 79 i 80.



Slika 79. Osnovna struktura PSM modela.



Slika 80. Rezultujuće površine PSM modela: levo – zavisnost kvaliteta koncentrata od sadržaja bakra u ulazu i pH vrednosti pulpe na osnovnom flotiranju; desno – zavisnost iskorišćenja Cu u koncentratu od sadržaja bakra u ulazu i potrošnje kolektora na dopunskom flotiranju.

Poznato je iz prakse da povećanje pH vrednosti pulpe utiče na povećanje kvaliteta koncentrata bakra, što se uočava i na slici 80. Na prvi pogled, može se nametnuti pitanje regularnosti date površine, s obzirom da se u ovom slučaju razmatra

samo pH vrednost na osnovnom flotiranju. Ipak ne treba zanemariti činjenicu da se pH vrednosti u ostalim stadijumima flotiranja smatraju optimalnim konstantama, te stoga ovakva površina ima opravdanje sa aspekta procesa flotacijske koncentracije u celini.

Glavni razlog dodavanja kolektora na dopunskom flotiranju jeste povećanje iskorišćenja bakra u koncentratu, što se poklapa sa izgledom površine na slici 80 desno.

U industrijskim uslovima, porast sadržaja bakra u ulaznoj rudi do određene mere utiče na rast kvaliteta koncentrata, kao i na opadanje iskorišćenja bakra u koncentratu, što takođe odgovara površinama na slici 80.

7.6.5 Hibridni model za predviđanje sadržaja bakra u koncentratu (ANF1)

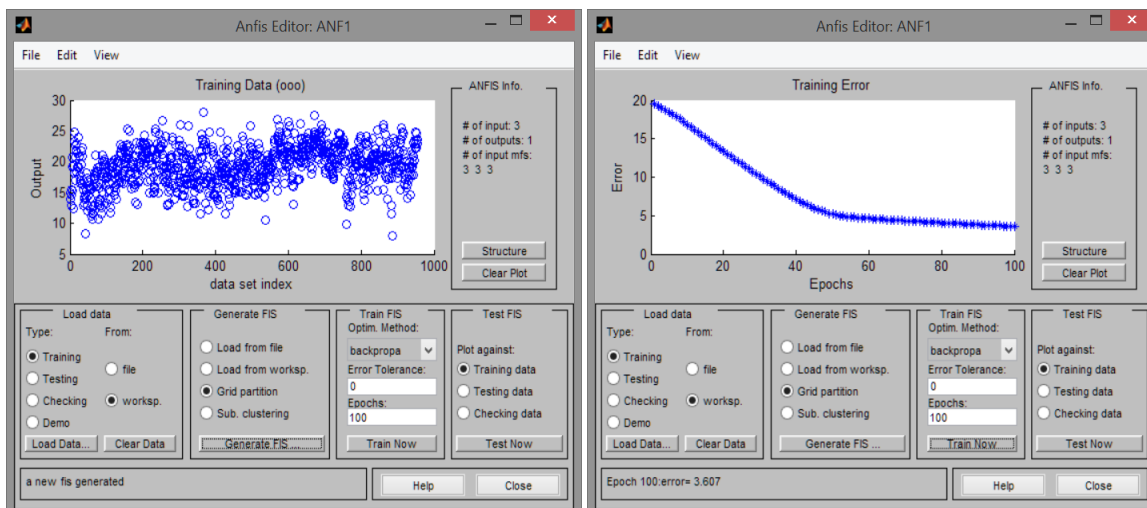
Za razvoj datog hibridnog modela korišćen je grafički korisnički interfejs Anfis Editor u okviru programskog modula Fuzzy Logic Toolbox koji primenjuje metodologiju neuronskih mreža u cilju generisanja, treniranja i testiranja Takagi Sugeno fazi sistema zaključivanja.

Prilikom optimizacije elementarnih uslova modelovanja procesa uzeta su u obzir sledeća dva kriterijuma: da rezultujuće površine modela što bolje odgovaraju realnom procesu i da koren srednje kvadratne greške treniranja bude minimalan. U tom smislu, ekspertskom analizom utvrđeno je da se najbolji rezultati postižu pri sledećim uslovima:

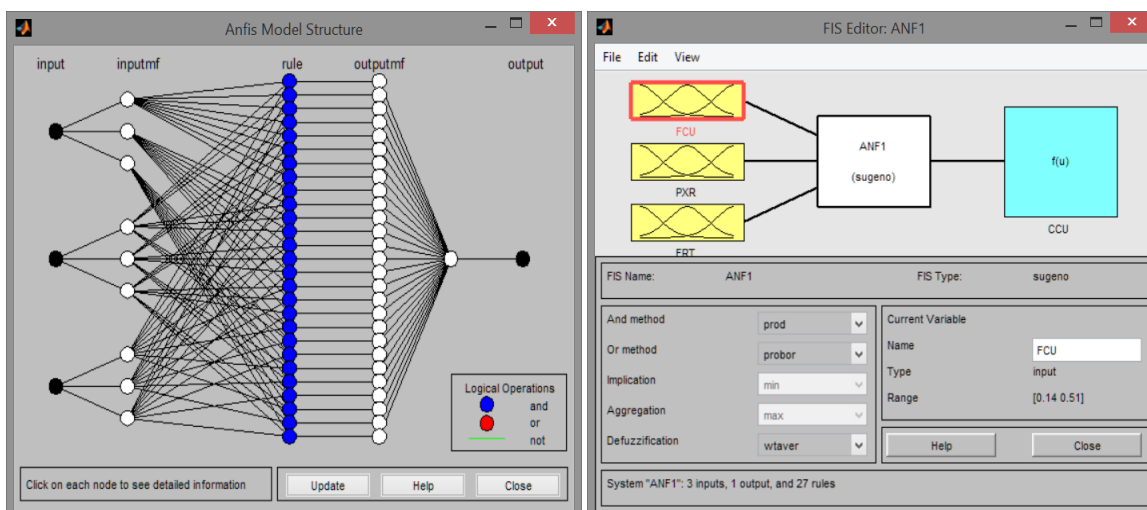
- Gausove funkcije pripadnosti su se pokazale optimalnim za fazifikaciju ulaznih promenljivih, dok su linearne funkcije bolje opisale izlaz od konstantnih.
- Kao algoritam učenja izabran je algoritam povratnog rasprostiranja greške (primenom hibridnog algoritma, u najvećem broju slučajeva dobijene su negativne ili previsoke vrednosti predviđenog sadržaja bakra u koncentratu), a broj iteracija iznosio je 100.

Za treniranje neuronske mreže izabran je svaki drugi niz vrednosti promenljivih FCU, PXR, FRT i CCU (odgovara podacima iz jedne smene) iz baze podataka⁵⁴. Na slici 81 prikazan je unos podataka za trening u Anfis Editor, kao i trend greške treniranja. Slika 82 prikazuje strukturu formirane neuronske mreže i osnovnu strukturu fazi sistema zaključivanja.

⁵⁴ “parni slučajevi”

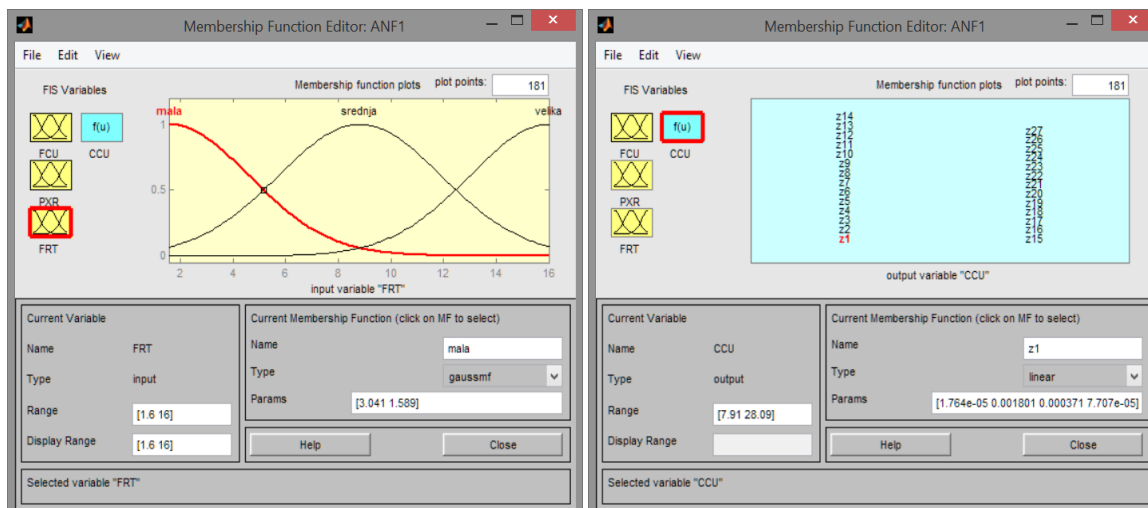


Slika 81. Prikaz podataka za trening i greška treniranja kod ANF1 modela.



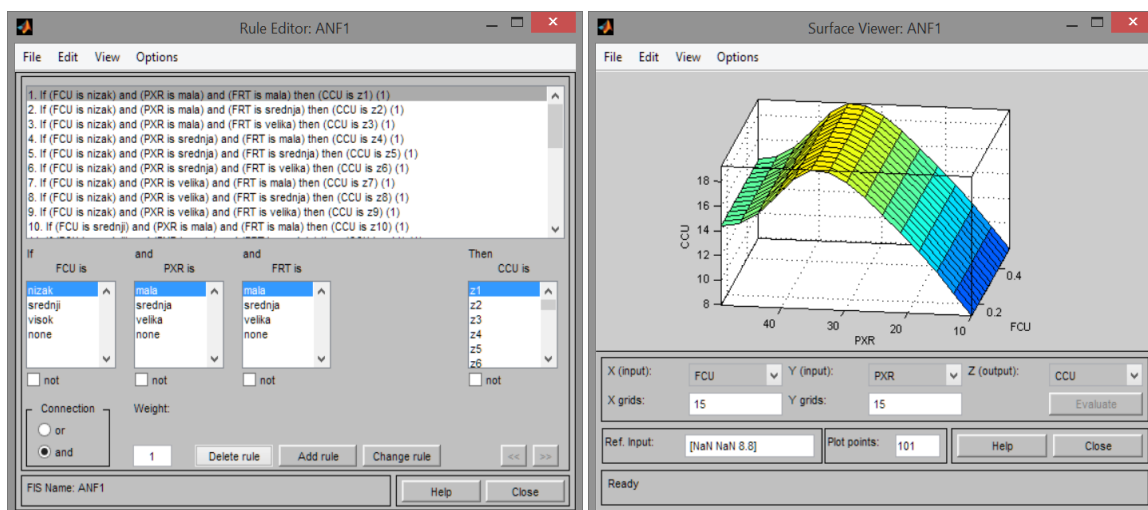
Slika 82. Struktura neuronske mreže i fazi sistema zaključivanja ANF1 modela.

Broj čvorova u prvom skrivenom sloju neuronske mreže odgovara broju funkcija pripadnosti za svaku ulaznu promenljivu (ukupno 9), dok broj čvorova u drugom skrivenom sloju odgovara broju fazi pravila (ukupno 27), pri čemu je u konsekvenci svakog pravila linearna funkcija sa drugačijim koeficijentima. Primer generisanih funkcija pripadnosti dat je na slici 83 levo i odnosi se na promenljivu „potrošnja penušaća (FRT)”, dok je na slici 83 desno, ilustracije radi, prikazan skup izlaznih funkcija sa koeficijentima za linearnu funkciju z_1 .



Slika 83. Primeri funkcija pripadnosti ANF1 modela.

Kao dodatak, slika 84 prikazuje detalj baze pravila i jednu od rezultujućih površina koje je generisao ANFIS. Može se konstatovati da predstavljena površina prilično dobro opisuje zavisnost promene kvaliteta koncentrata od potrošnje kolektora i sadržaja bakra u ulazu u odnosu na realan proces. Naime, sa porastom potrošnje kolektora kvalitet koncentrata raste, a zatim opada, što je i karakteristično za proces flotacijske koncentracije. Ipak, treba naglasiti da je pri malim potrošnjama kolektora kvalitet koncentrata dosta nizak, što ne odgovara realnim uslovima.

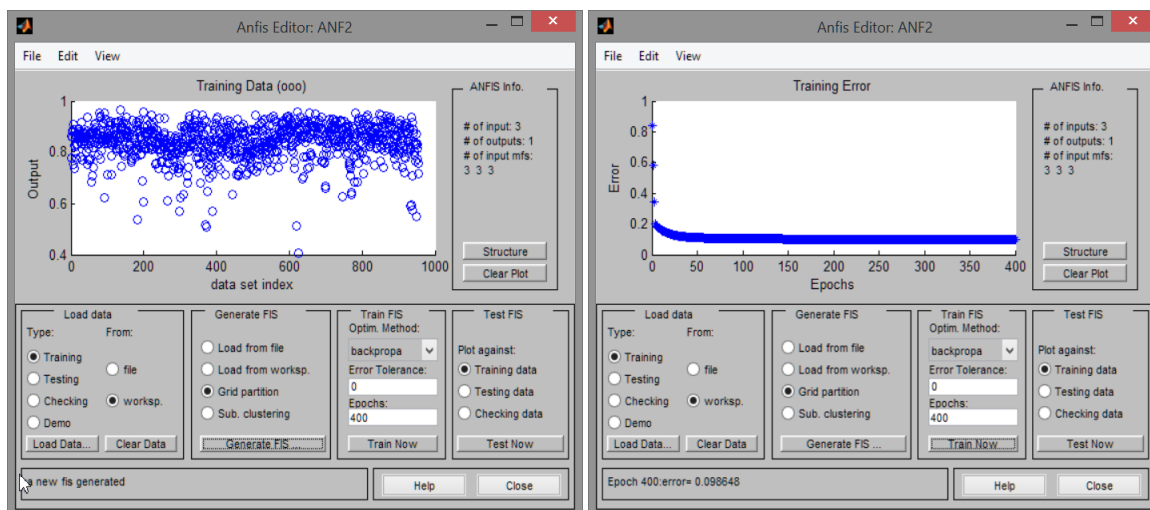


Slika 84. Baza pravila ANF1 modela i dijagram zavisnosti kvaliteta koncentrata od potrošnje kolektora na osnovnom flotiranju i sadržaja bakra u ulazu.

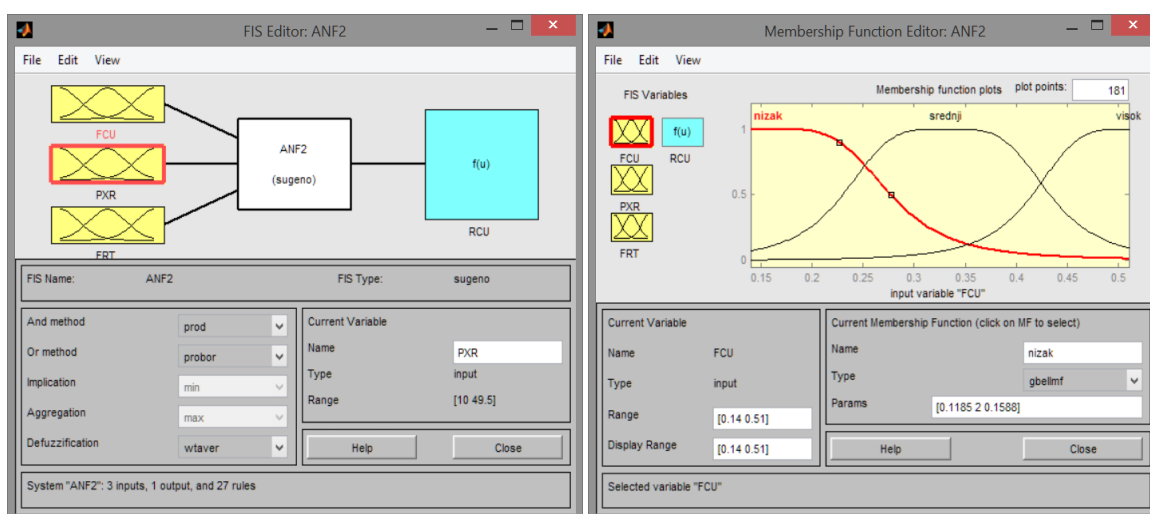
7.6.6 Hibridni model za predviđanje iskorišćenja bakra u koncentratu (ANF2)

Na sličan način kao i u prethodnom primeru, ekspertskom analizom su utvrđeni optimalni uslovi koji daju najbolje rezultate modelovanja – zvonaste funkcije pripadnosti za ulazne promenljive (npr. primenom drugih oblika funkcija pripadnosti dobijena su iskorišćenja veća od 100%); linearne izlazne funkcije; algoritam povratnog rasprostiranja greške za učenje; broj iteracija 400.

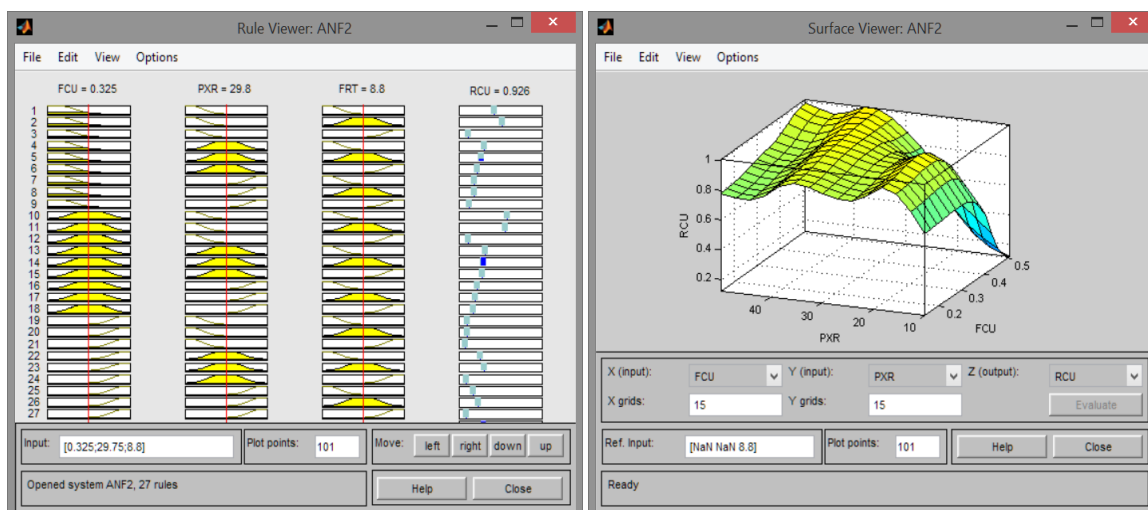
Podaci za trening neuronske mreže odabrani su po istom principu kao i u modelu ANF1, tako da neuronska mreža ima identičnu strukturu kao na slici 82. Jedino treba napomenuti da je iskorišćenje bakra u koncentratu izraženo u delovima jedinice. Slike 85 – 87 prikazuju neke od važnih koraka u procesu razvoja ANF2 modela.



Slika 85. Prikaz podataka za trening i greška treniranja kod ANF2 modela.



Slika 86. Struktura fazi sistema zaključivanja ANF2 modela i funkcije pripadnosti za FCU promenljivu.

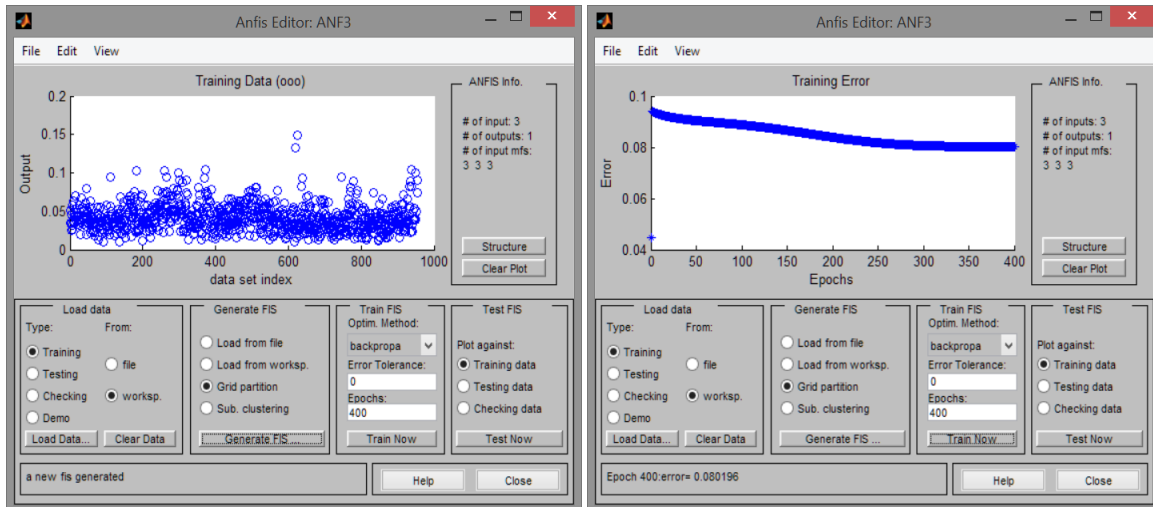


Slika 87. Baza pravila ANF2 modela i dijagram zavisnosti iskorišćenja bakra u koncentratu od potrošnje kolektora na osnovnom flotiranju i sadržaja bakra u ulazu.

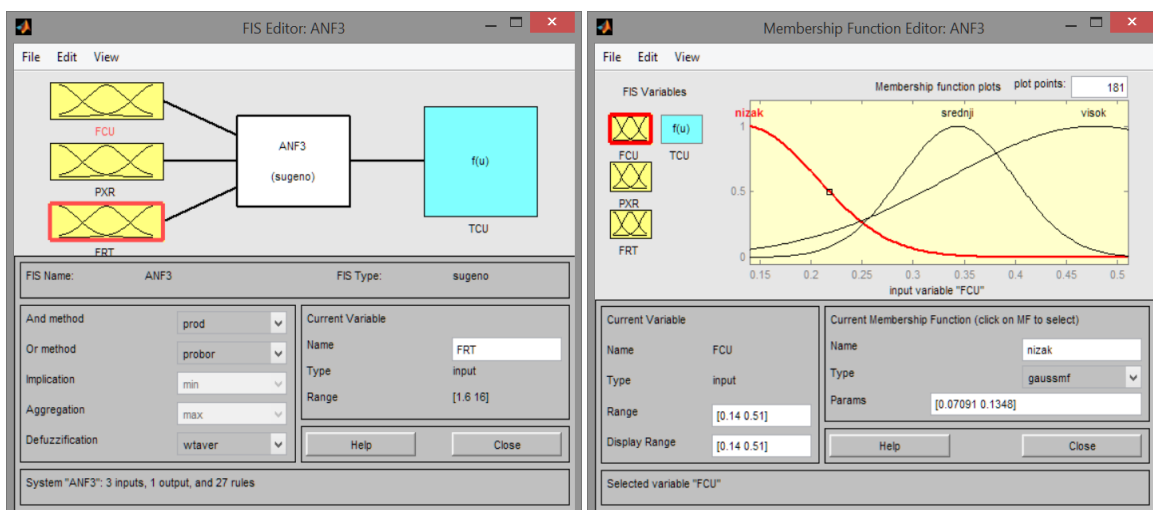
Iako su se pomenuti uslovi primenjeni pri formiranju ANF2 modela pokazali najboljim u datom slučaju predviđanja iskorišćenja bakra u koncentratu, za površinu prikazanu na slici 87 ne može se reći da u potpunosti dobro opisuje realnu procesnu zavisnost između promenljivih.

