



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
RUDARSKI FAKULTET PRIJEDOR



Ruzmir Avdić
MODELIRANJE GRAVITACIJSKE KONCENTRACIJE UGLJA
PRIMJENOM FUZZY LOGIKE
DOKTORSKA DISERTACIJA

Prijedor, 2019. godine



UNIVERSITY OF BANJA LUKA
FACULTY OF MINING PRIJEDOR



Ruzmir Avdić
MODELING THE GRAVITATIONAL CONCENTRATION
OF COAL BY USING FUZZY LOGIC

DOCTORAL DISERTATION

Prijedor, 2019. godine

MENTOR

dr. sc. Igor Miljanović, redovni profesor
Rudarsko-geološki fakultet
Univerzitet u Beogradu

NASLOV DOKTORSKE DISERTACIJE

''Modeliranje gravitacijske koncentracije uglja primjenom Fuzzy logike''

REZIME

Problematika pripreme uglja u mašinama taložnicama poznata je stotinama godina. Međutim, istraživači se slažu se da zbog velikog broja uticajnih faktora isti postupak ni do danas nije u dovoljnoj mjeri teoretski potkrijepljen. Zbog velikog obima upotrebe ovih mašina u rudarskoj industriji, ukazuje se potreba za izradom modela koji bi olakšao njihovo upravljanje i unaprjeđenje procesa pripreme uglja u njima. Istraživanja u okviru disertacije obuhvatila su teorijske i praktične aspekte definisanja pomenute problematike. Teorijskim istraživanjima izvršena je analiza svjetskih iskustava i trendova u oblasti modeliranja postupaka pripreme uglja u mašinama taložnicama, baziranih na primjeni standardnih matematičkih te metoda mekog računarstva. Obradene su detaljno i teorijske postavke procesa, u svrhu što kvalitetnije pripreme za razvoj modela. Praktičnim istraživanjima ostvarene su sljedeće aktivnosti:

- sagledavanje realnih problema u konkretnom postrojenju za pripremu uglja na separaciji RMU "Banovići"
- definisanje matematičkih i logičkih zavisnosti koje su korištene za uspostavljanje modela čišćenja uglja u mašinama taložnicama
- razvoj eksperimentalnog modela zasnovanog na Fuzzy logici
- testiranje i praktična provjera postavljenog modela
- analiza ostvarenih rezultata
- zapažanja i prijedlog daljih istraživanja.

Na bazi procesnog algoritma i strukturnog modela čišćenja uglja, razvijen je simulacioni model pripreme uglja u mašinama taložnicama za pripremu uglja.

Model je razvijen u programskom okruženju MATLAB koristeći module Fuzzy Logic Toolbox i Simulink. Obrada rezultata modeliranja urađena je u IBM SPSS paketu. Dobijeni rezultati su dobri, na zadovoljavajući način opisuju proces i potvrđuju njegovu moguću primjenu u datom, ali i sličnim postrojenjima za pripremu uglja u mašinama taložnicama bilo gdje u svijetu.

KLJUČNE RIJEČI:

Mašina taložnica, Fuzzy logika, modeliranje, čišćenje uglja, Simulink

NAUČNA OBLAST:

Inženjerstvo i tehnologija

UŽA NAUČNA OBLAST:

Priprema mineralnih sirovina

NAUČNO POLJE:

Rudarsko-geološko inženjerstvo

KLASIFIKACIONA OZNAKA ZA DATU OBLAST PREMA CERIF ŠIFRARNIKU:

T 340, Rudarstvo

TIP ODABRANE LICENCE KREATIVNE ZAJEDNICE (CREATIVE COMMONS)

Autorstvo - Nekomercijalno

MENTOR

Ph. D. Igor Miljanovic, Full Professor
Faculty of Mining and Geology
University of Belgrade

DOCTORAL DISSERTATION TITLE

MODELING THE GRAVITATIONAL CONCENTRATION
OF COAL BY USING FUZZY LOGIC

SUMMARY

The problem of coal preparation in jigs has been known for hundreds of years. However, the researchers agree that due to the large number of influencing factors, the same procedure has not been sufficiently theoretically explained to this day. Due to the large use of these machines in the mining industry, there is a need to develop a model that would facilitate their management and improve the coal preparation process. Research within the dissertation covered the theoretical and practical aspects of defining the aforementioned issues. Theoretical research analyzed the world experiences and trends in the modeling of coal preparation processes in jigs, based on the application of standard mathematical and soft computing methods. The theoretical aspects of the processes have been elaborated in order to prepare the model in a best possible way. The following activities were accomplished through practical research:

- reviewing the real problems in a coal separation plant of "Banovići" coal mine
- defining the mathematical and logical dependencies that were used to establish the model of coal cleaning in jigs
- developing an experimental model based on Fuzzy logic
- testing and practical verification of the model
- analysis of the results achieved
- observations and suggestions for further research.

Based on the process algorithm and the structural model of coal cleaning, a simulation model of coal preparation in jigs have been developed. The model was developed in the MATLAB programming environment using the modules Fuzzy Logic Toolbox and Simulink. The modeling results were processed in the IBM SPSS package. The results obtained are good, describing the process in a satisfactory way and confirming its possible application in a given, but also in similar, jig coal preparation plants anywhere in the world.

KEYWORDS:

Jig, Fuzzy Logic, Modeling, Coal Cleaning, Simulink

SCIENTIFIC AREA:

Engineering and Technology

NARROW SCIENTIFIC AREA:

Mineral processing

SCIENTIFIC FIELD:

Mining and geological engineering

CLASSIFICATION MARK FOR THE AREA BY CERIF CODE:

T 340, Mining

CREATIVE COMMONS TYPE OF SELECTED LICENSE

Authorship - Noncommercial

UNIVERZITETU U BANJOJ LUCI

PODACI O AUTORU ODBRANJENE DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora disertacije	Ruzmir Avdić
Datum, mjesto i država rođenja autora	10. 09. 1976. godine, Bosna i Hercegovina
Naziv završenog fakulteta autora i godina diplomiranja	Univerzitet u Tuzli Rudarsko-geološko-građevinski fakultet, 2005.
Datum odbrane magistarskog rada autora	24. 12. 2010. godine
Naslov magistarskog rada autora	"Uloga tehnološkog procesa oplemenjivanja uglja na separaciji RMU "Đurđevik" u lancu onečišćivača slivnog područja rijeke spreče"
Akadska titula koju je autor stekao odbranom magistarskog rada	Magistar tehničkih nauka iz oblasti rudarstva
Akadska titula koju je autor stekao odbranom doktorske disertacije	Doktor tehničkih nauka iz oblasti rudarstva
Naziv fakulteta na kome je doktorska disertacija odbranjena	Univerzitet u Banjoj Luci Rudarski fakultet Prijedor
Naziv doktorske disertacije i datum odbrane	''Modeliranje gravitacijske koncentracije uglja primjenom Fuzzy logike'' 2019. godine
Naučna oblast disertacije prema CERIF šifarniku	T 340, Rudarstvo
Imena mentora i članova komisije za odbranu doktorske disertacije	dr. sc. Igor Miljanović, red. prof., mentor dr. Zoran Štirbanović, docent, predsjednik dr. sc. Vladimir Malbašić, vanr. prof., član dr. sc. Adnan Hodžić, vanr. prof., član

U Banjoj Luci, dana _____

Dekan

dr. sc. Vladimir Malbašić, vanr.
prof.

PREGLED SKRAĆENICA

AI	Vještačka inteligencija / Artificial Intelligence
ANFIS	Adaptivni neuro Fuzzy sistem zaključivanja / Adaptive Neural Fuzzy Inference System
DEM	Metoda diskretnih elemenata / Discrete Element Method
CFD	Računarska dinamika fluida / Computational Fluid Dynamics
DM	Pretraga podataka / Data Mining
FIS	Fuzzy sistem zaključivanja / Fuzzy Inference System
FL	Fuzzy logika / Fuzzy Logic
FLC	Fuzzy logički kontroler / Fuzzy Logic Controller
FLP	Fazi logičko programiranje
FLS	Fazi logički sistem / Fuzzy Logic System
GKU	Gravitacijska koncentracija uglja
HC	Tvrdo računarstvo / Hard Computing
MBMS	Upravljački sistem na bazi modela / Model Based Management System
MIMO	Višestruki ulazi/izlazi / Multiple inputs/multiple outputs
MPC	Modelsko prediktivno upravljanje / Model Predictive Control
NGM	Near Gravity Materials /Materijali koji imaju sličnu specifičnu težinu kao i ugalj
NN	Neuronske mreže / Neural Network
PID	Proporcionalno – integraciono - derivativno / Proportional – integrative – derivative
PLC	Programabilni logički kontroler / Programmable Logic Controller
PMS	Priprema mineralnih sirovina / Mineral Processing
P-T	Pliva-tone (analiza)
SC	Meko računarstvo / Soft Computing
SISO	Single input/single output / Pojedinačni ulaz/izlaz
TS	Takagi – Sugeno
TSK	Takagi – Sugeno – Kang

S A D R Ź A J

1.	UVOD	16
1. 1.	PREDMET I ZNAČAJ ISTRAŽIVANJA.....	16
1. 2.	NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA	18
1. 3.	NAUČNI CILJEVI ISTRAŽIVANJA	18
1. 4.	PREGLED ISTRAŽIVANJA	19
1. 5.	AKTUELNOST ISTRAŽIVANJA.....	20
1. 6.	METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	20
2.	TEHNOLOGIJE ČIŠĆENJA UGLJA GRAVITACIJSKOM KONCENTRACIJOM....	22
2. 1.	UGALJ - ENERGETSKI IZVOR PROŠLOSTI, SADAŠNJOSTI I BUDUĆNOSTI	23
2. 2.	KLASIFIKACIJA POSTUPAKA ČIŠĆENJA UGLJA	36
2. 3.	PRINCIPI GRAVITACIJSKE KONCENTRACIJE UGLJA	40
2. 4.	ČIŠĆENJE UGLJA U MAŠINAMA TALOŽNICAMA	48
2. 5.	TEORIJSKI KONCEPTI TALOŽENJA ZRNA U MAŠINAMA TALOŽNICAMA	52
2. 5. 1.	Teorija različitih brzina padanja zrna	52
2. 5. 2.	Teorija potencijalnih energija.....	56
2. 5. 3.	Statistička hipoteza	57
2. 5. 1.	Suspensiona hipoteza	57
2. 6.	PARAMETRI RADA MAŠINA TALOŽNICA	58
2. 7.	VRSTE I TIPOVI MAŠINA TALOŽNICA ZA UGALJ.....	61
2. 7. 1.	RUČNA TALOŽNICA	62
2. 7. 2.	KLIPNE TALOŽNICE	63
2. 7. 3.	TALOŽNICE SA DIJAFRAGMOM	64
2. 7. 4.	ZRAČNE MAŠINE TALOŽNICE	64
3.	ANALIZA EFIKASNOSTI PROCESA ČIŠĆENJA UGLJA.....	69
3. 1.	ANALIZA MOGUĆNOSTI ČIŠĆENJA UGLJA.....	69
3. 1. 1.	Pliva – tone analiza (Washability test)	69
3. 1. 2.	Henry-Reinhardt-ove krive čišćenja uglja.....	71
3. 2.	KONTROLA OŠTRINE ODVAJANJA UGLJA.....	74
4.	MODELIRANJE I SIMULACIJA RADA MAŠINA TALOŽNICA ZA UGALJ.....	76
4. 1.	KLASIFIKACIJA MODELA MAŠINA TALOŽNICA	82
4. 1. 1.	VIŠENAMJENSKI (UNIVERZALNI) SIMULATORI	83
4. 1. 2.	MODELIRANJE KRETANJA ČESTICA I VODE	84

4. 1. 3.	MODELIRANJE NA BAZI POTENCIJALNE ENERGIJE ZRNA	86
4. 1. 4.	MODELIRANJE NUMERIČKIM METODAMA	87
5.	MODELIRANJE MAŠINA TALOŽNICA PRIMJENOM FUZZY LOGIKE	92
5. 1.	Fuzzy zaključivanje	98
5. 2.	Fuzzy logika u upravljanju i modeliranju	101
5. 2. 1.	Fuzzy modeliranje	102
5. 2. 2.	Fuzzy kontroleri.....	104
5. 2. 3.	Primjena vještačke inteligencije i mekog računarstva.....	107
5. 3.	FUZZY MODELIRANJE TALOŽNICA.....	109
6.	FUZZY MODEL POSTROJENJA ZA ČIŠĆENJE UGLJA U MAŠINAMA TALOŽNICAMA	112
6. 1.	ANALIZA TEHNOLOŠKOG PROCESA NA POSTROJENJU ZA SEPARACIJU UGLJA U BANOVIĆIMA.....	112
6. 2.	KVANTITATIVNI I KVALITATIVNI PARAMETRI RADA POSTROJENJA	117
6. 3.	RAZVOJ MODELSKE PROCEDURE.....	121
6. 3. 1.	Odabir parametara kvaliteta ulazne sirovine i izlaznog proizvoda	122
6. 3. 2.	Definisanje funkcija pripadnosti i fuzzy pravila	124
6. 4.	REZULTATI MODELIRANJA I DISKUSIJA	129
6. 4. 1.	Odstupanja modelskih i stvarnih kvalitativnih parametara uglja	131
6. 4. 2.	Statistička analiza rezultata modeliranja	132
7.	ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA.....	136
8.	LITERATURA.....	137
8. 1.	INTERNET IZVORI	148

SPISAK SLIKA

Slika 1. Ljestvica globalnog siromaštva. Izvor: Svjetska banka 2011, Međunarodna agencija za energiju 2011.....	25
Slika 2. Hemijska struktura (čistog) uglja.....	27
Slika 3. Elementarna i tehnička analiza uglja (Speight 2005.)	28
Slika 4. Sastav uglja (Miller 1984.)	28
Slika 5. Produkti gasifikacije i likvefakcije uglja (Haris 2013.).....	30
Slika 6. Globalna distribucija dokazanih svjetskih rezervi uglja. Izvor: BP Statistical Review of World Energy (2012.).	31
Slika 7. Podjela opreme za gravitacijsku koncentraciju na osnovu intenziteta djelujuće sile (Darling 2011.).....	39
Slika 8. Procesi gravitacijske koncentracije opisani su u djelu De Re Metallica, Agricola, 1556. godine.....	41
Slika 9. Ključni pomaci u razvoju tehnologija za čišćenje uglja (Noble 2015.).....	42
Slika 10. Različiti mehanizmi klasifikacije gravitacijskom koncentracijom a) Teškotekućinska separacija b) Mašine taložnice c) Tečni film d) Horizontalno pomijeranje (Burt 1984.)	44
Slika 11. Kriva graničnih krupnoća (puna linija) formirana od podataka iz tabele 9 (tačkasta linija). Puna linija predstavlja KK sa uključenim faktorom taloženja - Burt (Gupta 2016.).....	46
Slika 12. Osnovni dijelovi i princip rada mašine taložnice.....	48
Slika 13. Korelacija kretanja vode i zrna u radnom dijelu mašine taložnice	49
Slika 14. Odvođenje teške frakcije iz radnog dijela mašine taložnice (Witteven 1995.).....	50
Slika 15. Pneumatska mašina taložnica (Preuzeto: All Mineral GMBH).....	51
Slika 16. Sile koje utiču na kretanje zrna u radnom dijelu mašine taložnice (Dieudonné i sar., 2006.)	53
Slika 17. Tri mehanizma taloženja čestica u mašini taložnici prema teoriji baziranoj na različitim brzinama padanja čestica.....	53
Slika 18. Odnos brzine i vremena padanja za različite čestice (Gaudin 1939., Aplan 2003., Oki 2010. preuzeto iz Suba Rao 2011.)	54
Slika 19. Šematski prikaz snižavanja težišta u teoriji potencijalnih energija (Mayer 1965., Tavares i King 1995.)	57
Slika 20. Tipični oblici oscilacija u mašini taložnici: Sinusoidalni, Batac, IHC i Panam	59
Slika 21. Shematski prikaz mašina taložnica u odnosu na mehanizam za pulsiranje vode a) klipna, b) sa dijafragmom, c) pulsirajuća mašina taložnica (Petrović 2008.)	62

Slika 22. Princip rada ručne taložnice (Wils 2016.).....	63
Slika 23. Princip rada klipne mašine taložnice (Drzymala 2007.).....	63
Slika 24. Taložnica sa dijafragmom (Wills 2016.)	64
Slika 25. Sistem za automatsko pražnjenje jalovine kod Baum i Batac taložnica (Preuzeto: MBE Coal & Minerals Technology)	65
Slika 26. Mašina taložnica tipa Batac (Wills 2016.).....	66
Slika 27. Batac taložnica u radu	67
Slika 28. Rotacioni i disk ventili koji se upotrebljavaju na Batac taložnicama. Gornja slika i crtež prikazuju rotacioni, a donja ventil u obliku diska (Preuzeto: MBE Coal & Minerals Technology)	68
Slika 29. Pliva – tone analiza (Wills 2016.).....	70
Slika 30. Kriva materijala koji se našao u pogrešnoj grupi u odnosu na razliku u specifičnoj težini tečnosti	70
Slika 31. Krive čišćenja uglja po Henry-Reinhardt-u (Petrović 2008.)	71
Slika 32. H-R kriva rovnog uglja -120 +40 sa očitanim rezultatima	73
Slika 33. Trompova kriva podionih brojeva	74
Slika 34. Kontrolna petlja procesa modeliranja (Hodouin, 2011.)	78
Slika 35. Blok šema (algoritam) simulatora (Napier-Munn 1996, Wills 2016.).....	81
Slika 36. Izgledi grafičkog interfejsa univerzalnih simulatora	83
Slika 37. Primjer DEM iteracija na zrnima a) identifikacija kontakata b) primjena sile c) sumiranje sila d) proračun pomijeranja zrna (Wills 2016.)	88
Slika 38. Pojednostavljena primjena CFD tehnike na rješavanje dvodimenzionalnog problema kretanja fluida (Wills 2016.)	90
Slika 39. Fuzzy broj: Obični, trouglasti i trapezoidni	94
Slika 40. Stepen pripadnosti "Crisp" i "Fuzzy" skupovima	94
Slika 41. Izgled Fuzzy logičkih operatora "NE" i "ILI"	96
Slika 42. Funkcija pripadnosti Fuzzy skupu (Karray i Da Silva 2004.)	96
Slika 43. Tipovi Fuzzy skupova (Galindo 2005.)	97
Slika 44. Koncept Fuzzy zaključivanja (Sivanandam i sar. 2007, Jovanović 2015.)	98
Slika 45. Defazifikacija procesa.....	101
Slika 46. Blok dijagram Fuzzy logičkog upravljačkog sistema (Ross 2004.)	105
Slika 47. Funkcije pripadnosti ugla (a) i ugaone brzine (b) za obrnuto klatno (Matiai sar. 2014.) ..	105
Slika 48. Blok šema Fuzzy kontrolera	106

Slika 49. Elementi sistema prediktivne Fuzzy kontrole (Terano i sar. 2014.)	108
Slika 50. Definisanje Fuzzy skupova za parametre Centar gravitacije i Vrijeme (Mishra i Chakroborty 1995.)	109
Slika 51. Fuzzy kontrola ulaza uglja u mašinu taložnicu na osnovu visine sloja jalovine (Du i Lin 2002.)	110
Slika 52. Odnos između nivoa vode, pritiska zraka i položaja ventila i primijenjena Fuzzy pravila (Sawata i sar. 1995.)	111
Slika 53. Uspostavljanje trapezoidalnog oblika pulsacija nakon pokretanja sistema iz (A) i ponovno uspostavljanje istog nakon poremećaja (B) (Sawata i sar., 1995.)	111
Slika 54. Tehnološka šema oplemenjivanja mrkog uglja gravitacionim postupkom na separaciji RMU Banovići sa sistemom za prečišćavanje tehnoloških voda (Petrović 2008.)	113
Slika 55. Materijalni bilans separacije RMU "Banovići"	116
Slika 56. Dijagram proizvodnje pojedinih asortimana uglja po mjesecima 2018. godine (t)	118
Slika 57. Prikaz varijabli modela u radnom okruženju programa MatLab R2017a	121
Slika 58. Definisanje ulaznih i izlaznih varijabli Fuzzy modela	125
Slika 59. Dodjeljivanje Fuzzy vrijednosti parametrima u modelu	125
Slika 60. Formiranje Fuzzy pravila u modelu pripreme uglja u mašinama taložnicama	126
Slika 61. Vizuelni pregled rezultujućih površina koje je dao model	126
Slika 62. Izgled izvršne datoteke Fuzzy modela za postrojenje za pripremu uglja u Banovićima na ulazu u SIMULINK model	127
Slika 63. Model postrojenja razvijen u modulu SIMULINK programskog paketa MatLab, verzija 2017a. Kao osnova poslužio je Fuzzy model razvijen u modulu Fuzzy Logic Toolbox istog programskog paketa	128
Slika 64. Upporedni pregled rezultata Fuzzy modeliranja sa podacima o rovnom i separisanom uglju	130
Slika 65. Vrijednosti greške predviđanja za Fuzzy model pripreme uglja u mašinama taložnicama	131
Slika 66. Analiza rezultata modeliranja pomoću linearne regresije	133
Slika 67. Koeficijent korelativnosti stvarnih i vrijednosti predviđenih Fuzzy modelom	134

SPISAK TABELA

Tabela 1. Osnovne kvalitativne karakteristike ugljeva (Petrović 2008.)	27
Tabela 2. Dokazane svjetske rezerve uglja (u milionima tona i postotcima).....	32
Tabela 3. Najveći proizvođači uglja.....	33
Tabela 4. Najveći potrošači uglja.....	33
Tabela 5. Najveći izvoznici uglja.....	33
Tabela 6. Najveći uvoznici uglja.....	33
Tabela 7. Odnos kriterija koncentracije i krupnoće mineralne sirovine	45
Tabela 8. Vrijednosti kriterija koncentracije za neke česte minerale dobijene procesima gravitacijske koncentracije odvajanjem jalovine, specifične težine $\rho_{jalovine} = 2,65 \text{ kg/m}^3$	46
Tabela 9. Vrijednosti kriterija koncentracije za neke krupnoće ispitivane sirovine (Aplan 1985., Gupta 2016., Wills 2016.)	46
Tabela 10. Rasprostranjenost upotrebe glavnih procesa pripreme uglja u odnosu na svjetske regione.....	47
Tabela 11. Nivoi uticaja radnih parametara mašine taložnice na njen rad (Gupta 2016.)	58
Tabela 12. Bilans čišćenja uglja, očitani iz krivih čišćenja za zadati sadržaj pepela od 15 %.....	73
Tabela 13. Bilans čišćenja uglja, očitani iz krivih čišćenja za zadati maseni udio čistog uglja.....	74
Tabela 14. Neke osobine Fuzzy skupova (Karray and De Silva 2004., Jovanović 2015.)	95
Tabela 15. Pregled okvirnih vrijednosti parametara kvaliteta rovnog uglja	114
Tabela 16. Pregled kapaciteta separacije na rovni ugalj	114
Tabela 17. Pregled tehničkih karakteristika i radnih parametara mašina taložnica	115
Tabela 18. Proizvodnja rovnog uglja na RMU "Banovići" po pogonima u 2018. godini	117
Tabela 19. Parametri kvaliteta rovnog uglja (ulaz u model) po mjesecima 2018. godine	117
Tabela 20. Procentualni udio pojedinih asortimana u separisanom uglju po mjesecima 2018. godine	118
Tabela 21. Vrijednosti parametara kvaliteta separisanog uglja po asortimanima (izmjerene vrijednosti, procentualni i količinski udjeli)	119
Tabela 22. Relevantni parametri ulazne sirovine (rovnog uglja) i izlaznih parametara modela (parametri čija se vrijednost predviđa), te fazifikovane lingvističke vrijednosti	123
Tabela 23. Parametri separisanog uglja (kumulativno po mjesecima 2018. godine) upotrijebljeni za komparaciju sa izlaznim podacima iz modela	124
Tabela 24. Izlazne vrijednosti odabranih parametara kvaliteta uglja iz Fuzzy modela	129
Tabela 25. Statistička povezanost stvarnih i vrijednosti predviđenih Fuzzy modelom	132

Tabela 26. Analiza varijanse (ANOVA) implementiranog modela.....	133
Tabela 27. Regresiona statistička analiza stvarnih parametara kvaliteta separisanog uglja i vrijednosti dobivenih Fuzzy modeliranjem.....	134

1. UVOD

Zbog porasta broja stanovnika na Zemlji i njihovog standarda života, potreba modernog svijeta za energijom iz fosilnih goriva u konstantnom je porastu. Uprkos alternativnim izvorima energije, uglj i dalje predstavlja vodeći svjetski energent za produkciju električne energije. Negativne propratne pojave koje idu ruku pod ruku sa spaljivanjem velikih količina uglja za dobijanje električne energije su zagađenje zraka, vode i tla te pojava ozonskih rupa. Sve dok ne dođe do značajne promjene paradigme u korištenju obnovljive u odnosu na energiju dobivenu iz fosilnih goriva, a posebno uglja, šanse da se nešto značajno promijeni su male.