7.6.7 Hibridni model za predviđanje sadržaja bakra u jalovini (ANF3)

Analogno modelima ANF1 i ANF2, određeni su optimalni uslovi modelovanja (Gausove funkcije pripadnosti za ulazne promenljive; linearne izlazne funkcije; metoda povratnog rasprostiranja greške kao algoritam učenja i broj iteracija 400) za model ANF3. Odabir podataka za trening takođe je izvršen na isti način kao i kod drugih hibridnih modela. Na slikama 88 – 90 dati su neki od značajnih segmenata razvoja modela ANF3.

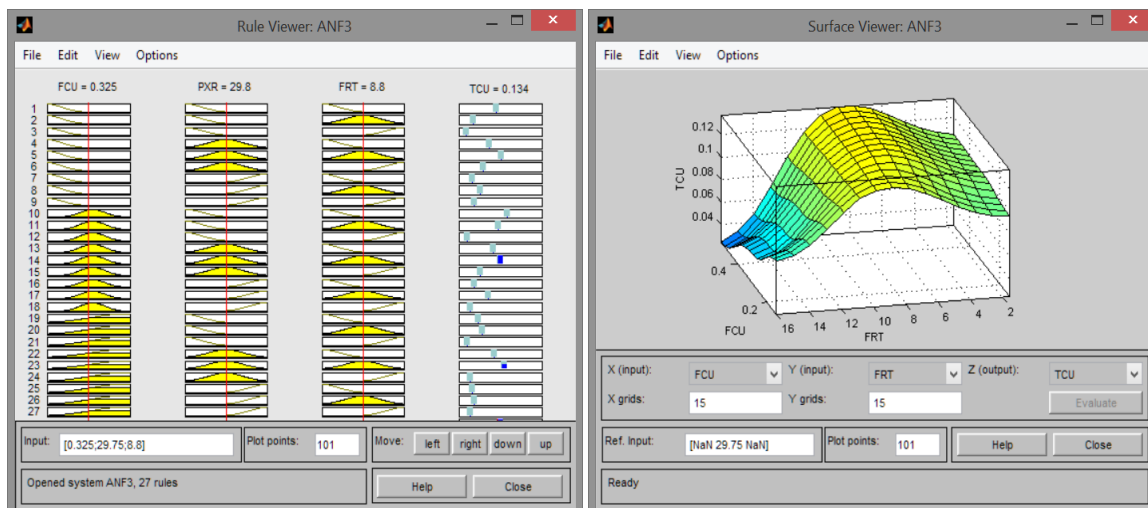


Slika 88. Prikaz podataka za trening i greška treniranja kod ANF3 modela.



Slika 89. Struktura fazi sistema zaključivanja ANF3 modela i funkcije pripadnosti za FCU promenljivu.

Sa slike 90 se vidi da prikazana rezultujuća površina ne opisuje na najbolji način realne zavisnosti u procesu flotacije. U posmatranom opsegu vrednosti, sa povećanjem količine penušača, trebalo bi da dođe do smanjenja sadržaja bakra u jalovini. U datom slučaju, sadržaj bakra u jalovini najpre raste do određene granice, a zatim opada.



Slika 90. Baza pravila ANF3 modela i dijagram zavisnosti sadržaja bakra u jalovini od potrošnje penušača i sadržaja bakra u ulazu.

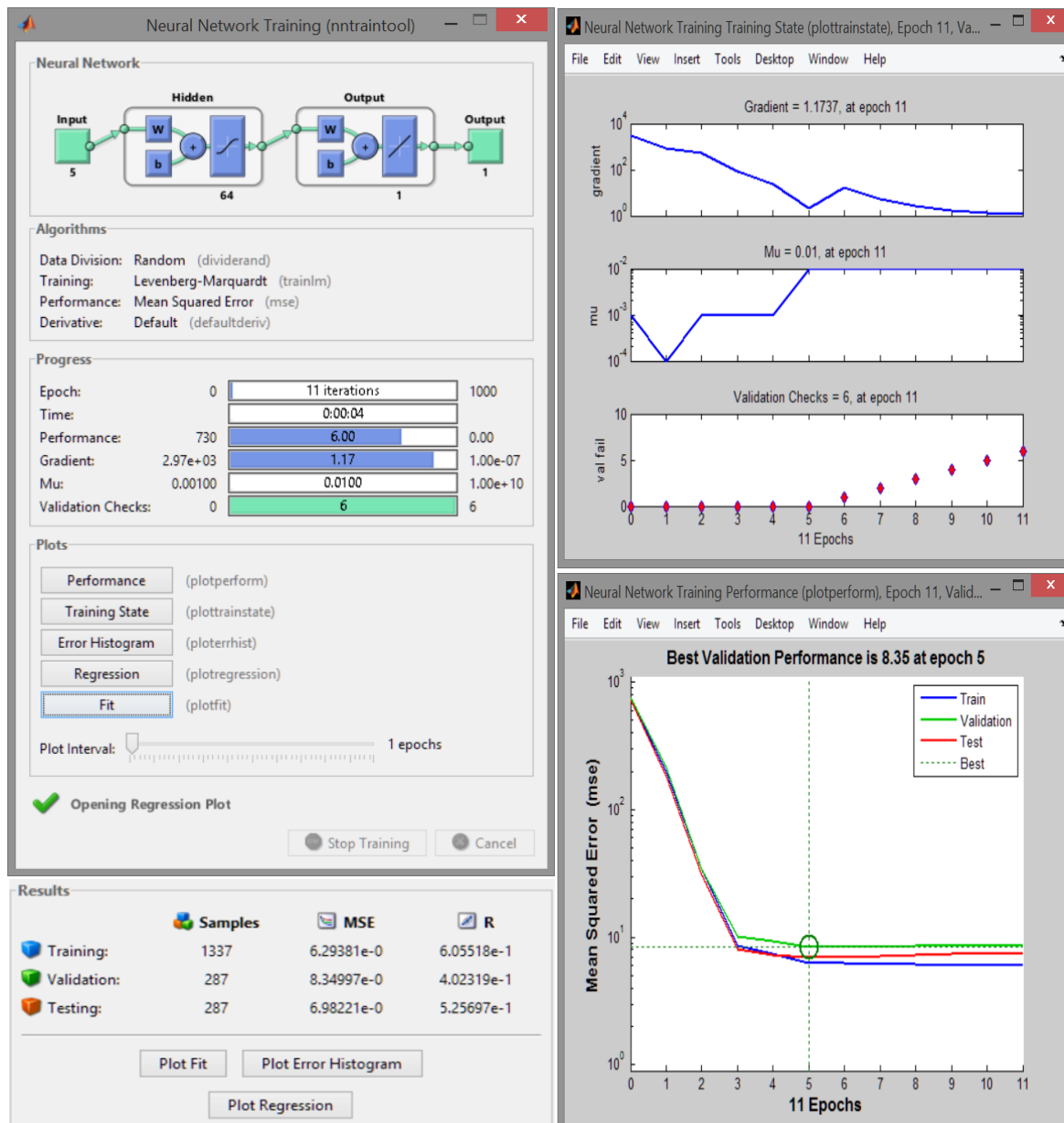
7.6.8 Model na bazi neuronske mreže za predviđanje sadržaja bakra u koncentratu (VNM1)

Radi poređenja dobijenih rezultata modelovanja, kreirana su i tri modela zasnovana na principu veštačkih neuronskih mreža. Model na bazi neuronske mreže VNM1 razvijen je upotrebom programskog modula Neural Network Fitting Tool, softverskog paketa MATLAB. Ovaj programski modul koristi se za formiranje i trening neuronske mreže, kao i evaluaciju njenih performansi posredstvom srednje kvadratne greške i regresione analize.

U cilju formiranja VNM1 modela izvršeno je treniranje višeslojnih perceptrona sa različitim brojem neurona u skrivenom sloju (od 10 do 100). Za potrebe treniranja mreže, kao slučajni uzorak odabrano je 1337 podataka (70% od ukupnog uzorka⁵⁵), a za potrebe validacije i testiranja je slučajnim izborom uzeto po 15% od ukupnog uzorka (po 287 podataka). Kao algoritam učenja, izabran je Levenberg-Marquardt algoritam.

Arhitektura neuronske mreže koja je dala najmanju srednju kvadratnu grešku testiranja je u ovom slučaju odabrana kao najpovoljnija, a neke od performansi razvoja date mreže prikazane su na slici 91.

⁵⁵ Pri razvoju sva tri modela, bazirana na ANN metodologiji, izvršeno je treniranje mreža i pri različitom procentualnom učešću podataka za trening – 50%, 60% i 70%. Međutim, značajne razlike u rezultatima nisu uočene.

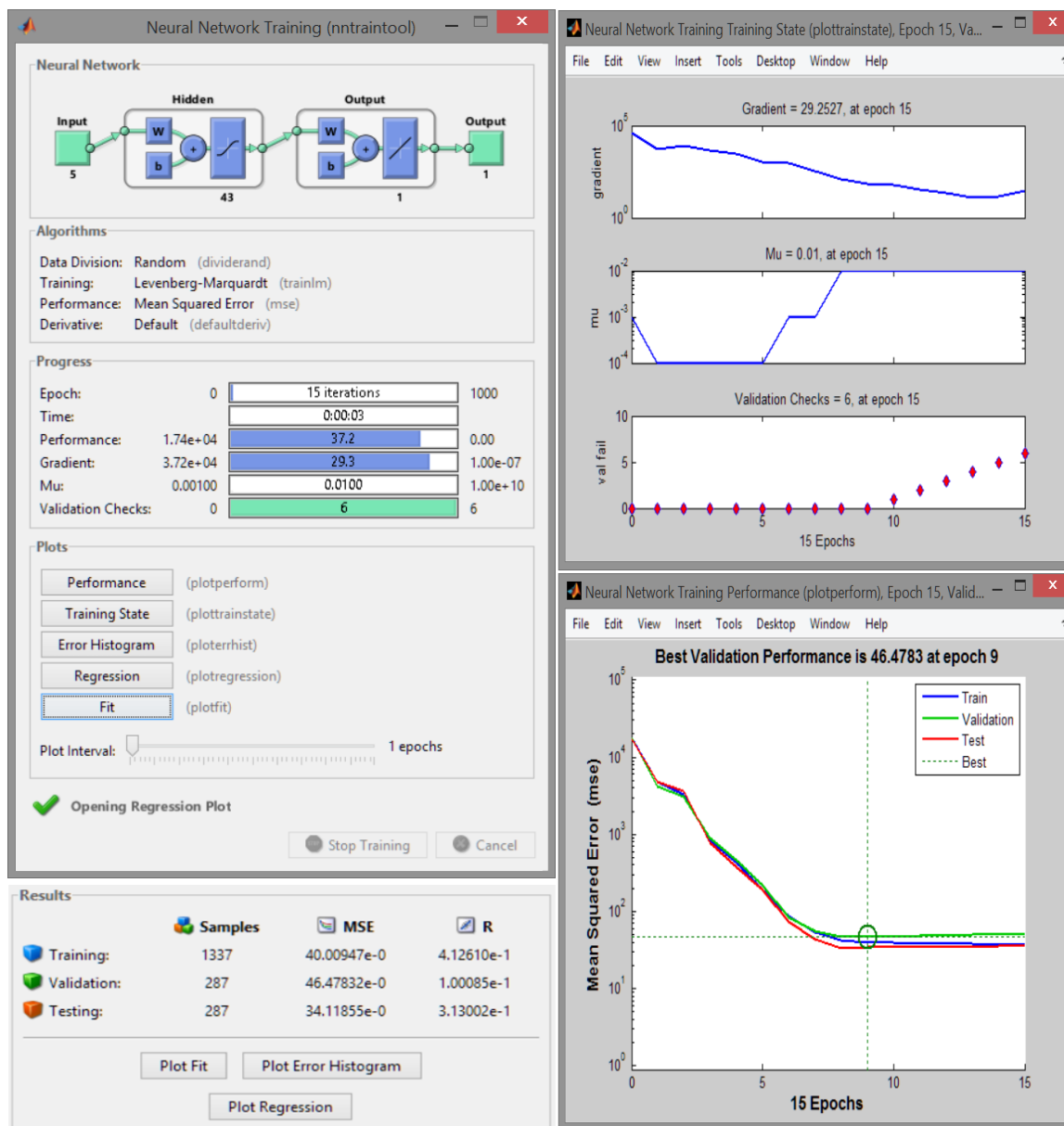


Slika 91. Elementi razvoja VNMI modela.

7.6.9 Model na bazi neuronske mreže za predviđanje iskorišćenja bakra u koncentratu (VNM2)

Analogno prethodnom primeru, model VNM2 formiran je pod istim uslovima. Promena broja neurona u skrivenom sloju varirala je od 10 do 100; broj podataka za trening iznosio je 1337, a broj podataka za validaciju i testiranje po 287. Levenberg-Marquardt algoritam je korišćen za potrebe učenja mreže. Minimalna srednja kvadratna

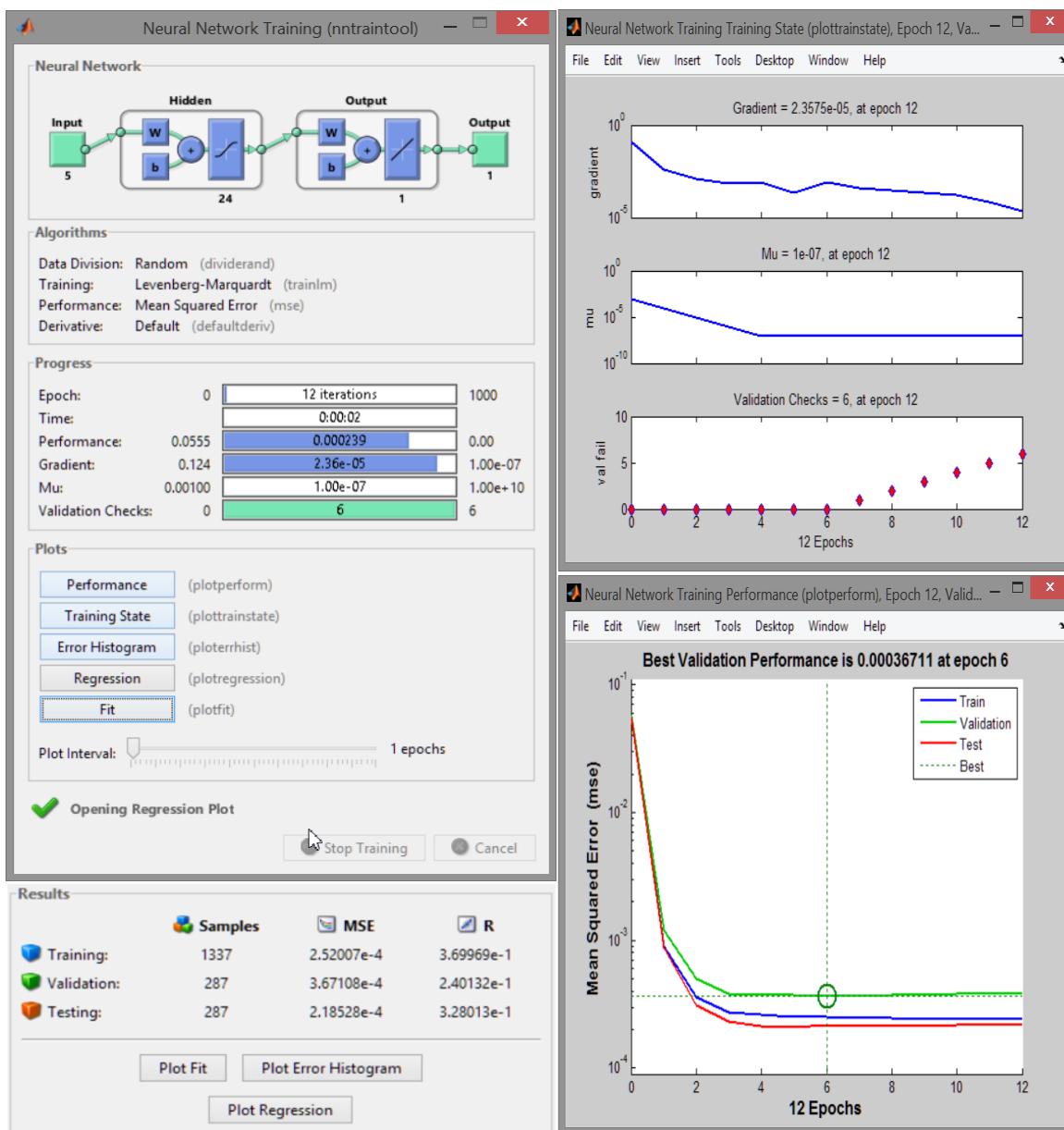
greška testiranja je i u ovom slučaju poslužila kao kriterijum odabira najpovoljnije arhitekture neuronske mreže. Elementi razvoja ovog modela predstavljeni su na slici 92.



Slika 92. Elementi razvoja VNM2 modela.

7.6.10 Model na bazi neuronske mreže za predviđanje sadržaja bakra u jalovini (VNM3)

ANN model koji nosi oznaku VNM3 kreiran je takođe pod istim uslovima kao i modeli VNM1 i VNM2, a slika 93 prikazuje karakteristične segmente razvoja odgovarajuće veštačke neuronske mreže.



Slika 93. Elementi razvoja VNM3 modela.

8.0 REZULTATI MODELOVANJA I DISKUSIJA

8.1 PREGLED REZULTATA I ESTIMACIJA PREDIKTIVNIH SVOJSTAVA MODELA

Evaluacija formiranih modela izvršena je u softverskom paketu MATLAB, unošenjem realnih vrednosti ulaznih procesnih promenljivih iz industrijskog flotacijskog postrojenja „Veliki Krivelj” i generisanjem odgovarajućih izlaza koje predviđaju modeli. Evaluacija modela je izvršena formiranjem matrice tri nezavisne promenljive (za modele EMM, ESM, ANF1–3) ili pet nezavisnih promenljivih (za modele PMM i PSM) i generisanjem matrice tri izlazne promenljive⁵⁶, upotrebom modula Fuzzy Logic Toolbox.

Sa ciljem utvrđivanja mogućnosti svakog od modela da na osnovu zadatih ulaznih parametara pouzdano predvidi tehnološke pokazatelje procesa flotacije izvršena je regresiona analiza u programu Microsoft Excel. U okviru regresione analize razmatrana je korelacija između realnih procesnih vrednosti iskorišćenja i sadržaja bakra u koncentratu i jalovini i vrednosti dobijenih prema modelima⁵⁷. Validacija modela izvedena je na svih 1911 raspoloživih podataka iz postrojenja „Veliki Krivelj”.

U tabelama 31–48 prikazani su rezultati regresione analize za svaki od formiranih modela, dok slike 94–98, kao i slika 102 prikazuju njihove greške predviđanja tehnoloških parametara. Greška predviđanja (ε), koja je poslužila kao jedan od kriterijuma za procenu prediktivnih svojstava modela, računata je prema formuli:

$$\varepsilon = y_{pr} - y_{st} \quad (17)$$

Gde je:

y_{pr} – predviđena vrednost tehnološkog pokazatelja

y_{st} – stvarna vrednost tehnološkog pokazatelja

⁵⁶ Kada su u pitanju modeli ANF1–3 generisana je po jedna kolona matrice za svaku izlaznu promenljivu.

⁵⁷ Treba napomenuti da je prilikom regresione analize izabrana opcija da konstanta u linearnoj regresionoj jednačini $y=ax+b$, bude jednak nuli (tj. $b=0$). Drugim rečima, pošlo se od isključivo teorijske pretpostavke da ukoliko bi stvarne vrednosti tehnoloških pokazatelja bile jednake nuli, u tom slučaju bi i vrednosti predviđene modelima bile jednake nuli. Ova konstatacija je usvojena iz praktičnih razloga, u cilju ublažavanja nelogičnih oscilacija, ekstremnih odstupanja i rasipanja vrednosti u stvarnim rezultatima, izazvanih nesavršenostima u merenju, greškama ljudskog faktora i slično, a koje mogu značajno uticati na rezultate validacije modela.

(1) Elementarni fazi logički model zasnovan na Mamdani sistemu zaključivanja

Tabela 31. Statistička povezanost stvarnih i predviđenih vrednosti pomoću EMM modela.

Statistički parametri	Tehnološki pokazatelj procesa flotacije		
	Sadržaj bakra u koncentratu	Iskorišćenje bakra u koncentratu	Sadržaj bakra u jalovini
Koeficijent korelacije R	0,98136	0,98943	0,89995
Koeficijent determinacije R ²	0,96307	0,97896	0,80992
Prilagođeni R ²	0,96254	0,97844	0,80939
Standardna greška (RMSE)	3,87144	11,69683	0,03050
Broj opservacija	1910	1910	1910

Tabela 32. Analiza varijanse (ANOVA) EMM modela.

		<i>df</i> *	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>SF</i>
CCU	Regresija	1	746112,06	746112,06	49780,47	0
	Ostatak	1909	28612,19	14,99		
	Ukupno	1910	774724,25			
RCU	Regresija	1	12154362,87	12154362,87	88837,38	0
	Ostatak	1909	261181,47	136,82		
	Ukupno	1910	12415543,34			
TCU	Regresija	1	7,5646	7,5646	8133,92	0
	Ostatak	1909	1,7754	0,00093		
	Ukupno	1910	9,3400			

* Značenje simbola u tabeli 32: *df* – broj stepeni slobode; *SS* – suma kvadrata odstupanja; *MS* – srednja kvadratna greška (*SS/df*); *F* – vrednost F-testa; *SF* (Significance F) – p-vrednost (statistička značajnost) F-testa

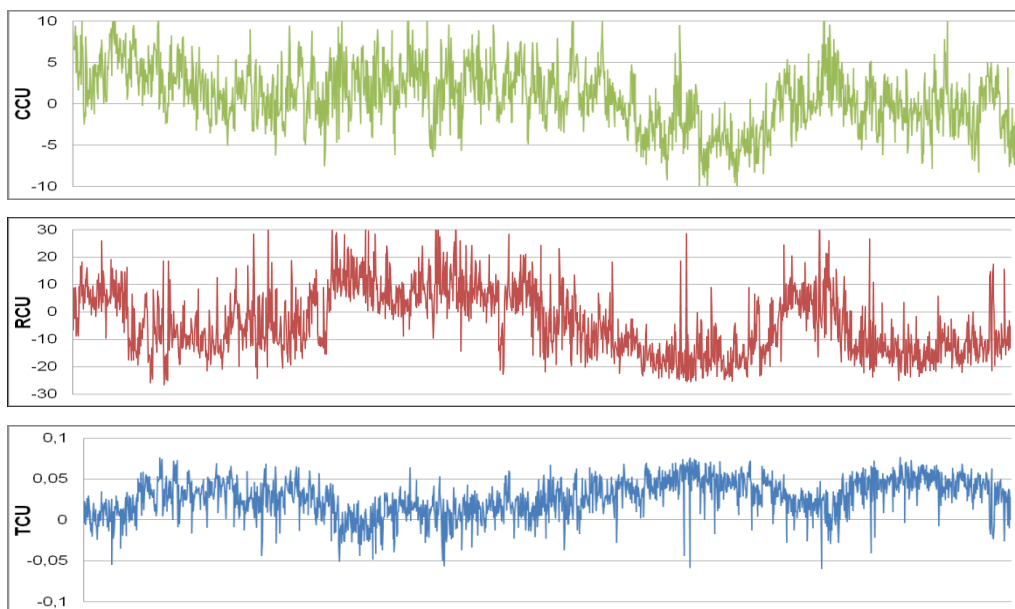
Tabela 33. Statistička analiza regresionih linearnih jednačina EMM modela.