Ključna prednost dobijanja električne energije iz uglja u odnosu na obnovljive izvore je stabilnost, tj. neovisnost o godišnjem dobu, dobu dana ili vremenskim uslovima. Da bi se smanjili uticaji spaljivanja uglja na okoliš, ali i poboljšali ekonomski parametri rada rudnika vrši se čišćenje uglja. Postoje brojni načini čišćenja uglja, ali se osnovni zahtjevi od tog procesa svode na:

- da značajno umanja udio jalovine i vlage u uglju
- da troškovi postupka budu mali, tj. ekonomski opravdani u odnosu na korist.

Modeliranje gravitacijskih procesa prerade uglja je zbog složenosti procesa i raznovrsnosti opsega ulaznih parametara relativno malo obrađivano.

Pošto je voda medij u kome se vrši čišćenje uglja, veliki faktor čini povezanost procesa čišćenja uglja sa onečišćenjem tehnoloških voda, tj. potrebom zahvatanja novih količina vode u proces. Svaki, pa i najmanji napredak u nekoj od ovih tehnoloških oblasti mogao bi donijeti veliku korist prvenstveno za okoliš, ali i za održivost industrijske grane, poslova koji se vežu na nju i koristi koje najsiriromašnijim slojevima društva donosi pristup električnoj energiji.

1. 1. PREDMET I ZNAČAJ ISTRAŽIVANJA

Rad postrojenja za gravitacijsku koncentraciju uglja u fluidu voda, odnosno čišćenje uglja u mašinama taložnicama, podrazumijeva složene funkcionalne zavisnosti između ulaznih i izlaznih parametara odnosno promjenjivih. Upotreba savremenih računarskih sistema za

upravljanje ovako složenim procesima i postrojenjima uveliko može doprineti produktivnosti, stabilnosti, pouzdanosti i naravno cjenovnoj konkurentnosti pomenutih postrojenja.

Vodeći cilj sistema automatskog upravljanja je obezbjeđivanje pravovremenih informacija i mogućnost preduzimanja efikasnih i brzih upravljačkih dejstava kako bi se osigurao bezbjedan i stabilan rad postrojenja uprkos djelovanju spoljašnjih i unutrašnjih činilaca koji utiču na efikasno odvijanje procesa. Kako bi sistemi automatskog upravljanja ispunili ove ciljeve, pred iste se postavlja uslov izvršavanja niza funkcija koje se mogu uslovno podijeliti u dvije kategorije: osnovne i napredne funkcije. U napredne funkcije spadaju:

- procesna analiza
- optimizacija
- detekcija grešaka.

Tokom poslednje decenije, trend upotrebe Fuzzy logičkih kontrolera u upravljanju različitim industrijskim procesima je u porastu, naročito kada je reč o složenim procesima. Sistemi upravljanja sa Fuzzy logičkim kontrolerom u svom centru, koji se primjenjuju u industrijskim uslovima zasnovani su na konceptu Fuzzy logike i Fuzzy logičkih sistema zaključivanja (Fuzzy logic inference systems).

Fuzzy logika u kontekstu modeliranja i upravljanja industrijskim procesima predstavlja računski orijentisan sistem principa i tehnika koji funkcioniše na principima „približnog“ zaključivanja. Ovakav pristup simulira proces donošenja odluka od strane ljudskog operatera u industrijskom procesu. Fuzzy logika se na ovaj način može smatrati i sredstvom za opis odnosno matematičku formalizaciju procesa „približnog“ zaključivanja.

Iako se aproksimacija realnih sistema u cilju efikasnijeg upravljanja uz pomoć Fuzzy logike može sprovesti upotrebom čisto heurističkog znanja kao što je iskustvo ljudskog operatera, broj pravila koje je potrebno razviti kako bi se formirao odgovarajući model procesa je u realnim uslovima izuzetno visok. Kako bi se ostvario efikasan sistem upravljanja industrijskim procesima, u praksi se često pribjegava pristupu MBPC, odnosno „Upravljanje pomoću prognostičkih modela“ (Model Based Predictive Control). Fuzzy logički pristup se u velikoj mjeri uklapa u ovaj pristup, obzirom da je riječ o pristupu po kome se izradi model procesa, a zatim razvijeni model uključi u upravljački sistem.

Mogućnost praktične primjene Fuzzy logike u industrijskim procesima pripreme mineralnih sirovina od posebnog je značaja obzirom na inherentnu varijabilnost koju nosi promjenjivi sadržaj ulazne sirovine. S druge strane, složenost modela razvijenih u cilju efikasnog upravljanja procesima znatno raste, obzirom na broj nezavisnih promjenjivih koje moraju biti uzete u obzir.

Upotrebom Fuzzy logike prilikom definisanja modela upravljanja postrojenjem, osiguravaju se sljedeće prednosti (Miljanović i sar. 2008.):

1. Optimalno upravljanje operacijama oplemenjivanja
2. Efektivne korektivne reakcije na moguće poremećaje u radu sistema
3. Povećanje (radne) efikasnosti sistema
4. Olakšana harmonizacija operacija
5. Efikasnost prognostičke i uslovne dijagnostike, procesnih trendova i poremećaja
6. Efikasna kontrola operativnih troškova
7. Olakšano je ispunjavanje mnogih ekoloških zahtjeva itd.

Proces modeliranja baziran na Fuzzy logičkim principima, kako je već rečeno, podrazumijeva aproksimaciju i matematičku formalizaciju složenih interakcija ulaznih i izlaznih promjenjivih. U ovom smislu, proces definisanja modela se dijelom oslanja na teorijske postavke gravitacijske koncentracije, odnosno proučavanja kretanja zrna u uslovima ometanog padanja uz uvažavanje heterogenosti mineralnih sirovina u ovom slučaju uzrokovane granulometrijskim sastavom i sastavom po frakcijama različitih gustina zrna, kao i na znanje i iskustvo menadžmenta i operatera u pojedinim dijelovima postrojenja.

1. 2. NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA

Kao ishod provedenih istraživanja, disertacija donosi različite naučne i stručne doprinose, i to prije svega:

1. Cjelovit prikaz izložene problematike
2. Multidisciplinarnost teme istraživanja, sa aspekta istraživanja praktične primjene Fuzzy logike u oblasti gravitacijske koncentracije uglja u fluidu voda koja je u početnim fazama u svjetskim okvirima
3. Metodološki doprinos, obzirom na savremenost modelskih i drugih alata koji su korišteni u izradi disertacije i nedovoljnu istraženost
4. Model gravitacijske koncentracije uglja u mašinama taložnicama zasnovan na Fuzzy logici, kao i analizu njegove primjene na podacima iz separacije RMU "Banovići".

1. 3. NAUČNI CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Praktičnim istraživanjima baziranim na širokoj teoretskoj osnovi i podacima iz realnog postrojenja, izrađen je i validiran matematički model čišćenja uglja u fluidu voda, odnosno u

mašinama taložnicama, primjenom savremenih računarskih tehnologija, i principa i tehnika baziranih na Fuzzy logičkim sistemima odlučivanja.

Cilj doktorske disertacije, da se da doprinos primjeni i razvoju inteligentnih sistema kontrole i upravljanja procesima u rudarstvu i konkretno procesima separacije na bazi razlike u fizičkim svojstvima uglja i jalovih minerala u postupku gravitacijske koncentracije uglja, u potpunosti je ispunjen. Uspostavljanje modela ostvareno je primjenom Fuzzy logike, na bazi eksperimentalnih podataka o mogućnosti primjene gravitacijske koncentracije u mašinama taložnicama.

1. 4. PREGLED ISTRAŽIVANJA

Upravljanje procesima sa ciljem stabilizacije i optimizacije industrijskih procesa pripreme mineralnih sirovina prisutno je u praksi oko 50 godina. U poslednjih 20 godina, upravljanje procesima predstavlja sigurnu investiciju u ovoj oblasti, obzirom na brz povrat uložених sredstava, povećanje koncentracije korisne komponente u koncentratu i istovremeno i iskorištenja. Shodno tome, upravljanje procesima pripreme mineralnih sirovina je predmet istraživanja mnogih istraživača, kako sa teorijskog tako i sa praktičnog aspekta.

Integracija proizvodnog i poslovnog segmenta postrojenja za pripremu mineralnih sirovina predstavlja oblast u kojoj je primjena savremenih informacionih tehnologija od naročitog značaja. Ono što je naročito značajno je primjena metoda mekog računarstva (fazi logike, neuronskih mreža, genetskih algoritama) u ovakvom okruženju, odnosno ideja fazifikacije hijerarhijskih nivoa. Do ovakvog trenda došlo je prije svega usljed porasta složenosti industrijskih procesa i, posledično, pojava neodređenosti i nejasnosti (nepoznate veličine) sa izraženim uticajem na robusnost i performanse sistema. Jedna od posledica je dominirajuća uloga „inteligentnih sistema“ (Zilouchian i Jamsidi 2001.). Ovi pristupi se karakterišu različitim razvojnim strategijama, pri čemu se kao faze razvoja modela obično izdvajaju:

- Modeliranje
- Analiza
- Simulacija
- Implementacija i
- Verifikacija.

Ovako razvijeni modeli često su primjenjivani u praksi, sa zadovoljavajućim rješenjima za praktične probleme iz industrijskih uslova. Međutim, razvoj metoda mekog računarstva uslijedio je između ostalog i zato što su često problemi koji postoje u praksi systemske analize

i upravljanja bili podređeni razvoju matematičkih teorija koje su rješavale „pre-idealizovane“ probleme sa malo ili nimalo povezanosti sa teorijom (Zadeh 1962.). Opšti matematički opis procesa čišćenja uglja u mašini taložnici poznat je dugi niz godina, međutim problem postavljanja sveobuhvatnog matematičkog modela i razvoja odgovarajućeg inteligentnog sistema ili eventualno sistema za podršku odlučivanju i dalje predstavlja problem u istraživačkom svijetu. Pored ovoga, fokus istraživanja na ovom polju je bio na klasičnom, determinističkom modeliranju, čime se otvara prostor za značajne doprinose kada je riječ o primjeni metoda mekog računarstva u cilju razvoja procesnog modela i njegove hijerarhijske integracije u proizvodno-poslovni ambijent.

1. 5. AKTUELNOST ISTRAŽIVANJA

Na današnjem nivou razvoja nauke i tehnike, ali i informacione tehnike, uštede u svakom tehnološkom procesu su ključne. Ponuda postrojenja na svjetskom tržištu, ali i podataka o njima je veća nego ikada. Međutim, snaći se u takvoj "šumi" podataka nije nimalo lako i zahtijeva izuzetno široko znanje i uzimanje u obzir čitavog niza parametara da bi se na kvalitetan način napravila mjerodavna ocjena. Svjetska istraživanja u oblasti praktične primjene fazilogičkog koncepta u pripremi mineralnih sirovina su veoma aktuelna.

Izdvaža se pet provedenih faza u izradi doktorske disertacije i to:

1. Analiza mogućnosti čišćenja uglja u mašinama taložnicama u idealnim uslovima na bazi eksperimentalnih, laboratorijskih podataka kvalitativnim svojstvima rovnog i separisnog uglja
2. Kontrola oštine odvajanja po Trompu (izrada Trompovih krivih podionih brojeva)
3. Definisanje metodologije i broja kriterija ocjene povoljnosti postavljenih tehnoloških sistema, njihova ocjena i postavljanje Fuzzy logičkog modela
4. Razvoj programske procedure na bazi verifikovane metodologije za optimizaciju procesa koncentracije
5. Test modela gravitacijske koncentracije uglja u mašinama taložnicama, uz upotrebu Fuzzy logike.

1. 6. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Osnovne naučne metode korištene u istraživanju zasnovane su na postojećim teorijskim rezultatima i eksperimentalnom radu i obuhvataju:

- Prikupljanje, analizu i sistematizaciju literaturnih izvora

- Induktivne i deduktivne metode zaključivanja
- Metode analize podataka
- Metode statističke analize
- Razvoj i primjenu algoritamskih struktura
- Metode Fuzzy logičkog modeliranja.

Rezultati istraživanja prikazani tabelarno, grafički, algoritamski kao i prikazom modela.

2. TEHNOLOGIJE ČIŠĆENJA UGLJA GRAVITACIJSKOM KONCENTRACIJOM

Priprema uglja kao pojam najčešće podrazumijeva:

- smanjenje sadržaja pepela
- smanjenje sadržaja vlage
- kombinaciju smanjenja vlage i sadržaja pepela.

U današnjem profitno orijentisanom svijetu, ekonomski aspekti pripreme uglja pažljivo se prate, te svaki korak (trošak) mora imati svoje jasno objašnjenje. Stoga je i investiranje u čišćenje uglja (za spaljivanje u termoelektranama i proizvodnju čelika) našlo svoju ekonomsku opravdanost kroz sljedeće elemente:

- smanjenje troškova prevoza (ukoliko se čišćenje uglja obavlja u blizini rudnika, a potrebno ga je transportovati na značajne udaljenosti)
- povećanje sadržaja sagorive materije
- smanjenje habanja opreme i transportnih sredstava za ugalj (čišćenjem se uklanjaju najabrazivniji materijali)
- kapaciteta visoke peći (više prostora za rudu)
- manje troškova koji nastaju sagorijevanjem u visokim pećima (manje vezivanje pepela za unutrašnjost visoke peći, veći transfer toplote, rjeđe ju je potrebno čistiti što smanjuje operativne troškove, kraće vrijeme zastoja i sl.) (Wheelock 1984.).

Čišćenjem uglja obično možemo ukloniti oko pola materijala koji formiraju pepeo, što obično iznosi 10-35 % mase uglja koji je iskopan u rudniku.

Nasuprot nabrojanim uštedama i pozitivnim aspektima moraju se sagledati:

- troškovi čišćenja uglja u postrojenjima
- troškovi gubitaka (sagorivi materijal koji je otišao u jalovinu).

Da bi čišćenje uglja bilo ekonomski opravdano, prodajna cijena mora pokriti troškove dodatnog tretmana. Ako je potrebno još i raditi smanjenje granulacije, troškovi se još više povećavaju dok se smanjuje efikasnost procesa (Osborne 1992.).

Priprema uglja mora se prilagođavati i različitim uslovima rovnog uglja na ulazu, ali i izmjenama u zahtjevima tržišta na drugoj strani. Stoga se značajni naponi ulažu u razvoj tehnologija koje će na što jeftiniji način postići zadovoljavajuće efekte u čišćenju uglja.

Praksa u pripremi uglja mora pratiti i reflektovati kako ekonomske parametre, tako i ekološke propise da ne bi dolazilo do vraćanja pošiljki, kazni za nepoštovanje ekoloških zakona, ekološke takse (po principu Zagađivač plaća), izbjegavanje negativne korporativne slike u

javnosti i sl. Procesi bazirani na gravitacijskoj koncentraciji (za razliku od flotacije) ne koriste organske hemikalije (Burt 1987.).

Osim navedenih, priprema uglja podrazumijeva i sljedeće procese:

- sušenje uglja
- razdvajanje očišćenog uglja u asortimane
- prečišćavanje tehnoloških voda
- zbrinjavanje jalovine.

Modernizacija se kroz istoriju provodila kroz razvoj opreme koja je sve većeg kapaciteta, efikasnosti, a sve manje cijene. U budućnosti će se sve više raditi na usavršavanju postojeće opreme za gravitacijsku koncentraciju, te na razvoju nove. Gravitacijska koncentracija ne stagnira, već se sve više povezuje sa drugim granama kao što je recikliranje.

2. 1. UGALJ - ENERGETSKI IZVOR PROŠLOSTI, SADAŠNJOSTI I BUDUĆNOSTI

Da bi se procesi čišćenja uglja što kvalitetnije opisali, potrebno je dati nekoliko važnih činjenica vezanih za ugalj. Generalno gledajući, izvori energije podijeljeni su u tri kategorije: fosilna goriva, obnovljivi izvori i nuklearni izvori energije. U fosilna goriva spadaju uglavnom nafta, ugalj i zemni gas. Nuklearna energija spada u neobnovljive izvore energije. U obnovljive izvore spadaju hidropotencijali, biomasa, sunčeva energija, geotermalna energija, energija vjetra. Obnovljive izvore energije potrebno je poticati u mjeri koliko je to objektivno moguće, a termoelektrane na fosilna goriva te na nuklearnu energiju u mjeri koliko se to mora, samo da bi se garantovala pouzdanost opskrbe potrošača električnom energijom.

Pojam ugalj (eng. Coal) u Oksfordskom riječniku definisan je kao *"Zapaljiva crna ili tamno smeđu stijena, koja se sastoji većinom od karbonizovane biljne materije, sa nalazištima u podzemlju, koristi se kao gorivo"*.

Ugalj je metamorfna stijena nastala taloženjem biljnih i životinjskih ostataka na dnu močvara, gdje se bez prisustva kiseonika odvijao proces karbonifikacije. Ugalj se većinom sastoji od karbona, te u manjoj ili većoj mjeri drugih elemenata (hidrogen, sumpor, oksigen, i nitrogen) Ugalj se formira sljedećim redoslijedom: treset, lignit, mrki ugalj, kameni ugalj i antracit. Ova metamorfoza uključuje kako biološke, tako i geološke procese. Potonji traju milionima godina. Starije forme uglja, kao što je antracit, mogu se nazvati i metamorfnim stijenama zato što su dugo vremena bile izložene povišenoj temperaturi i pritisku.

Ugalj je osnova ekonomskog razvoja, socijalnog progresa i većeg kvaliteta života. Svuda u svijetu više proizvedenog uglja znači da će ljudi živjeti duže i bolje. Svijet treba mnogo

energije, a posebno električne energije, dok se istovremeno mora značajno smanjiti emisija stakleničkih gasova, a posebno karbon dioksida (Nelson 2013.).

Ugalj ostaje važan resurs za mnoge zemlje uglavnom zbog svoje široke rasprostranjenosti, relativno niskih troškova eksploatacije i pripreme, te velikog energetskeg intenziteta.

Važno je naći balans u jednačini između realne opasnosti po atmosferu izazvane oslobađanjem CO₂ koji nastaje spaljivanjem uglja i velikim koristima koji nastaju korištenjem struje, naročito za siromašnije slojeve društva. Pristup električnoj energiji je osnova zdravlja i dobrobiti milijardi ljudi na Zemlji. U zemljama koje imaju raširen pristup električnoj energiji, ljudi se zdravije hrane, piju čišću vodu, imaju veće šanse da prežive dječije bolesti i bolje su obrazovani. Postoje teorije koje kažu da bi se povećanjem cijena smanjila potrošnja struje. Međutim, velike su šanse da bi takav pokušaj smanjenja potrošnje pogodio isključivo najslabije i najsiromašnije slojeve društva. Stoga, električna energija proizvedena spaljivanjem uglja je, i nastaviti će biti, osnova globalnog razvoja (Clemente 2013.).

Ugalj igra veoma značajnu ulogu u razvoju ljudske civilizacije. Upotreba uglja poznata je još od drevnih vremena. Prvo pominjanje uglja u europskoj literaturi datira u četvrti vijek PNE.

Postoje značajni dokazi da je ugalj prvo korišten u Kini, čak 1000 godina PNE. Od 1000-te godine nove ere, ugalj je bio primarno gorivo u Kini, te je njegovu upotrebu potvrdio i Marko Polo u trinaestom vijeku NE. Prva dokumentovana upotreba uglja u Zapadnoj civilizaciji je spominjanje u u djelima grčkih filozofa Plinija i Aristotela (Miller 2005.).

Industrijska revolucija je pogonjena Watovim pronalaskom parne mašine koja je toplotnu energiju koju ugalj oslobađa sagorijevanjem pretvarala u koristan mehanički rad, tj. translatorno i rotaciono kretanje. Prije tog izuma, za fizički rad i transport koristila se isključivo snaga životinja i prirodne sile (vodotoci, vjetar i sl.). Taj izum je promijenio čitav tok istorije rapidno ubrzavši industrijski, a samim tim i razvoj ostalih segmenata ljudskog društva. Sve do vremena između dva svjetska rata, kada na svjetsku energetskeg scenu stupa nafta, ugalj je bio primarni izvor energije. Tu poziciju je u velikoj mjeri zadržao do danas.

Ugalj je bio osnova industrijske revolucije započete u Engleskoj u 18. vijeku, američkog etabliranja kao glavne ekonomske sile krajem 19 - tog i početkom 20 - og vijeka, njemačkog proizvođačkog i tehnološkog čuda početkom 20 - tog vijeka.

Mnogi napretci i izumi u 18. vijeku doveli su do ekspanzije u upotrebi uglja u Engleskoj, što je kulminiralo industrijskom revolucijom od 1750 do 1850 godine. Ovi napretci odnose se na revoluciju u transportu, proizvodnji gvožđa i čelika, i enormnu deforestizaciju uzrokovanu nekontrolisanom sječom. Iako započeta u Engleskoj, industrijska revolucija brzo se raširila kontinentalnom Europom, uglavnom Francuskom i Njemačkom. Ove zemlje su mogle lako da

se "okoriste" izumima koji su pogonili industrijsku revoluciju, iz prostog razloga što su na svojoj teritoriji posjedovali nalazišta uglja koji je bio potreban za pogonjenje mašina i proizvodnju ključnog proizvodnog resursa – željeza i čelika.

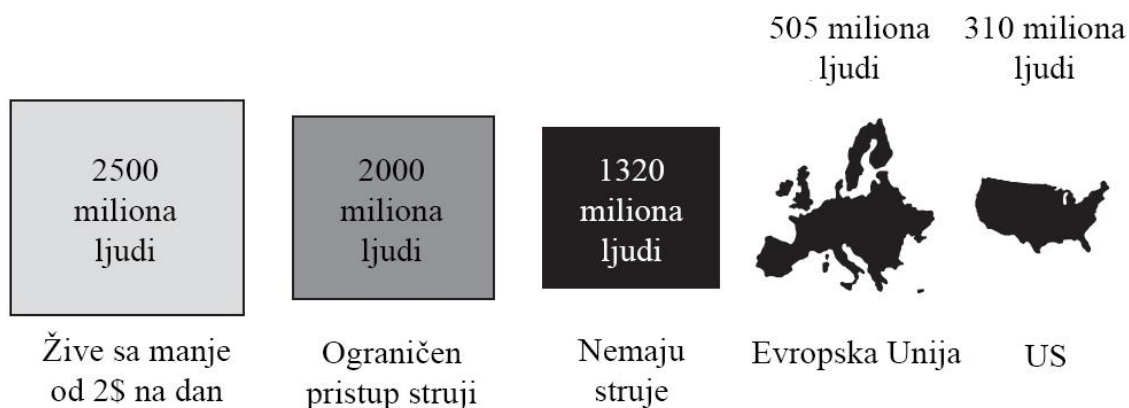
Upotreba uglja nije se zaustavila samo na spaljivanju uglja. Ubrzo je otkriveno da su gasovi koji nastaju pri proizvodnji koksa zapaljivi, što je dovelo do izgradnje postrojenja za proizvodnju gasa koji je služio za rasvjetu.

Na kraju, temelj današnje Europske unije je položen formiranjem "Zajednice uglja i čelika". Stavljanjem kontrole nad ova dva ključna resursa koji omogućavaju proizvodnju oružja, smanjena je mogućnost za buduće ratne sukobe na području Europe i šire.

Iz uglja se danas proizvodi oko 40 % električne energije na planeti. To je vodeći izvor, koji će zbog svoje dostupnosti, cijene i pouzdanosti još dugo vremena to i ostati (Nelson 2013.).

Na UN - ovoj konferenciji o klimatskim promjenama (Kopenhagen 2009.), vodeći stručnjaci su upozorili na neophodnost usklađivanja dvaju potreba:

- potreba nacija/država svijeta da svoje aktivnosti što prije usklade sa rastućim izazovima klimatskih promjena i
- da se ima na umu da su socijalni i ekonomski razvoj i iskorjenjivanje siromaštva prvi i osnovni prioritet zemalja u razvoju.



Slika 1. Ljestvica globalnog siromaštva. Izvor: Svjetska banka 2011, Međunarodna agencija za energiju 2011.

Ključne globalne teme i činjenice koje definišu položaj uglja u svijetu su:

- Trenutno ne postoji praktična alternativa uglju koja bi mogla zadovoljiti svjetske energetske potrebe

- Ekonomsko i ekološko osjetljiva energija je osnova za kontinuirano zdravstveno i ekonomsko blagostanje stanovništva. Električna energija je najbitniji oblik energije za ljudsko blagostanje
- Intervencije vlada u tržišta za rješavanje problema klimatskih promjena mogu imati značajan uticaj na dugoročnu perspektivu upotrebe uglja
- U prošlosti su naučene lekcije da se ne treba pretjerano oslanjati na oskudne, geopolitički rizične izvore energije. Međutim, te lekcije su veoma brzo zaboravljene
- Da bi se pokrili zahtjevi za energijom u budućnosti, svi dostupni izvori energije će morati dati svoj doprinos. Diskriminirati ugalj u odnosu na ostale energetske izvore, samo na osnovu razvojnih planova i politika ne bi bilo mudro.

U svojoj davnoj prošlosti, na Zemlji su postojale guste šume koje su se nalazile u blizini močvarnih područja. Ugalj se formirao od organskog materijala nataloženog u močvarnim područjima. Prirodnim procesima kao što su poplave, ovaj organski materijal je bio zakopan u zemlju stvarajući pritisak na donje slojeve. Sa porastom dubine i pritiska, rasla je i temperatura. Organska materija nastala taloženjem biljaka bila je zaštićena vodom i blatom od biodegradacije i oksidacije. Pod uticajem visokog pritiska i temperature, nastao je ugalj. Na formiranje uglja uticalo je veliki broj faktora – klima, geologija, vrste biljaka i sl., zajedno sa uslovima u močvarama koji su uticali na raspadanje materijala.

Pošto je ugalj većinom sastavljen od karbona, konverzija vegetacije u ugalj naziva se karbonizacija. Finalna faza karbonizacije nastaje kada se ugalj izloži metamorfnoj aktivnosti. Profesor Carl Hilt je 1873. definisao tzv. Hiltov zakon koji govori da "što je ugalj dublje u zemlji, to je većeg ranga". Tvrdnja ima smisla ako je termalna gradacija u potpunosti vertikalna, ali metamorfizam može prouzročiti lateralne promjene u rangu, neovisno o dubini.

Ugalj je kompleksan heterogeni materijal, te postoji mnogo načina njegove klasifikacije. Da bi se uvažila sva njegova heterogenost, prilikom klasifikacije osim na toplotnu moć, potrebno je obratiti pažnju i na njegovu fizičko-hemijsku strukturu, kao i druga važna obilježja. Potreba i naponi da se ugalj klasifikuje datiraju unazad više od dva vijeka. Bilo je potrebno uvesti reda u zbunjujuće obilje različitih vrsta i kvaliteta uglja. Klasifikacija uglja olakšala je trgovinu ugljem. Postoje razni sistemi klasifikacije uglja (Američki, Ruski, Britanski, Njemački itd.)

Osnovna podjela koja se najčešće koristi na našem području je podjela u tri grupe prema kaloričnosti:

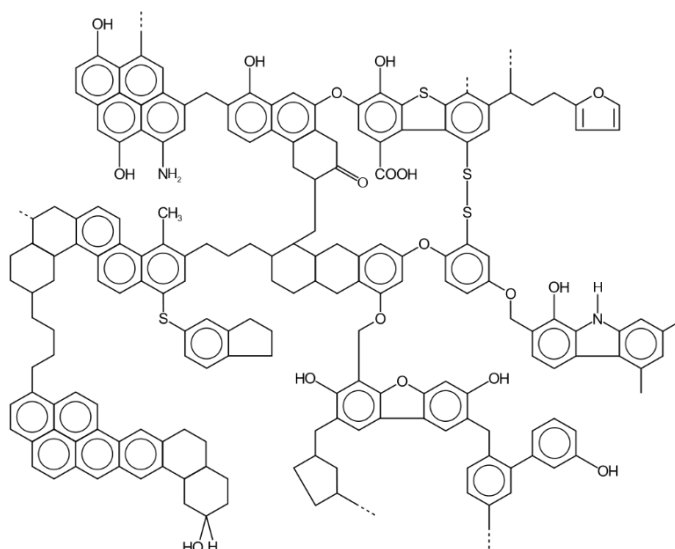
Tabela 1. Osnovne kvalitativne karakteristike ugljeva (Petrović 2008.)

Vrsta uglja	Ogrjevna moć MJ/kg	Sadržaj vlage %	Isparljivi sastojci %	Sadržaj ugljika %
Lignit	do 12,56	31 – 60	51 – 60	65 – 70
Mrki ugalj	12,80 – 23,90	11 – 30	46 - 50	71 – 80
Kameni ugalj	24,00 – 37,70	do 10	4 – 45	81-98

Kameni ugalj po količini isparljivih tečnosti dijeli se na više podgrupa:

- antracit (4-7 %)
- poluantracit (8-12 %)
- mršavi kameni ugalj (13-18 %)
- masni kameni ugalj (19-35 %)
- gasni kameni ugalj (13-18 %)
- gasno - plameni kameni ugalj (39-45 %).

Podjela ugljeva se može vršiti prema namjeni, materijalu od kojeg vode porijeklo, te fizičkim, hemijskim i drugim karakteristikama. Mrki i kameni ugalj nazivamo bituminoznim dok lignit zovemo smeđim. Osnovna mjera za gradaciju ugljeva po kvalitetu je količina mineralne materije prisutne u uglju. Vlaga, sadržaj sumpora, količina pepela, ponašanje pepela na visokim temperaturama te količina pratećih elemenata takođe predstavljaju važne elemente za određivanje upotrebe ugljeva.

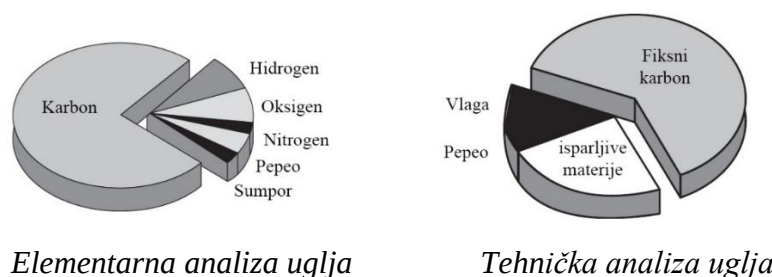


Slika 2. Hemijska struktura (čistog) uglja

Ugalj je izuzetno kompleksan materijal koji pokazuje široku paletu fizičkih karakteristika. Rapidan rast upotrebe uglja u 20-tom vijeku stvorio je potrebu da se naprave metode analize uglja koje će povezati svojstva i sastav uglja sa njegovim 'ponašanjem' pri upotrebi.

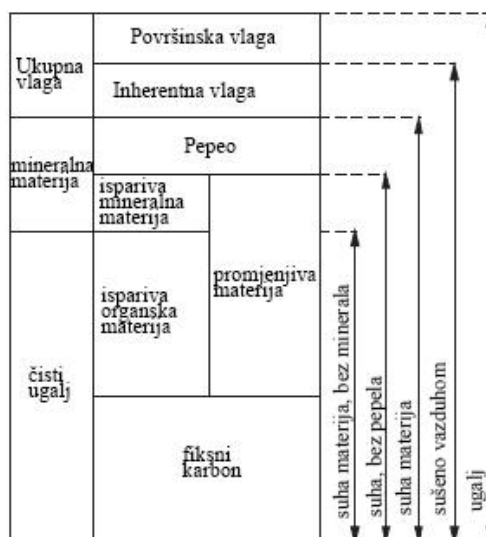
Elementarnom hemijskom analizom (*Ultimate analysis*) određuje se hemijski sastav sagorljivog (organskog) dijela ugljene materije, tj. količina karbona, hidrogena, kisika, azota, sumpora, i fosfora.

Tehničkom analizom uglja (*Proximate analysis*) određuje se sadržaj: vlage, pepela sumpora i isparivih plinskih materija, zatim koks i kalorična vrijednost. Ova analiza obuhvata sve pokazatelje od kojih ovisi praktična vrijednost uglja kao goriva.



Slika 3. Elementarna i tehnička analiza uglja (Speight 2005.)

Nivo starosti uglja poznat je kao rang (*Rank*) i pokazatelj je nivoa metamorfizma koji je ugalj dostigao. Rang je takođe mjera sadržaja karbona, jer se zna da povećanje procenta karbona znači povećan nivo metamorfizma. Radi lakšeg razumijevanja kvantitativnih odnosa gradivnih elemenata uglja, dati su sljedeći dijagrami:



Slika 4. Sastav uglja (Miller 1984.)

Postoje detaljno razrađene (korak po korak) metode i protokoli za testiranje uglja za elementarnu i tehničku analizu uglja, sadržaj mineralne materije, te određivanje fizičkih, električnih, termičkih, mehaničkih i drugih relevantnih svojstava uglja. Na osnovu tih analiza, određuju se moguće upotrebe uglja i biraju tehnologije za njegovu upotrebu.

U svijetu se ulažu velika sredstva u unaprjeđenje tehnologije korištenja uglja. Neka dostignuća tog razvoja, poput visoke termičke efikasnosti procesa i ostvarivanja niskog nivoa zagađenja okoliša, sastavni su dio komercijalne ponude opreme na svjetskom tržištu. Da bi se ugalj efikasno koristio u pomenutoj opremi, potrebno je izuzetno dobro poznavanje karakteristika uglja kao goriva.

Industrije bazirane na uglju igrale su ključnu ulogu u razvoju modernog svijeta, te je za očekivati da će se takvo stanje zadržati još dugo vremena, a naročito u zemljama u razvoju.

Ugalj je preovlađujuće i široko rasprostranjeno fosilno gorivo, gdje su procjene da se 64 % globalnih rezervi fosilnih goriva odnosi na ugalj, u odnosu na 19 % nafte i 17 % prirodnog gasa. Procjenjuje se da će potražnja za ugljem do 2030. godine porasti za 50 %, najviše zbog velikog ekonomskog rasta Indije i Kine (Osborne 2013.).

Jednako kao i kod klasifikacije i sastava uglja, brojni su kriteriji i načini klasifikovanja tehnologija upotrebe uglja. Većina autora koristi podjelu na ugalj kao gorivo, ugalj korišten za proizvodnju čelika, gasifikacija i likvefakcija uglja te ugalj za hemijsku preradu.

Ugalj je osnovno gorivo za proizvodnju struje i zagrijavanje prostora na planeti. Pouzdan je, jeftin i ima ga u izobilju širom planete. Isplativ mu je i transport zbog velikog sadržaja energije u relativno maloj masi. Termoelektrane na ugalj generišu preko 40 % svjetske proizvodnje električne energije. Za sagorijevanje uglja u termoelektranama dominantno se koriste dvije osnovne tehnologije sagorijevanja:

1. sagorijevanje ugljenog praha pomiješanog sa vazduhom (*Pulverised Coal - PC*)
2. sagorijevanje u fluidizovanom sloju (*Fluidized bed – FB*).

Kvalitet uglja je najvažniji parametar koji određuje koja će se tehnologija spaljivanja koristiti. PC tehnologija je najčešće korištena tehnologija u velikim sistemima, i u upotrebi je već 70 godina. Postoje kotlovi snage preko 1,2 GW, koji sagorijevaju i do 500 tona na sat (Juniper 2013.). Kada se ugalj koristi za proizvodnju električne energije, on se spaljuje u pećima koje zagrijavaju vodu. Voda se pretvara u vodenu paru koja preko mlaznica pokreće električne generatore koji proizvode električnu energiju. Moderne elektrane mogu koristiti i više različitih ugljeva, mada nije uvijek sigurno da će bilo koji ugalj odgovarati bilo kojoj elektrani.

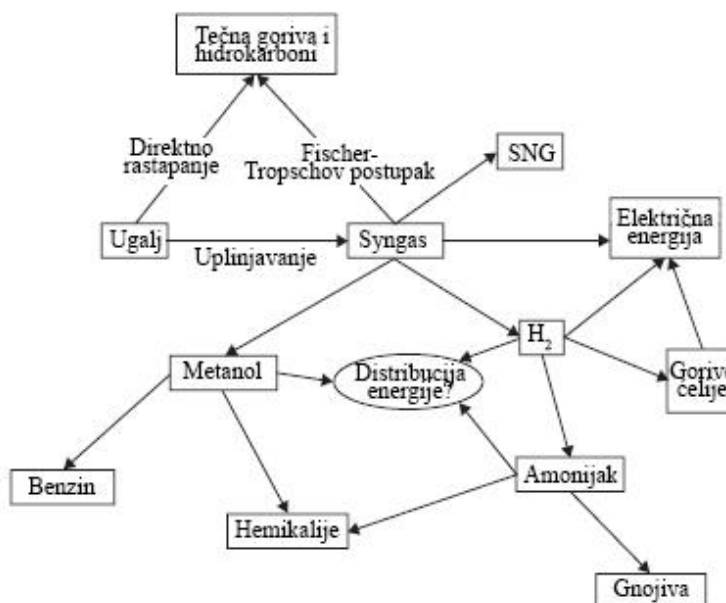
Emisije koje nastaju spaljivanjem uglja kao što su sitne čestice, sumpor, nitrogen oksidi, živa i dugi prateći elementi, u značajnoj mjeri mogu biti kontrolisani tehnologijama koje su u komercijalnoj upotrebi (Alderman 2013.).

Kao najbolji i najbrži način za smanjenje CO₂ emisije za sada se pokazalo povećanje efikasnosti postojećih termoelektrana. Procjene su da većina njih radi na oko 28 % efikasnosti, dok su moderne sposobne ići i do 45 % efikasnosti.

Čelik je vjerovatno najvažniji građevinski materijal današnjice. Karbon je glavni redukcijski agent i izvor topline u procesima pretvaranja rude željeza u željezo i dalje u čelik (Babich 2013.). Metalurški ugalj ili ugalj za koksovanje od vitalne je važnosti za proizvodnju gvožđa i čelika. Preko 70 % svjetske proizvodnje čelika iz gvozdene rude ovisno je o uglju. U 2010-toj godini svjetska proizvodnja sirovog gvožđa iznosila je 1,4 milijardi tona, za šta je oko 720 miliona tona uglja iskorišteno za koksovanje. Ugalj koji se koristi u ovoj industriji trebao bi imati mali sadržaj pratećih elemenata, da bi se spriječio njihov prelazak u metal.

Koks je čvrsto, energetski intenzivno karbonsko gorivo koje nastaje zagrijavanjem viših vrsta ugljeva bez prisustva kisika. Proizvodi se u koksnim pećima a koristi se pri proizvodnji željeza i čelika kao gorivo u visokim pećima.

Otkriće gasova koji se oslobađaju iz uglja veže se za početak 17. vijeka, kada je belgijski hemičar Jan van Helmot uvidio da se pri zagrijavanju uglja otpuštaju gasovi. Gasifikacija uglja je proces u kome se ugalj pretvara u sintetski gas (*Syngas*), koji je mješavina karbon monoksida (CO) i hidrogena (H₂).



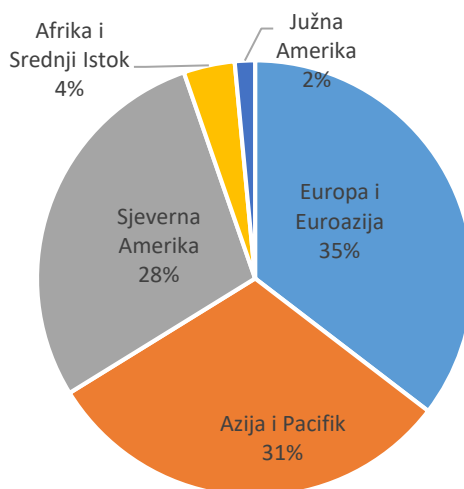
Slika 5. Produkti gasifikacije i likvefakcije uglja (Haris 2013.)

Proces počinje miješanjem uglja sa oksigenom i vodenom parom, istovremeno grijući sistem pod velikim pritiskom. Tokom reakcije, oksigen i molekule vode oksidiraju ugalj u karbon monoksid (CO), otpuštajući gas hidrogen (H₂).

Tako proizveden sintetski gas se može koristiti na više načina:

- direktno spaljivati u turbinama za proizvodnju električne energije
- ubacivati u Fischer-Tropschov postupak kojim se može dobiti paleta ugljikovodikovih goriva
- proizvodnja metanola
- proizvodnja hidrogena za "ekonomiju pogonjenu hidrogenom" (*Hydrogen Economy*).

Ugalj se može prerađivati na veliki broj načina, od kojih su najzanimljiviji likvefakcija (proizvodnja tečnih goriva) i gasifikacija (proizvodnja gasova).



Slika 6. Globalna distribucija dokazanih svjetskih rezervi uglja. Izvor: BP Statistical Review of World Energy (2012.).

Zalihe uglja na planeti se procjenjuju na oko 890 biliona tona. Ovi resursi su geografski pravilno raspoređeni. U većini industrijaliziranih zemalja kroz istoriju ugalj je bio ključni izvor energije i glavni pokretač ekonomskog rasta. Danas industrija vađenja uglja prolazi značajnu tranziciju. Trend je da se kreće prema automatizaciji procesa, mašine i sistemi uzimaju sve veću ulogu u upravljanju, a sve to da bi se postigao što veći stepen efikasnosti, sigurnosti, profita i ekološke zaštite. U nastavku su kvantificirane osnovne činjenice vezane za proizvodnju i upotrebu uglja u svijetu.