	<i>C</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>L95</i>	<i>U95</i>
CCU	1,01362	0,00454	223,12	0	1,00471	1,02253
RCU	0,94393	0,00317	298,06	0	0,93772	0,95014
TCU	1,41712	0,01571	90,19	0	1,38631	1,44794

*Značenje simbola u tabeli 33: *C* – vrednost koeficijenta; *SE* – standardna greška koeficijenta; *t* – vrednost t-testa za koeficijente (*C/SE*); *p* – p-vrednost (statistička značajnost) t-testa; *L95* (Lower 95%) – donja granica intervala poverenja; *U95* (Upper 95%) – gornja granica intervala poverenja

Razmatranjem rezultata regresione analize prikazanih u tabeli 31 može se ustanoviti da su vrednosti koeficijenta korelacije visoke, posebno kada su u pitanju predviđanja EMM modela u pogledu sadržaja i iskorišćenja bakra u koncentratu. To znači da je ustanovljena jaka veza između stvarnih i predviđenih vrednosti tehnoloških pokazatelja. Drugačije rečeno, formirani model dobro prati promene realnih vrednosti

posmatranih parametara koje se odnose na njihov porast ili pad tokom vremena. Ipak, kada se u obzir uzme greška predviđanja (slika 94) primećuje se da pored neznatnih, postoje i relativno velika odstupanja od stvarnih rezultata.



Slika 94. Greške predviđanja tehnoloških parametara prema EMM modelu.

Posmatranjem trenda greške predviđanja kvaliteta koncentrata može se konstatovati da greška uglavnom „oscilira” oko vrednosti nula, što je i očekivano. Jedino veće odstupanje od ovog trenda uočava se na desnoj polovini dijagrama koja, prema proceni, odgovara početku poslednje trećine posmatranog vremenskog perioda rada postrojenja. U tom periodu greške predviđanja su uglavnom negativne, što može ukazati na promene u režimu rada postrojenja. Ove promene mogu biti izazvane različitim faktorima, koji nisu uzeti u obzir prilikom modelovanja, kao što je recimo, izmena finoće mlevenja i/ili domeljavanja usled nailaženja mekših ili tvrdih partija rude, promena u kvalitetu samih reagenasa i sl.

Dalje, posmatranjem trenda greške iskorišćenja, uočeno je da pozitivnu grešku u predviđanju iskorišćenja (predviđene vrednosti su veće od stvarnih) prilično dobro prati negativna greška u predviđanju kvaliteta jalovine. Takođe važi i obrnuto – negativnu grešku predviđanja iskorišćenja prati pozitivna greška u predviđanju kvaliteta jalovine. S obzirom da su iskorišćenje bakra u koncentratu i sadržaj bakra u jalovini u direktnoj

sprezi, ovo ukazuje na dobru generalnu postavku modela, kao i na potencijalni uticaj procesnih faktora koji su prilikom modelovanja smatrani konstantnim.

(2) *Elementarni fazi logički model zasnovan na Takagi-Sugeno sistemu zaključivanja*

Tabela 34. Statistička povezanost stvarnih i predviđenih vrednosti pomoću ESM modela.

Statistički parametri	Tehnološki pokazatelj procesa flotacije		
	Sadržaj bakra u koncentratu	Iskorišćenje bakra u koncentratu	Sadržaj bakra u jalovini
Koeficijent korelacije R	0,98219	0,99537	0,90220
Koeficijent determinacije R ²	0,96470	0,99077	0,81396
Prilagođeni R ²	0,96417	0,99025	0,81344
Standardna greška (RMSE)	3,98479	8,14911	0,02582
Broj opservacija	1910	1910	1910

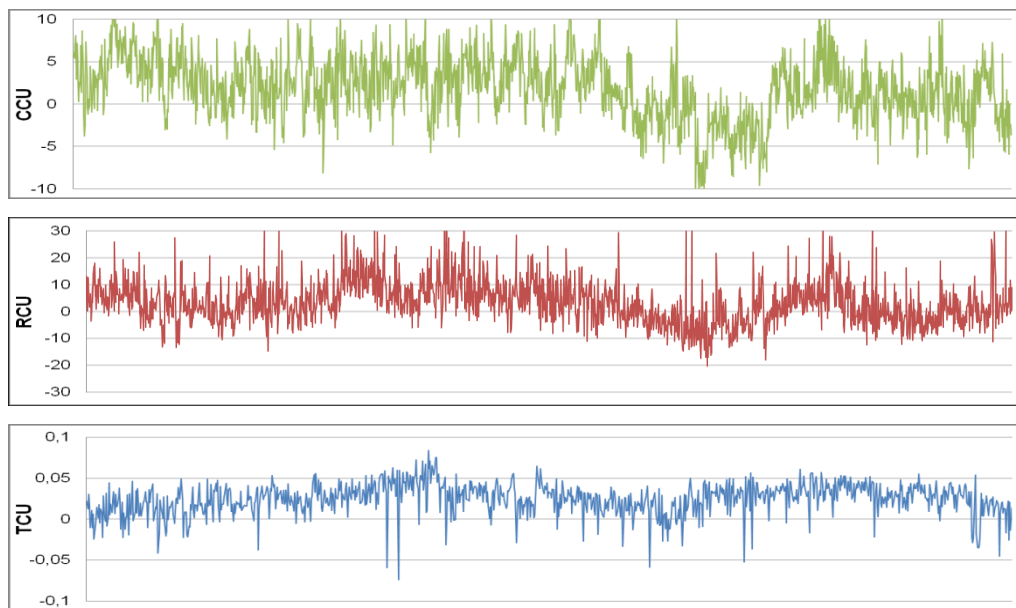
Tabela 35. Analiza varijanse (ANOVA) ESM modela.

		df*	SS	MS	F	SF
CCU	Regresija	1	828299,59	828299,59	52164,59	0
	Ostatak	1909	30312,20	15,88		
	Ukupno	1910	858611,79			
RCU	Regresija	1	14525951,50	14525951,50	204933,29	0
	Ostatak	1909	135312,52	70,88		
	Ukupno	1910	14661263,02			
TCU	Regresija	1	5,5683	5,5683	8352,21	0
	Ostatak	1909	1,2727	0,00067		
	Ukupno	1910	6,8410			

Tabela 36. Statistička analiza regresionih linearnih jednačina ESM modela.

	C	SE	t	p	L95	U95
CCU	1,06799	0,00468	228,40	0	1,05882	1,07716
RCU	1,03192	0,00228	452,70	0	1,02745	1,03639
TCU	1,21583	0,013304	91,39	0	1,18974	1,24192

Za rezultate dobijene regresionom analizom ESM modela može se konstatovati da su vrlo slični rezultatima iz prethodnog primera. Drugim rečima, visoke vrednosti koeficijenata korelacije upućuju na postojanje jake veze između stvarnih i predviđenih vrednosti tehnoloških pokazatelja (tabela 34), dok se na dijagramima grešaka predviđanja (slika 95) mogu uočiti manja i veća odstupanja od stvarnih rezultata.



Slika 95. Greške predviđanja tehnoloških parametara prema ESM modelu.

Trend greške predviđanja sadržaja bakra u koncentratu je skoro identičan analognom trendu prikazanom na slici 94. Takođe, trend greške predviđanja iskorišćenja se u mnogome poklapa sa odgovarajućim trendom sa slike 94, ali je za nijansu „umereniji“. To znači da su odstupanja između predviđenih i stvarnih vrednosti iskorišćenja nešto manja, što odgovara i većoj vrednosti koeficijenta korelacije ESM modela za promenljivu RCU.

Kada je u pitanju greška predviđanja sadržaja bakra u jalovini, takođe se može konstatovati da su odstupanja generalno manja u odnosu na model EMM i da se pretežno kreću u opsegu $\pm 0,05\%$ Cu.

(3) Prošireni fazi logički model zasnovan na Mamdani sistemu zaključivanja

Tabela 37. Statistička povezanost stvarnih i predviđenih vrednosti pomoću PMM modela.

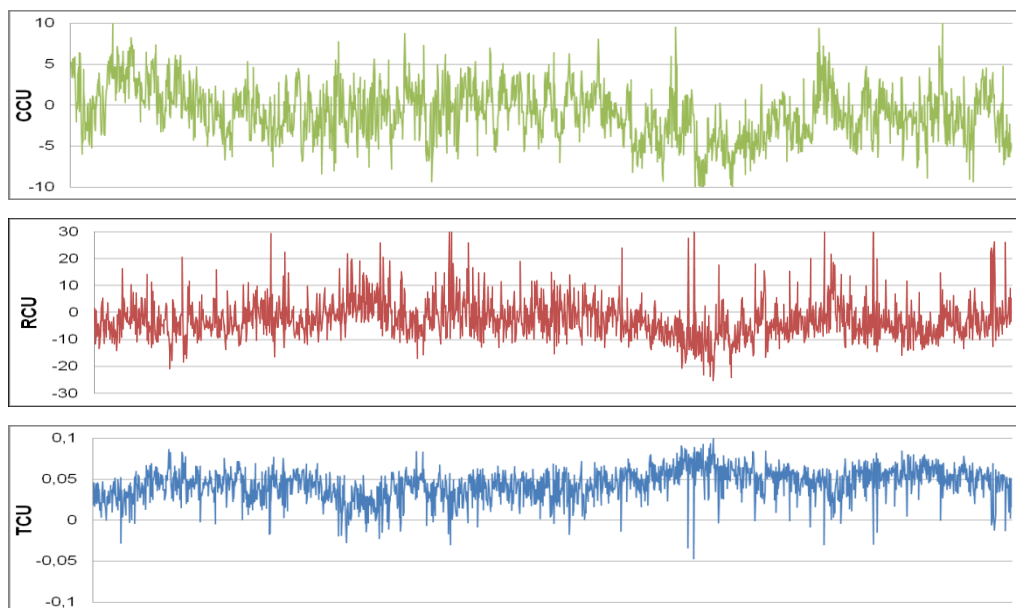
Statistički parametri	Tehnološki pokazatelj procesa flotacije		
	Sadržaj bakra u koncentratu	Iskorišćenje bakra u koncentratu	Sadržaj bakra u jalovini
Koeficijent korelacije R	0,98543	0,99631	0,91620
Koeficijent determinacije R ²	0,97108	0,99263	0,83943
Prilagođeni R ²	0,97055	0,99211	0,83890
Standardna greška (RMSE)	3,12578	7,00684	0,03402
Broj opservacija	1910	1910	1910

Tabela 38. Analiza varijanse (ANOVA) PMM modela.

		<i>df</i> *	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>SF</i>
CCU	Regresija	1	626143,23	626143,23	64084,92	0
	Ostatak	1909	18651,93	9,77		
	Ukupno	1910	644795,16			
RCU	Regresija	1	12625669,71	12625669,71	257164,10	0
	Ostatak	1909	93723,83	49,10		
	Ukupno	1910	12719394,54			
TCU	Regresija	1	11,5531	11,5531	9979,68	0
	Ostatak	1909	2,2100	0,00116		
	Ukupno	1910	13,7631			

Tabela 39. Statistička analiza regresionih linearnih jednačina PMM modela.

	<i>C</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>L95</i>	<i>U95</i>
CCU	0,92856	0,00367	253,15	0	0,92137	0,93575
RCU	0,96206	0,00190	507,11	0	0,95834	0,96578
TCU	1,75131	0,01753	99,90	0	1,71693	1,78569

**Slika 96.** Greške predviđanja tehnoloških parametara prema PMM modelu.

Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 37 – 39, a prema analogiji sa modelima EMM i ESM, moguće je tvrditi da formirani PMM model dobro prati pozitivne i negativne promene u stvarnim vrednostima posmatranih parametara tokom vremena. Međutim, i u ovom slučaju se na slici 96 mogu zapaziti neka od većih odstupanja između stvarnih i predviđenih vrednosti promenljivih CCU, RCU i TCU.

Za razliku od prethodnih primera, prisutno je nešto „ravnomernije oscilovanje” greške predviđanja kvaliteta koncentrata oko nulte vrednosti, iako je i dalje uočljivo odstupanje od ovog trenda u poslednjoj trećini vremenskog perioda rada postrojenja. Osim toga, greška u predviđanju sadržaja bakra u jalovini je u najvećem delu pozitivna, što znači da su vrednosti predviđene modelom po pravilu nešto veće od realnih.

Ovakav rezultat ukazuje na to da je potrebno fino podešavanje (fine tuning) modela. Naime, relativno mala odstupanja rezultata prediktivnog modela od realnih rezultata sa tendencijom „prebacivanja” vrednosti realnih rezultata upućuju na to da je vrednosti fazi brojeva u okviru funkcija pripadnosti potrebno dodatno korigovati. Ipak, imajući u vidu dobru korelaciju izlaznih vrednosti baze fazi pravila sa realnim vrednostima rada flotacijskog sistema, ovo je istovremeno indikacija da su performanse samog modela „udarile” u sopstvene granice. U tom smislu, preporučuje se kombinovanje, odnosno hibridizacija fazilogičkog modela sa drugim soft kompjuting metodama.

(4) Prošireni fazi logički model zasnovan na Takagi-Sugeno sistemu zaključivanja

Tabela 40. Statistička povezanost stvarnih i predviđenih vrednosti pomoću PSM modela.

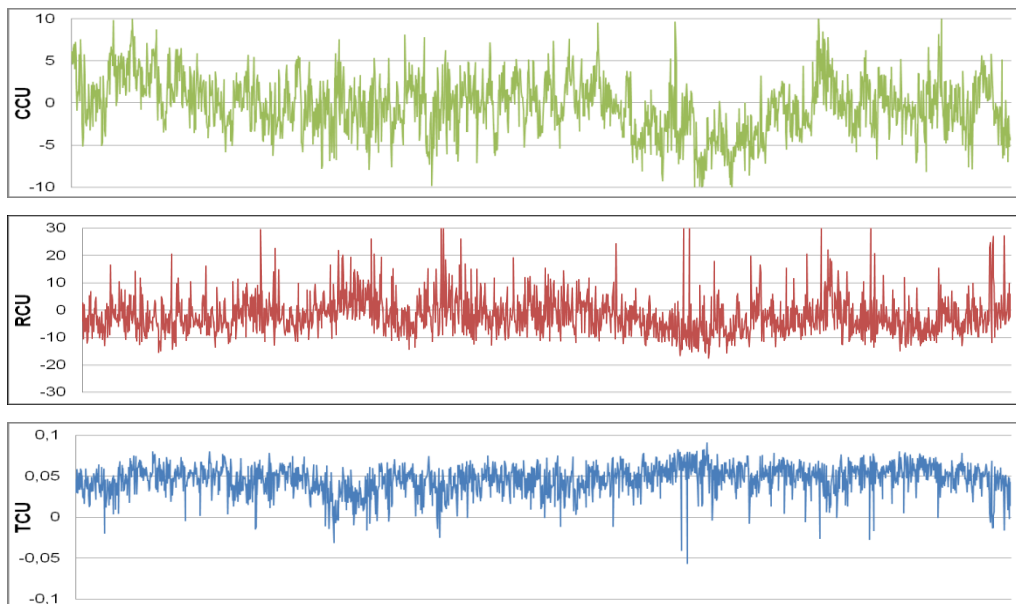
Statistički parametri	Tehnološki pokazatelj procesa flotacije		
	Sadržaj bakra u koncentratu	Iskorišćenje bakra u koncentratu	Sadržaj bakra u jalovini
Koeficijent korelacije R	0,98488	0,99664	0,92045
Koeficijent determinacije R ²	0,96999	0,99329	0,84723
Prilagođeni R ²	0,96947	0,99277	0,84671
Standardna greška (RMSE)	3,29064	6,73917	0,03415
Broj opservacija	1910	1910	1910

Tabela 41. Analiza varijanse (ANOVA) PSM modela.

		df*	SS	MS	F	SF
CCU	Regresija	1	668160,99	668160,99	61704,87	0
	Ostatak	1909	20671,29	10,83		
	Ukupno	1910	688832,28			
RCU	Regresija	1	12831897,90	12831897,90	282538,80	0
	Ostatak	1909	86699,93	45,42		
	Ukupno	1910	12918597,82			
TCU	Regresija	1	12,3455	12,3455	10586,97	0
	Ostatak	1909	2,2261	0,00117		
	Ukupno	1910	14,5715			

Tabela 42. Statistička analiza regresionih linearnih jednačina PSM modela.

	<i>C</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>L95</i>	<i>U95</i>
CCU	0,95921	0,00386	248,40	0	0,95164	0,96678
RCU	0,96988	0,00182	531,54	0	0,96630	0,97346
TCU	1,81037	0,01759	102,89	0	1,77586	1,84487

**Slika 97.** Greške predviđanja tehnoloških parametara prema PSM modelu.

Pregledom rezultata PSM modela uočeno je da su isti izuzetno slični rezultatima koje je dao PMM model, kako u pogledu ishoda regresione analize (tabele 40 – 42) tako i u pogledu vrednosti grešaka predviđanja iskorišćenja i sadržaja bakra u proizvodima koncentracije (slika 97).

(5) Modeli zasnovani na hibridnom sistemu ANFIS

Tabela 43. Statistička povezanost stvarnih i predviđenih vrednosti pomoću ANF1, ANF2 i ANF3 modela.

Statistički parametri	Tehnološki pokazatelj procesa flotacije		
	Sadržaj bakra u koncentratu	Iskorišćenje bakra u koncentratu	Sadržaj bakra u jalovini
Koeficijent korelacije R	0,98347	0,99608	0,91642
Koeficijent determinacije R ²	0,96721	0,99217	0,83982
Prilagođeni R ²	0,96669	0,99164	0,83930
Standardna greška (RMSE)	3,44739	0,079921	0,04786
Broj opservacija	1910	1910	1910

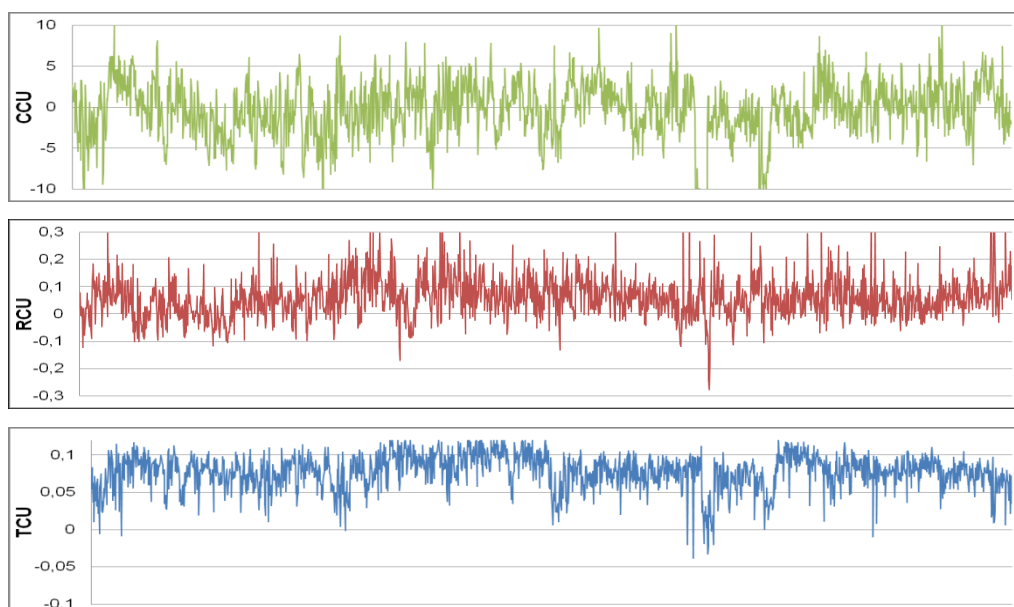
Tabela 44. Analiza varijanse (ANOVA) ANF1, ANF2 i ANF3 modela.

		<i>df</i> *	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>SF</i>
CCU	Regresija	1	669217,43	669217,43	56309,99	0
	Ostatak	1909	22687,56	11,88		
	Ukupno	1910	691905,99			
RCU	Regresija	1	1544,76	1544,76	241848,19	0
	Ostatak	1909	12,19	0,00639		
	Ukupno	1910	1556,95			
TCU	Regresija	1	22,9236	22,9236	10008,83	0
	Ostatak	1909	4,3722	0,00229		
	Ukupno	1910	27,2958			

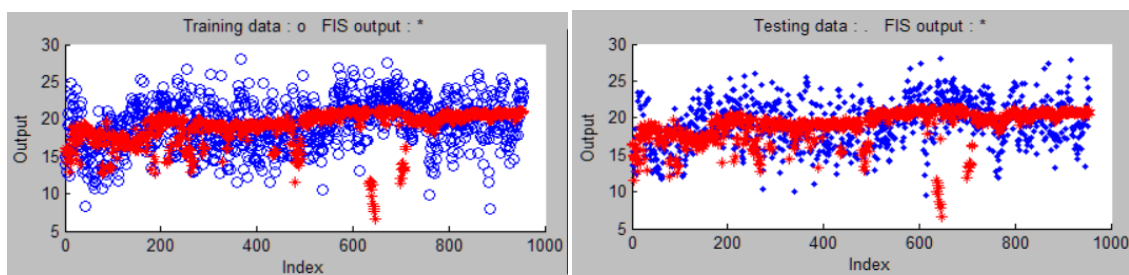
Tabela 45. Statistička analiza regresionih linearnih jednačina ANF1, ANF2 i ANF3 modela.