Zemlja	Ukupno	Postotak na svjetskom nivou
 SAD	237.295	22,6
 Rusija	157.010	14,4
 Kina	114.500	12,6
 Australija	76.400	8,9
 Indija	60.600	7,0
 Njemačka	40.699	4,7
 Kazakhstan	33.600	3,9
 Ukrajina	33.873	3,9
 JAR	30.156	3,5
 Srbija	13.770	1,6
 Kanada	6.528	0,8
 Kolumbija	6.746	0,8
 Poljska	5.709	0,7
 Indonezija	5.529	0,6
 Brazil	4.559	0,5
 Grčka	3.020	0,4
 Bosna i Hercegovina	2.853	0,3
 Bugarska	2.366	0,3
 Mongolija	2.520	0,3
 Pakistan	2.070	0,3
 Turska	2.343	0,3
 Mađarska	1.660	0,2
 Uzbekistan	1.900	0,2
 Albanija	794	0,1
 Argentina	550	0,1
 Češka	1.100	0,1
 Iran	1.203	0,1
 Kirgistan	812	0,1
 Laos	503	0,1
 Meksiko	1.211	0,1
 Novi Zeland	15.000	0,1
 Sjeverna Koreja	600	0,1
 Španija	530	0,1
 Tajland	1.239	0,1
 Zimbabve	502	0,1
UKUPNO:	891.530	100

Tabela 2. Dokazane svjetske rezerve uglja (u milionima tona i postotcima)

Tabela 3. Najveći proizvođači uglja

Zemlja	Postotak
 Kina	47,7 %
 SAD	11,9 %
 Indija	7,4 %
 Europska Unija	3,8 %
 Australija	7,2 %
 Indonezija	6,3 %
 Rusija	4,8 %
 JAR	3,7 %
 Njemačka	1,1 %
 Poljska	1,4 %
 Kazahstan	1,2 %

Tabela 5. Najveći izvoznici uglja

Zemlja	Postotak
 Indonezija	29,8 %
 Australija	23,5 %
 Rusija	10,7 %
 SAD	8,7 %
 Kolombija	6,5 %
 JAR	5,8 %
 Kanada	2,7 %
 Kazahstan	2,5 %
 Mongolija	1,7 %
 Vijetnam	1,5 %
 Kina	1,1 %

Tabela 4. Najveći potrošači uglja

Zemlja	Postotak
 Kina	50,0 %
 Indija	10,6 %
 SAD	10,3 %
 Europska Unija	6,8 %
 Japan	3,1 %
 Rusija	2,3 %
 JAR	2,2 %
 Južna Koreja	2,2 %
 Indonezija	2,1 %
 Njemačka	2,0 %
 Poljska	1,3 %
 Australija	1,2 %
 Turska	0,9 %

Tabela 6. Najveći uvoznici uglja

Zemlja	Postotak
 Japan	17,5 %
 Kina	16,6 %
 Južna Koreja	10,7 %
 Indija	8,6 %
 Tajvan	6,0 %
 Njemačka	4,7 %
 Turska	2,5 %
 UK	2,5 %
 Italija	1,9 %
 Holandija	1,9 %
 Rusija	1,9 %
 Francuska	1,8 %
 SAD	1,8 %

1

Ugalj je već decenijama glavni energetske resurs Bosne i Hercegovine. Brojne nove termoelektrane u fazi su planiranja ili izgradnje, što je jasan znak da će se u doglednoj budućnosti malo raditi na otklonu od ovisnosti o električnoj energiji proizvedenoj iz uglja. Dok je sa jedne strane najjeftinije gorivo za proizvodnju električne energije, ugalj ima i svoju tamnu stranu o kojoj se sve više govori. To su respiratorne bolesti rudara i stanovništva, rudarske

¹ Podaci u tabelama 1-5 preuzeti sa www.wikipedia.org, pristupljeno 22. 09. 2018. godine

nesreće, kisele kiše, smanjeni prihodi u poljoprivredi i klimatske promjene. Šteta koja nastaje prilikom rudarenja i spaljivanja uglja ne ogleda se u njegovoj cijeni po toni ili cijeni električne energije, ali svijet tu cijenu definitivno plaća.

Kada izađe iz rudnika, u većini slučajeva mu je potrebno čišćenje prije nego bude poslat na upotrebu u sofisticiranim savremenim postrojenjima. To čišćenje ili priprema uglja može varirati od najobičnijeg drobljenja da bi se dobila granulacija koja odgovara određenom tipu postrojenja, do vrlo zahtjevnog mljevenja i čišćenja da bi se odvojio sumpor i mineralna materija od koje nastaje pepeo. Nivo do kojeg se ugalj čisti zavisi prvenstveno od kupca, tj. tržišta za koje se ugalj priprema. Jedan od glavnih zahtjeva je da ugalj nema više od 10 % pepela. Praktična rješenja u pripremi uglja variraju globalno u istoj mjeri kako variraju i karakteristike uglja i tržišni zahtjevi.

Korištenjem elektrostatskih filtera moguće je se iz dimnih plinova odstraniti do 99,5 % lećećeg pepela i smanjiti emisija opasnih tvari. Filteri rade na principu polja elektrostatike u kojem se čestice skupljaju na anodi. Odsumporavanjem dimnih plinova smanjuje se emisija sumporovih oksida (SO_x). Sumpor u uglju može ali i ne mora biti hemijski vezan. Postupak se izvodi na način da se kalcijev karbonat pomiješan s vodom raspršuje sa vrha postrojenja na dimne plinove, koji reagujući sa smjesom stvaraju kalcijev sulfat (gips).

Tehnologije čistog uglja (*eng. Clean coal technologies* ili *CCT*) razvijene su kao napor da se nastavi upotreba uglja za proizvodnju električne energije, dok se u isto vrijeme pazi i na zagađenje okoliša. Rani pokušaji svodili su se na pokušaje smanjenja emisije sumpora radi ublažavanja zabrinutosti zbog kiselih kiša tehnologijom hvatanja SO₂.

Trenutno najznačajniji napredak je postignut na polju povećanja koeficijenta korisnog dejstva cijelih postrojenja (Nelson 2013.). Ovo je vrlo značajno jer napredak od 1 % u efikasnosti postrojenja rezultira 3 % smanjenja CO₂ emisije.

Tehnologije za povećanje iskorištenja termoelektrana najviše je povezano sa radnim pritiscima i temperaturama. U tom smislu postoje:

- nadkritične tehnologije, iskorištenje od 42 % do 43 %
- ultra nadkritične tehnologije, iskorištenje do 45 %
- napredna ultranadkritična tehnologija sa iskorištenjem većim od 50 %.

Razlike u pomenutim tehnologijama se uglavnom odnose na radne temperature i pritiske, jer svaka od tehnologija zahtijeva poboljšanje u materijalima, izradi (varenju), mjernim instrumentima i sl. Konvencionalne termoelektrane rade u podkritičnim uslovima, a nekonvencionalne termoelektrane nadkritičnim parametrima rada. Osnovna razlika u njima je

ta da termoelektrane s novim tehnologijama, odnosno nadkritičnim parametrima rada, manje zagađuju okolinu i imaju veću iskoristivost.

Kombinovane termoelektrane (*Combine Cycle Gas Turbine - CCGT*) su elektrane koje koriste prirodni gas i ugalj kao gorivo. Ovo je veoma popularan postupak povećanja kapaciteta i iskorištenja postojećih termo blokova, jer zahtijeva mala ulaganja, a dobija se povećanje kapaciteta i što je još važnije, povećanje iskorištenja na oko 50 %.

Kombinovani proces s integrisanim uplinjavanjem (*IGCC*) tehnologija je kojom se ugalj, otpad ili biomasa pretvaraju u sintetski plin. Isti se koristi za proizvodnju električne energije. Višak toplote iz primarnog procesa sagorijevanja odvodi se u generator pare, rezultirajući većim iskorištenjem u poređenju sa konvencionalnim termoelektranama na ugalj. Iskoristivost im je 39-42 %.

Tehnologija proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva uz nultu emisiju CO₂ još nisu razvijene do nivoa komercijalne isplativosti. Naučna dostignuća vezana za razvoj tehnologija čistog uglja treba redovno pratiti te uzimati u obzir prilikom donošenja strateških odluka o izgradnji elektroenergetskih sistema. Tehnologija hvatanja i skladištenja karbon dioksida (*CCS - Carbon Capture and Storage*) jedina je tehnologija koja značajno može umanjiti emisiju CO₂ koja nastaje spaljivanjem fosilnih goriva za proizvodnju električne energije. Ovim sistemom prvo se CO₂ prikupi, kompresuje, zatim transportuje i na kraju sigurno pohranjuje, najčešće ispod zemlje. Razvojem CCS tehnologije, izgledno je da ćemo u skoroj budućnosti imati termoelektrane na ugalj koje će imati CO₂ otisak (*footprint*) približan nuli.

Bez obzira na nove tehnologije koje omogućavaju lakšu upotrebu alternativnih i obnovljivih izvora energije, te unatoč pritisku javnosti da se smanji upotreba uglja zbog negativnog efekta koji ima na okoliš, ugalj je i dalje primarni izvor za proizvodnju električne energije. Više ljudi, više privrede i više urbanizacije automatski znači i veću potrebu za energijom. Više energije znači i više uglja, svjetske osnove za proizvodnju električne energije.

Opskrba adekvatnom i pristupačnom električnom energijom za 8,5 milijardi ljudi koji će naseljavati planetu 2035. godine zavisit će od dostupnosti, proizvodnje i potrošnje pouzdane, jeftine električne energije, a ugalj je odlično pozicioniran da sve ovo obezbijedi. Države u razvoju sve više će se oslanjati na ugalj da bi zadovoljile svoje enormne potrebe za energijom. Postoje procjene Europske komisije da će globalne potrebe za energijom u sljedećih 20 godina porasti za 60 %. Sve su prilike da će proizvodnja i upotreba uglja, u budućnosti značajno rasti u odnosu na današnji nivo (Fecko 2013.).

Električna energija proizvedena iz uglja je bila, i nastavit će to da bude, kamen temeljac globalnog razvoja. Ugalj je glavni motor koji pokreće ekonomska čuda koja se dešavaju u Kini

i Indiji na početku 21. vijeka. Ugalj kao izvor energije ima značajan potencijal da podupre globalne napore za iskorjenjivanje siromaštva, ekspanziju ekonomskog rasta, i izazove klimatskih promjena. Jedino se oslanjanjem na raznorodne energente, pa samim time jednim dijelom i na ugalj, može dugoročno osigurati sigurnost opskrbe električnom energijom. Ugalj takođe nije bez svojih izazova. Odgovor leži u tehnologiji.

2. 2. KLASIFIKACIJA POSTUPAKA ČIŠĆENJA UGLJA

Priprema mineralnih sirovina je dio rudarske nauke koji se bavi odvajanjem mineralne sirovine od jalovine. Najzaslužniji doprinos za evoluciju iz vještine obogaćivanja ruda u nauku i tehnologiju pripreme mineralnih sirovina (*Mineral Processing*) bio je Taggart.

Tehnologija čišćenja (pripreme ili oplemenjivanja) uglja pokriva širok opseg tehnoloških procesa koji mogu biti primijenjeni, a tokom kojih se nečistoće (neželjeni sadržaj) kao što su pepeo, stijene, sumpor i voda uklanjaju iz uglja, da bi se unaprijedio kvalitet uglja, tj. da bi mu se povećala tržišna vrijednost.

U zadnje vrijeme naročito postaje važna činjenica da procesi pripreme uglja mogu donijeti značajnu korist za okoliš, koji se mogu ogledati u smanjenju emisija SO₂ i CO₂ te sitnih čestica prašine pri spaljivanju uglja, na način da se potrošačima obezbijedi relativno čist ugalj. Glavni stimulus industrija prerade uglja dobila je 60 - tih godina prošlog vijeka, kada je zbog naglog povećanja upotrebe mehanizacije za dobijanje uglja i neselektivnog otkopavanja došlo do takođe naglog pogoršanja kvalitete rovnog uglja. Dodatni razvoj nastupio je zbog sve veće potrebe rudarskih kompanija da pruži proizvod koji je što bliži zahtjevima sve zahtjevnijih kupaca. Tokom zadnjih godina, kontinuirani razvoj procesa, te ulaganja u istraživanje i razvoj, doveli su do značajnih promjena na bolje u praksama pripreme uglja, i ovaj trend će se po svemu sudeći nastaviti u doglednoj budućnosti.

Oplemenjivanje uglja, čišćenje uglja ili priprema uglja nazivi su za grupu fizičko-hemijskih procesa kojima se neorganska onečišćenja izdvajaju (čiste) iz uglja. Na taj način unapređuju se karakteristike uglja kao goriva. Separacijski procesi koji se koriste bazirani su na korištenju najčešće fizičkih razlika između organskog dijela (ugalj) i neorganskih komponenti (pepeo). Čisti ugalj je oksimoron, gotovo pa nemoguća misija, jer ugalj po svojoj prirodi nije čist. Preciznije, nije nemoguća već finansijski neisplativa misija, zato što nove tehnologije koje omogućavaju čišćenje uglja do mjere da se pri sagorijevanju oslobađaju zanemarive količine štetnih tvari značajno poskupljuju proces i čine ga neisplativim i nekonkurentnim u odnosu na druge energente.

Većina uglja koji se proizvede u rudnicima prođe kroz neku vrstu pripreme prije upotrebe. Priprema može varirati od jednostavnog drobljenja da bi se olakšalo rukovanje i kontrolisala krupnoća za specifičnu upotrebu, pa sve do operacija čišćenja koje uključuju uklanjanje neorganskog sumpora i materija koje formiraju pepeo.

U prirodi se ugalj nalazi povezan i izmiješan sa okolnim stijenama. Uklanjanje neželjenih pratećih stijena i drugih minerala, a da to ostane u ekonomski isplativim granicama osnovni je zadatak svih operacija čišćenja uglja.

Prema nivou pripreme uglja, procese dijelimo na sljedeće nivoe (Phillips i DeRienzo 1976.):

Nivo A: Nema pripreme

Nivo B: Drobljenje da bi se kontrolisala vršna krupnoća sa malim, ako ikakvim, odvajanjem krupnog otpada i smeća

Nivo C: Čišćenje krupnih klasa. Ugalj ispod 9,5 mm otprema se bez čišćenja

Nivo D: Čišćenje krupnih i sitnih faza. Ultrafini ugalj se ne čisti i može se prodavati u stanju kakvo jeste ili se izbacivati. Nešto malo termalnog sušenja

Nivo E: Sve veličine se čiste. Termalno sušenje sitnih klasa potrebno je da bi se ograničio sadržaj vlage

Nivo F: Najrigorozniji nivo čišćenja uglja. Može uključivati izdvajanje dva ili više korisnih proizvoda u multistrim sistemu za čišćenje uglja.

Imperativ za sve ove procese je da budu efikasni, ali i cjenovno prihvatljivi. Prema kompleksnosti, procese pripreme rovnog uglja se generalno mogu svrstati u tri grupe:

1. jednostavni postupci koji obuhvataju prosijavanje (klasiranje) sa ili bez drobljenja i ručnog odabiranja
2. postupci koji se zasnivaju na principima gravitacijske koncentracije
3. postupci flotacijske koncentracije.

Ovi procesi mogu uključivati jednostavnije postupke pripreme rovnog uglja kao što su prosijavanje u sortimane ili drobljenje, ali i znatno kompleksnije postupke kao što su čišćenje i obogaćivanje. Tradicionalna uloga pripreme uglja je da primjenom uglavnom fizičko-mehaničkih procesa rovnom uglju poveća tržišnu vrijednost.

Postupci čišćenja uglja ovise o tome koja je fizičko-hemijsko-mehanička osobina uglja korištena kao kriterij za odvajanje. Osnovna podjela može se izvršiti na sljedeći način:

- gravitacijska koncentracija – razlika u specifičnoj težini
- flotacija - odvajanje na osnovu površinskih osobina zrna
- hemijsko čišćenje
- biološko čišćenje.

U današnje vrijeme hemijski procesi čišćenja uglja su još uvijek u razvojnoj fazi, a za širu primjenu su trenutno neprihvatljivi zbog još uvijek nedovoljno istraženih tj. nepredvidivih izlaznih karakteristika, ali i cijene koja je daleko iznad prihvatljive tržišne vrijednosti. Separacija gravitacijskom koncentracijom bazira se na razlici u specifičnoj težini uglja i jalovine. U slučaju flotacije, za separaciju se koristi razlika u površinskim osobinama zrna. Vidljivo je da za čišćenje uglja dominiraju dva separacijska principa:

- separacija bazirana na razlici u specifičnoj težini između uglja i ostalih mineralnih materija. Čisti ugalj ima specifičnu težinu $1,3 \text{ kg / dm}^3$, dok pridružena mineralna materija (jalovina) obično iznad $2,2 \text{ kg / dm}^3$.
- separacija bazirana na razlici u površinskim osobinama zrna između uglja i jalovine, jer je ugalj hidrofoban, dok je jalovina generalno hidrofilna.

Ostale metode, koje uključuju magnetne, elektrostatske, hemijske i biološke procese čišćenja, do sada su privukle značajnu pažnju, ali u biti nisu ni blizu da postanu komercijalno isplativi. Veza između izbora tehnologije obogaćivanja od granulacije uglja bit će obrađena dalje u radu. Gravitacijska koncentracija uglja je daleko najviše korištena grupa postupaka za pripremu uglja. Na onovu medija koji je korišten za gravitacijsku koncentraciju uglja, prepoznamo:

- mokra separacija (voda, teška sredina, autogena suspenzija)
- suha - zrak.

Suho separisanje se obavlja većinom u pneumatskim mašinama taložnicama, mada postoje i drugi manje zastupljeni postupci. Uređaji suhe separacije su optički sorteri sa X-zrakama, pneumatske mašine taložnice i stolovi. Suha separacija ima mnoge potencijalne prednosti, uključujući smanjenu upotrebu vode, što je atraktivno u sušnim, ali i predjelima sa izuzetno niskim temperaturama. Osim toga, eliminiraju se troškovi sušenja uglja, te se smanjuju troškovi transporta. Iako je trenutno vrlo malo zastupljeno, suho separisanje dobija na važnosti kako se rudarenje pomijera prema veoma hladnim i/ili sušnim područjima. Suha separacija sa druge strane ima veliki nedostatak koji se ogleda u smanjenoj efikasnosti odvajanja u odnosu na mokro separisanje. Tu su i rizici od eksplozije zbog generisanja velike količine ugljene prašine. Mokro separisanje može se odvijati:

- u teškoj sredini
- u autogenoj suspenziji
- u vodi.

Mokro separisanje uglja se najčešće obavlja u mašinama taložnicama, teškotekućinskim separatorima i ciklonima. Razlike u specifičnoj težini materijala se koriste da bi se izvršilo odvajanje i koncentracija željenih komponenti. Pokretačka sila za to odvajanje može biti

Zemljino gravitaciono polje ili mnogostruko intenzivnija polja koja se generišu centrifugalnim uređajima.

Gravitacijski postupci i uređaji se takođe mogu podijeliti u 2 grupe:

- proizvedeni medijum
- autogena suspenzija.

U prvom slučaju, separacija se odvija u tečnom mediju koji je proizveden tako da mu je specifična težina između specifičnih težina rude i jalovine. Primjeri uređaja su teškotekućinski drumovi i teškotekućinski cikloni. U uređajima sa autogenom suspenzijom sredina u kojoj se odvija separacija se kreira od vode i sitnih čestica materijala koji se prerađuje. Primjeri uređaja koji koriste autogenu suspenziju su mašine taložnice, Parnabi uređaji i sl..

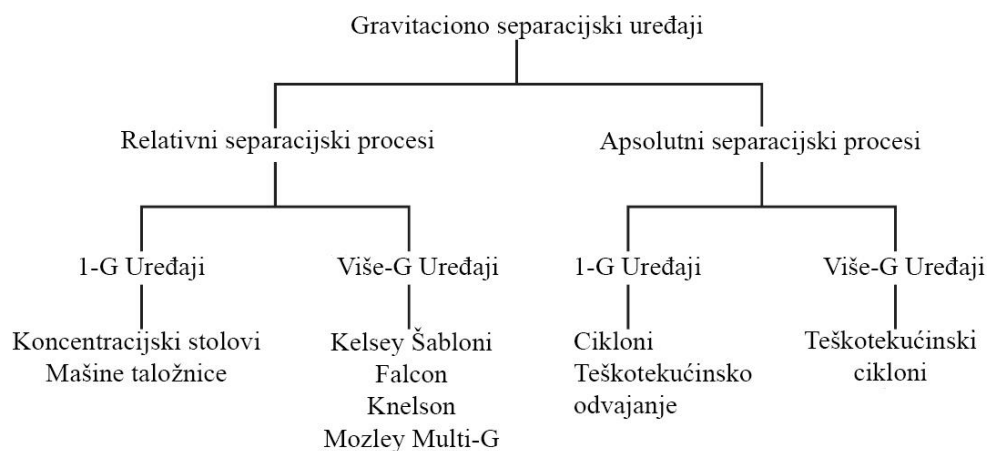
Treću grupu gravitacijskih uređaja koji se oslanjaju na kompleksne fizičke procese da bi se postigla separacija zrna različite specifične težine čine spiralni koncentratori i klatni stolovi.

Prema cjelovitosti postupka, postoje dvije mogućnosti:

- detaljno čišćenje - *total washing*
- djelimično čišćenje - *partial washing*.

Detaljno čišćenje uglja se primjenjuje ondje gdje se traži visoka kvaliteta proizvoda (npr. kod uglja za koksovanje). Za većinu energetske primjene, nije neophodno da se prečišćava cijela količina rovnog uglja. Obično se prije čišćenja uglja suhim odsijavanjem odvoje sitne frakcije koje se dalje prodaju same ili spaljuju bez ikakve dalje pripreme.

Gravitacijski postupci se mogu podijeliti i na osnovu činjenice koliko silu gravitacije koriste, tj. da li osim gravitacijske koriste i centrifugalnu silu da bi poboljšali efekat odvajanja. Ovakvi koncentratori nazivaju se i centrifugalnim.



Slika 7. Podjela opreme za gravitacijsku koncentraciju na osnovu intenziteta djelujuće sile (Darling 2011.)

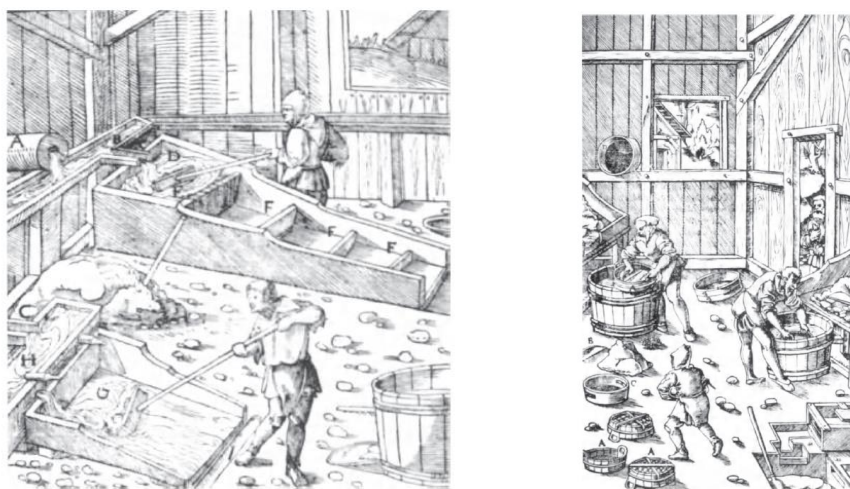
Svaki od uređaja ima optimalnu granulaciju na kojoj daje najbolju oštrinu odvajanja, dok se sila korištena za separaciju izražava proizvodom sa gravitacijskom silom (1G i VišeG uređaji).

2. 3. PRINCIPI GRAVITACIJSKE KONCENTRACIJE UGLJA

Većina minerala i ruda u prirodi se nalazi kao dio kompleksnih stijenskih struktura, međusobno izmiješani, te je potrebno izvršiti njihovo odvajanje. Ovakvo odvajanje rude od jalovine naziva se priprema mineralnih sirovina, i obično se izvodi relativno jednostavnim fizičko-mehaničkim operacijama koje značajno ne narušavaju fizičke i hemijske osobine tretiranog materijala.

Procesi pripreme mineralnih sirovina, a naročito procesi gravitacijske koncentracije, osim na rudu i jalovinu mogu se primijeniti i na industrijski otpad, u prehrambenoj industriji i slično. Kako su rude koje su se lako vadile trošile i postajale rijetkost, a selektivno rudarenje postalo nepraktično, ukazivala se potreba za ručnim sortiranjem. Vrlo brzo nakon toga ljudi su shvatili da ako korpu materijala koja sadrži lake i teške minerale podižu i spuštaju dovoljno brzo, unutar iste se izvrši raslojavanje materijala po specifičnoj težini, tj. na dno će pasti teži, a na površini će biti lakši materijali. Sljedeći korak u evoluciji bio je da se isti postupak odvija u fluidu-mediju gušćem od zraka – vodi, što je još više proces ubrzalo jer se te i takve mašine po principu rada vrlo malo razlikuju od današnjih.

Gravitacijska koncentracija je najstarija od svih koncentracijskih postupaka pripreme mineralnih sirovina, odmah uz ručno odabiranje i na sceni je već minimalno 2000 godina. Na egipatskim spomenicima koji datiraju prije više od 3.000 godina PNE prikazano je odvajanje zlata koristeći razliku u specifičnoj težini. Atinjani su prije više od 2000 godina koristili gravitacijsku koncentraciju u svojim rudnicima Laurium. Arheološka istraživanja otkrila su primjenu procesa koncentracije mineralnih sirovina (olovo, srebro) koja datiraju 300 - 400 godina PNE (Gupta 2016.). U šesnaestom vijeku Agricola (1556.) je u svom djelu *De Re Metallica* opisao nekoliko vrsta gravitacijskih uređaja koji su u to vrijeme korišteni u Europi.



Slika 8. Procesi gravitacijske koncentracije opisani su u djelu De Re Metallica, Agricola, 1556. godine

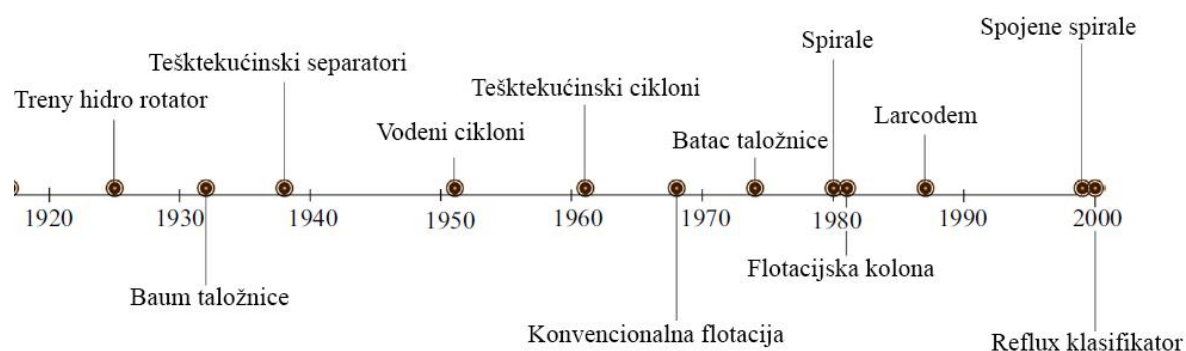
Djelo T'ien-kung K'ai-Wu prikazuje kinesku tehnologiju u sedamnaestom vijeku (Sung 1637.). U Europi devetnaestog vijeka von Rittinger je prednjačio u provođenju teoretskih i praktičnih studija. Kasnije istog vijeka Richards je u SAD radio na postavkama osnovnih principa gravitacijske koncentracije. Dvadesetih godina prošlog vijeka Finkley (1924.) je uspostavio mnoge matematičke relacije koje opisuju proces. Sredinom istog vijeka Gaudin (1939.) i Taggart (1945, 1951.) su proširili i zaokružili principe na kojima se gravitacijska koncentracija zasniva. Tek u dvadesetom vijeku njena važnost je malo opala zbog pojave procesa kao što su flotacija i magnetna separacija, koji su omogućili selektivan tretman niskokoncentriranih kompleksnih ruda (Burt 1987.). Neovisno o tome, gravitacijska koncentracija ostaje u primarnoj upotrebi za rude željeza, volframa, uglja, zlata i mnogih drugih industrijskih minerala.

Odvajanje dva ili više minerala gravitacijom je rezultat njihovog relativnog kretanja kao odgovor na silu gravitacije, i jednu ili više drugih sila, što često uključuje otpor kretanju koji pruža viskozna tečnost. Gravitacijska koncentracija se zasniva na razlikama u pravcu i brzini kretanja mineralnog zrna kroz fluid (voda, vazduh, teška sredina).

Gravitacijska koncentracija je proces u kojem se čestice mineralne sirovine različitih veličina, oblika i specifične težine odvajaju u fluidu upotrebom gravitacijske ili centrifugalne sile. Proces je dizajniran da separira čestice mineralne sirovine različitih specifičnih težina, ali se u određenoj mjeri radi i o odvajanju na bazi krupnoće i oblika (Aplan 2003.). Faktori koji su važni u određivanju relativnog kretanja čestice u tečnosti uključuju specifičnu gravitaciju, težinu, veličinu i oblik čestica ne samo u apsolutnom smislu, već i u odnosu na ostale čestice u sistemu.

Zadatak uređaja za gravitacijsku koncentraciju je da, primjenom vanjske sile omogući česticama materijala koji se obogaćuje da budu malo odmaknute jedne od drugih, te na taj način omogući njihovo kretanje i razdvajanje po gustini.

Iako je primjena procesa gravitacijske koncentracije jedno vrijeme stagnirala, visoki troškovi alternativnih procesa, zajedno sa razvojem opreme visokog kapaciteta vratili su ih u središte pažnje. Neka od prastarih postrojenja za oplemenjivanje su bila prilično efikasna. Stoga neka jalovišta od prije 2000 godina ne sadrže dovoljno vrijednosti da bi se preradila u savremenim postrojenjima. Ovo naravno nije uvijek istina, te se jalovišta mogu preraditi periodično, sa svakim novim napretkom u postupcima pripreme. Metode pripreme mineralnih sirovina imale su svoje početke veoma davno u istoriji. Neke od tih metoda se i danas koriste na načine veoma slične kao i nekada davno, dok druge koriste iste principe ali za izradu uređaja koriste moderne materijale i pogone ih električni motori (Ilschner 1991.).



Slika 9. Ključni pomaci u razvoju tehnologija za čišćenje uglja (Noble 2015.)

Neki istraživači su ubjeđenja da je legenda o Zlatnom Runu iz Homerove Odiseje bazirana na gravitacijskoj metodi kojom se radila separacija zlata. Životinjsko krzno stavljalo bi se u potok za koji se znalo da nosi čestice zlata te bi na taj način teške čestice zlata propadale u krzno i na taj način bile “hvatane” (Agricola 1556., Wills 2016.).

Priprema uglja, u svojim najranijim formama, datira još iz srednjevjekovlja, mada je glavni stimulus naglom rastu interesa za procese pripreme uglja nastao 60-tih godina prošlog vijeka, kada su u proizvodnju uvedene metode koje su produktivnije, ali su manje selektivne u otkopavanju. U nekim ležištima, trend povećanja produktivnosti i uvećane mehanizacije takođe je bio praćen slabljenjem kvaliteta ugljenih rezervi. Pomenute promjene su generalno dovele do povećanja u sadržaju pepela i vlage u uglju, te smanjenja granulacije.

Uprkos preko 1.000 godina kontinuirane upotrebe (iz niza razloga koji će u radu biti detaljno obrađeni), još uvijek ne postoji integrativna teorija koja čisto i sa zadovoljavajućim nivoom

tačnosti opisuje procese koji se dešavaju unutar radnih komora mašine taložnice (Burt i Mils 1984., De Aguiar 2015.).

Priprema uglja u principu uključuje čišćenje uglja na način da se čestice u kojima dominira ugljena materija odvajaju od čestica u kojima dominira mineralna materija. Proces najčešće ima sljedeći sadržaj i redoslijed:

- tretman rovnog uglja (odsijavanje, drobljenje i sl.)
- čišćenje uglja
- odvajanje po krupnoći
- sušenje uglja
- tretman jalovine i prečišćavanje otpadnih voda.

Priprema uglja nudi niz ekonomskih i ekoloških prednosti:

- povećava se kvalitet a time i vrijednost uglja koji se prodaje
- eksploatacija rezervi čija bi se eksploatacije bez primjene postupaka pripreme uglja smatrala ekonomski i ekološki neopravdanom
- povećana efikasnost i smanjenje potrebe za održavanjem postrojenja za spaljivanje uglja
- poboljšane ekološke karakteristike procesa spaljivanja uglja (smanjena emisija SO₂, CO₂ i finih čestica)

Dva ključna separacijska principa se primjenjuju za odvajanje ugljenih od jalovinskih čestica.

Ovi principi se reflektuju kroz dva glavna tipa procesa:

- procesi bazirani na razlikama u specifičnoj težini između uglja i jalovine. Čisti ugalj ima specifičnu težinu oko 1,3 t/m³, dok je specifična težina jalovine oko 2,2 t/m³
- procesi bazirani na razlikama u površinskim osobinama čestica uglja i jalovine (Budge 2000.).

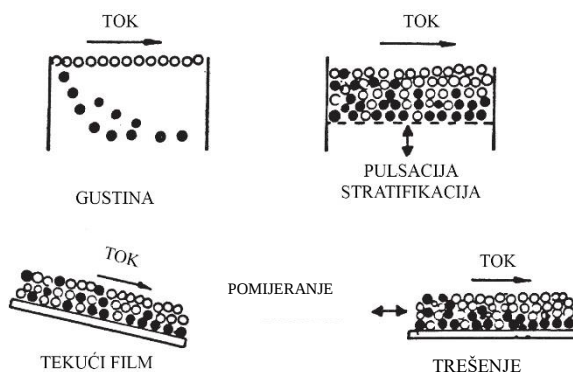
Gravitacijska koncentracija uopšte, a samim time i gravitacijska koncentracija uglja, zasniva se na korištenju razlike u specifičnoj težini minerala i jalovine, da bi se izdvojio jedan ili više minerala koji imaju ekonomsku vrijednost. Separacija se obično odvija potpomognuta razlikom u granulaciji i obliku, a ubrzava se i olakšava primjenom jedne ili više vanjskih sila, obično vertikalne, horizontalne i/ili centrifugalne.

Gline, željezni sulfidi, karbonati (kalcit i dolomit) te silicijum čine većinu jalovine (mineralne materije) u rovnom uglju. Zbog raznolikosti nečistoća u uglju te zbog njihove različite forme, veličine, rasprostranjenosti i koncentracije čak i u jednom ležištu ili dijelu ležišta, razlikuju se i metode i parametri postupaka koji se koriste za čišćenje uglja. Način otkopavanja ležišta takođe je jedan od uticajnih faktora koji se mora uzeti u obzir.

Način rada bilo kojeg uređaja za gravitacijsku koncentraciju ne može se na zadovoljavajući način objasniti primjenom samo jednog mehanizma. Stoga se prilikom predstavljanja načina njihovog rada uvijek koristi kombinacija dva ili više koncentracijskih mehanizama. Nasuprot tome, različiti mehanizmi su zajednički za uređaje koji se potpuno razlikuju, pa se sličnosti mogu koristiti prilikom klasifikacije postupaka i uređaja.

Četiri mehanizma u suštini objašnjavaju rad uređaja za gravitacionu koncentraciju: gustoću, uslojavanje, tečni film i horizontalno pomijeranje (Burt 1984.).

- **Gustoća.** Upotrijebljena viskozna tekućina ima gustoću, ili relativnu gustoću između minerala koje treba odvojiti, tako da jedan mineral ima neto pozitivnu plovnost i plutat će, dok će drugi imati neto negativnu plovnost i potonut će.
- **Uslojavanje.** Različita mineralna zrna se stratificiraju tako što se podvrgavaju isprekidanoj fluidizaciji uzrokovanoj pulsiranjem fluida u vertikalnoj ravnini. Ovakva klasifikacija dešava se i mašinama taložnicama.
- **Tečni film.** Različita zrna se odvajaju njihovim relativnim pomijeranjem kroz struju guste otopine koja teče niz ravninu djelovanjem gravitacije. Koncentracija tečnim filmom je najstariji proces koji se koristi u gravitacionoj koncentraciji i ostaje od velikog značaja.
- **Horizontalno pomijeranje.** Zrna se odvajaju tako što se nanose na tečni film preko oscilacija ili orbitalno.



Slika 10. Različiti mehanizmi klasifikacije gravitacijskom koncentracijom a) Teškotekućinska separacija b) Mašine taložnice c) Tečni film d) Horizontalno pomijeranje (Burt 1984.)

Pojačavanjem uticaja gravitacijske sile upotrebom centrifugalne sile (kao što je slučaj kod novijih centrifugalnih separatora) ne mijenja se mehanizam raslojavanja, već mu se samo pojačava intenzitet (Burt 1999.).

Nisu svi minerali i kombinacije minerala i jalovine pogodni za odvajanje gravitacijskom koncentracijom u svakom fluidu. Da bi se provjerila mogućnost odvajanja određene rude i jalovine u konkretnom fluidu, tj. da bi se izvršio odabir fluida za određeni proces, kao osnovni kriterij koristi se kriterij koncentracije. To je neimenovan broj koji definiše razliku u gustoćama teške i lake frakcije u odnosu na gustinu fluida. Računa se za teži i lakši mineral (ili mineral i jalovinu) i fluid (medij) u kojem se vrši ili namjerava vršiti odvajanje. Razvio ga je Taggart izvođenjem iz Njutnovih jednačina.

$$\text{Kriterij koncentracije} = \frac{\rho_{\text{težeg minerala}} - \rho_{\text{fluida}}}{\rho_{\text{lakšeg minerala}} - \rho_{\text{fluida}}} \quad \text{Jednačina 1}$$

ρ – specifična težina (kg/m^3), voda 1000 kg/m^3 , vazduh $1,23 \text{ kg/m}^3$

Prema fluidu u kojem se vrši odvajanje, procese gravitacijske koncentracije dijelimo na one koji se vrše:

- u vodi
- u vazduhu (pneumatska koncentracija)
- u teškoj sredini.

Opredjeljenje između vode, vazduha ili teške sredine, kao radnog medija u kojem se koncentracija obavlja, zavisi od vlažnosti mineralne sirovine, mogućih nepovoljnih posljedica usljed kvašenja mineralne sirovine, pristupa vodi, temperature okoline, te od zahtjeva krajnjeg potrošača. Po pravilu, zbog boljih tehnoloških rezultata, prednost se daje vodi kao fluidu za koncentraciju. Osnovni uslov za primjenu vode kao fluida za gravitacijsko razdvajanje jeste da kriterijum koncentracije bude iznad 1,25. Jedan od većih uticajnih faktora je i krupnoća mineralne sirovine. Eksperimentalno utvrđeni odnos između kriterijuma koncentracije i krupnoće dat je u tabeli 7.

Tabela 7. Odnos kriterija koncentracije i krupnoće mineralne sirovine

Krupnoća, mm	Kriterijum koncentracije
> 6,5	> 1,25
> 1,6	> 1,5
> 0,2	> 1,75
> 0,074	> 2,5

Iz tabele se vidi da se sa povećanjem specifične težine fluida, olakšava proces koncentracije. Kriteriji koncentracije navedeni u tabelama 7. i 8. moraju se uzeti samo kao orijentacione vrijednosti, jer na brzinu taloženja utiču i drugi parametri kao što je oblik zrna.

Tabela 8. Vrijednosti kriterija koncentracije za neke česte minerale dobijene procesima gravitacijske koncentracije odvajanjem jalovine, specifične težine $\rho_{jalovine} = 2,65 \text{ kg/m}^3$

Mineral	Fluid	Kriterij koncentracije
Zlato	Voda	10,3
Zlato	Zrak	6,8
Kasiterit	Voda	3,5
Ugalj	Voda	3,4
Hematit	Voda	2,5

Ako je vrijednost kriterija koncentracije iznad 2,5, separacija se odvija prilično lako, dok za njegovu vrijednosti ispod 1,25 separacija nije isplativa.

Tabela 9. Vrijednosti kriterija koncentracije za neke krupnoće ispitivane sirovine (Aplan 1985., Gupta 2016., Wills 2016.)

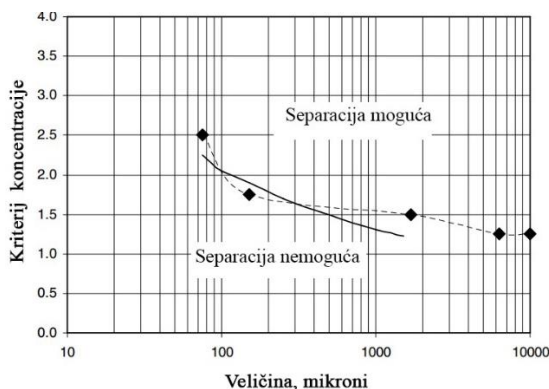
Kriterij koncentracije	Mogućnost korištenja gravitacijske separacije
$CC > 2,5$	Lagano do $75 \mu\text{m}$
$1,72 < CC < 2,5$	Moguće do $150 \mu\text{m}$
$1,5 < CC < 1,75$	Moguće do $1,7 \text{ mm}$
$1,25 < CC < 1,5$	Moguće do $6,35 \text{ mm}$
$CC < 1,25$	Nemoguće pri bilo kojoj krupnoći

Faktor taloženja čestice predstavlja odnos terminalne brzine dviju čestica iste gustoće i veličine, ali različitog oblika (Burt 1987.).

$$\text{Faktor taloženja čestice} = \frac{v_t(\text{čestice})}{v_t(\text{sferične čestice})} \quad \text{Jednačina 2}$$

v_t – terminalna brzina

Ukoliko se prilikom izračunavanja kriterija koncentracije u obzir uzme i faktor oblika čestice, dobijaju se puno realniji i pouzdaniji rezultati, dok se u praksi pojavljuju mnogi problemi ako isti bude zanemaren.



Slika 11. Kriva graničnih krupnoća (puna linija) formirana od podataka iz tabele 9 (tačkasta linija). Puna linija predstavlja KK sa uključenim faktorom taloženja - Burt (Gupta 2016.)

Kriterij koncentracije, čak i ovako unaprijeđen uključivanjem faktora oblika čestica, služi za osnovnu provjeru mogućnosti primjene gravitacijske koncentracije u određenom slučaju. Njegove manjkavosti se ogledaju u tome što ne uključuje zavisnosti od krupnoće zrna, poroznost materijala, stepen oslobođenosti i slične faktore koji u značajnoj mjeri utiču na krajnji rezultat. Tačnija ocjena mogućnosti primjene gravitacijske koncentracije može se dati tek provođenjem pliva-tone analize.

Na izbor postupka oplemenjivanja uglja veliki uticaj ima krupnoća uglja (granulacija). U svrhu izrade ovog rada, koristit će se rasponi krupnoća – granulacije uglja koji su najšire prihvaćeni u praksi pripreme uglja:

- krupni ugalj (> 25 mm)
- sitni ugalj (25 – 3 mm)
- fini ugalj (< 3 mm)
- ultrafini ugalj (< 150 μ m).

Metode čišćenja uglja se često kategorišu krupnoćom (npr. "čišćenje krupnih klasa"). Ovakvi pojmovi znaju biti zbunjujući, zbog toga što se metode i oprema koja se koristi za čišćenje uglja u tom smislu znatno preklapaju u rasponu krupnoća u kojima se isti koriste za čišćenje uglja. Nijedan od uređaja nije sposoban da radi sa svim krupnoćama uglja, već samo sa određenim dijapazonom. Takođe, na nekim uređajima se pojavljuje smanjena efikasnost u sredini ili na rubovima operativnog ranga.

Tabela 10. Rasprostranjenost upotrebe glavnih procesa pripreme uglja u odnosu na svjetske regione

Proces (%)	SAD	Australija	Kina	Indija	Njemačka	Rusija	UK
Mašine taložnice	13	22	60	47	79	48	30
Teškotekućinska separacija	52	60	23	35	15	24	30
Flotacija	18	10	14	2	6	10	15
Ostalo	17	8	3	16	0	18	25

Iz tabele je vidljivo da među državama-regionima postoje značajne razlike kada se govori o odabiru postupka za pripremu uglja.