	<i>C</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>L95</i>	<i>U95</i>
CCU	0,95997	0,00405	237,30	0	0,95203	0,96790
RCU	1,06415	0,00216	491,78	0	1,05991	1,06840
TCU	2,46691	0,02466	100,04	0	2,41855	2,51527

Regresionom analizom rezultata, ostvarenih evaluacijom modela zasnovanih na hibridnom ANFIS sistemu, dobijeni su neznatno veći koeficijenti korelacije u odnosu na EMM i ESM modele. Ovo važi za sve tri zavisne promenljive – CCU, RCU i TCU (tabela 43).

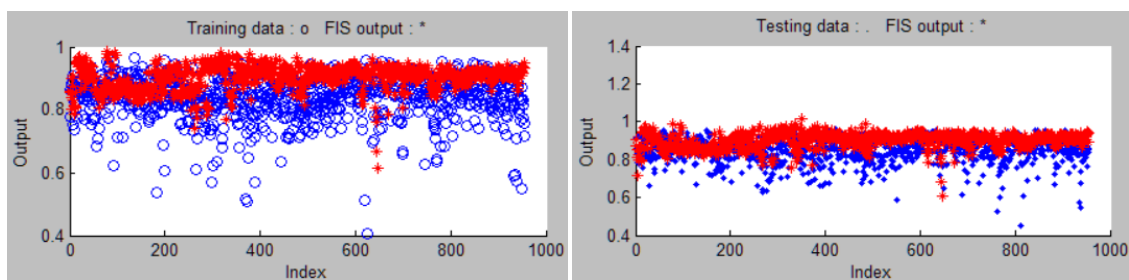
**Slika 98.** Greške predviđanja tehnoloških parametara prema hibridnim ANF1, ANF2 i ANF3 modelima.

Kada su u pitanju rezultati predviđanja sadržaja bakra u koncentratu, sa slike 99 je uočljivo da model ANF1 uglavnom predviđa kvalitet koncentrata u opsegu između 17 i 22% Cu. Ovo predviđanje se može smatrati sasvim korektnim, iako se na prvi pogled ne čini da je tako. Razlog je veliko rasipanje realnih podataka u postrojenju, na šta ukazuje i greška predviđanja, koja praktično tokom celog vremenskog perioda rada postrojenja primetno „oscilira” oko vrednosti nula (slika 98).



Slika 99. Predviđanje sadržaja Cu u koncentratu prema ANF1 modelu u odnosu na trening i test podatke

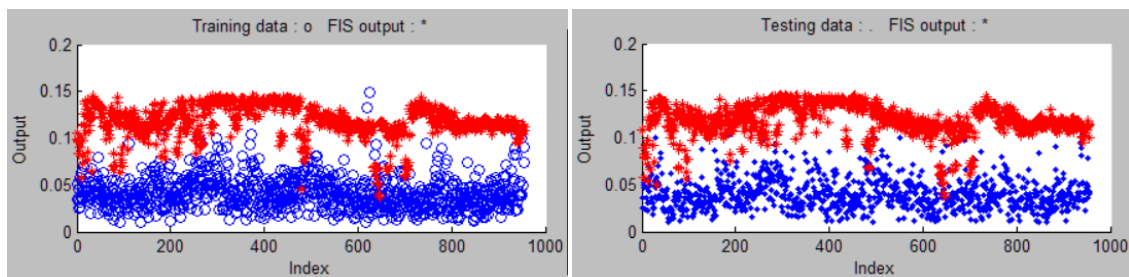
Predviđanje iskorišćenja bakra u koncentratu (ANF2 model) karakteriše visok koeficijent korelacije, ali se vizuelnom analizom (slika 100) može konstatovati da su vrednosti iskorišćenja dobijenih po modelu uglavnom veće od realnih, što potvrđuje i greška predviđanja koja je velikim delom pozitivna (slika 98).



Slika 100. Predviđanje iskorišćenja Cu u koncentratu prema ANF2 modelu u odnosu na trening i test podatke

Konačno, sa slike 101 se može videti da su vrednosti predviđanja sadržaja bakra u jalovini (ANF 3 model) značajno veće od procesnih kada su u pitanju i trening i test podaci, na šta ukazuje i pozitivna greška predviđanja tokom celog vremenskog perioda rada postrojenja (slika 98). Ova vrednost greške često prelazi i 0,1% Cu, pa se nameće zaključak da se ovakav model ne može smatrati adekvatnim. Ovo je takođe dobar primer kako visok koeficijent korelacije znači da model dobro prati promene u stvarnim

vrednostima posmatranih parametara ali da istovremeno predviđene vrednosti ne zadovoljavaju zahtevane kriterijume u pogledu preciznosti.



Slika 101. Predviđanje sadržaja Cu u jalovini prema ANF3 modelu u odnosu na trening i test podatke

(6) Modeli zasnovani na konceptu veštačkih neuronskih mreža

Tabela 46. Statistička povezanost stvarnih i predviđenih vrednosti pomoću VNM1, VNM2 i VNM3 modela.

Statistički parametri	Tehnološki pokazatelj procesa flotacije		
	Sadržaj bakra u koncentratu	Iskorišćenje bakra u koncentratu	Sadržaj bakra u jalovini
Koeficijent korelacije R	0,99114	0,99720	0,93117
Koeficijent determinacije R ²	0,98235	0,99440	0,86708
Prilagođeni R ²	0,98183	0,99387	0,86656
Standardna greška (RMSE)	2,56712	6,28453	0,01563
Broj opservacija	1910	1910	1910

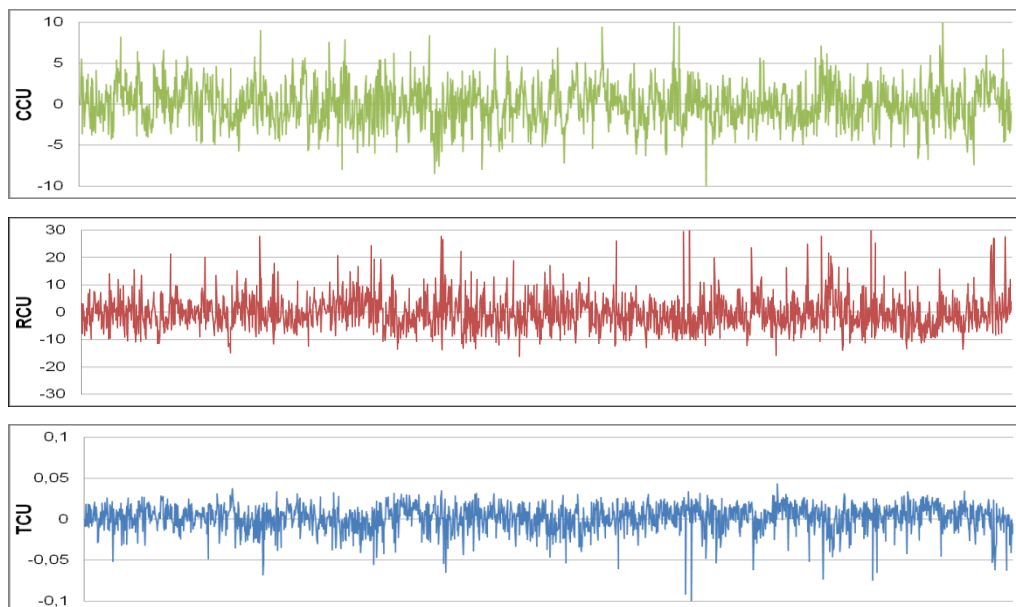
Tabela 47. Analiza varijanse (ANOVA) VNM1, VNM2 i VNM3 modela.

		df*	SS	MS	F	SF
CCU	Regresija	1	700323,51	700323,51	106268,61	0
	Ostatak	1909	12580,55	6,59		
	Ukupno	1910	712904,13			
RCU	Regresija	1	13383644,94	13383644,94	338866,34	0
	Ostatak	1909	75396,62	39,50		
	Ukupno	1910	13459041,56			
TCU	Regresija	1	3,0422	3,0422	12453,38	0
	Ostatak	1909	0,4664	0,00024		
	Ukupno	1910	3,5086			

Tabela 48. Statistička analiza regresionih linearnih jednačina VNM1, VNM2 i VNM3 modela.

	C	SE	t	p	L95	U95
CCU	0,98203	0,00301	325,99	0	0,97612	0,98793
RCU	0,99052	0,001702	582,12	0	0,98718	0,99385
TCU	0,89869	0,008053	111,59	0	0,88290	0,91448

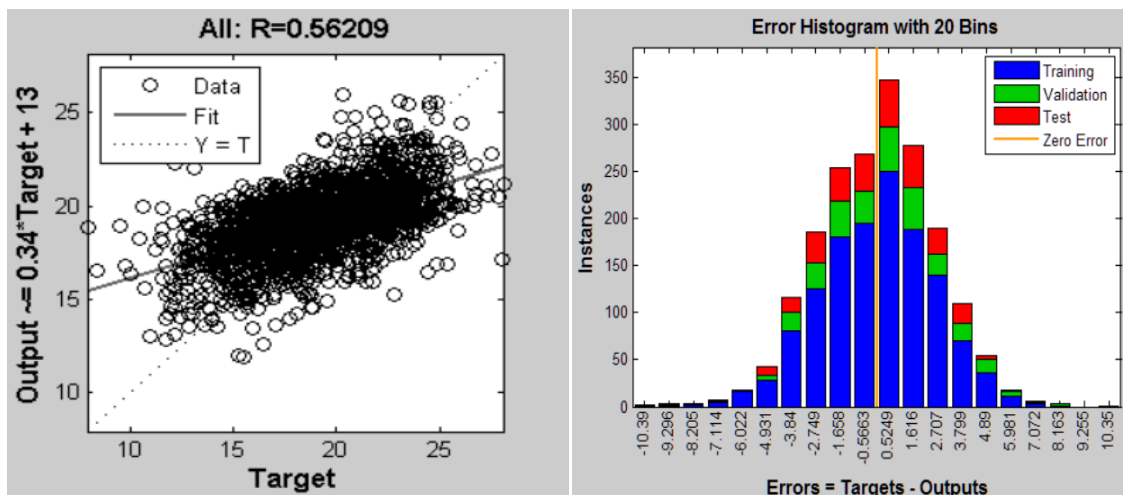
U okviru validacije modela baziranih na veštačkim neuronskim mrežama, rezultati dobijeni regresionom analizom podataka upućuju na vrlo jaku korelaciju između stvarnih i predviđenih vrednosti izlaznih parametara (shodno veoma visokim vrednostima koeficijenta korelacije prikazanim u tabeli 48).



Slika 102. Greške predviđanja tehnoloških parametara prema VNM1, VNM2 i VNM3 modelima.

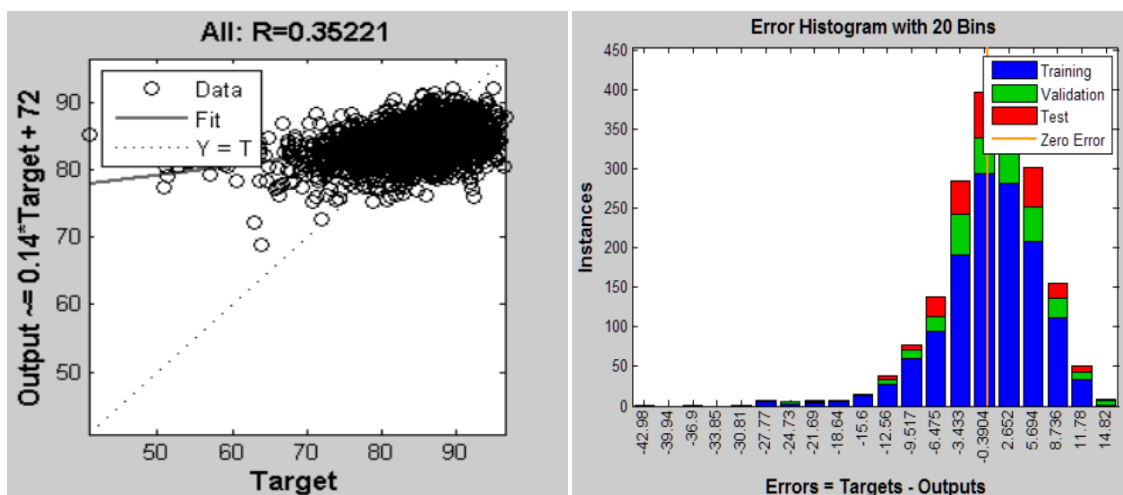
Greška predviđanja sadržaja bakra u koncentratu veoma retko izlazi iz granica opsega $\pm 5\%$ Cu (slika 102), što je u skladu sa histogramom greške treniranja, testiranja i validacije podataka neuronske mreže, prikazanim na slici 103. Na ovom histogramu se jasno vidi da se najveći deo vrednosti greške predviđanja zapravo nalazi u opsegu $\pm 2\%$ Cu što se može nazvati vrlo korektnim predviđanjem, posebno kada se razmotre velike fluktuacije u realnim procesnim podacima. Takođe, raspored tačaka na dijagramu⁵⁸ stvarnih i predviđenih vrednosti sadržaja bakra u koncentratu ukazuje na dobra prediktivna svojstva VNM1 modela.

⁵⁸ Napomena: za proračun vrednosti R prikazanih na slikama 103, 104 i 105 programski jezik MATLAB primenjuje drugačiju metodologiju i ograničenja u odnosu na metode korišćene tokom regresione analize.



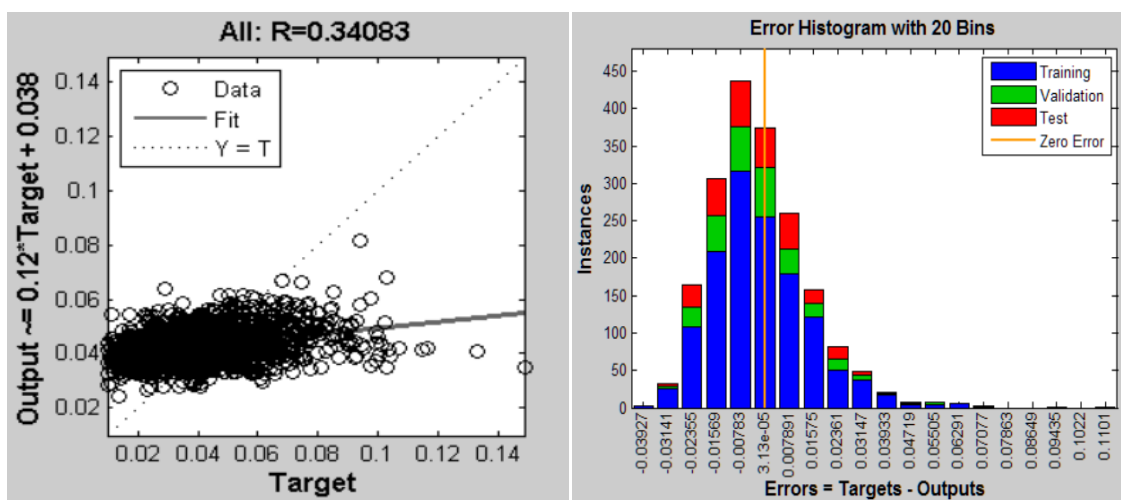
Slika 103. Grafički prikaz rezultata VNM1 modela sa histogramom greške treniranja, validacije i testiranja.

Kada je u pitanju model VNM2, generalno se može tvrditi da isti ima bolja prediktivna svojstva u odnosu na druge modele koji predviđaju iskorišćenje bakra u koncentratu. Naime, greška predviđanja (slika 102) retko prelazi opseg $\pm 10\%$ I_{Cu} , što se još jasnije uočava na histogramu prikazanom na slici 104. Prema datom histogramu, najveći deo vrednosti greške predviđanja iskorišćenja (pri treningu, validaciji i testiranju mreže) smešten je u intervalu između $-3,5$ i $+6\%$ I_{Cu} . U tom smislu, izveden je zaključak da model VNM2 ima solidna prediktivna svojstva, jer treba uzeti u obzir da su i u ovom slučaju zapažene značajne fluktuacije u realnim iskorišćenjima, koje se možda najbolje mogu uočiti na slikama 85 i 100 kao i na tačkastom dijagramu sa slike 104.



Slika 104. Grafički prikaz rezultata VNM2 modela sa histogramom greške treniranja, validacije i testiranja

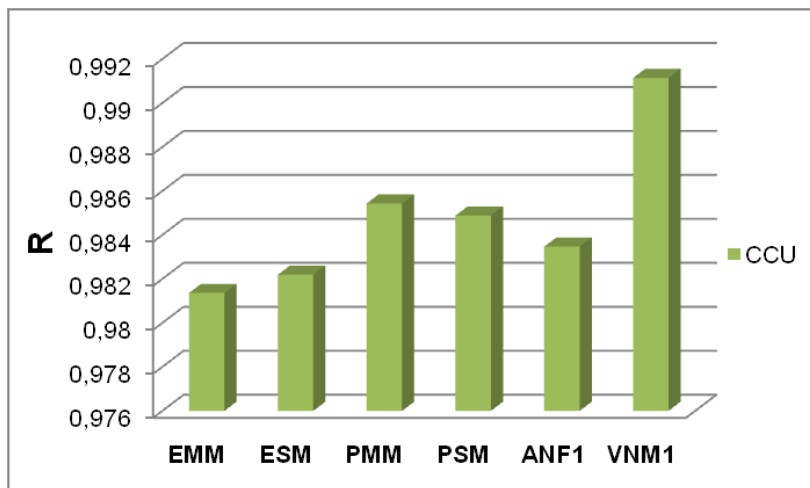
Analizom vrednosti greške VNM3 modela, sa slike 102 kao i sa histograma (slika 105) može se zapaziti da u ovom slučaju greška predviđanja izlazne promenljive TCU uglavnom uzima vrednosti u opsegu $\pm 0,016\%$ Cu. Iako se razmatranjem tačkastog dijagrama sa slike 105 na prvi pogled čini da ovo predviđanje nije dovoljno korektno, kada se razmotre varijacije u realnim vrednostima sadržaja bakra u jalovini (koje se najbolje mogu uočiti na slici 101) prediktivna svojstva VNM3 modela su sasvim prihvatljiva, a odstupanja u pomenutom opsegu se mogu tolerisati.



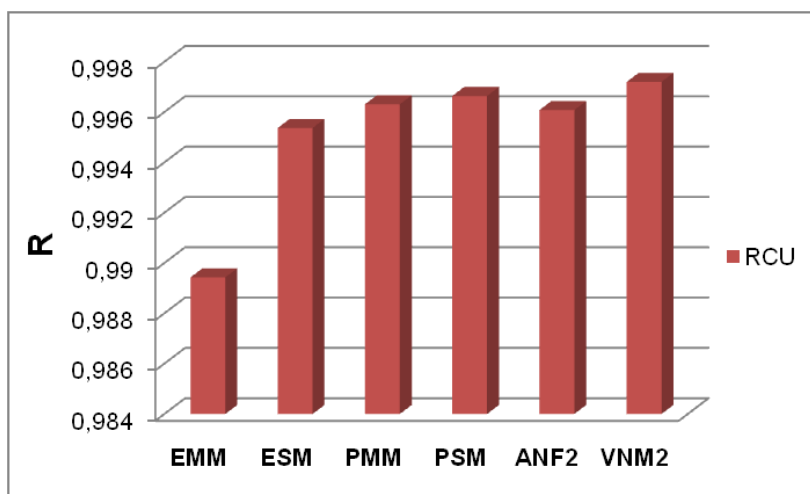
Slika 105. Grafički prikaz rezultata VNM3 modela sa histogramom greške treniranja, validacije i testiranja.

8.2 UPOREDNA ANALIZA ISHODA MODELOVANJA

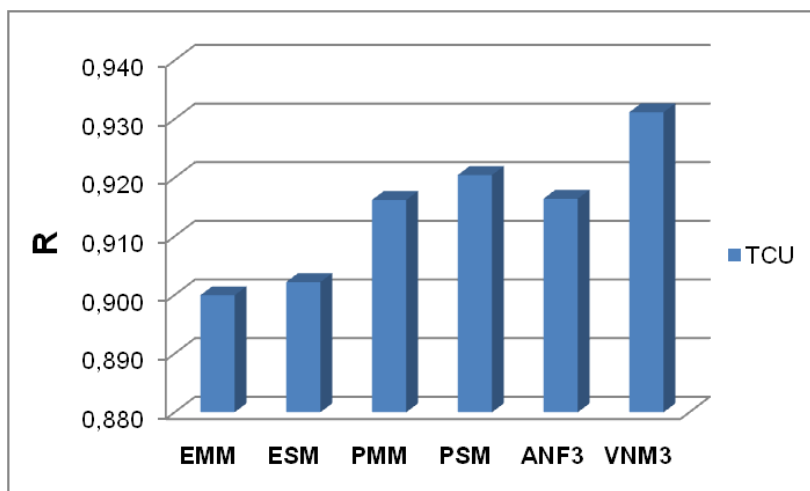
Uporedna analiza rezultata modelovanja izvršena je na osnovu vrednosti koeficijenta korelacije dobijenih regresionom analizom, kao i dosadašnjih zapažanja u pogledu prediktivnih svojstava svakog od formiranih modela. Na slikama 106 – 108 predstavljeni su stubičasti dijagrami koji prikazuju vrednosti koeficijenta korelacije za svaki od deset razvijenih modela.



Slika 106. Koeficijenti korelacije stvarnih i predviđenih vrednosti sadržaja bakra u koncentratu.



Slika 107. Koeficijenti korelacije stvarnih i predviđenih vrednosti iskorišćenja bakra u koncentratu.



Slika 108. Koeficijenti korelacije stvarnih i predviđenih vrednosti sadržaja bakra u jalovini.

Razmatranjem rezultata prikazanih na slikama 106 – 108 uočava se da su dobijeni koeficijenti korelacije vrlo visoki, što generalno upućuje na dobru uzajamnu vezu između stvarnih i predviđenih vrednosti izlaznih promenljivih. Ipak, u izvesnom broju slučajeva mogu se uočiti znatnija odstupanja između vrednosti koje su predvideli modeli i realnih procesnih podataka. Sveobuhvatnim sagledavanjem date situacije moguće je izvesti određene zaključke.

S obzirom da rezultujuće površine fazilogičkih modela (osim kada su u pitanju modeli zasnovani na hibridnom ANFIS sistemu) veoma dobro oslikavaju karakteristike realnog procesa flotacijske koncentracije, same postavke fazilogičkih modela su korektne. Do znatnijih odstupanja između stvarnih i predviđenih vrednosti je najverovatnije došlo usled fluktuacija u realnim procesnim podacima koje mogu biti izazvane različitim faktorima, kao na primer: promenljiva dinamika odvijanja procesa zbog zastoja u radu postrojenja, veće oscilacije u procesnim parametrima koji su prilikom modelovanja smatrani konstantnim (finoća mlevenja, gustina pulpe), nesavršenosti uređaja za doziranje reagenasa, razlike u aktivnosti kreča, kvalitet povratnih voda i sl.