Procesima gravitacijske koncentracije se mogu tretirati krupnoće veće od bilo kog drugog procesa. Najveća granulacija koja se može tretirati gravitacijskom koncentracijom je ona na kojoj su ugalj i jalovina dovoljno oslobođeni da bi bili dovoljno gravitacijski različiti. Praktično, gornja granična krupnoća je limitirana mogućnostima mehaničke manipulacije uređajem. Iako postoje uređaji koji mogu raditi i sa krupnoćama do 1 m, generalno je

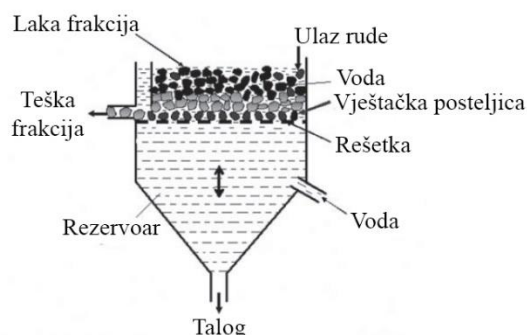
prihvaćeno da je 500 mm najviša krupnoća koja se može separirati. Donja granična krupnoća za gravitacijsku koncentraciju je 6 mikrometara.

Generalno gledajući, krupne frakcije se čiste mašinama taložnicama ili teškotekućinskim postupcima, sitne frakcije obično na koncentracijskim stolovima ili teškotekućinskim ciklonima, a ultrafine frakcije flotacijom ili hidrociklonima.

2. 4. ČIŠĆENJE UGLJA U MAŠINAMA TALOŽNICAMA

Mašine taložnice se osim za čišćenje uglja koriste i za odvajanje nekih drugih minerala koji su teži od jalovine. Stoga se prilikom odvajanja uglja koncentratom naziva lakša frakcija, dok je kod odvajanja minerala koji su teži od jalovine koncentrat teža frakcija.

Jednostavan opis mašine taložnice glasio bi da je to otvoreni rezervoar sa vodom, sa horizontalnom (ili blago nagnutom) rešetkom pri vrhu na koju se dovode izmiješane čestice uglja i jalovine (ili nekog drugog minerala i jalovine), sa mehanizmom za uspostavljanje vertikalnih pulsacija vode. Voda podiže tovar koji se zbog različite brzine padanja težih i lakših čestica raslojava na teške čestice na dnu i lakše na vrhu tovara.



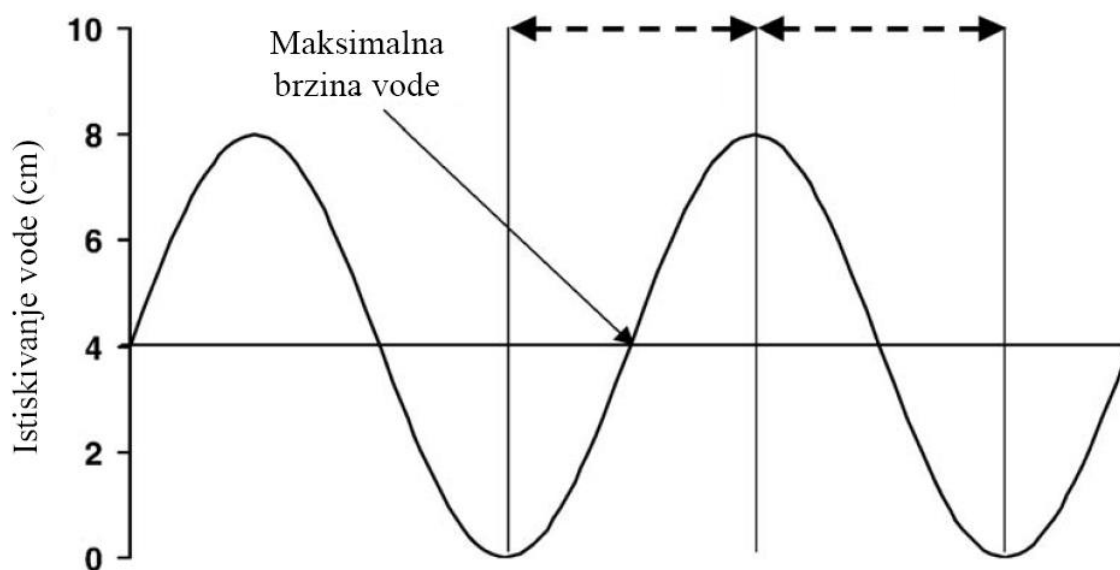
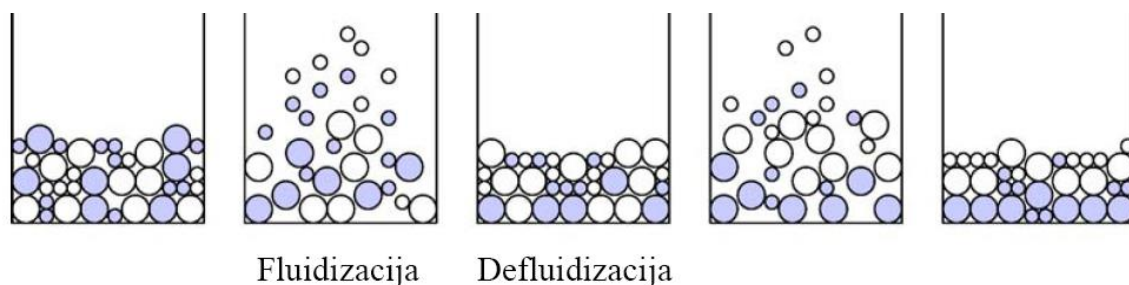
Slika 12. Osnovni dijelovi i princip rada mašine taložnice

Osnovni dijelovi svake mašine taložnice su:

- radno odjeljenje (rešetka i prostor iznad rešetke)
- tank za vodu koja se nalazi ispod rešetke
- pogonski mehanizam za generisanje pulsacija vode
- mehanizmi za kontinuirano dovođenje materijala
- mehanizam za odvajanje teške i lake frakcije (preliv za laku frakciju i mehanizam za ispuštanje teške frakcije).

Odvajanje čestica teške i lake frakcije u mašinama taložnicama rezultat je kompleksnog ciklusa pomijeranja vode. U ovakvom stalno promjenjivom hidrodinamičkom sistemu vrši se taloženje teške frakcije na dno, dok povrh nje leži sloj lake frakcije. Prilikom pulsiranja, pritisak vodene

struje u vis treba da bude dovoljan da se na kratko izdigne cijeli tovar u radnom dijelu mašine taložnice. Trajanje pulsacije treba biti dovoljno kratko da se ne bi stvorili uslovi za postizanje konačne brzine padanja ni uglja ni jalovine.



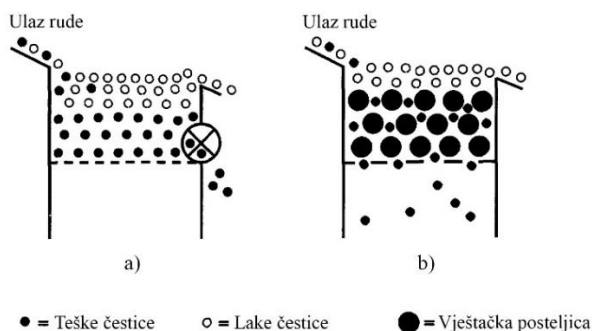
Slika 13. Korelacija kretanja vode i zrna u radnom dijelu mašine taložnice

Kрупnija i zrna veće specifične težine taložiti će se na rešetci, dok će se povrhu njih istaložiti sitnija i zrna manje specifične težine. Tako se tovar istaloži u nivoe, gdje je na vrhu laka frakcija (ugalj) a na dnu teška frakcija (jalovina). U praksi pripreme uglja u mašinama taložnicama je od izuzetnog značaja pronaći optimalan odnos između trajanja pulsacije, visine dizanja tovara i broja pulsacija u jedinici vremena. Postoje dva načina odvođenja teške frakcije iz radnog dijela mašine taložnice:

- sa rešetke
- kroz rešetku.

Kod načina odvođenja "sa rešetke" i teška i laka frakcija ostaju na rešetci. Otvori na rešetci su manji od granulacije zrna koje se odvajaju. Teška frakcija se odvodi vratima ili zvjezdastim ventilom promjenjive brzine. Upotrebljava se za odvajanje krupnih klasa. Za upotrebu ovakvog

načina primjene taložnice na sitne klase (manje od 15 mm), bilo bi potrebno da otvori na situ budu mali, tj. manji od sirovine koju odvajamo što je nepraktično i u praksi teško provodivo.



a) iznad rešetke (hidraulična vrata) b) kroz rešetku (vještačka posteljica)

Slika 14. Odvođenje teške frakcije iz radnog dijela mašine taložnice (Witteveen 1995.)

Zbog toga je u širokoj upotrebi sistem vještačke posteljice (*Ragging*), gdje teška frakcija propada kroz rešetku nakon što prođe kroz vještačku postelju koja se nalazi između rešetke i lake frakcije tj. materijala iz koga se izdvaja teška frakcija. Vještačku postelju čine zrna koja imaju veći promjer od otvora na rešetci, specifične težine između lake i teške frakcije, da bi se spriječilo propadanje lake frakcije kroz rešetku. Upotrebljava se za odvajanje sitnih klasa. U zavisnosti od minerala koji se odvaja, kao vještačka posteljica upotrebljavaju se zrna ili kuglice željeza, hematita, pirita, olova, kao i jalovina ako je ima u dovoljnoj količini i ako je odgovarajuće specifične težine. Pražnjenje teške frakcije se vrši sa dna rezervoara za vodu. Na brzinu prolazanja zrna teške frakcije kroz vještačku postelju utiče gustina, prečnik i oblik zrna, brzina kretanja vode uvis, frekvencija pulsacija i visina posteljice.

U današnje vrijeme, najčešće upotrebljavane mašine taložnice za čišćenje uglja su tipa Baum i još novije Batac. To su mašine sa nepomičnom rešetkom, kod kojih se pulsacije generišu komprimiranim zrakom. Iste omogućavaju regulisanje velikog broja radnih parametara, pa je moguće čišćenje čak i ugljenog mulja (sa nešto slabijom uspešnošću).

Uvođenjem novih konstrukcionih rješenja i primjenom automatskih regulatora za punjenje i pražnjenje proizvoda, postupak je moguće primjenjivati i kod ugljeva koji se teško čiste. Priprema uglja u mašinama taložnica se razlikuje od pripreme drugih mineralnih sirovina u mnogim važnim aspektima (Witteveen 1995.):

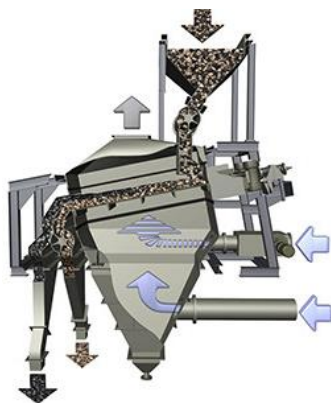
- ugalj predstavlja laku frakciju, ali je zapreminski veći od jalovine
- velika je raznolikost u krupnoći na ulazu u mašinu taložnicu
- nivo pepela tj. nečistoće u koncentratu predstavlja kriterij za ocjenu kvaliteta uglja
- ugalj ima specifičnu težinu vrlo blizu specifičnoj težini vode
- sitni ugalj je teško smokriti.

Krajnji rezultat - uslojavanje uglja i jalovine po specifičnoj težini rezultat je mnogo promjenjivih sila koje djeluju na zrna uglja, jalovine i sraslaca. Proces je ovo u kojem se odvajanje dvije čvrste faze vrši na način da je više ovisno o specifičnoj težini nego krupnoći. Osim vertikalno, sva zrna se pomiču i u horizontalnom smjeru, ugalj zajedno sa vodom prema presipu, a jalovina i sraslac prema vratima gdje se ispuštaju. Mašine taložnice su potpuno automatizirane, što obuhvata dodavanje materijala, odvođenje uglja, sraslaca i jalovine. Kod mašina taložnica, kao i kod većine drugih uređaja za gravitacijsku koncentraciju, veći kapacitet obično znači manju preciznost u odvajanju. Postoje i procesi u kojima mašine taložnice umjesto sa vodom rade sa teškom tekućinom, i takvi sistemi pružaju značajno bolje oštine odvajanja. Za očekivati je da će se zbog velike upotrebe mašina taložnica u skorijoj budućnosti pojaviti napretci koji će nuditi potpunije, jasnije i detaljnije objašnjenje njihovog načina rada od teorija koje sada postoje.

U zadnje vrijeme se sve više vodi računa o materijalima koji nisu ugalj, a imaju sličnu specifičnu težinu kao i ugalj (*NGM - Near Gravity Materials*), jer utiču na procese odvajanja (Bhattacharya 2016.). Definišu se kao materijali koji imaju specifičnu težinu $\pm 0,1$ od gustine tečnosti u kojoj se vrši odvajanje. Vjeruje se da su oni glavni razlog (ili bar važan faktor) grešaka koje se pojavljuju u raspoređivanju zrna u ugalj ili jalovinu.

Mašine taložnice su jednostavne za upotrebu i imaju mala kapitalna ulaganja i operativne troškove. Bile su dominantna tehnologija za čišćenje uglja do 70-tih godina prošlog vijeka.

Međutim, kada postoji veće prisustvo NGM, njihova efikasnost se znatno smanjuje. Kao rezultat toga, teškotekućinska tehnologija je preuzela primat. Taložnice se još uvijek značajno koriste gdje nije potreban nizak nivo pepela, gdje postoji dobro otvaranje minerala (nizak nivo NGM), ili pak gdje su investicije limitirane. Iako mašine taložnice u nekim situacijama mogu ponuditi rezultate slične teškotekućinskim separatorima, ovi potonji se moraju koristiti kada se radi o ugljevima koji se teško čiste.



Slika 15. Pneumatska mašina taložnica (Preuzeto: All Mineral GMBH)

Pneumatske mašine taložnice se već više od 50 godina koriste u industriji uglja i zlata. U okviru mašine postoje dva izvora zraka. Prvi je niskog pritiska a velikog volumena i služi za fluidizaciju sloja, a drugi je visokog pritiska i malog volumena i služi za proizvodnju pulsacija uglja na rešetci. Imaju svoje nedostatke, ali i prednosti. Predviđanja su da će se u budućnosti kreirati hibridna rješenja gdje će se grubo odvajanje kamenja odvijati u pneumatskim, a finalna separacija u hidrauličnim taložnicama.

2. 5. TEORIJSKI KONCEPTI TALOŽENJA ZRNA U MAŠINAMA TALOŽNICAMA

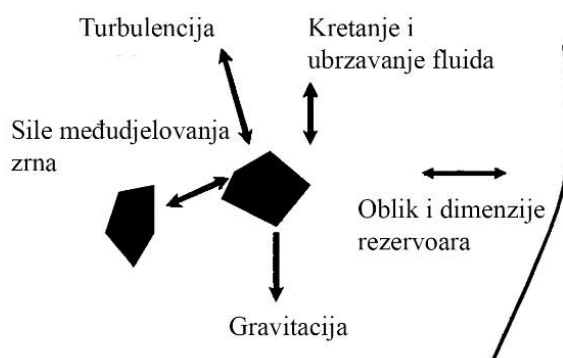
Postoji više naučnih teorija i načina za objašnjenje procesa taloženja u mašinama taložnicama.

Prepoznaju se četiri glavna pravca:

- teoretski opis procesa taloženja, baziran na različitim brzinama padanja individualnih zrna (Gaudin 1939.)
- teoretski opis materijala koji se taloži, koji kao glavni element uzima praćenje promjena energetskog stanja materijala u radnom odjeljenju taložnice (Mayer 1964., King 1987.)
- teoretski opis procesa taloženja baziran na statističkom pristupu praćenja i objašnjavanja kretanja zrna
- više praktičan pristup, baziran na eksperimentima taloženja (Lyman 1992).

2. 5. 1. Teorija različitih brzina padanja zrna

Teorija bazirana na različitoj brzini padanja zrna (hidrodinamička teorija, klasična teorija, Gaudinova teorija) polazi od pretpostavke da će se dva zrna sferičnog oblika, istog prečnika i različitih specifičnih masa kretati na način da će teža zrna brže padati, a samim time i prije se istaložiti na dnu radnog dijela taložnice. Teorija je proizašla iz osnova nastalih kroz praktičnu primjenu Njutnovih i Stokesovih zakona, koje je dodatno uobličio von Rittinger u teoriju slobodno taložećih zrna. U obzir se uzima da je za pravilnu primjenu ove teorije potrebno da su svi parametri koji utiču na ometano taloženje uzeti u obzir: veličina čestica, specifična težina, oblik, za medij (vodu ili suspenziju) se prati gustoća medija, viskoznost i temperatura, a za sistem se uzimaju u obzir gustina pulpe i dimenzije uređaja jer iste direktno utiču na učestalost sudaranja čestica i međusobno trenje.

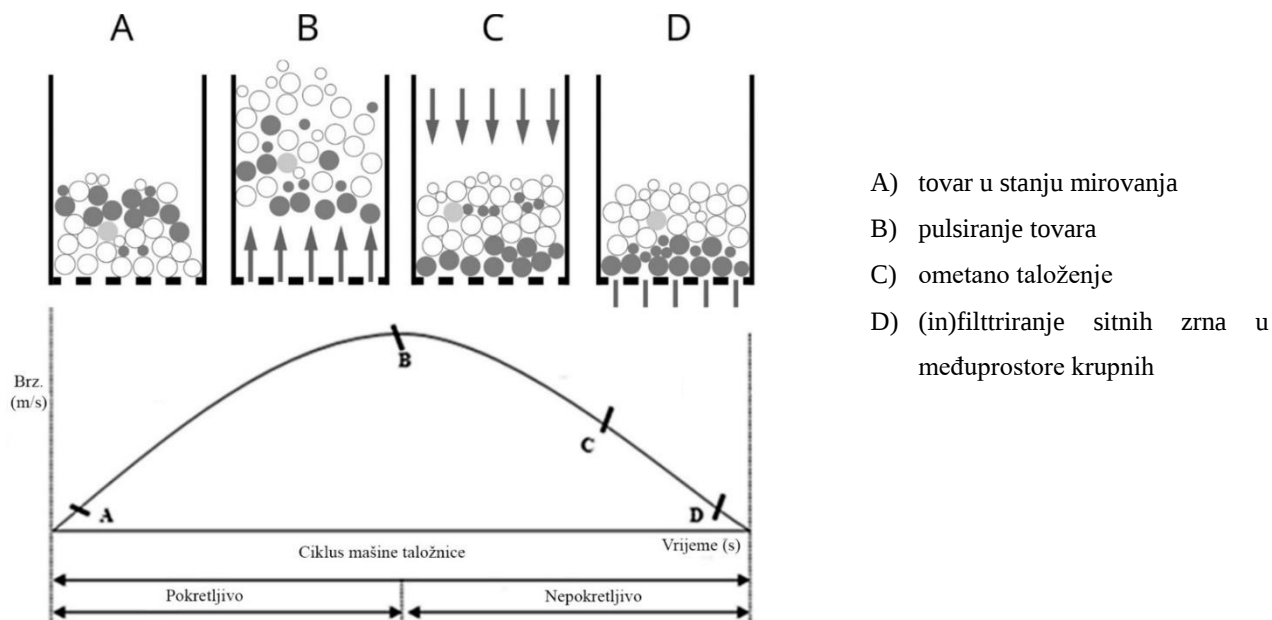


Slika 16. Sile koje utiču na kretanje zrna u radnom dijelu mašine taložnice (Dieudonné i sar., 2006.)

Prepoznaju se tri mehanizma koji se u manjoj ili većoj mjeri pojavljuju i smjenjuju tokom procesa taloženja u mašinama taložnicama:

- ometano taloženje (*Hindered settling*)
- različito ubrzanje zrna (*Differential acceleration*)
- (in)filtriranje sitnih zrna u međuprostore krupnih (*Consolidation trickling*).

Tokom kretanja vode u radnom odjeljenju prema gore širi se tovar a samim time i prostor između pojedinačnih zrna. Nakon povlačenja vode zrna se kreću prema dole pod uticajem gravitacione sile i slažu se u slojeve po specifičnoj težini.



Slika 17. Tri mehanizma taloženja čestica u mašini taložnici prema teoriji baziranoj na različitim brzinama padanja čestica

Uslojavanje u fazi kada je tovar otvoren (kada postoji međuprostor između pojedinačnih zrna) kontrolišu procesi nazvani "*Različito ubrzanje zrna*" i "*Otežano taloženje*". Nakon što se krupna zrna tovara spuste na rešetku nastupa proces "*Filtriranje sitnih zrna kroz međuprostore krupnih*".

Diferencijalno ubrzanje zrna (*eng: Differential Acceleration*) predstavlja inicijalno ubrzanje na početku padanja zrna. Kako se zrno tek počinje kretati nadole, njegova brzina je mala, a pošto je sila proporcijalna brzini zrna u odnosu na fluid, sila koja vuče zrno je zanemariva. Jednačina ubrzanja zrna koje se taloži u fluidu glasi:

$$a_p = g \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \right) \quad \text{Jednačina 3}$$

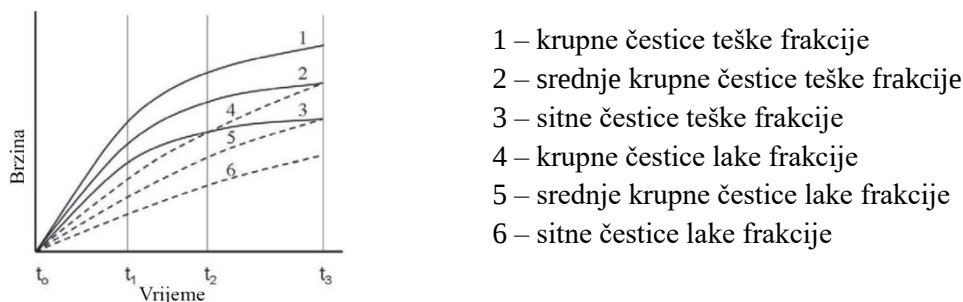
Jednačina pokazuje da ovo ubrzanje zavisi isključivo od specifičnih težina zrna i vode. Veličina čestice ovdje ne igra nikakvu ulogu. Iz ovoga proizilazi da ako se padanje ponavlja dovoljno velikom učestalošću, a trajanje pada je dovoljno kratko, put koji zrna pređu više je pod uticajem njihovog inicijalnog ubrzanja nego njihove konačne brzine padanja.

Pojednostavljeno rečeno, slobodnim taloženjem zrna se prema Tagartu (1951.) može smatrati takvo taloženje pri kome nema dodira između susjednih zrna. Primjenom drugog Njutnovog zakona imamo:

$$F = m_z a_z = F_g - (F_u + F_v) \quad \text{Jednačina 4}$$

F – sila koja djeluje na zrno	m_z – masa zrna
$F_g = m_z \cdot g$ gravitaciona sila	a_z – ubrzanje zrna
$F_u = r_f \cdot V_z \cdot g$ sila uzgona (Arhimedov princip)	g – gravitaciona sila
	V_z – brzina zrna
	F_v – sila vučenja

Na kretanje zrna u fluidu najviše utiču specifična težina i krupnoća zrna. Ukoliko su prečnici zrna jednaki, brzina padanja zavisi isključivo od specifične težine zrna, tj. zrna koja imaju veću specifičnu težinu padat će brže od zrna koja imaju manju specifičnu težinu.



Slika 18. Odnos brzine i vremena padanja za različite čestice (Gaudin 1939., Aplan 2003., Oki 2010. preuzeto iz Suba Rao 2011.)

Pošto je zadatak odvojiti zrna po specifičnoj težini bez obzira na krupnoću, pomoću Rittingerovog koeficijenta jednakih brzina padanja određujemo granične vrijednosti krupnoće zrna koja je moguće istovremeno tretirati u jednoj mašini taložnici, prema sljedećem obrascu:

$$\varepsilon = \frac{d_L}{d_T} = \frac{\rho_T - \rho_F}{\rho_L - \rho_F}$$

ε – koeficijent jednakopadajućih zrna, bezdimenzionalan broj

d_L – prečnik zrna manje gustine, mm

d_T – prečnik zrna veće gustine, mm

ρ_L – specifična težina zrna težih zrna, kg/m³

ρ_T – specifična težina zrna lakših zrna, kg/m³

ρ_F – specifična težina fluida, kg/m³.

Ovakav model posmatra kretanje svake čestice odvojeno i pokušava pratiti odgovor u kretanju čestica kao posljedicu stalno promjenjivih uslova. Osim kretanja prouzrokovanog vertikalnim kretanjem fluida (najčešće vode) na ponašanje čestica utiču još dva kretanja:

- kretanje čistog uglja od ulaza prema izlazu
- kretanje jalovine prema izlazu.

Dodatnu kompleksnost sistemu daje i kretanje vode od ulaza prema izlazu zajedno sa čistim ugljem, ali i kroz elevatore (Lovel 1991.).

Fenomen taloženja, a posebno otežano taloženje (*eng: Hindered settling*) u osnovi su svih procesa gravitacijske koncentracije. Kako se koncentracija čestica u fluidu povećava, efekat pretrpanosti - uzajamnog međudjelovanja čestica postaje očigledan, te se brzina taloženja čestica smanjuje. Sistem se počinje ponašati kao teška tečnost sa gustoćom pulpe (sastavljene od čestica i fluida), a ne gustoćom fluida. Ovaj efekat je poznat kao ometano taloženje. Glavna karakteristika faze ometanog taloženja je da u ovoj fazi taloženja terminalna brzina zavisi isključivo od mase čestice, a ne od njene specifične težine.

Slobodno taloženje (*Free settling*) može se okarakterisati kao proces u kojem zrna padaju slobodno u fluidu bez da im taloženje otežavaju druga zrna (Richards i Locke 1940, Aplan 2003.). Konačna brzina padanja ovakvih zrna različite specifične težine je u funkciji prečnika zrna i gustine i prirode fluida. Brzina taloženja ovih zrna, za koje podrazumijevamo da su sferičnog oblika, može se računati iz jednačina Njutna i Stouksa:

$$V_m = \sqrt{\frac{4}{3f} \frac{\rho_z \cdot \rho_{fl}}{\rho_{fl}}} \cdot d \cdot g \quad \text{Brzina taloženja čestica prema Njutnu} \quad \text{Jednačina 5}$$

V_m – konačna brzina padanja zrna

f – koeficijent trenja ili koeficijent otpora ($f \sim 0,4$ za sferična zrna)

ρ_z – specifična težina zrna

ρ_{fl} – specifična težina fluida

d – prečnik zrna

g – gravitacijska sila.

$$v_m = \frac{1}{18} \frac{\rho_z - \rho_{fl}}{\mu} d^2 \cdot g \quad \text{Brzina taloženja čestica prema Stouksu} \quad \text{Jednačina 6}$$

V_m – konačna brzina padanja zrna

μ – viskoznost fluida

ρ_z – specifična težina zrna

d – prečnik zrna

ρ_{fl} – specifična težina fluida

g – gravitacijska sila.

Parametri koji utiču na otežano taloženje su:

- veličina čestica
- gustoća čestica
- oblik čestica
- gustoća i viskoznost fluida
- udio čvrste mase
- karakteristike separatora (mašine taložnice).

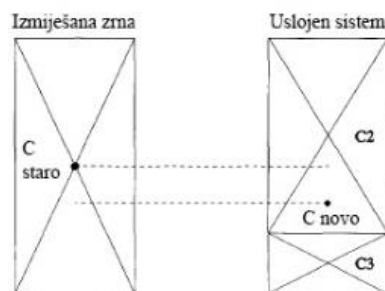
Otežano taloženje je važno za separisanje krupnijih čestica zbog toga što krupnije čestice teško da imaju dovoljno vremena da dostignu svoju terminalnu brzinu.

Filtriranje sitnih zrna kroz međuprostore krupnih (*eng: Consolidation trickling*) pojava je koja nastaje pri kraju pulsacije i ukoliko joj se ne posveti dovoljna pažnja može značajno da ugrozi rezultate gravitacijskog raslojavanja. Nakon što se krupne čestice krećući se nadole zaustave na rešetci, određena količina vode koja se kreće prema dole zajedno sa silom gravitacije može stvoriti potpritisak koji će sitne čestice lake frakcije vući kroz međuprostore krupnih čestica teške frakcije prema rešetki (čak i ispod rešetke). Kad se radi o uglju, dešava se da sitne čestice uglja završe u jalovini ili u odjeljku za vodu. Pozitivan efekat se stvara kada se sitna teška zrna spuste među krupna teška zrna. Međutim negativni efekti su kada se laka zrna infiltriraju među teška krupna, ili čak ispod rešetke.

Da bi se ovakav efekat umanjio, dodaje se voda kroz dodatni ventil, čiji se rad sinhronizuje sa oscilacijama (detaljno objašnjeno u dijelu rada koji obrađuje taložnice sa dijafragmom).

2. 5. 2. Teorija potencijalnih energija

Prema Mayeru, svaka količina zrna ima svoj nivo potencijalne energije. Raslojavanje zrna u slojeve različitih gustina prema ovoj teoriji ima se posmatrati kao težnja energetski neuređenog sistema da se uredi, tj. da se postigne minimum potencijalne energije. U tom smislu, energija vode koja se dovodi posmatra se samo kao sredstvo za oslobađanje zrna. Sistem teži da zauzme položaj najmanje potencijalne energije, što podrazumijeva snižavanje težišta sistema.



Slika 19. Šematski prikaz snižavanja težišta u teoriji potencijalnih energija (Mayer 1965., Tavares i King 1995.)

Djelovanjem pulsacija dolazi do preraspodjele zrna u slojeve različitih gustina. Zrna veće gustine zauzimaju donje položaje, dok zrna manjih gustina zauzimaju položaje u gornjim slojevima taložnice. King (1995.) proširio je Mayerov model. Zanimljivo je da oba modela posmatraju samo početno i ishodišno stanje, bez posmatranja procesa u cjelini.

2. 5. 3. Statistička hipoteza

Statistička hipoteza bavi se prognoziranjem rezultata odvajanja postupkom gravitacijske koncentracije. Za njenu primjenu dovoljno je da su poznati sastav sirovine, početna relativna brzina raslojavanja i vrijeme raslojavanja. Po ovoj hipotezi procesi gravitacijske koncentracije sastoje se iz dva dijela:

1. zakonito premještanje raznorodnih (u pogledu gustine, oblika i krupnoće) zrna pod dejstvom sile gravitacije i sile otpora sredine i
2. slučajno premještanje zrna.

Prve procese karakteriše brzina premještanja centra raslojavanja sistema (na osnovu energetske hipoteze), a drugi predstavljaju stohastičke procese i imaju karakteristike statističke vjerovatnosti. Glavni nedostatak ove teorije je što sirovinu posmatra samo i isključivo kroz njenu gustinu.

2. 5. 1. Suspensiona hipoteza

Suspensiona hipoteza tretira fluid u kome se vrši odvajanje kao suspenziju, tj. smješu zrna i fluida u kome se vrši odvajanje. Zbog porasta kriterija koncentracije (koji raste sa gustinom fluida odnosno sredine u kojoj se vrši odvajanje), primjena suspenzije pri radu mašina taložnica ima dva pozitivna efekta:

- odvajanje se može vršiti u širem rasponu krupnoća pojedinih klasa
- dobija se veća oštrina odvajanja u odnosu na fluid voda.

Proces se može smatrati uspješnim kada je donja granična krupnoća zrna mineralne sirovine najmanje 10 puta veća od granične krupnoće zrna suspenzoida, jer se u takvim uslovima kretanje zrna može posmatrati kao kretanje zrna u homogenoj tečnosti veće gustine. Ova teorija ima potencijal jer bi se odvajanje u taložnicama moglo mnogo šire primjenjivati.

2. 6. PARAMETRI RADA MAŠINA TALOŽNICA

Na procese u mašini taložnici utiče veliki broj faktora. Među najznačajnije promjenjive i statične spadaju (Ćalić 1991, Witteven 1995, DeAguiar 2015.):

- karakteristike sirovine
- razlika u specifičnim karakteristikama sirovine i jalovine
- veličina čestica koje se razdvajaju
- oblik čestica koje se razdvajaju
- parametri procesa
- frekvencija rada mašine taložnice (broj punih oscilacija u jednoj sekundi)
- amplituda oscilacija
- oblik oscilacija
- utrošak podrešetne i nadrešetne vode
- visina sloja sirovine u radnom odjeljenju
- visina prelivnog praga
- rastresitost sloja
- kapacitet mašine taložnice
- debljina sloja.

Od svih nabrojanih parametara, vjerovatno najveći uticaj na proces ima visina i frekvencija podizanja vode (Gupta i Yan 2006, Mukherjee 2006.).

Tabela 11. Nivoi uticaja radnih parametara mašine taložnice na njen rad (Gupta 2016.)

Variable	Vrijednosti	Uticaj na rad mašine taložnice
Spec. tež. vj. posteljice	raste	Smanjuje protok teške frakcije
Dimenzije vj. posteljice	raste	Povećava protok teške frakcije
Dubina vj. posteljice	raste	Smanjuje protok teške frakcije
Ragging kontaminacije	raste	Smanjuje protok teške frakcije
Krupnoća	50 μ m do 20 mm	Normalan rad za teške minerale
Krupnoća	0.5-200 mm	Normalan rad za ugalj

Upravljanje procesom odvajanja u mašini taložnici vrši se kontrolisanjem i mijenjanjem amplitude i frekvencije vodenih oscilacija, brzinom dodavanja materijala i vode, te kontrolisanjem umjetne posteljice.

Pulsacije vode kroz rešetku mašine taložnice mogu se generisati gumenom dijafragmom, pomičnim klipom ili kompresovanim zrakom. U novije vrijeme u Baum i Batac taložnicama taložnicama za pripremu uglja za tu svrhu se gotovo isključivo koristi kompresovani zrak. One omogućavaju fino podešavanje parametara pulsacija (visine i frkvencije), što je neophodno za kreiranje preciznih procesa kod odvajanja krupnijih škriljaca, sitnog uglja i materijala koji imaju specifičnu težinu vrlo sličnu uglju.

Postoji direktna veza između frekvencije oscilacija i kapaciteta taložnice (von Rittinger, Ilschner 1991.). Izraz koji povezuje trajanje jedne oscilacije za taložnicu koja tretira materijal maksimalne krupnoće glasi

$$V = 26,32\sqrt{D - (\rho - 1)} \quad \text{Jednačina 7}$$

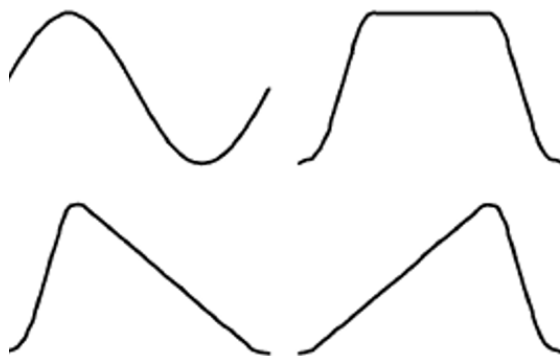
gdje je

V – brzina vodenog stuba uvis

D – prečnik čestica

ρ – specifična težina minerala koji odvajamo.

Rani modeli mašina taložnica koristili su isključivo sinusoidalni oblik pulsacija vode. Kako su modeli i tehnologije evoluirali, mijenjao se i optimalan oblik oscilacija (Burt 1999).



Slika 20. Tipični oblici oscilacija u mašini taložnici: Sinusoidalni, Batac, IHC i Panam

Slika prikazuje različite oblike oscilacija za različite proizvođače i modele mašina taložnica, koji su nastali kao proizvod potrage za što efikasnijim procesom odvajanja i ulogom ovog važnog parametra u procesu separisanja. Podjela mašina taložnica u odnosu na to kako vodena struja djeluje na tovar, izvršena je na sljedeći način (Jevremović 1984.):

- mašine taložnice sa naizmjeničnom vodenom strujom prema gore i prema dole (realni ciklus)

- mašine taložnice sa pulsacijama (prekidima) vodene struje u vis (idealni ciklus).

Ciklus pulsacije ili ciklus taloženja predstavlja jednu potpunu promjenu smjera i brzine vertikalnog kretanja vode. Ciklus se sastoji iz kretanja vodenog stuba prema gore, pauze nakon dostizanja maksimalne visine i povlačenja vode prema dole. Mogu biti simetrični (harmonijski) i asimetrični (neharmonijski), a razlika je u tome što se kod potonjeg razlikuju vremena kretanja vode prema gore i prema dole.

Brzina oscilacija kreće se u opsegu od 60 pulsacija u minuti za ugljeve, pa sve do 280 pulsacija u minuti za teške minerale. Krupnija zrna se talože brže od sitnih a teža zrna brže od lakših. Potrebna je značajna brzina i količina vode da bi se podigla teška zrna, a sve to zahtijeva duge pulsacije. Amplituda oscilacija je maksimalna visina do koje se podiže vodeni stub i tovar. Kapacitet mašine taložnice se izražava u tonama na sat na 1m² površine rešetke. Podatak je to koji nam vrlo malo govori ako nisu navedeni vrsta mašine taložnice, uslovi i parametri pod kojima radi. Kapacitet je u funkcionalnoj zavisnosti sa tipom i veličinom mašine taložnice, veličine čestica koje se odvajaju, količine jalovine, te traženog kvaliteta konačnog proizvoda. Moderne mašine taložnice obezbjeđuju kapacitet i do 1000 t/sat po mašini, ali se na tržištu nalaze i mnogo manji modeli, po dimenzijama i kapacitetu, u zavisnosti od specifičnih potreba. Veliki kapacitet je najčešće signal da je možda loša oštrina odvajanja jer su te dvije veličine obrnuto proporcionalne. Zbog velikih tehničkih unaprjeđenja danas to više ne mora biti slučaj, te se ovakvi veliki kapaciteti postižu uz sasvim solidnu oštrinu odvajanja.

Kapacitet mašine taložnice zavisi od površine radnog odjeljenja, visine sloja tovara, brzine izdizanja tovara, stepena rastresitosti i krupnoće sirovine, a računa se prema obrascu:

$$Q = 3,6 H S V \delta \theta \text{ (t/h)} \quad \text{Jednačina 8}$$

gdje je:

H – visina sloja tovara (m)

S – površina radnog odjeljenja (m²)

V – srednja brzina radnog materijala pri kretanju u vis (m/s)

Potrošnja energije prilikom rada taložnice procijenio je Tagart sljedećom jednačinom (Gupta 2016.)

$$P = 7.310,16 A \sqrt{d} \quad \text{Jednačina 9}$$

gdje je:

P – snaga (W)

A – površina rešetke (m²)

d – visina materijala (m).

Savršeni proces separacije izvršio bi odvajanje 100 % jalovine od 100 % uglja. Efikasnost mašina taložnica zavisi od mnogo faktora koji se ne mogu direktno kontrolisati na uređaju, kao što su brzina dolaska i raznolik sastav i krupnoća materijala koji ulazi u taložnicu. Stoga je efikasnost uređaja direktno vezana za njegovu sposobnost da na efikasan način apsorbuje ove vanjske faktore.

Potrošnja vode ogleda se kroz dodavanje podrešetne i nadrešetne vode i važan je faktor u procesu koncentracije u mašinama taložnicama zbog toga što pravilna količina vode utiče na stratifikaciju zrna i na njihovo horizontalno kretanje preko preliva. Voda se u sistem dodaje zajedno sa ulaznom sirovinom, da bi se nadoknadila voda koja izlazi sa proizvodima koncentracije.

Pražnjenje uglja se vrši preko prelivnog praga. Zrna u pravcu preliva nosi horizontalna vodena struja. Visina prelivnog praga treba da bude nešto ispod visine sloja materijala koji se izdiže djelovanjem uzlazne struje vode. Računa se na sljedeći način:

$$H = \frac{0,5 t V_v (V_v - V_s)}{V_s (\delta - \Delta) \theta} \quad \text{Jednačina 10}$$

gdje je:

H – visina prelivnog praga (m)

V_v – srednja brzina vodene struje uvis (m/s)

t – vrijeme kretanja vodene struje uvis

θ – koeficijent rastresitosti.

Visina sloja zrna u mašini taložnici kod krupnih klasa trebala bi iznositi 5-10 d , a kod sitnih 10-20 d (d – prečnik najkrupnijih zrna u klasi).

Rastresitost sloja u radnom dijelu mašine taložnice se računa preko koeficijenta rastresitosti kao odnos volumena tečne faze prema ukupnom volumenu zrna i tečne faze zajedno.

Otvori na rešetki trebaju biti toliki da stvaraju minimalan otpor vertikalnom kretanju vode, dovoljno mali da zadrže od propadanja krupnu frakciju koncentrata, jalovine ili vještačke posteljice. Takođe, trebaju biti dovoljno veliki da dopuštaju prolazak sitnih teških zrna.

2. 7. VRSTE I TIPOVI MAŠINA TALOŽNICA ZA UGALJ

Mašine taložnice predstavljaju jedan od najstarijih načina pripreme uglja i drugih korisnih minerala. Najčešći način rada taložnice je takav da fluid (najčešće voda) potiskuje postelju od materijala - zrna koja se nalaze na statičnoj rešetki u veoma kratkim vremenskim intervalima i pušta da se padajuća zrna istalože na rešetki na način da teška zrna padaju na dno, dok lakša ostaju na vrhu sloja.

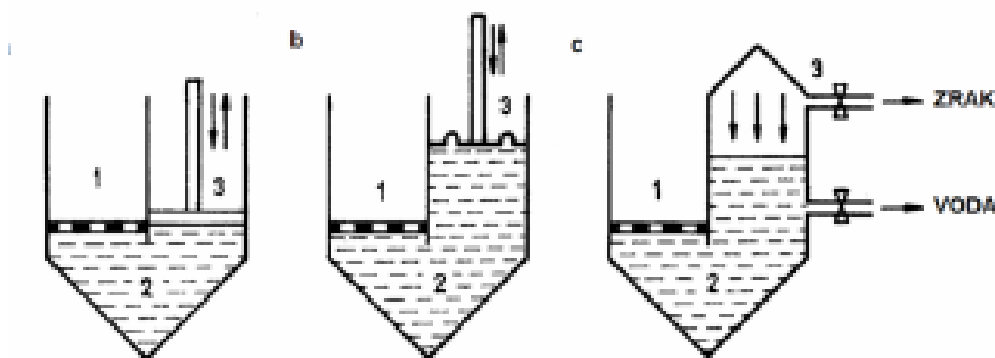
Prema krupnoći uglja koji čiste, podjela je izvršena na mašine taložnice:

- za krupne klase ($-120+10$ mm)
- za sitne klase ($-10+1$ mm)
- za ugljeni mulj ($-1+0,5$ mm).

Rasponi krupnoće u ovakvoj podjeli su samo okvirni, jer umnogome zavise od konstrukcionih karakteristika svake pojedinačne mašine, ali i od karakteristika uglja koji se prerađuje, pa imamo slučajeve gdje se uspješno čiste ugljevi i do 250 mm. U odnosu na način kreiranja pulsacija vodene struje kroz radno odjeljenje, podjela je izvršena na:

- klipne mašine taložnice
- mašine taložnice sa dijafragmom
- pulsirajuće mašine taložnice.

Princip rada je isti za sve navedene tipove taložnica. Za pripremu uglja u današnje vrijeme najčešće se upotrebljavaju pulsirajuće mašine taložnice i to Batac tipa, a takva jedna instalirana je i na oglednom postrojenju u separaciji rudnika Banovići. Iste su veoma zastupljene u industriji pripreme uglja zbog mogućnosti regulisanja velikog broja radnih parametara, tj. zbog prilagodljivosti na promjenjive uslove u ulaznoj sirovini.



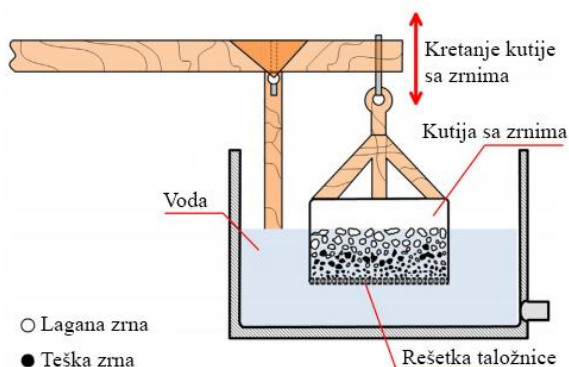
Slika 21. Shematski prikaz mašina taložnica u odnosu na mehanizam za pulsiranje vode a) klipna, b) sa dijafragmom, c) pulsirajuća mašina taložnica (Petrović 2008.)

Taložnice se proizvode za pripremu uglja i prvi su izbor (ispred nešto skupljih teškotekućinskih sistema) kada u ugalj ne sadrži veliku količinu materijala koji imaju specifičnu težinu sličnu uglju.