Najmanji koeficijenti korelacije između stvarnih i predviđenih vrednosti dobijeni su prilikom predviđanja sadržaja bakra u jalovini i ovo generalno važi za sve modele. Razlog može ležati u tome što je dijapazon kretanja realnih vrednosti sadržaja bakra u jalovini relativno uzak u odnosu na kvalitet i iskorišćenje (videti tabelu 25), pa se može dogoditi da se uticaji sasvim različitih vrednosti ulaznih parametara integrisano manifestuju kroz vrlo slične ili iste sadržaje bakra u jalovini, a da to nije uzeto u obzir prilikom modelovanja. Ovakva situacija bi mogla bitno uticati na koeficijent korelacije. Takođe, ne treba zanemariti ni moguće nesavršenosti tokom uzorkovanja jalovine (koje su posebno spregnute sa nestabilnostima u radu postrojenja), jer se radi o izuzetno malim sadržajima bakra u uzorcima, te je stoga pravilno uzorkovanje od presudnog značaja za dobijanje preciznog hemijskog sastava jalovine.

Najveći koeficijenti korelacije između stvarnih i predviđenih vrednosti dobijeni su kada je u pitanju iskorišćenje bakra u koncentratu, što takođe generalno važi za sve modele. S druge strane, najveće greške predviđanja prisutne su upravo na dijagramima koji se odnose na promenljivu RCU. Ovakvi rezultati ukazuju da se u procesu ostvarivanja ravnoteže performansi flotacijskog postrojenja u pogonu „Veliki Krivelj”

potpunije performanse ostvaruju kada je reč o kvalitetu koncentrata. Ovakav zaključak ne znači da je iskorišćenje bakra u koncentratu zanemareno, već da je proces „fino podešen” u smeru dobijanja što kvalitetnijeg koncentrata. Ovo bi bio i osnovni razlog zašto se kod modelovanja promenljive RCU dobijaju najveće vrednosti grešaka predviđanja, pod okolnostima u kojima je potvrđeno da modeli soft kompjuting metoda dobro oslikavaju stanje i varijacije sistema. Takođe, ovaj podatak pokazuje kako se u procesu modelovanja sistema može doći do dopunskih korisnih informacija o aktuelnom stanju procesa i njegovim performansama.

Iako je već napomenuto da, uopšteno, svi modeli imaju visoke vrednosti koeficijenta korelacije, ipak se međusobnom komparacijom rezultata modelovanja mogu ustanoviti neke razlike. Tako na primer, EMM model ima nešto lošije koeficijente korelacije u odnosu na ostale modele, a i razmatranjem grešaka predviđanja može se uočiti veći broj znatnih odstupanja od realnih vrednosti, posebno kada se radi o promenljivim CCU i RCU. Takođe, za model ANF3 se može tvrditi da je najmanje adekvatan, jer je, bez obzira na visok koeficijent korelacije, dao izuzetno velike greške u predviđanju sadržaja bakra u jalovini.

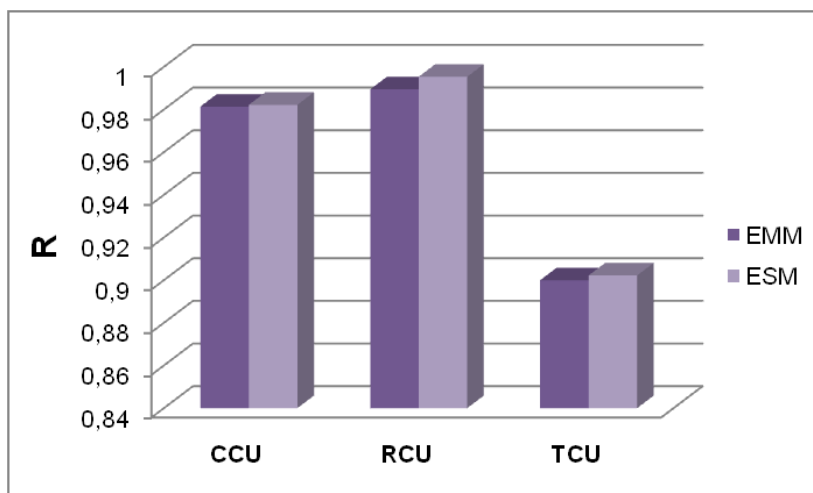
S druge strane, modeli na bazi veštačke neuronske mreže su pokazali najbolja prediktivna svojstva kada su u pitanju sve tri flotacijske promenljive. Stoga se nameće hipoteza da veštačke neuronske mreže bolje „savlađuju” skupove podataka u kojima su prisutna velika rasipanja vrednosti, ili drugim rečima, daju odgovore koji bolje prate prisutne fluktuacije u skupovima izlaznih podataka, barem kada je reč o modelovanju flotacijskih sistema.

Generalno gledano, performanse fazi logičkih modela sa pet ulaznih promenljivih (PMM, PSM) su nešto bolje od performansi fazi logičkih modela sa tri ulazne promenljive (EMM, ESM). Na osnovu toga se može izvesti zaključak da uvođenje većeg broja nezavisno promenljivih veličina dovodi do poboljšanja prediktivnih svojstava ove vrste modela procesa flotacijske koncentracije. Stoga postoji preporuka za razvoj fazi logičkih modela sa 6 i više nezavisno promenljivih procesnih parametara. Ipak, u ovom slučaju se mora voditi računa o maksimalnom broju ulaznih parametara zbog veličine i kompleksnosti baze fazi pravila.

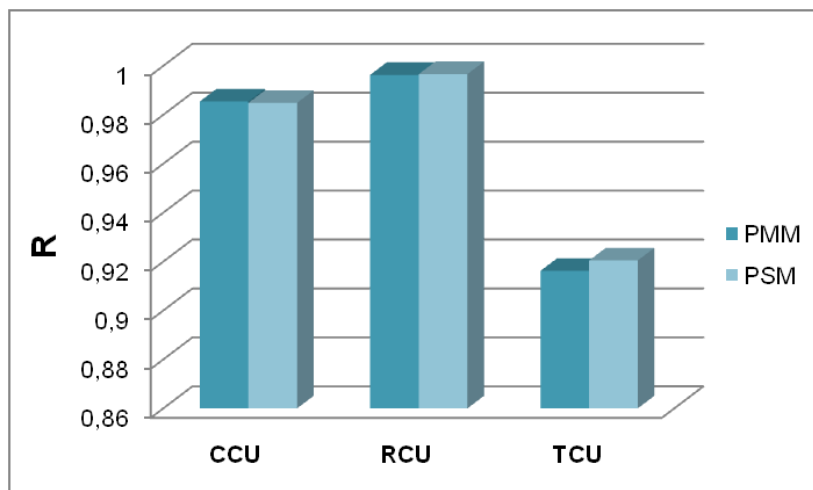
Konačno, kada je reč o poređenju fazi logičkih modela sa modelima zasnovanim na hibridnom ANFIS sistemu, postoje indikacije da ANF1 model ima bolja prediktivna

svojstva od EMM i ESM modela, kada se radi o predviđanju sadržaja bakra u definitivnom koncentratu.

Kao dodatak, na slici 109 dat je komparativni prikaz koeficijenta korelacije koji su dobijeni regresionom analizom rezultata EMM i ESM modela, dok je na slici 110 predstavljen isti takav prikaz za PMM i PSM modele.



Slika 109. Komparativni prikaz koeficijenta korelacije EMM i ESM modela.



Slika 110. Komparativni prikaz koeficijenta korelacije PMM i PSM modela.

Međusobnim poređenjem korelacionih svojstava EMM i ESM modela (slika 109), odnosno PMM i PSM modela (slika 110), a imajući u vidu i greške predviđanja, ustanovljeno je da nema značajne razlike u tome koji je fazi sistem zaključivanja primenjen u okviru modelovanja procesa flotacijske koncentracije (za iste uslove).

U literaturi postoje naznake da Takagi-Sugeno metoda daje nešto bolje rezultate kad je u pitanju modelovanje istih procesa, pod identičnim uslovima⁵⁹. I u ovom konkretnom slučaju, postoje minimalne razlike u korist Takagi-Sugeno metode, ali su toliko neznatne, da se praktično mogu zanemariti.

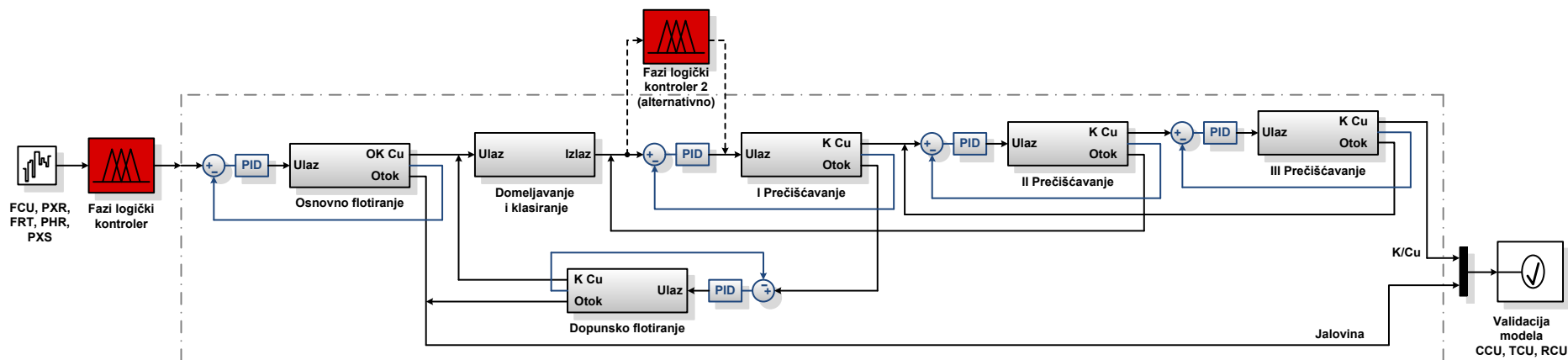
8.3 IMPLEMENTACIJA MODELA ZASNOVANIH NA METODAMA SOFT KOMPJUTINGA U INTELIGENTNI SISTEM UPRAVLJANJA

Svrha modelovanja nekog proizvodnog procesa jeste upravo mogućnost implementacije dobijenog modela u automatski sistem upravljanja tim procesom. Slike 111 i 112 sadrže predloge pojednostavljenih upravljačkih šema flotacijskog postrojenja „Veliki Krivelj” koje bi uključile i primenu kontrolera baziranih na metodama soft kompjutinga, i to kao vid podrške odlučivanju (fazi logički kontroler) ili kao samostalna kontrolna jedinica (ANN kontroler). Klasični PID regulatori bi se, u ovom sličaju, koristili na nižim hijerarhijskim nivoima upravljanja i to za regulaciju pojedinih parametara kao što su: nivo pulpe u flotacijskim ćelijama, protok vazduha, pH vrednost, vrednost elektrohemijjskog potencijala (E_h) i sl.

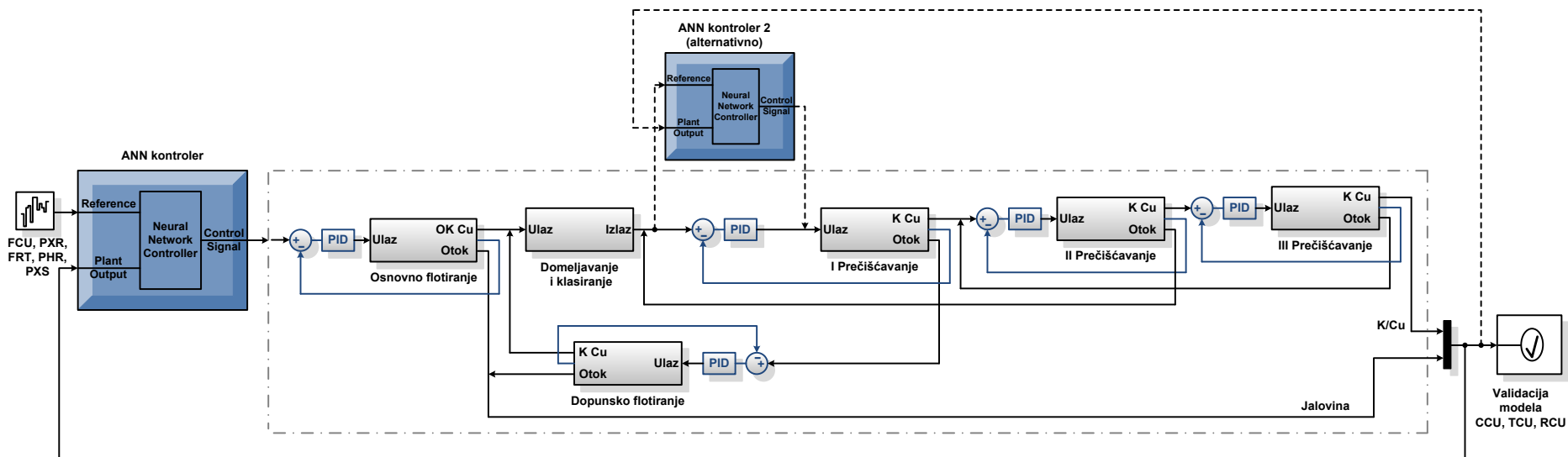
Na osnovu razvijenih fazi logičkih modela i modela zasnovanih na veštačkim neuronskim mrežama, moguće je razmatrati preporuke za pozicije odgovarajućih upravljačkih modula u okviru sistema automatskog upravljanja u postrojenju „Veliki Krivelj”.

Rezultati razvoja modela dopuštaju funkcionalno pozicioniranje fazi logičkog kontrolera u dve varijante (slika 111) arhitekture upravljačkog sistema. Prema jednoj varijanti, u postrojenju za flotacijsku koncentraciju bi se upravljanje i kontrola procesa odvijala kroz upravljačka dejstva jednog fazi kontrolera, dok bi u drugoj varijanti funkcionalnost fazi logičkog modela bila realizovana kroz odvojene fazi logičke kontrolere za osnovno i dopunsko flotiranje sa jedne strane, odnosno za prečišćavanje sa druge strane.

⁵⁹ Treba naglasiti da se ovde radi o drugim vrstama procesa, jer ovakav tip poređenja nije pronađen u literaturi kada su u pitanju flotacijski sistemi.



Slika 111. Šema inteligentnog sistema upravljanja procesom flotacijske koncentracije zasnovana na fazi logičkom kontroleru.



Slika 112. Šema inteligentnog sistema upravljanja procesom flotacijske koncentracije zasnovana na kontroleru na bazi veštačkih neuronskih mreža.

Aktuelna arhitektura sistema automatskog upravljanja dopušta razradu obe varijante. Prema prvoj varijanti, prošireni fazi modeli bi, u skladu sa bazom fazi pravila izvodili upravljanje i kontrolu procesa praktično celokupnog flotacijskog sistema⁶⁰.

Performanse modela, uprkos velikoj bazi fazi pravila, omogućuju upravljanje radom postrojenja na opisan način. Međutim, u slučaju znatnog povećanja broja praćenih parametara, neophodno bi bilo obimno proširenje baze fazi pravila, te bi u takvom slučaju performanse modela potencijalno opadale. U ovoj situaciji, opravdanost druge varijante, odnosno primene dva povezana, ali prema svojim bazama fazi pravila i funkcijama pripadnosti nezavisna fazi kontrolera bi bila izvesna.

U tehnološkom smislu, procesi osnovnog i dopunskog flotiranja sa jedne strane i prečišćavanja sa druge strane su dovoljno različiti da bi uvođenje još jednog stepena kontrole bilo ekonomski opravdano. Fleksibilnost razvijene baze fazi pravila je takva da bi, uz prilagođavanje funkcija pripadnosti, razvoj ovog kontrolera bio olakšan, odnosno ne bi postojale značajnije razlike u načinu funkcionisanja oba kontrolera.

Slična zapažanja su opravdana i kada je reč o kontroleru zasnovanom na razvoju veštačkih neuronskih mreža (slika 112), s tim da je neophodno ispitati performanse kontrolera u realnom dinamičkom sistemu. Kako je prikazano u literaturnom pregledu, algoritmi i modeli bazirani na veštačkim neuronskim mrežama su uglavnom boljih performansi od fazi logičkih, međutim to nije slučaj u svim industrijskim (i test) sistemima. Odluku o tome koja varijanta kontrolera je optimalna za dati tehnološki proces potrebno je doneti „na licu mesta” odnosno uzimajući u obzir specifičnosti posmatranog tehnološkog sistema.

9.0 ZAKLJUČAK I PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA

Flotacijski sistemi su karakteristični po svojoj kompleksnosti, koja je uzrokovana složenim interakcijama velikog broja različitih procesnih parametara. Samim tim, modelovanje i kontrola ovako složenih sistema nije jednostavan zadatak.

Dosadašnja istraživanja na polju primene klasičnih matematičkih metoda u modelovanju i upravljanju flotacijskim procesima (zbog potrebe za precizno

⁶⁰ Iako su u tehnološkom smislu usko povezani, zbog specifičnosti konstrukcije pravila i kvalitativno različitih karakteristika, procesi domeljavanja i klasiranja bili bi izostavljeni, te bi u tom pogledu bilo neophodno uposliti novi kontroler na bazi soft kompjutinga, ili neki drugi tip kontrolera.

definisanim procesnim informacijama) nisu dala zadovoljavajuće rezultate u pogledu funkcionalnosti kontrolnih sistema. U tom smislu, prihvaćena je ideja da modeli zasnovani na metodama soft kompjutinga bolje opisuju stohastički flotacijski proces, kroz emulaciju rada ljudskih eksperata u okviru kontrole procesa.

Unapređenja i uspesi u modelovanju flotacijskih procesa metodama soft kompjutinga ustanovljeni su na osnovu razmatranja velikog broja rezultata svetskih studija koje se bave ovom problematikom. Međutim, na bazi stečenih informacija moguće je izneti i sledeća zapažanja:

- * Mnoga istraživanja uključuju samo laboratorijska ili poluindustrijska ispitivanja kao i samo jedan stadijum flotiranja (uglavnom osnovno flotiranje).
- * Testiranje modela i kontrolnih softvera u industrijskim okvirima većinom je vezano za kratak vremenski period rada postrojenja (najčešće do mesec dana).
- * Najveća pažnja pri modelovanju flotacijskih procesa upotrebom metoda soft kompjutinga posvećena je flotacijskoj koloni.

Imajući u vidu navedeno, istraživanja u okviru ove doktorske disertacije sprovedena su kroz kompleksniji pristup modelovanja industrijskog procesa flotacijske koncentracije u mehaničkim flotacijskim ćelijama. Primenjene su sledeće metode soft kompjutinga: fazi logika, hibridni ANFIS sistem i veštačke neuronske mreže. Sveobuhvatnim sagledavanjem problematike istraživanja, kao i dobijenih rezultata izvedeni su sledeći zaključci:

- * Industrijsko flotacijsko postrojenje „Veliki Krivelj” koje je poslužilo kao postrojenje za testiranje adekvatnosti modela je aktivan proizvodni sistem u kome postoji redovno praćenje relevantnih procesnih parametara.
- * Proces flotacije u postrojenju „Veliki Krivelj” je fino podešen u smeru dobijanja što kvalitetnijeg koncentrata.
- * Skup realnih procesnih podataka za razvoj i testiranje modela dobijen je višegodišnjim monitoringom rada postrojenja. Na skupovima izlaznih podataka (iskorišćenje i kvalitet koncentrata) uočene su značajne disperzije u vrednostima.
- * Generalno gledano, metodama soft kompjutinga (fazi logika, veštačke neuronske mreže) se dobro modeluje proces flotacijske koncentracije u mehaničkim

flotacijskim ćelijama, u smislu predviđanja iskorišćenja i sadržaja bakra u koncentratu, kao i sadržaja bakra u jalovini – što je ilustrovano na primeru flotacijskog postrojenja „Veliki Krivelj”.

- * Veštačke neuronske mreže su se pokazale kao adekvatnija metoda za modelovanje procesa flotacijske koncentracije od fazi logike.
- * U razmatranom slučaju, veći broj ulaznih promenljivih u fazilogičkim modelima doprinosi izvesnom poboljšanju performansi modela.
- * Poređenjem Mamdani i Takagi-Sugeno fazi sistema zaključivanja, uočeno je da je Takagi-Sugeno sistem daje nešto bolje rezultate modelovanja. Međutim, primećene razlike su minimalne, što ukazuje na to da pri modelovanju izrazito stohastičkog procesa (kao što je proces flotacijske koncentracije) ne treba očekivati razlike u performansama ovakvih modela. U skladu s tim, treba dati prednost onom tipu fazi sistema zaključivanja koji više odgovara obliku izlaznih funkcija zavisnih promenljivih.
- * Funkcionalno pozicioniranje inteligentnog kontrolera u flotacijskom postrojenju moguće je ostvariti kroz dve varijante arhitekture upravljačkog sistema. Prema jednoj varijanti, kontrola flotacijskog procesa bi se odvijala kroz upravljačka dejstva jednog inteligentnog kontrolera, dok bi u drugoj varijanti postojala dva odvojena inteligentna kontrolera za osnovno i dopunsko flotiranje sa jedne strane, odnosno za trostepeno prečišćavanje sa druge strane.

Rezultati dobijeni u ovim ispitivanjima, kao i širina date tematske oblasti predstavljaju dobru osnovu za dalja istraživanja. Shodno tome, preporuke za nastavak istraživanja bi obuhvatile:

- * Kombinovanje primenjenih tehnika modelovanja sa drugim metodama soft kompjutinga kroz hibridni pristup, s obzirom da modeli skoro idealno oslikavaju ponašanje sistema, ali zahtevaju dodatna fina podešavanja. U tom smislu, dopunska istraživanja bi uključila: razvoj hibridnog ANFIS sistema sa različitim brojem ulaznih promenljivih, zatim optimizaciju parametra modela nekim od inteligentnih algoritama (genetski algoritam, algoritam roja čestica, gravitacioni pretraživački algoritam, algoritam diferencijalne evolucije i sl.), integraciju sa metodom potpornih vektora, itd.

- * Ispitivanja i poređenja performansi flotacijskih modela zasnovanih na već korišćenim metodama, ali kroz drugačije postavke kao što su: razvoj neuronskih mreža čije se arhitekture razlikuju od primenjenih, formiranje fazi logičkih modela sa većim brojem ulaznih promenljivih, skraćenim ili proširenim bazama pravila, drugim oblicima funkcija pripadnosti i sl.
- * Modelovanje procesa flotacijske koncentracije u smislu uvođenja novih izlaznih parametara, poput tehnoloških pokazatelja uspešnosti koncentracije drugih korisnih komponenata.

LITERATURA

1. Abkhoshk, E., Kor, M., Rezai, B., 2010. A study on the effect of particle size on coal flotation kinetics using fuzzy logic. *Expert Systems with Applications* 37, pp. 5201–5207
2. Abraham, A., 2003. Intelligent Systems: Architectures and Perspectives, Chapter 1 in: *Recent Advances in Intelligent Paradigms and Applications (Studies in Fuzziness and Soft Computing, Volume 113)* (Editors: A. Abraham, L.C. Jain, J. Kacprzyk), Springer, pp. 1–35
3. Aldrich, C., Moolman, D.W., Eksteen, J.J., Van Deventer, J.S.J., 1995. Characterization of flotation processes with self-organizing neural nets. *Chemical Engineering Communications* 139 (1), pp. 25–39
4. Aldrich, C., Moolman, D.W., Gouws, F.S., Schmitz, G.P.J., 1997. Machine learning strategies for control of flotation plants. *Control Engineering Practice*, Vol. 5, No. 2, pp. 263–269
5. Aldrich, C., Schmitz, G.P.J., Gouws, F.S., 2000. Development of fuzzy rule-based systems for industrial flotation plants by use of inductive techniques and genetic algorithms. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 100, No. 2, pp 129–134
6. Aldrich, C., Marais, C., Shean, B.J., Cilliers, J.J., 2010. Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: A review. *International Journal of Mineral Processing*, 96, pp. 1–13
7. Ali, S., 2007. Mathematical models for the efficiency of flotation process for North Waziristan copper. PhD Thesis, University of education Lahore, Pakistan, 167 p.
8. Almond D.G., Becerra K., Campain D., 2013. The minerals plant of the future – leveraging automation and using intelligent collaborative environment. *The Journal of the Southern African Mining and Metallurgy Institute* Vol. 113, pp. 273–283.
9. Al-Thyabat, S., 2008. On the optimization of froth flotation by the use of artificial neural network. *Journal of China University of Mining and Technology* 18 (3), pp. 418–426
10. Al-Thyabat, S., 2009. Investigating the effect of some operating parameters on phosphate flotation kinetics by neural network. *Advanced Powder Technology* 20 pp. 355–360
11. Atiya, A., 1991. Learning algorithms for neural networks. PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA
12. Auret, L., 2010. Process Monitoring and Fault Diagnosis using Random Forests. PhD Thesis, University of Stellenbosch, South Africa, p. 214
13. Auret L., Aldrich C., 2011. Monitoring of Mineral Processing Operations based on Multivariate Similarity Indices. Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano (Italy) August 28 – September 2, pp. 9923–9928.
14. Auret L., Aldrich C., 2012. Interpretation of nonlinear relationships between process variables by use of random forests. *Minerals Engineering* 35, pp. 27–42.
15. Bakker, C.W., Meyer, C.J., Deglon, D.A., 2010. The development of a cavern model for mechanical flotation cells. *Minerals Engineering* 23, pp. 968–972
16. Bartolacci, G., Pelletier Jr., P., Tessier Jr., J., Duchesne, C., Bossé, P.-A., Fournier, J., 2006. Application of numerical image analysis to process diagnosis and physical parameter

- measurement in mineral processes – Part I: Flotation control based on froth textural characteristics. *Minerals Engineering* 19, pp. 734–747
17. Bergh, L.G., Yianatos, J.B., Leiva, C.A., 1998. Fuzzy supervisory control of flotation columns. *Minerals Engineering* 11 (8) pp. 739–748
 18. Bergh, L.G., Yianatos, J.B., Acuña, C.A., Pérez, H. F., López, F., 1999. Supervisory control at Salvador flotation columns. *Minerals Engineering* Vol. 12, No. 7, pp. 733–744
 19. Bergh, L.G., Yianatos J.B., 2011. The long way toward multivariate predictive control of flotation processes. *Journal of Process Control* 21, pp. 226–234
 20. Bergh, L., Yianatos J., 2013. Control of rougher flotation circuits aided by industrial simulator. *Journal of Process Control* 23, pp. 140–147
 21. Bharadway, A., Minz, S., 2009. Discretization based Support Vector Machines for Classification. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistic* 63 (2) pp. 189-197
 22. Bhunia, K., Kundu, G., Mukherjee, D., 2014. Experimental Studies on Flotation Column Cell Using Solid: Gas Dispersion Characteristics and Application of Neural Network. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research* 4 (2), pp. 619–640
 23. Bloom, F., Heindel, T.J., 1997. Mathematical Modelling of the Flotation Deinking Process. *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 25, No. 5, pp. 13-58
 24. Bonifazi, G., Serranti, S., Volpe, F., Zuco, R., 2001. Characterisation of flotation froth colour and structure by machine vision. *Computers & Geosciences* 27, pp. 1111–1117
 25. Borak, B., 2009. Genetski algoritam za rešavanje lokacijskog problema snabdevača ograničenog kapaciteta u više nivoa. Diplomski – master rad, Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu, 53 str.
 26. Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45, pp. 5–32
 27. Brożek, M., Młynarczykowska, A., 2007. Analysis of kinetics models of batch Flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing (Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii)*, Vol.41, pp. 51-65
 28. Brożek, M., Młynarczykowska, A., 2012. The distribution of air bubble size in the pneumo-mechanical flotation machine, *Archives of Mining Sciences* 57 (3), pp. 729-740.
 29. Бумаженко, Т.М., 2011. Применение нейронных сетей для регулирования процесса флотации. Материалы международной научной конференции "Информационные технологии и системы 2011 (ИТС 2011)", 26 октября, Минск, Беларусь, стр. 85
 30. Bushell, C., 2012. The PGM flotation predictor: Predicting PGM ore flotation performance using results from automated mineralogy systems. *Minerals Engineering* 36–38, pp. 75–80
 31. Camacho E.F., Bordons C., 1999. *Model Predictive Control*. Springer, 280 p.
 32. Cao, B., Xie, Y., Gui, W., Wei, L. Yang, C., 2013. Integrated prediction model of bauxite concentrate grade based on distributed machine vision. *Minerals Engineering* 53, pp. 31–38
 33. Cao, B., Xie, Y., Yang, C., Gui, W., Li, J., 2014. Intelligent predictive control of cleaning flotation process based on froth texture features. In *Proceedings of: 11th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 29 June - 4 July, Shenyang, China, pp. 766–771
 34. Carvalho, M.T., Durão, F., 1999. Performance of a flotation column fuzzy controller. In: *Computers and Computational Engineering in Control* (Edited by N.E. Mastorakis), pp. 220–225.
 35. Carvalho, M.T., Durão, F., 2000. Strategies for fuzzy control of a water/air column. In: *Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress*, July 23-27, Rome, Italy, pp. C3-17–C3-23
 36. Carvalho, M.T., Durão, F., 2002. Control of a flotation column using fuzzy logic inference. *Fuzzy Sets and Systems* 125, pp. 121–133
 37. Casali, A., Gonzalez, G., Agosto H., Vallebuona, G., 2002. Dynamic simulator of a rougher flotation circuit for a copper sulphide ore, *Minerals Engineering* 15, pp. 253–262
 38. Castillo, O., Melin, P., 2008. *Type 2 Fuzzy Logic: Theory and Applications (Studies in Fuzziness and Soft Computing)*, Springer, 244p.
 39. Chai, T., Geng, Z.-X., Yue, H., Wang, H., Su, C.-Y., 2009. A hybrid intelligent optimal control method for complex flotation process. *International Journal of Systems Science*, Vol. 40, No. 9, pp. 945–960
 40. Chuk, O.D., Ciribeni, V., Gutierrez, L.V., 2005. Froth collapse in column flotation: a prevention method using froth density estimation and fuzzy expert systems. *Minerals Engineering* 18, pp. 495–504

41. Chuk, O.D., Kuchen, B.R., 2011. Supervisory control of flotation columns using multi-objective optimization. *Minerals Engineering* 24, pp. 1545–1555
42. Cipriano, A., Ramos, M., 1994. Fuzzy model based control for a mineral flotation plant. In *Proceedings of 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '94)*, 05-09 September, Bologna, Italy, pp. 1375 – 1380
43. Cipriano, A., Guarini, M., Vidal, R., Soto, A., Sepúlveda, C., Mery, D., Briseño, H., 1998. A real time visual sensor for supervision of flotation cells. *Minerals Engineering* 11 (6), pp. 489–499
44. Cipriano A., 2010. Industrial Products for advanced control of mineral processing plants. In: *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants* (Edited by D. Sbárbaro, R. del Villar), Chapter 7, pp. 287–308.
45. Cisternas, L.A., Lucay, F., Gálvez, E.D., 2014. Effect of the objective function in the design of concentration plants. *Minerals Engineering* 63, pp. 16–24
46. Citir, C., Aktas, Z., Berber, R., 2004. Off-line image analysis for froth flotation of coal. *Computers and Chemical Engineering* 28, pp. 625–632
47. Cubillos, F.A., Lima, E.L., 1997. Identification and optimising control of a rougher flotation circuit using an adaptable hybrid-neural model. *Minerals Engineering* 10 (7), pp. 707–721.
48. Cubillos, F.A., Lima, E.L., 1998. Adaptive hybrid neural models for process control. *Computers and Chemical Engineering* 22, Suppl., pp. S989–S992
49. Cui, D., 2003. *Product Selection Agents: A Development Framework and Preliminary Application*. PhD Thesis, Department of Marketing of the College of Business Administration, University of Cincinnati, USA, 125 p.
50. Čalić N., 1990. *Teorijski osnovi pripreme mineralnih sirovina*. Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 496 str.
51. Çilek, E.C., 2002. Application of neural networks to predict locked cycle flotation test results. *Minerals Engineering* 15, pp. 1095–1104
52. Čizmar, D., Rajčić, V., Vlašić, A., 2009. Predviđanje progiba ovješnog mosta metodom potpornih vektora. *Građevinar* 61 (7), str. 635-642
53. Deglon, D.A., Sawyerr, F., O'Connor, C.T., 1999. A model to relate the flotation rate constant and the bubble surface area flux in mechanical flotation cells. *Minerals Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 599-608
54. DeHaan, D., Guay, M., 2010. Robust Adaptive Model Predictive Control of Nonlinear Systems. In: *Model Predictive Control* (Edited by Tao Zheng), Chapter 2, pp. 25–57
55. Deghani F., Ranjbar, G., Rezai, B., 2011. The Effect of the Shape of Silica Particles Ground by Ball Mill on their Flotation Kinetics, *American Journal of Scientific Research*, Iss. 29, pp. 33-40
56. Del Villar R., Desbiens, A., Maldonado, M., Bouchard, J., 2010. Automatic Control of Flotation Columns. In: *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants* (Edited by D. Sbárbaro, R. del Villar), Chapter 6, pp. 249–286
57. Delpont, R., 2005. *Process identification using second order Volterra models for nonlinear model predictive control design of flotation circuits*. M.Sc. thesis, Faculty of Engineering, the Built Environment and Information Technology, University of Pretoria, 137 p.
58. Desbiens, A., Hodouin, D., Najim, K., Flament, F., 1994. Long-range predictive control of a rougher flotation unit. *Minerals Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 21–37
59. Desbiens, A., Hodouin, D., Mailloux, M., 1998. Nonlinear predictive control of a rougher flotation unit using local models. *Proceedings of IFAC Symposium: Automation in Mining, Metal and Mineral Processing*, Cologne, Germany, 1-3 September, pp. 297–302
60. Drzymała, J., 2007. *Mineral Processing: Foundations of theory and practice of minerallurgy*. Wrocław University of Technology, ISBN 978-83-7493-362-9, 508 p.
61. Duan, J., Fornasiero, D., Ralston, J., 2003. Calculation of the flotation rate constant of chalcopyrite particles in an ore, *International Journal of Mineral Processing* 72, pp. 227– 237
62. Edwards, R.P., 1990. *Expert System Control of a Flotation Circuit*. MSc Thesis, University of British Columbia, 266 p.
63. El-Shall, H., Svoronos, S., Abdel-Khalek, N.A., Gruber, G., Scheiner, B., Stanley, D., Karr, C., 2001. Bubble generation, design, modeling and optimization of novel flotation columns for phosphate beneficiation. Volume I. FIPR Project No. 95-02-111, Florida Institute of Phosphate Research, USA, 203 p.
64. Estrada-Ruiz, R.H., Pérez-Garibay, R., 2009. Neural networks to estimate bubble diameter and bubble size distribution of flotation froth surfaces. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy* (109), pp. 441–446

65. Farghaly, M., Serwa, A., Ahmed M., 2012. Optimizing the Egyptian Coal Flotation Using an Artificial Neural Network, *Journal of Mining World Express* 1 (2), pp. 27–33
66. Faulkner, B.P., 1966. Computer control improves metallurgy at Tennessee copper flotation. *Plan Mining Engineering*, Vol. 18, pp. 53-57.
67. Ferreira, J. P., Loveday, B. K., 2000. An improved model for simulation of flotation circuits. *Minerals Engineering* 13 (14-15), pp. 1441–1453.
68. Fichera, M.A., Chudacek, M.W., 1992. Batch cell flotation models - A review. *Minerals Engineering*, Vol. 5, Iss. 1, pp. 41–55
69. Filipič, B., Junkar, M., 2000. Using inductive machine learning to support decision making in machining processes. *Computers in Industry* 43, pp. 31–41
70. Flintoff, B., 2002. Introduction to Process Control. *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*, Vol. 2 (Edited by A.L. Mular, D.N. Halbe and D.J. Barrat), pp. 2051–2065
71. Forbes, G. 2007. Texture and bubble size measurements for modelling concentrate grade in flotation froth systems. Phd Thesis, University of Cape Town, 266 p.
72. Fuerstenau D. W., 2007. A Century of Developments in the Chemistry of Flotation Processing, in: *Froth flotation A Century of Innovation*, SME, (Editors: Fuerstenau M.C., Jameson G., Yoon R-H), pp.3–64
73. Fyfe, C., 2005. Artificial Neural Networks. In: *Do Smart Adaptive Systems Exist* (Edited by B. Gabrys, K. Leiviskä and J. Strackeljan), Publisher: Springer, pp. 57–79
74. Gao, D., Zhang, Y.-X., Zhao, Y.-H., 2009. Random forest algorithm for classification of multiwavelength data. *Research in Astronomy and Astrophysics* 9 (2)pp. 220-226
75. Garcia Zuñiga, H., 1935. The efficiency obtained by flotation is an exponential function of time. *Boletín Minero*, Sociedad Nacional de Minería, Santiago, Chile, 47, pp. 83-86
76. Gayathri, R., Malathi, A., 2013. Exploration of Data Mining Techniques in Record Deduplication. *International Journal of Science and Research* 2 (11), pp. 216–219
77. Gegov, A., Petrov, N., Vatchova, B., 2010. Advanced Modelling of Complex Processes by Rule Based Networks. In: *Proceedings of 5th IEEE International Conference on Intelligent Systems*, 7-9 July, London, UK, pp. 197–202
78. Gegov, A., Petrov, N., Vatchova, B., Sanders, D., 2011. Advanced Modelling of Complex Processes by Fuzzy Networks. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems* 10 (10), pp. 319–330
79. Geng Z., Chai T., Yue H., Wang H., Su, C., 2008. Intelligent Control for Flotation Process. *Proceedings of the 17th World Congress: The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11, pp. 10009–10014
80. Geng Z.X., Chai, T. Y., 2008. Soft sensor of technical indices based on LS-SVM for flotation process. *Journal of System Simulation* 20 (23) pp. 6321–6324 (In Chinese).
81. Ghobadi, P., Yahyaei, M., Banisi, S., 2011. Optimization of the performance of flotation circuits using a genetic algorithm oriented by process-based rules. *International Journal of Mineral Processing* 98, pp. 174–181.
82. Gonzalez, G.D., Orchard, M., Cerda, J.L., Casali, A., Vallebuona, G., 2003. Local models for soft-sensors in a rougher flotation bank. *Minerals Engineering* 16, pp. 441–453
83. Gorain, B.K., Franzidis J.-P., Manlapig E.V., 1999. The empirical prediction of bubble surface area flux in mechanical flotation cells from cell design and operating data. *Minerals Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 309-322
84. Gouws, F.S., Aldrich, C., 1996. Rule-Based Characterization of Industrial Flotation Processes with Inductive Techniques and Genetic Algorithms. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 35, pp. 4119–4127
85. Gui, W., Liu, J., Yang, C., Chen, N., Liao, X., 2013. Color co-occurrence matrix based froth image texture extraction for mineral flotation. *Minerals Engineering* 46–47, pp. 60–67
86. Gui, W., Chen, Z., He, M., Yang, C., 2014. Soft Sensor of Sulfur Flotation Froth Level Based on Relevance Vector Machine. *Control Engineering of China* 21 (1), pp. 1–4
87. Gupta, S., Liu, P.-H., Svoronos, S.A., Sharma, R., Abdel-Khalek, N.A., Cheng, Y., El-Shall, H. 1999. Hybrid first-principles/neural networks model for column flotation. *AIChE Journal* 45 (3), pp. 557–566
88. Gupta, A., Yan, D.S, 2006. *Mineral processing design and operation*. First edition, Chapter 18, pp. 622–671

89. Guria, C., Verma, M., Mehrotra, S.P., Gupta, S.K., 2005a. Multi-objective optimal synthesis and design of froth flotation circuits for mineral processing, using the jumping gene adaptation of genetic algorithm. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 44 (8), pp. 2621–2633
90. Guria, C., Verma, M., Gupta, S.K., Mehrotra, S.P., 2005b. Simultaneous optimization of the performance of flotation circuits and their simplification using the jumping gene adaptations of genetic algorithm. *International Journal of Mineral Processing* 77, pp. 165–185.
91. Guria, C., Varma, M., Mehrotra, S.P., Gupta, S.K., 2006. Simultaneous optimization of the performance of flotation circuits and their simplification using the jumping gene adaptations of genetic algorithm-II: More complex problems. *International Journal of Mineral Processing* 79, pp. 149–166.
92. Haiyang, Z., Yali, K., Guanghui, W., Li, J., 2014. Soft Sensor Model for Coal Slurry Ash Content Based on Image grey characteristics. *International Journal of Coal Preparation & Utilization* 34 (1), pp. 24–37.
93. Hales, L.B., Ynchausti, R.A., Salmon, D.F., 1999. Image Analysis of Froth for Improved Flotation. In: *Proceedings of the Symposium "Advances in Flotation Technology"*, SME Annual Meeting, March 1-3, Denver, Colorado, pp. 425 – 432
94. Harris, C.C., 1978. Multiphase models of flotation machine behaviour. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 5, Iss. 2, pp. 107–129
95. Harris, M.C., Runge, K.C., Whiten, W.J., Morrison, R.D., 2002. JKSimFloat as a practical tool for flotation process design and optimization. *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*, Vol. 1 (Edited by A.L. Mular, D.N. Halbe and D.J. Barrat), pp. 461–478
96. Hay, M.P., 2008. Optimising froth condition and recovery for a nickel ore, *Minerals Engineering* 21, pp. 861–872
97. He, M., Yang, C., Wang, X., Gui, W., Wei, L., 2013a. Nonparametric density estimation of froth colour texture distribution for monitoring sulphur flotation process. *Minerals Engineering* 53, pp. 203–212
98. He, M., Yang, C., Wang, X., Gui, W., 2013b. Performance recognition of sulfur flotation based on fuzzy support vector machine. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* 23 (12), pp. 3478–3483 (In Chinese)
99. Heaton, J., 2008. *Introduction to Neural Networks with Java*. Heaton Research, Inc, 2nd edition, 440p.
100. Herbst, J.A., Harris, M.C., 2007. Modeling and simulation of industrial flotation processes. *Froth Flotation: A Century of Innovation* (Edited by M.C. Fuerstenau, G.J. Jameson, R.H. Yoon), Publisher: SME, pp. 757–777.
101. Herbst J. A., Flintoff B., 2012, *Recent Advances in Modeling, Simulation, and Control of Mineral Processing Operations*. In: *Separation Technologies for minerals, coal and earth resources* (Edited by C.A Young and G.H. Luttrell), SME, pp. 667–680.
102. Hernáinz, F., Calero, M., 1996. Flotation rate of celestite and calcite. *Chemical Engineering Science*, Vol. 51, No. 1, pp. 119–125
103. Hernáinz, F., Calero, M., 2001. Froth flotation: kinetic models based on chemical analogy. *Chemical Engineering and Processing* 40, pp. 269–275
104. Hirajima, T., Oshima, K., Tsunekawa, M., Otsuka, Y., Kubo, S., Imai, T., 1996. Fuzzy Control of Column Flotation at Toyoha Mines. *Journal- Mining and Materials Processing Institute of Japan* 112 (3) pp. 161–166
105. Hodouin, D., Flament, F., Bazin, C., 1993. Predictive control of flotation plants. In: *Emerging Computer Techniques for the Minerals Industry*, (Edited by: B.J. Scheiner, D.A. Stanley and C.L. Karr), Publisher: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, Colorado, pp. 3–12.
106. Hodouin, D., Bazin C., Gagnon, E., Flament F., 2000. Feedforward–feedback predictive control of a simulated flotation bank. *Powder Technology* 108, pp. 173–179
107. Hodouin, D., Jämsä-Jounela, S.-L., Carvalho, M.T., Bergh L., 2001. State of the art and challenges in mineral processing control. *Control Engineering Practice* 9, pp. 995–1005
108. Hodouin, D., 2011. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants. *Journal of Process Control* 21, pp. 211–225
109. Holkar, K.S., Waghmare, L.M., 2010. An Overview of Model Predictive Control. *International Journal of Control and Automation*, Vol. 3 No. 4, pp. 47–63

110. Holtham, P.N., Nguyen, K.K., 2002. On-line analysis of froth surface in coal and mineral flotation using JKFrothCam. *International Journal of Mineral Processing* Vol. 64, No. 3-4, pp.163–180
111. Horning N., 2010. Random Forests: An algorithm for image classification and generation of continuous fields data sets. In: *Proceeding of the 5th International Conference on Geoinformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences (GIS-IDEAS)*, 9–11 December, Hanoi, Vietnam, pp. 93–98.
112. Hosseini, M.R., Haji Amin Shirazi, H., Massinaei, M., Mehrshad, N., 2015. Modeling the Relationship between Froth Bubble Size and Flotation Performance Using Image Analysis and Neural Networks. *Chemical Engineering Communications* 202 (7), pp. 911–919
113. Hu, W., Hadler, K., Neethling, S.J., Cilliers, J.J., 2013. Determining flotation circuit layout using genetic algorithms with pulp and froth models. *Chemical Engineering Science* 102, pp. 32–41
114. Huang, Y., Lan, Y., Thomson, S.J., Fang, A., Hoffmann, W.C, Lacey, R.E., 2010. Development of soft computing and applications in agricultural and biological engineering. *Computers and Electronics in Agriculture* 71, pp 107–127
115. Hyötyniemi, H., Ylinen, R., Miettunen, J., 2000. AI in practice: case study on a flotation plant. In *Proceedings entitled: STeP 2000 – Millennium of Artificial Intelligence*, Vol. 2: "AI of Today", The 9th Finnish Artificial Intelligence Conference, Helsinki, University of Technology, Espoo, 28-30 August, pp. 159–166
116. Iorio, A.S., Smith, V.C., Brereton-Stiles, P.J., Singh, A., 2003. Mintek's advanced optimisation control strategies in milling, flotation and smelting. *Proceedings of the First African Control Conference*, 3-5 December 2003, University of Cape Town, South Africa, pp. 492–497.
117. Jahedsaravani, A., Marhaban, M.H., Massinaei, M., 2014a. Prediction of the metallurgical performances of a batch flotation system by image analysis and neural networks. *Minerals Engineering* 69, pp. 137–145
118. Jahedsaravani, A., Mehrshad, N., Massinaei, M., 2014b. Fuzzy-based modeling and control of an industrial flotation column. *Chemical Engineering Communications* 201 (7) pp. 896–908
119. Jahedsaravani, A., Marhaban, M.H., Massinaei, M., 2016. Application of statistical and intelligent techniques for modeling of metallurgical performance of a batch flotation process. *Chemical Engineering Communications*, Article in press, DOI: 10.1080/00986445.2014.973944
120. Jain, S. 2013. Design and Simulation of Fuzzy Implication Function of Fuzzy System Using Two Stage CMOS Operational Amplifier. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJTCAS)* 7 (2), pp. 150-155
121. Jakhu, M.R., 1998. Process Control in Flotation Plants. In: *Froth Flotation: Recent Trends*, Jamshedpur, September 22-24, pp.79–102
122. Jämsä-Jounela S.-L., Poikonen, R., Vatanski, N., Rantala, A., 2003. Evaluation of control performance: methods, monitoring tool and applications in a flotation plant. *Minerals Engineering* 16 pp. 1069–1074
123. Jeanmeure, L.F.C., Zimmermann, W.B.J., 1998. A CNN video based control system for a coal froth flotation. In: *Proceedings of 5th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications*, 14-17 April, London, UK, pp. 192–197
124. Jonas, R.K., Craw, I.A., 2012. Paradigm shift in Advanced Control in Mining. In: *Separation technologies for minerals, coal and earth resources*, (Edited by C.A. Young and G.H. Luttrell), Publisher: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, pp. 681–687.
125. Jorjani, E., Mesroghli, Sh., Chehreh Chelgani, S., 2008. Prediction of operational parameters effect on coal flotation using artificial neural network. *Journal of University of Science and Technology Beijing* 15 (5), pp. 528–533
126. Jorjani, E., Asadollahi Poorali, H., Sam, A., Chehreh Chelgani, S., Mesroghli, Sh., Shayestehfar, M.R., 2009. Prediction of coal response to froth flotation based on coal analysis using regression and artificial neural network. *Minerals Engineering* 22 pp. 970–976
127. Kaartinen, J., Hätönen, J., Hyötyniemi, H., Miettunen, J., 2006. Machine-vision-based control of zinc flotation – A case study. *Control Engineering Practice* 14, pp. 1455–1466
128. Kaartinen J., 2009, Machine vision in measurement and control of mineral concentration process. PhD Thesis, Helsinki University of Technology, 138 p.
129. Kalinowski K., Kaula R., 2013. Verification of flotation kinetics model for triangular distribution of density function of flotability of coal particles, *Archives of Mining Sciences* 58 (4), pp. 1279-1287.

130. Kalyani, V.K., Pallavika, Chaudhuri, S., Gouri Charan, T., Haldar, D.D., Kamal, K.P., Badhe, Y.P., Tambe, S.S., Kulkarni, B.D., 2008. Study of a laboratory-scale froth flotation process using artificial neural networks. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review* 29, pp. 130–142
131. Kämpjärvi, P., Jämsä-Jounela, S.-L., 2003. Level control strategies for flotation cells. *Minerals Engineering* 16, pp. 1061–1068
132. Karhu, L., Rantanen, S., Karhu, L., 1992. User's experience of Outokumpu expert system at Outokumpu plants. *Powder Technology* 69, pp. 61–67
133. Karimi, M., Akdogan, G., Bradshaw, S.M., 2014a. A computational fluid dynamics model for the flotation rate constant, Part I: Model development. *Minerals Engineering* 69, pp. 214–222
134. Karimi, M., Akdogan, G., Bradshaw, S.M., 2014b. A CFD-kinetic model for the flotation rate constant, Part II: Model validation. *Minerals Engineering* 69, pp. 205–213
135. Karr, C.L., 1999. *Practical Applications of Computational Intelligence for Adaptive Control*. CRC Press, Inc, Boca Raton, Florida, USA, 280 p.
136. Karr, C.L., Scheiner, B.J., 2000. Optimizing, adaptive process control for phosphate flotation – final report. Publication No. 02-123-165, Florida Institute of Phosphate Research, USA, 44 p.
137. Karray, F., De Silva, C., 2004. *Soft Computing and Intelligent Systems Design*. Publisher: Pearson Education, 560 p.
138. Kaur, A., Kaur, A., 2012. Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Air Conditioning System. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)* 2 (2), pp. 323–325
139. Kelsall, D.F., 1961. Application of probability in the assessment of flotation systems. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Vol. 70, pp. 191–204
140. King, R.P., 2001. *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Publisher: Butterworth-Heinemann, Oxford, Great Britain, ISBN 0 7506 4884 8, 403 p.
141. Kirjavainen, V.M., 1989. Application of a probability model for the entrainment of hydrophilic particles in froth flotation, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 27, Iss. 1-2, pp. 63–74
142. Kistner, M., Jemwa, G.T., Aldrich, C., 2013. Monitoring of mineral processing systems by using textural image Analysis. *Minerals Engineering* 52, pp. 169–177
143. Knights, B.D.H., Satyro, J.C., Dias, R.A., Araújo Freitas, A.C. de, 2012. Performance improvements provided by Mintek's FloatStar™ advanced control system on reverse flotation of iron ore. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 112, March 2012, pp. 203–209
144. Koh, P.T.L., Schwarz, M.P., 2006. CFD modelling of bubble–particle attachments in flotation cells. *Minerals Engineering* 19, pp. 619–626
145. Koh, P.T.L., Schwarz, M.P., 2008. Modelling attachment rates of multi-sized bubbles with particles in a flotation cell. *Minerals Engineering* 21, pp. 989–993
146. Kostović, M., Gligorić, Z. 2015. Multi-criteria decision making for collector selection in the flotation of lead–zinc sulfide ore. *Minerals Engineering* 74, pp. 142–149
147. Kuopanportti, H., Suorsa, T., Dahl, O., Niimimäki, J., 2000. A model of conditioning in the flotation of a mixture of pyrite and chalcopyrite ores. *International Journal of Mineral Processing* 59, pp. 327–338
148. Labidi, J., Pèlach, M.À., Turon, X., Mutjé, P., 2007. Predicting flotation efficiency using neural networks. *Chemical Engineering and Processing* 46, pp. 314–322
149. Landau, I.D., Lozano, R., M'Saad, M., Karimi, A., 2011. *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*, Springer, 590 p.
150. Laurila, H., Karesvuori, J., Tiili, O., 2002. Strategies for Instrumentation and Control of Flotation Circuits. *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*, Vol. 2 (Edited by A.L. Mular, D.N. Halbe and D.J. Barrat), pp. 2174–2195
151. Leiviskä, K., 2001a. Basics of Soft Computing Methods. In: *Industrial Applications of Soft Computing: Paper, Mineral and Metal Processing Industries* (Edited by K. Leiviskä), Publisher: Physica-Verlag, pp. 3–22
152. Leiviskä, K., 2001b. Soft Computing Applications in Mineral and Metal Industries. In: *Industrial Applications of Soft Computing: Paper, Mineral and Metal Processing Industries* (Edited by K. Leiviskä), Publisher: Physica-Verlag, pp. 23–34
153. Leondes, C.T., 2001. Preface in *Expert Systems, Six-Volume Set: The Technology of Knowledge Management and Decision Making for the 21st Century*, (Edited by C.T. Leondes), Publisher: Academic Press, 1947 p.

154. Leng, Y., Wane, Y., Gui, W., Yang, C., 2010. Quality prediction for flotation column based on DEPSO and RBF. In Proceedings of: 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 7-9 July, Jinan, China, pp. 3291–3295
155. Li, X., McKee, D.J., Horberry, T., Powell, M.S., 2011. The control room operator: The forgotten element in mineral process control. *Minerals Engineering* 24, pp. 894–902
156. Li, J.-W., Sun, C.-Y., Yin, W.-Z., Yuan, C., 2012. Effect of Particle Size on Galena Flotation Kinetics Using Fuzzy Logic. *Journal of North-eastern University(Natural Science)* 33 (2), pp. 279–283
157. Li, Y., Zhao, W., Gui, X., Zhang, X., 2013a. Flotation kinetics and separation selectivity of coal size fractions. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 49 (2), pp. 387–395
158. Li, H., Chai, T., Fu, J., Wang, H., 2013b. Adaptive Decoupling Control of Pulp Levels in Flotation Cells. *Asian Journal of Control* 15 (5), pp. 1434–1447
159. Liao, Y., Liu, J., Wang, Y., Cao, Y., 2011. Simulating a fuzzy level controller for flotation columns. *Mining Science and Technology (China)* 21 pp. 815–818
160. Lin, B., Recke, B., Knudsen, J.K.H., Jørgensen, S.B., 2008. Bubble size estimation for flotation processes. *Minerals Engineering* 21, pp. 539–548
161. Liu, J.J., MacGregor, J.F., Duchesne, C., Bartolacci, G., 2005. Flotation froth monitoring using multiresolutional multivariate image analysis. *Minerals Engineering* 18, pp. 65–76
162. Liu, J., Liu, H., Shen, W., Xu, Y., Yang, S., 2006. A Fuzzy PID Controller for Controlling Flotation De-inking Column. Proceedings of International Conference on Intelligent Computing (ICIC 2006), Kunming, China, pp. 90–95
163. Liu, J.J., MacGregor, J.F., 2008. Froth-based modeling and control of flotation processes. *Minerals Engineering* 21 pp. 642–651
164. Liu, L., Ding, Y.-G., Ji, J., 2012. Study on gas holdup of collection zone in packed flotation column based on Artificial Neural Network. *Industrial Minerals and Processing* 2, pp. 1–3
165. Liu, J., Gui, W., Tang, Z., Yang, C., Zhu, J., Li, J., 2013. Recognition of the operational statuses of reagent addition using dynamic bubble size distribution in copper flotation process. *Minerals Engineering* 45, pp. 128–141
166. Lombardi, J., Muhamad, N., Weidenbach, M., 2012. Flotation process control optimisation at Prominent Hill. *The AusIMM Bulletin, Journal of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy* No. 1 February 2012, pp. 58–64
167. Lundh, M., Gaulocher, S., Pettersson, J., Lindvall, H., Gallestey, E., 2009. Model Predictive Control for Flotation Plants. In: *Process control applications in mining and metallurgical plants (Proceedings of 48th Annual Conference of Metallurgists COM 2009)*, August 26-29, Sudbury, ON, Canada, pp. 121–130
168. Lynch A.J., Johnson N.W., Manlapig E.V., Thorne C.G., 1981. *Mineral and Coal Flotation Circuits - Their simulation and Control*, Publisher: Elsevier, 290 p.
169. Maldonado, M., Sbarbaro, D., Lizama, E., 2007. Optimal control of a rougher flotation process based on dynamic programming. *Minerals Engineering* 20, pp. 221–232
170. Maldonado, M.A., 2010. *Advances in estimation and control for flotation columns*. PhD Thesis, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, Canada, 175 p.
171. Man, K.F., Tang, K.S., Kwong, S., 1996. Genetic Algorithms: Concepts and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 43 (5), pp. 519–534
172. Mantsho, S. M., Moswate, P., Strobos, P., Phillpotts, D., 2013. The Implementation of FloatStar Grade-Recovery Optimisation Control Solutions using Blue Cube Online Grade Analysers on Industrial Flotation Circuits. Proceedings of Metallurgical Plant Design and Operating Strategies (MetPlant 2013), 15-17 July, Perth WA, pp. 575–582
173. Marais, C., 2010. Estimation of concentrate grade in platinum flotation based on froth image analysis. MSc Thesis, University of Stellenbosch, South Africa, p. 81
174. Marais, C., Aldrich C., 2011a. The estimation of platinum flotation grade from froth image features by using artificial neural networks. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 111, pp. 81–85
175. Marais, C., Aldrich C., 2011b. Estimation of platinum flotation grades from froth image data. *Minerals Engineering* 24, pp.433–441
176. Massinaei, M., Doostmohammadi, R., 2010. Modeling of bubble surface area flux in an industrial rougher column using artificial neural network and statistical techniques. *Minerals Engineering* 23, pp. 83–90

177. Massinaei, M., Falaghi, H., Izadi, H., 2011. Optimization of an Industrial Flotation Column Performance using GSA: Gravitational Search Algorithm. 22nd World Mining Congress, 11-16 September, Istanbul, Turkey, pp. 251–255.
178. Massinaei, M., Falaghi, H., Izadi, H., 2013. Optimisation of metallurgical performance of industrial flotation column using neural network and gravitational search algorithm. *Canadian Metallurgical Quarterly* 52 (2), pp. 115–122
179. Massinaei, M., Sedaghati, M.R., Rezvani, R., Mohammadzadeh, A.A. 2014. Using data mining to assess and model the metallurgical efficiency of a copper concentrator. *Chemical Engineering Communications* 201 (10), pp. 1314–1326
180. Mendez, D.A., Gálvez, E.D., Cisternas, L.A., 2009. State of the art in the conceptual design of flotation circuits. *International Journal of Mineral Processing* 90, pp. 1–15
181. Mendoça, L.F., Vieira, S.M., Sousa, J.M.C., 2007. Decision tree search methods in fuzzy modeling and classification. *International Journal of Approximate Reasoning* 44, pp. 106–123
182. Mihajlović, I., 2014. Razvoj algoritma za selekciju adekvatnog modela procesa na osnovu strukture ulaznih podataka. Doktorska disertacija, Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, 117 str.
183. Milošević, S., 1994. Flotacijska koncentracija – Teorijske osnove flotiranja. Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Bor, 211 str.
184. Miljanović I., 2008a. Računarski integrisani sistemi za podršku odlučivanju i upravljanju u PMS, zasnovani na fuzzy logici. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 154 str.
185. Miljanović, I., 2008b. Fazi logičko upravljanje procesima u pripremi mineralnih sirovina. Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, ISBN 86-7352-199-2, 161 p.
186. Mikkili, S., Panda, A.K., 2014. Real-Time Implementation of Type-2 FLC–Based Shunt Active Filter Control Strategies (p–q and Id–Iq) with Different Fuzzy MFs for Power Quality Improvement. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 15 (3), pp. 217–236
187. Mitchell, M., 1998. An Introduction to Genetic Algorithms. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 221p.
188. Mohammed, A.A., 2007. Removal of Emulsified Paraffine from Water: Effect of Bubble Size and Particle Size on Kinetic of Flotation, *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, Vol.8, No.3, pp. 1-5
189. Mohanty, S., 2009. Artificial neural network based system identification and model predictive control of a flotation column. *Journal of Process Control* 19, pp. 991–999
190. Moolman, D.W., Aldrich, C., Van Deventer, J.S.J., Stange, W.W., 1994. Digital image processing as a tool for on-line monitoring of froth in flotation plants. *Minerals Engineering* 7 (9), pp. 1149–1164
191. Moolman, D.W., Aldrich, C., Van Deventer, J.S.J., Bradshaw, D.J., 1995a. The interpretation of flotation froth surfaces by using digital image analysis and neural networks. *Chemical Engineering Science* 50 (22), pp. 3501–3513
192. Moolman, D.W., Aldrich, C., Van Deventer, J.S.J., 1995b. The analysis of videographic process data with neural nets. *Acta Chimica Slovenica* 42 (1), pp. 137–142.
193. Moolman, D.W., Aldrich, C., Van Deventer, J.S.J., Stange, W.W., 1995c. The classification of froth structures in a copper flotation plant by means of a neural net. *International Journal of Mineral Processing* 43, pp. 193–208
194. Moolman, D.W., Aldrich, C., Van Deventer, J.S.J., 1995d. The monitoring of froth surfaces on industrial flotation plants using connectionist image processing techniques. *Minerals Engineering* 8 (1/2), pp. 23–30
195. Moolman, D.W., Aldrich, C., Schmitz, G.P.J., Van Deventer, J.S.J., 1996a. The interrelationship between surface froth characteristics and industrial flotation performance. *Minerals Engineering* 9 (8), pp. 837–854
196. Moolman, D.W., Eksteen, J.J., Aldrich, C., Deventer, J.S.J. van, 1996b. The significance of flotation froth appearance for machine vision control. *International Journal of Mineral Processing* 48, pp. 135–158
197. Morar, S.H., 2010. The use of machine vision to describe and evaluate froth phase behaviour and performance in mineral flotation systems. PhD Thesis, University of Cape Town, p. 311
198. Morar, S.H., Harris, M.C., Bradshaw, D.J., 2012. The use of machine vision to predict flotation performance. *Minerals Engineering* 36–38, pp. 31–36

199. Muller D., De Villiers P.G.R., Humphries G., 2010. A Holistic Approach to Flotation Mass Pull and Grade Control. IFAC MMM 2010, 13th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Cape Town, South Africa, pp. 133–136
200. Muñoz, C., Cipriano, A., 1999. An integrated system for supervision and economic optimal control of mineral processing plants. *Minerals Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 627–643
201. Murthy, S., Kasif, S., Salzberg, S., Beigel, R., 1993. OC1: A Randomized Induction of Oblique Decision Trees. Proceedings of the 11th national conference on artificial intelligence AAAI-93, pp. 322–327
202. Nagendra, S., Jestin, D., Grūdal, Z., Haftka, R.T., Watson, L.T., 1996. Improved genetic algorithm for the design of stiffened composite panels. *Computers & Structures* 58 (3) pp. 543–555
203. Nakhaei, F., Mosavi, M.R., Sam, A., Vaghei, Y., 2012. Recovery and grade accurate prediction of pilot plant flotation column concentrate: Neural network and statistical techniques. *International Journal of Mineral Processing* 110–111 pp. 140–154
204. Nakhaei, F., Sam, A., Mosavi, M.R., 2013a. Concentrate Grade Prediction in an Industrial Flotation Column using the Artificial Neural Network. *Arabian Journal for Science and Engineering* 38 (5), pp.1011–1023
205. Nakhaei, F., Mosavi, M.R., Sam, A., 2013b. Recovery and grade prediction of pilot plant flotation column concentrate by a hybrid neural genetic algorithm. *International Journal of Mining Science and Technology* 23, pp. 69–77
206. Nakhaei, F., Irannajad, M., 2013a. Comparison between neural networks and multiple regression methods in metallurgical performance modeling of flotation column. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 49 (1), pp. 255–266
207. Nakhaei, F., Irannajad, M., 2013b. Forecasting grade and recovery of flotation column concentrate using radial basis function and layer recurrent neural networks. *AWERProcedia Information Technology & Computer Science*, Vol 04, pp. 454–473
208. Narayanan, R.G., 2010. Expert System Applications in Sheet Metal Forming. Chapter 6 in *Expert Systems* (Edited by P. Vizureanu), Publisher: InTech, pp. 91–116
209. Natarajan, R., Nirdosh, I., 2006. A Comparative Study of Kinetics of Flotation of a Copper-Nickel Ore by N-Hydrocinnamoyl-N-Phenylhydroxylamine (HCNPHA) Vis-À-Vis Potassium Amyl Xanthate (PAX). Proceedings of the International Seminar on Mineral Processing Technology, Chennai, India, pp. 236 – 242
210. Nguyen, A.V., Ralston, J., Schulze, H.J., 1998. On modelling of bubble–particle attachment probability in flotation. *International Journal of Mineral Processing* 53, pp. 225–249
211. Nguyen A.V., 1998. Particle–bubble encounter probability with mobile bubble surfaces. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 55, Iss. 2, pp. 73–86
212. Núñez, F., Cipriano, A., 2009. Visual information model based predictor for froth speed control in flotation process. *Minerals Engineering* Vol. 22, No. 4, Visio pp. 366–371
213. Núñez, F., Tapia, L., Cipriano, A., 2010. Hierarchical hybrid fuzzy strategy for column flotation control. *Minerals Engineering* 23, pp. 117–124
214. Ofori, P., O’Brien, G., Hapugoda, P., Firth, B., 2014. Distributed flotation kinetics models – A new implementation approach for coal flotation. *Minerals Engineering* 66–68, pp. 77–83
215. Oproiu, G., Lacatusu, I., Stoica, L., 2009. Examination of Kinetic Flotation Process for Two Experimental Cu(II) and Ni(II) – α -benzoinoxime Systems, Based on Kinetic Literature Models, *Chemistry Magazine (Revista de Chimie)*, Vol. 60 (6), pp. 641–645
216. Osorio, D., Pérez-Correa, J.R., Cipriano, A., 1999. Assessment of expert fuzzy controllers for conventional flotation plants. *Minerals Engineering*, Vol. 12, No. 11, pp. 1327–1338
217. Pauck, W.J., 2011. Neural network modelling and prediction of the flotation deinking behaviour of complex recycled paper mixes. PhD Thesis, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa, 210p.
218. Pérez, R., del Villar, R., Flament, F., 1993. Level detection in a flotation column using an artificial neural network. Proceedings of the XXIV APCOM Conference, Montréal, Canada, pp. 174–181
219. Perez R., del Villar, R., 1997. Estimation of bias and entrainment in flotation columns using conductivity measurements. *Canadian Metallurgical Quarterly* 36 (5), pp. 299–307
220. Pérez-Correa, R., González, G., Casali, A., Cipriano, A., Barrer, R., Zavala, E., 1998. Dynamic modelling and advanced multivariable control of conventional flotation circuits. *Minerals Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 333–346

221. Pirouzan, D., Yahyaei, M., Banisi, S., 2014. Pareto based optimization of flotation cells configuration using an oriented genetic algorithm. *International Journal of Mineral Processing* 126, pp. 107–116
222. Pitt, J.C., 1968. The development of system for continuous optimal control of flotation plants. In: *Computer Systems Dynamics and Automatic Control in Basic Industries*, I.F.R.C Symposium, Sydney, pp. 165-171.
223. Poirier, P.J., Meech, J.A., 1993. Using Fuzzy Logic for On-line Trend Analysis. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Control Applications*, 13–16 September, Vancouver, Canada, pp. 83–86
224. Poirier, P.J., 1995. Development of a real-time advisory expert system as a training tool for copper flotation operators. MSc Thesis, University of British Columbia, 141 p.
225. Polat, M., Chander, S., 2000. First-order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constants. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 58, pp. 145–166
226. Preez, N.B. du, Crundwell, F.K., Knights, B.D.H., 2013. Flotation of PGM-containing minerals: Plant-wide regression and prediction of circuit performance. *Minerals Engineering* 54, pp. 116–123
227. Qin, S.J., Badgwell, T.A., 2003. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice* 11, pp. 733–764
228. Quinlan, J. R., 1986. Induction of Decision Trees. *Machine Learning* 1 (1), pp. 81–106
229. Quinlan, J.R., 1993. *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers, 302p.
230. Rahman, R.M., Ata, S., Jameson, G.J., 2012. The effect of flotation variables on the recovery of different particle size fractions in the froth and the pulp, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 106–109, pp. 70–77
231. Raj, K.J., Sathya, S.S., 2013. SVM and Random Forest Classification of Satellite Image with NDVI as an Additional Attribute to the Dataset. In *proceedings of the Third International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2013)*, Vol.1, december 26–28, Roorkee, India, pp. 95–108
232. Ralston J., 1992. The influence of particle size and contact angle in flotation, in: *Colloid Chemistry in Mineral Processing*, J.S. Laskowski i J. Ralston (eds.), *Development in Mineral Processing*, D.W. Fuerstenau (ed.), Vol. 12, Chap. 6, 203–224.
233. Rath, S.S., Sahoo, H., Das, B., 2013. Optimization of flotation variables for the recovery of hematite particles from BHQ ore. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 20, No. 7, pp. 605-611
234. Remes, A., Saloheimo, K., Jämsä-Jounela, S.-L., 2007. Effect of speed and accuracy of on-line elemental analysis on flotation control performance. *Minerals Engineering* 20, pp. 1055–1066
235. Ren, C., Yang, J., Liang, C., 2015. Estimation of copper concentrate grade based on color features and least-squares support vector regression. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 51(1) pp. 163–172
236. Ritika, 2014. Research on Data Mining Classification. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering* 4 (4), pp. 329–332
237. Rojas, D., Cáceres, J., Cipriano, A., 2009. Multivariable expert fuzzy control for a rougher flotation circuit, considering grade estimation in intermediate cells. In: *Proceedings of the IFAC Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industry*, 14–16 October, Viña del Mar, Chile, pp. 96–100
238. Rojas, D., Cipriano, A., 2011. Model based predictive control of a rougher flotation circuit considering grade estimation in intermediate cells. *Dyna* Vol.78, No.166, pp. 29–37
239. Rokach, L., Maimon, O., 2010. Decision trees. Chapter 9 in *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook* (Edited by O. Maimon and L. Rokach), Springer, pp.165–192
240. Rughooputh, H.C.S., Rughooputh, S.D.D.V., 2002. Neural network process vision systems for flotation process. *Kybernetes* 31 (3/4), pp. 529–535
241. Runge, K.C., Franzidis J.P., Manlapig, E.V., 2003a. A study of the flotation characteristics of different mineralogical classes in different streams of an industrial circuit. *Proceedings of XXII International Mineral Processing Congress*, 29 September – 3 October, Cape Town, South Africa, pp. 962-972
242. Runge, K.C., Franzidis J.P., Manlapig, E.V., Harris, M.C., 2003b. Structuring a flotation model for robust prediction of flotation circuit performance. *Proceedings of XXII International Mineral Processing Congress*, 29 September – 3 October, Cape Town, South Africa, pp. 973–984

243. Sadr-Kazemi, N., Cilliers, J.J., 1997. An image processing algorithm for measurement of flotation froth bubble size and shape distributions. *Minerals Engineering*, Vol. 10, No. 10, pp. 1075–1083
244. Saghatoleslami, N., Karimi, H., Rahimi, R., Shirazi, H.H.A., 2004. Modeling of texture and color froth characteristics for evaluation of flotation performance in Sarcheshmeh copper pilot plant using image analysis and neural networks. *International Journal of Engineering Transactions B: Applications*, Vol. 17, No. 2, pp. 121–130
245. Saleh A.M., 2010. A study on the performance of second order models and two phase models in iron ore flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Vol. 44, pp. 215-230
246. Savassi, O.N., Alexander, D.J., Franzidis J.P., Manlapig E.V., 1998. An empirical model for entrainment in industrial flotation plants. *Minerals Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 243-256
247. Sawyerr, F., Deglon, D.A., O'Connor, C.T., 1998. Prediction of bubble size distribution in mechanical flotation cells. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 98 (4), pp. 179-185
248. Sbarbaro, D., Maldonado M., Cipriano, A., 2008. A two level hierarchical control structure for optimizing a rougher flotation circuit. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11, pp. 11018-11022
249. Sbarbaro, R., Villar R. del, 2010. Introduction. In: *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants* (Edited by D. Sbarbaro, R. del Villar), Chapter 1, pp. 1–14
250. Scheiner, B.J, Karr, C.L., Stanley, D.A., 1996. Modeling of the Phosphate Beneficiation Process as a Forerunner to Adaptive Control. Publication No. 02-103-132, Florida Institute of Phosphate Research, USA, 31 p.
251. Schulze, H.J., 1993. Flotation as a heterocoagulation process: Possibilities of calculating the probability of flotation. In: *Coagulation and Flocculation: Theory and Applications* (Edited by B. Dobiáš) pp. 321-353
252. Schulze, H.J., Stöckelhuber W., 2005. Flotation as a Heterocoagulation Process: Possibilities of Calculating the Probability of the Microprocesses, Rupture of the Intervening Thin Liquid Film, and Progress in Modeling of the Overall Process. In: *Coagulation and Flocculation*, (Edited by H. Stechemesser and B. Dobiáš), pp. 455-517
253. Schumann, R., 1942. Flotation Kinetics. Part 1. Methods for Steady-State Study of Flotation Problems. *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 46, pp. 891-902
254. Shahbazi, B., Rezai, B., Chehreh Chelgani, S., Javad Koleini, S.M., Noaparast, M., 2013. Estimation of diameter and surface area flux of bubbles based on operational gas dispersion parameters by using regression and ANFIS. *International Journal of Mining Science and Technology* 23 (3), pp. 343–348
255. Shammas, N.K., Bennett, G.F., 2010. Principles of Air Flotation Technology. In: *Flotation Technology* (Edited by L. K. Wang, N.K. Shammas, W. A. Selke, D. B. Aulenbach), Chapter 1, pp. 1-47
256. Sharad, M., Augustine, C., Panagopoulos, G., Roy, K., 2012. Ultra low energy analog image processing using spin based neurons. In: *Proceedings of 8th ACM/IEEE International Symposium on Nanoscale Architectures "NANOARCH 2012"*, July 4-6, Amsterdam, Netherlands, pp. 211–217
257. Shean, B.J., Cilliers J.J., 2011. A review of froth flotation control. *International Journal of Mineral Processing* 100, pp. 57–71
258. Sheng, C., Wen, J., 2013. ANFIS-Based Level Control System for Flotation Column. In: *Proceedings of 30th Annual International Pittsburgh Coal Conference 2013*, 15-18 September, Beijing, China, pp. 4017–4023.
259. Sherrell, I.M., 2004. Development of a Flotation Rate Equation from First Principles under Turbulent Flow Conditions. PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 95 p.
260. Singh, A., Louw, J.J., Hulbert, D.G., 2003. Flotation stabilization and optimization. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, November 2003, pp. 581–588
261. Sivanandam, S.N., Sumathi, S., Deepa, S.N., 2007. *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*, Springer, 430 p.
262. Smith, G.C., Singh, A., Smith, V.C., 2005. Advancing comminution and flotation performance with advanced process control. *Proceedings of The Third Southern African Conference on Base Metals: 'Southern Africa's response to changing global base metals market dynamics'*, 26–29 June, Kitwe, Zambia, pp. 201–216

263. Somasundaran, P., Lin, I.J., 1973. Method for Evaluating Flotation Kinetics Parameters. *Transactions of SME*, Vol. 254, pp. 181-184
264. Sosa-Blanco, C., Hodouin, D., Bazin C., Lara-Valenzuela, C., Salazar, J., 1999. Integrated simulation of grinding and flotation. Application to a lead-silver ore, *Minerals Engineering*, Vol. 12, No. 8, pp. 949-967
265. Sripriya, R., Rao, P.V.T., Choudhury, B.R., 2003. Optimisation of operating variables of fine coal flotation using a combination of modified flotation parameters and statistical techniques. *International Journal of Mineral Processing* 68, pp. 109–127
266. Suganyadevi, M.V., Babulal, C.K., 2014. Fast Assessment of Voltage Stability Margin of a Power System. *Journal of Electrical Systems* 10 (3) pp. 305-316
267. Suichies, M., Leroux, D., Dechert, C., Trusiak, A., 2000. An implementation of generalized predictive control in a flotation plant. *Control Engineering Practice* 8, pp. 319–325
268. Supomo, A., Yap, E., Zheng, X., Banini, G., Mosher, J., Partanen, A., 2008. PT Freeport Indonesia's mass-pull control strategy for rougher flotation. *Minerals Engineering* 21, pp. 808–816
269. Tahmasebi, P., Hezarkhani, A., 2012. A hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic algorithm for grade estimation. *Computers & Geosciences* 42, pp. 18–27
270. Thwaites, P., 2007. Process Control in metallurgical plants – From an Xstrata perspective. *Annual Reviews in Control* 31, pp. 221–239
271. Tian, M.-L., Yang, J.-M., 2014. Improved Extraction Algorithm of Outside Dividing Lines in Watershed Segmentation Based on PSO Algorithm for Froth Image of Coal Flotation. *Journal of Multimedia* 9 (2), pp. 325–332,
272. Tsatouhas, G., Grano, S.R., Vera M., 2006. Case studies on the performance and characterisation of the froth phase in industrial flotation circuits. *Minerals Engineering* 19, pp. 774–783
273. Turban, E., 1992. *Expert Systems and Applied Artificial Intelligence*. Publisher: Macmillan USA, 720p.
274. Turban, E., 1995. *Decision Support and Expert Systems: Management Support Systems*, Publisher: Prentice-Hall, 930 p.
275. Uçurum, M., Bayat, O., 2007. Effects of operating variables on modified flotation parameters in the mineral separation. *Separation and Purification Technology* 55, pp. 173–181
276. Uusi-Hallila, S.J., 2014. Utilizing froth phase behaviour and machine vision to indicate flotation performance. MSc Thesis, University of Oulu Faculty of Technology, p.85
277. Van Schaikwyk T., 2002. *Multivariable Control of a Rougher Flotation Cell*. MSc Thesis, University of Cape Town, 172 p.
278. Vasseghian, Y., Heidari, N., Ahmadi, M., Zahedi, G., Mohsenipour, A.A., 2014. Simultaneous ash and sulfur removal from bitumen: Experiments and neural network modeling. *Fuel Processing Technology* 125, pp. 79–85
279. Vera M.A., Mathe, Z.T., Franzidis, J.-P., Harris, M.C., Manlapig, E.V., O'Connor, C.T., 2002. The modelling of froth zone recovery in batch and continuously operated laboratory flotation cells. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 64 pp. 135–151
280. Vieira, S.M., Sousa, J.M.C., Durão, F.O., 2004. Combination of fuzzy identification algorithms applied to a column flotation process. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2004)*, July 25-29, Budapest, Hungary. pp. 421–426.
281. Vieira, S.M., Sousa, J.M.C., Durão, F.O., 2005a. Fuzzy modelling strategies applied to a column flotation process. *Minerals Engineering* 18, pp. 725–729
282. Vieira, S.M., Sousa, J.M.C., Durão, F.O., 2005b. Fuzzy predictive control of a column flotation process. In: *Proceedings of 16th International Federation of Automatic Control World Congress*, July 4-8, Prague, Czech Republic, paper code: Tu-M03-TP/13
283. Vieira, S.M., Sousa, J.M.C., Durão, F.O., 2005c. Fuzzy predictive filters applied to predictive control of a column flotation process. In: *Proceedings of 11th International Fuzzy Systems Association World Congress*, July 28-31, Beijing, China, pp. 818–823
284. Vieira, S.M., Sousa, J.M.C., Durão, F.O., 2007. Real-Time Fuzzy Predictive Control of a Column Flotation Process. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2007)*, July 23-26, London, UK, pp. 1–6
285. Wang, J.-S., Zhang, Y., 2006. Application of the soft sensing model based on the adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) to the flotation process. *Journal of Hefei University of Technology* 29 (11), pp. 1365–1369

286. Wang, J.-S., Han, S., Shen, N.-N., 2013. Echo state network fusion soft sensing model of flotation process based on glowworm swarm optimization algorithm. *ICIC Express Letters Part B: Applications*, 4 (3), pp. 519–524
287. Wang, J.-S., Han, S., Shen, N.-N., Li, S.-X., 2014a. Features Extraction of Flotation Froth Images and BP Neural Network Soft-Sensor Model of Concentrate Grade Optimized by Shuffled Cuckoo Searching Algorithm. *The Scientific World Journal (Volume 2014)*, Article ID 208094, 17 pages
288. Wang, J.-S., Han, S., Shen, N.-N., 2014b. Improved GSO Optimized ESN Soft-Sensor Model of Flotation Process Based on Multisource Heterogeneous Information Fusion. *The Scientific World Journal*, Article ID 262368, 12 pages
289. Wang, J.-S., Han, S., 2015. Feed-Forward Neural Network Soft-Sensor Modeling of Flotation Process Based on Particle Swarm Optimization and Gravitational Search Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Article ID 147843, 10 pages
290. Welsby, S.D.D., Vianna, S.M.S.M., Franzidis, J.-P., 2010. Assigning physical significance to floatability components, *International Journal of Mineral Processing* 97, pp. 59–67
291. Wills, B.A., Napier-Munn, T., 2006. *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*, 7th Edition, Publisher: Elsevier Science & Technology Books, 444p.
292. Wong, P.M., Aminzadeh, F., Nikraves, M., 2002. Intelligent Reservoir Characterization. In: *Soft Computing for Reservoir Characterization and Modeling* (Edited by P.Wong, F. Aminzadeh, and M. Nikraves), Springer, pp. 3–14.
293. Woodburn, E.T., 1970. Mathematical modelling of flotation process. *Minerals Science and Engineering*, Vol. 2, pp. 3-17
294. Wright B.A., 1999. *The Development of a Vision-Based Flotation Froth Analysis System*. MSc Thesis, University of Cape Town, 187 p.
295. www.academia.edu/2992850/Fuzzy_data_Exact_data_Exact_queries_Fuzzy_queries
296. www.open.umich.edu/sites/default/files/chemical_process_dynamics_and_controls-book_2.pdf
297. www.slideplayer.com/slide/4008836/
298. Xian-ping, L., Xue-kun, T., Li-ping, H., Li-ying, L., 2011. Effects of size distribution on flotation kinetics of Chalcopyrite. 2011 International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE, Vol.8, (2011) IACSIT Press, Singapore, pp. 81-85
299. Xiaoping, Y., Aldrich, C., 2013. Optimizing control of coal flotation by neuro-immune algorithm. *International Journal of Mining Science and Technology* 23 pp. 407–413
300. Xu, J.-H., 2011. Application of Artificial Neural Network (ANN) for Prediction of Maritime Safety. In: *Proceedings of International Conference, ICCIC 2011: 'Information and Management Engineering'*, Part VI, September 17-18, Wuhan, China, pp. 34–38
301. Xu, C., Gui, W., Yang, C., Zhu, H., Lin, Y., Shi, C., 2012. Flotation process fault detection using output PDF of bubble size distribution. *Minerals Engineering* 26, pp. 5–12
302. Yang, C., Xu, C., Mu, X., Zhou, K., 2009. Bubble size estimation using interfacial morphological information for mineral flotation process monitoring. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 19, pp. 694–699
303. Yang, H., Huang, M., 2010a. A soft sensor based on kernel PCA and composite kernel support vector regression for a flotation circuit. In *Proceedings of: 2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC)*, 27-29 March, Shenyang, China, pp. 375–378
304. Yang, H., Huang, M., 2010b. Prediction Model for Production Indexes of a Flotation Circuit Based on Adaptive PCA and Composite Kernel Support Vector Regression. In *Proceedings of: International Conference on Biomedical Engineering and Computer Science (ICBECS)*, 23-25 April, Wuhan, China, pp. 375–378
305. Yang, F., Sun, W., Hu, Y., 2012. QSAR analysis of selectivity in flotation of chalcopyrite from pyrite for xanthate derivatives: Xanthogen formates and thionocarbamates. *Minerals Engineering* 39, pp. 140–148
306. Yao, X., 1999. Evolving artificial neural networks. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 87, Iss. 9, pp. 1423–1447
307. Yianatos, J.B., 1989. Column flotation: modeling and technology. In *Proceedings of International Colloquium: Developments in Froth Flotation*, Vol. 2, 3-4 August 1989, Cape Town, South Africa, pp. 1-30
308. Yianatos, J.B., Bergh, L.G., Díaz, F., Rodríguez, J., 2005(a). Mixing characteristics of industrial flotation equipment, *Chemical Engineering Science* 60, pp. 2273 – 2282

309. Yianatos, J., Bucarey, R., Larenas, J., Henríquez, F., Torres L., 2005(b). Collection zone kinetic model for industrial flotation columns, *Minerals Engineering* 18, pp.1373–1377
310. Yianatos, J.B., Henríquez, F.D., 2006. Short-cut method for flotation rates modelling of industrial flotation banks, *Minerals Engineering* 19, pp. 1336–1340
311. Yianatos, J.B., Henríquez, F.H., Oroz, A.G., 2006. Characterization of large size flotation cells, *Minerals Engineering* 19, pp. 531–538
312. Yianatos J.B., 2007. Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes columns and mechanically agitated cells - a review. *Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design*, Vol.85 (A12), pp. 1591–1603
313. Yianatos, J., Contreras F., 2010. Particle entrainment model for industrial flotation cells. *Powder Technology* 197, pp. 260–267
314. Yianatos, J., Bergh, L., Vinnett, L., Contreras, F., Díaz, F., 2010. Flotation rate distribution in the collection zone of industrial cells. *Minerals Engineering* 23, pp. 1030–1035
315. Yianatos, J., Carrasco, C., Bergh, L., Vinnett, L., Torres C., 2012. Modelling and simulation of rougher flotation circuits. *International Journal of Mineral Processing* Vol. 112–113, pp. 63–70
316. Yong, Z., Kejun, J., Yukun, W., 2012. Flotation concentrate grade prediction model based on RBF neural network & immune evolution algorithm. In *Proceedings of: 31st Chinese Control Conference*, 25-27 July, Hefei, China, pp. 3319–3323.
317. Yu, K., Leufen, G. Hunsche, M., Noga, G., Chen, X., Bareth, G., 2014. Investigation of Leaf Diseases and Estimation of Chlorophyll Concentration in Seven Barley Varieties Using Fluorescence and Hyperspectral Indices. *Remote Sensing* 6(1), pp. 64-86
318. Zavala, E., Prrez-Correa, R., Muñoz, C., Cipriano, A., 1995. Heuristic and model predictive control strategies for a simulated flotation circuit. *Proceedings of the 8th IFAC International Symposium in Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, pp. 59–64
319. Zhang, J.G., 1989. Factors affecting the kinetics of froth flotation. PhD thesis, Department of Mining and Mineral Engineering, University of Leeds, Great Britain, 41 p.
320. Zhang, P., 2010. *Advanced Industrial Control Technology*. Publisher: Elsevier, 842 p.
321. Zhang, Y., Zhu, J., Liu, T., 2012. The Research of the Flotation Recovery Prediction Methods Based on Advanced LS-SVM. *Applied Mechanics and Materials* 130-134, pp. 1854–1857
322. Zhao, J., Bose, B.K., 2002. Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive. *IECON – 2002: 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 229 – 234
323. Zhou, K., Yang, C., Mou, X., Gui, W., 2009a. A flotation recovery prediction algorithm based on image feature extraction. *Chinese High Technology Letters* 19 (9) pp. 957–963 (In Chinese)
324. Zhou, K., Yang, C., Mou, X., Gui, W., 2009b. Flotation recovery prediction based on froth features and LS-SVM. *Chinese Journal of Scientific Instrument* 30 (6), pp. 1295–1300 (In Chinese)
325. Zhu, J., Wang, Y.K., 2008. Application of image recognition system in flotation process. *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 25-27 June, Changqing, China, pp. 655-659 (In Chinese)
326. Zhu, J., Gui, W., Yang, C., Xu, H., Wang, X., 2014. Probability density function of bubble size based reagent dosage predictive control for copper roughing flotation. *Control Engineering Practice* 29, pp. 1–12
327. Zimmermann, W.B.J., Jeanmeure, L.F.C., 1996. Simple model of equilibrium froth height for foams: an application for CNN image analysis. In: *Proceedings of 4th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications*, 24-26 June, Seville, Spain, pp. 237–241

BIOGRAFIJA AUTORA

Ivana M. Jovanović je rođena 26. 11. 1977. godine u Požegi. Osnovnu školu završila je 1992. godine u Kosjeriću, a gimnaziju u Valjevu 1996. godine. Iste godine je upisala Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, gde je diplomirala 2004, sa prosečnom ocenom u toku studija 8,91. Magistarsku tezu, pod nazivom „Mogućnost primene mikroniziranog i klasiranog elektrofilterskog pepela kao aditiva za proizvodnju građevinskih materijala” odbranila je 2009. godine, pod rukovodstvom mentora prof. dr Milene Kostović.

Od 2006. do 2012. godine bila je zaposlena u Institutu za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina u Beogradu. Od 2012. godine zapošljava se u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, gde i danas radi. Bavi se izradom projekata postrojenja za pripremu mineralnih sirovina, studija uticaja na životnu sredinu, kao i laboratorijsko-tehnološkim ispitivanjima iz oblasti pripreme mineralnih sirovina. Učesnik je na projektima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Autor je i koautor mnogih radova objavljenih u domaćim i međunarodnim časopisima kao i radova objavljenih na međunarodnim i nacionalnim skupovima.

Govori engleski i ruski jezik.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана: **Ивана М. Јовановић**

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**Модел интелигентног система адаптивног управљања
процесом прераде руде**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 12.10.2015.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jovanovic', is written over a horizontal line.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

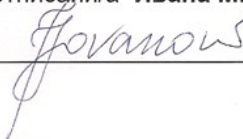
Име и презиме аутора: **Ивана М. Јовановић**

Студијски програм: **Рударско инжењерство**

Наслов рада: **Модел интелигентног система адаптивног управљања
процесом прераде руде**

Ментор: **Проф. др Игор Миљановић**

Потписани/а **Ивана М. Јовановић**



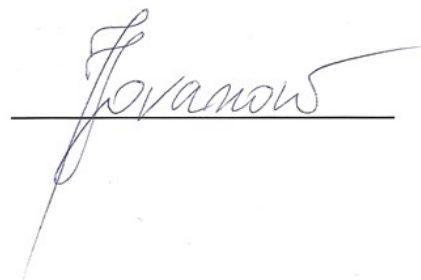
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 12.10.2015.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Модел интелигентног система адаптивног управљања процесом прераде руде

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

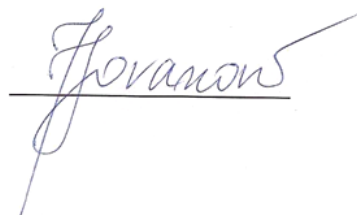
①. Ауторство

2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 12.10.2015.



1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.