2. 7. 1. RUČNA TALOŽNICA

Najvažnija taložnica sa pokretnom rešetkom je ručna taložnica. Ista je kroz istoriju bila važan uređaj za oplemenjivanje ruda, ali se danas rijetko koristi. Ručna mašinu taložnicu teoretski možemo predstaviti kao sanduk u kome se nalazi tovar za razdvajanje. Ručno (ili ekscentrom)

izazvane oscilacije sanduka nakon određenog vremena izazvat će efekt taloženja, jer će se na dnu sanduka istaložiti teška frakcija, dok će laka frakcija biti iznad nje.

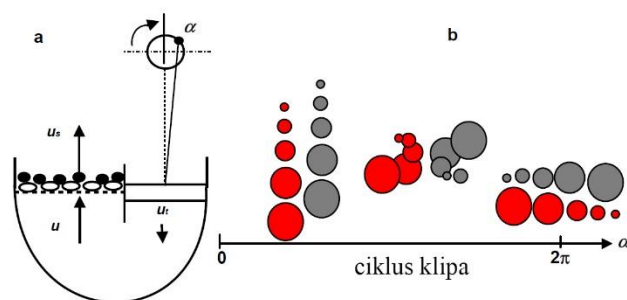


Slika 22. Princip rada ručne taložnice (Wils 2016.)

Nakon ručnog vađenja lake frakcije izvrši se dodavanje nedostajućeg materijala za odvajanje. U nekom od sljedećih ciklusa izvrši se vađenje dovoljno nakupljenog (teškog ako se radi o mineralima) koncentrata.

2. 7. 2. KLIPNE TALOŽNICE

Klipne taložnice sastoje se od dva odjeljenja: klipno i odjeljenje sa rešetkom, koji predstavljaju spojene posude. Kod klipnih taložnica rešetka je nepokretna i na nju se dovodi materijal za odvajanje. Pulsacije vode u vis se postižu kretanjem klipa u klipnom odjeljenju prema dole.



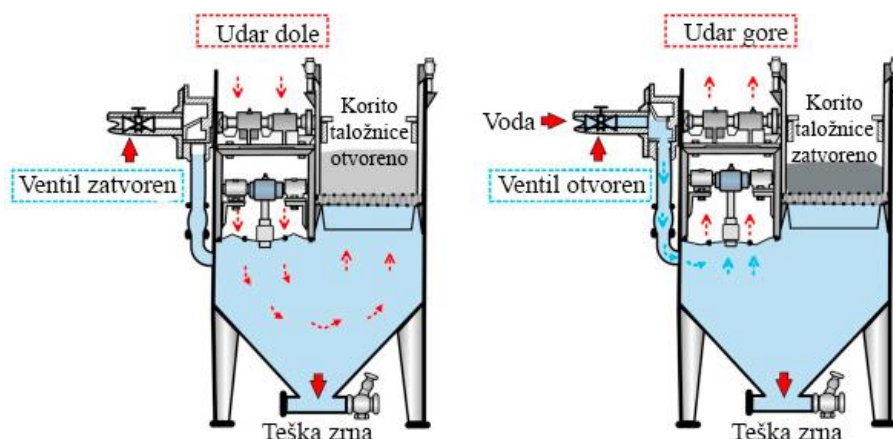
Slika 23. Princip rada klipne mašine taložnice (Drzymala 2007.)

Ukoliko su površina klipa i površina sita jednake, za jednako kretanje klipa prema dole, nivo vode (a sa njim i materijala) se podiže za istu vrijednost. Ukoliko je površina klipa manja, potrebno je njegovo duže kretanje da bi se postigla zadovoljavajuća visina dizanja vode u radnom odjeljenju. Među taložnicama sa nepokretnom rešetkom najstarija je klipna taložnica tipa Harz (*Harz Jig*), koja je ime dobila po srednjonjemačkom gorju gdje je prvi puta stavljena

u upotrebu. U savremenim klipnim taložnicama klip se pokreće ekscentrom, a mašina ima do pet serijski spojenih komora.

2. 7. 3. TALOŽNICE SA DIJAFRAGMOM

Taložnice sa dijafragmom umjesto klipa za proizvodnju vodenih oscilacija imaju gumenu dijafragmu koju pokreće ekscentar. Rešetka je statična. Tipičan predstavnik ove vrste je taložnica Denver. Pomjeranje dijafragme kod ove taložnice sinhronizirano je sa ventilom za dodavanje pogonske vode. Prilikom kretanja dijafragme naniže ventil je zatvoren i vrši se potiskivanje vode da bi podigla tovar u radnom dijelu.



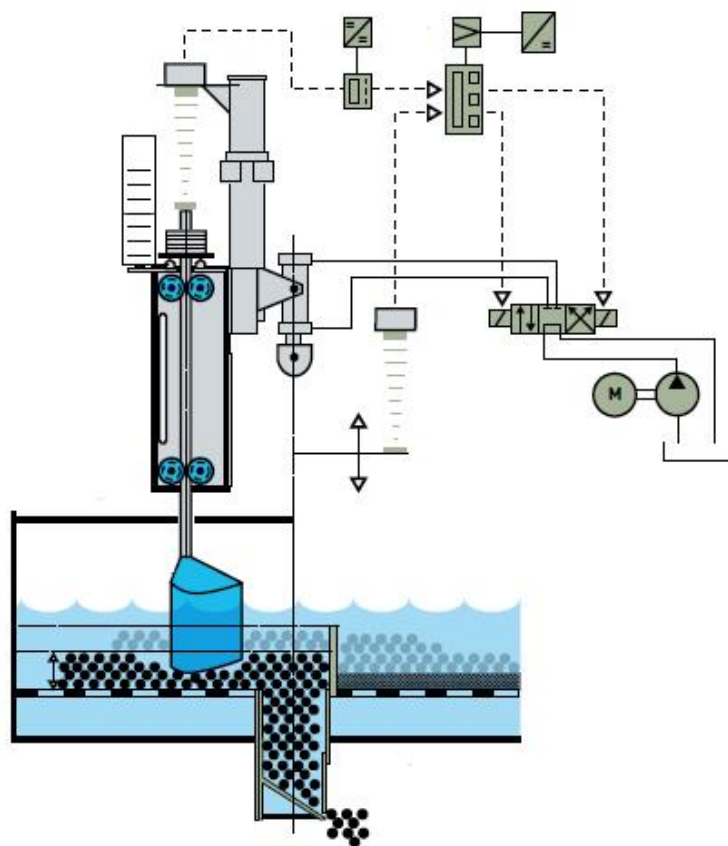
Slika 24. Taložnica sa dijafragmom (Wills 2016.)

Ukoliko bi ventil ostao zatvoren, sa podizanjem dijafragme pojavili bi se preveliki pritisak vode nadole, što bi moglo proizvesti prolazak lakih zrna kroz rešetku. Zato se vrši otvaranje ventila, te voda puno sporije silazi u sanduk taložnice.

2. 7. 4. ZRAČNE MAŠINE TALOŽNICE

Mašine taložnice kod kojih se pulsiranje vodenog stuba odvija upotrebom komprimiranog zraka omogućile su veću upotrebu mašina taložnica jer su dozvoljavale relativno laku promjenu parametara kao što su frekvencija i oblik oscilacija, a koje najviše utiču na oštrinu odvajanja. Glavna razlika između Baum i Batac taložnica je u mjestu gdje se uduvava zrak. Kod starijih Baum taložnica zrak se uduvavao u komoru koja se nalazila pored komore sa rešetkom, dok se kod modernih Batac taložnica zrak uduvava ispod radne rešetke. Sanders i saradnici daju značajnu prednost Batac taložnici zbog niza tehnoloških unaprjeđenja u odnosu na Baum. Takođe, njihova istraživanja ekonomskih parametara pokazala su znatnu prednost mašina taložnica kada je riječ o isplativosti investicije, tj. u investicionim i tekućim troškovima u odnosu na teškotekućinska postrojenja za pripremu uglja.

Baum taložnicu razvio je Fritz Baum 1892. godine i od tada je počela njena primjena u Njemačkoj i SAD. Ovaj uređaj se još uvijek intenzivno koristi za odvajanje kada postoji nizak nivo materijala sa sličnom specifičnom težinom. To je proces u kojem se kao medij koristi voda i gdje se više različitih sila koriste da bi se postiglo razdvajanje materijala na osnovu specifične težine. Radi na principu impulsa zraka gdje zrak pomijera vodu iz susjedne komore u radnu. Ovakav koncept je pogodniji za kontrolisanje sila u mašini taložnici, i prilagodljiv je za upotrebu u višecelijskim sistemima. Ponavljanje radnih ćelija dopušta odvajanje šireg ranga krupnoća u jednom prolazu, što je minimiziralo potrebu za prethodnim prosijavanjem na klase. Iako se klipne taložnice još uvijek proizvode, generalno gledajući u gravitacijskoj pripremi uglja princip zračne pulsacije usmjerio je razvoj pravcem kojim se i danas kreće. Umjesto klipa koristi se komprimirani zrak koji preko specijalnih ventila ulazi i izlazi iz komore na taj način proizvodeći pulsacije vode. Obično se proizvode sa 2 komore, tako da se mogu izdvojiti 3 produkta: jalovina kao komponenta najveće gustoće pri preradi uglja, sraslaci kao srednje teška komponenta i ugalj kao najlakša komponenta koja će zajedno sa vodom preplivati izvan mašine.

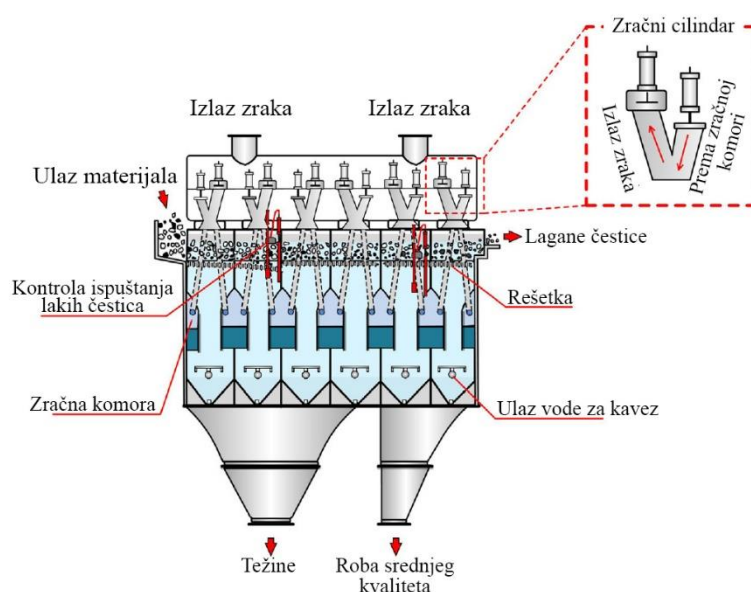


Slika 25. Sistem za automatsko pražnjenje jalovine kod Baum i Batac taložnica (Preuzeto: MBE Coal & Minerals Technology)

Gornja granična krupnoća je oko 200 mm, uz kapacitet do maksimalnih 300 t/h. U većini slučajeva, Baum taložnice još uvijek rade sa sasvim zadovoljavajućim rezultatima rada, jer postižu velike tonaže (i do 1.000 t/h) uglja različitih granulacija. Međutim zbog svoje konstrukcije ove taložnice ne pružaju istu silu na cijeloj površini rešetke, što može prouzrokovati određene razlike u ravnomjernosti taloženja. Ovaj problem nije izražen kod užih mašina. Regulisanje pražnjenja jalovine ili sraslaca pri preradi uglja vrši se dizanjem i spuštanjem pregrade pomoću automatskog hidrometra koji prati visinu sloja jalovine i daje signal za otvaranje ili zatvaranje pregrade. Baum taložnice se gotovo isključivo koriste za pripremu uglja. Sanduk za vodu im je u obliku slova U. Na jednoj strani nalazi se statična rešetka, a na drugoj se dodaje pulsirajući zrak. Obično rade sa 60 - 80 pulsacija u minuti. Mogu prerađivati ugalj do 130 mm, i pri takvoj krupnoći imaju kapacitet $40 \text{ t} / \text{m}^2 / \text{h}$, tako da taložnice kapaciteta 270 – 700 t/h nisu rijetka pojava. Iako nisu pogodne za čišćenje klasa ispod 6 mm, generalno se mogu upotrebljavati za čišćenje širokih klasa uglja, bez da se značajno kompromituje oština odvajanja.

Sredinom prošlog vijeka razvijena je nova generacija koja je unaprijedila postojeću tehnologiju Baum taložnica, sa ciljem da se približe efikasnosti teškotekućinskog separisanja, ali uz uslov da se koristi samo voda, zbog visoke cijene i ekološkog uticaja teškotekućinskog procesa.

Početna unapređenja i razvoj obavljen je u Japanu, razvojem mašine nazvane Tacub. Uvedena je ključna izmjena koja se odnosi na dovod zraka ispod rešetke, povećane pritiske zraka i varijacije u frekvenciji i tipu oscilacija. Dalji razvoj dešavao se u Njemačkoj, a kao finalni rezultat dobivena je Batac taložnica (BAum TACub).



Slika 26. Mašina taložnica tipa Batac (Wills 2016.)

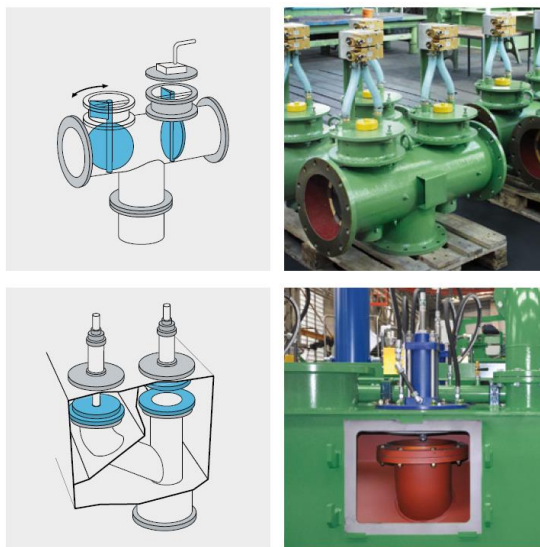
Danas je to najčešće upotrebljavana mašina za pripremu uglja na svijetu. Batac taložnica je takođe pneumatska taložnica sa statičnom rešetkom, ali nema pneumatsku komoru sa strane već se zrak dovodi u komore ispod rešetke, kako bi se postigao ravnomjeran raspored vazduha. Iako Batac taložnice koriste isti princip rada kao i Baum taložnice, u Batac su ugrađena razna dodatna konstrukciona poboljšanja koja omogućavaju veći kapacitet po jedinici površine rešetke (Wheelock 1984.). Koriste se elektronski kontrolisani zračni ventili koji omogućavaju oštro odsijecanje dovedenog i povratnog vazduha. Na taj način moguće je proizvesti precizne pulsacije koje omogućavaju taloženje za različite karakteristike ulaznog uglja. Kao rezultat svega navedenog, Batac taložnice mogu dobro prerađivati i krupne i sitne frakcije uglja. Kapacitet taložnice prvenstveno zavisi od njene širine. Baum taložnice sa bočnim zračnim pulsacijama izrađivale su se do maksimalne širine od 2,5 metra, jer se kod širih rešetki pojavljivao problem neravnomjerne raspodjele sile uzgona po cijeloj površini rešetki. Batac taložnice se proizvode široke i do 7 m, sa kapacitetima do 1000 t/h.



Slika 27. Batac taložnica u radu

Od ključnog značaja za kvalitetnu separaciju je kontrolisanje frekvencije i oblika pulsacije. Zbog toga su Batac taložnice opremljene specijalnim vrstama ventila koji su izuzetno brzi te omogućavaju generisanje željenih pulsacija. Ventilima se takođe upravlja komprimiranim

zrakom. Ista se frekvencija (40 - 120 pulsacija u minuti) podešava za svaku komoru. Specifičan oblik pulsacije uspostavlja se po potrebi za svaku komoru posebno.



Slika 28. Rotacioni i disk ventili koji se upotrebljavaju na Batac taložnicama. Gornja slika i crtež prikazuju rotacioni, a donja ventil u obliku diska (Preuzeto: MBE Coal & Minerals Technology)

Nominalni pritisak se određuje za specifične uslove rada i sprema se u kontroler. Pritisak se mijenja da bi se prilagodio trenutnim uslovima kroz mjerenje pristizanja rovnog uglja u taložnicu. Kao rezultat konstantnog ulaganja u istraživanje zadnjih desetljeća pojavio se veći broj novih vrsta mašina taložnica ali i drugih uređaja za gravitacijsku koncentraciju.

3. ANALIZA EFIKASNOSTI PROCESA ČIŠĆENJA UGLJA

3.1. ANALIZA MOGUĆNOSTI ČIŠĆENJA UGLJA

Mogućnost čišćenja nekog uglja u određenom uređaju određuje se na osnovu sadržaja pepela u ulaznom i izlaznom uglju. Reprezentativni uzorak uglja se ispituje "pliva – tone" analizom, kojom za razne opsege granulacije uglja ispitujemo procenat frakcije koja pliva pri određenoj gustini fluida, analizira se sadržaj pepela u svakoj frakciji, mjeri se zbirna težina frakcija koje plivaju i zbirna težina frakcija koje tonu. Na osnovu navedenih podataka izrađuju se dijagrami tzv. "krivih čišćenja uglja" kojima se prati, analizira i optimizira oština odvajanja u separacijskom uređaju. Osnova procjene procesa separacije leži u mogućnosti kvantificiranja očekivanih i dobivenih rezultata.

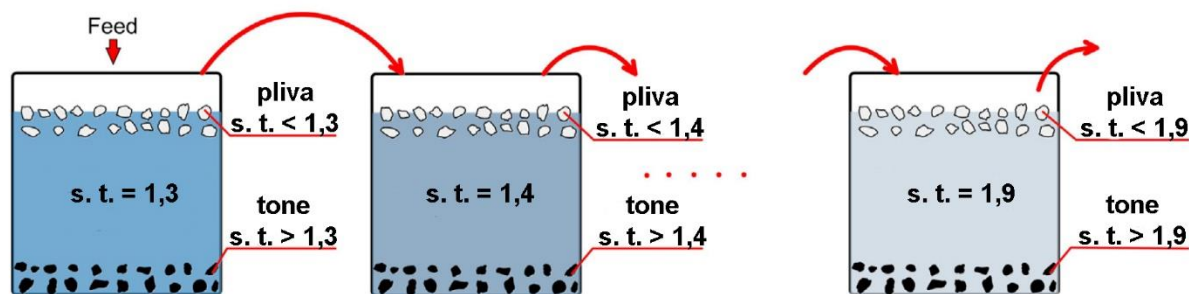
3.1.1. Pliva – tone analiza (Washability test)

Analiza pliva - tone je vrsta laboratorijske analize koja nam pokazuje mogućnost i uslove raslojavanja mineralnih zrna po gustini. Analiza se vrši u teškim tečnostima, tj. tečnostima koje imaju specifičnu težinu (ρ) veću od specifične težine vode (1.000 kg / m^3). U pripremi uglja, kao teške tečnosti upotrebljavaju se cink-hlorid ($\rho=2.750 \text{ kg/m}^3$) ili kalcijum-hlorid ($\rho=2.240 \text{ kg/m}^3$) koje dalje razrjeđujemo sa vodom do potrebne gustoće.

Pliva - tone analizom dobijamo podatke koliki je postotak zrna u uzorku lakši od tečnosti u koju ga spuštamo, a koliki je teži. Kad je riječ o uglju, njegova specifična težina je direktno srazmjerna količini jalovine. Prije potapanja u tešku tečnost, uzorak se razdvaja na klase krupnoće. Tako odvojene klase se odvojeno i analiziraju pliva – tone analizom.

Reprezentativni uzorak uglja se stavlja u posudu sa sitno perforiranim dnom, nešto manju od posuda u kojima je teška tečnost. Ta posuda se spušta u posude sa tečnošću progresivno rastuće specifične težine, za svaki sljedeći sud obično 100 kg/m^3 . Uobičajeno se za ugalj upotrebljava 6 sudova u rasponu od 1.100 kg/m^3 do 1.900 kg/m^3 . Frakcija koja tone pokupi se cjediljkom sa vrha, okapa, osuši, izvaga i analizira joj se sadržaj pepela i sumpora.

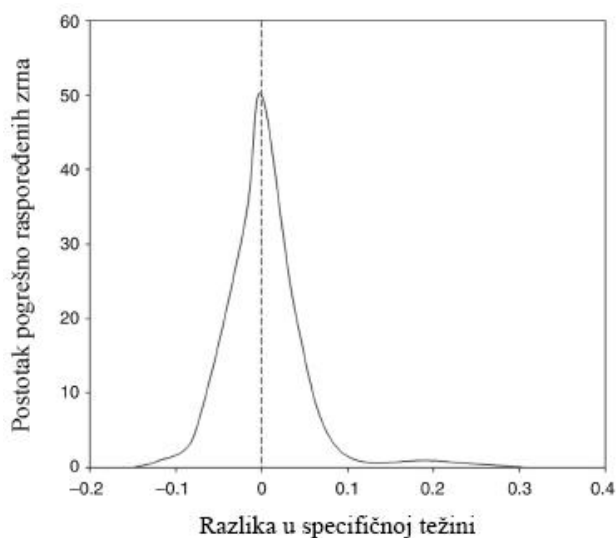
Taloženjem u teškoj tečnosti sva zrna koja imaju manju ili približno istu specifičnu težinu kao teška tečnost će da plivaju, dok će teža da potonu. Kad se taloženje u jednom sudu završi, izdvajaju se obje frakcije (frakcija koja pliva i frakcija koja tone), suše se i vagaju. Zrna koja ne plivaju ni u najgušćoj tečnosti se takođe okapavaju, suše, vagaju i analiziraju. Nakon toga se frakcija koja je potonula stavlja u sljedeći sud sa nešto gušćom tečnošću i tako redom. Za ugljenu prašinu, ovaj proces je dug i spor.



Slika 29. Pliva – tone analiza (Wills 2016.)

Nakon serije spuštanja uzorka u tečnosti različite specifične težine, dobijamo tabelu sa podacima o sadržaju pepela u frakcijama koje plivaju i tonu. Za svaku frakciju uglja osim mase određuje se i sadržaj pepela i sumpora.

Idealno odvajanje na osnovu razlike u specifičnoj težini bilo bi kada bi sva zrna lakša od tečnosti plutala, a zrna teža od tečnosti potonula. Nažalost, ovakva situacija nije moguća u praksi. Realna situacija kakva se obično zbiva u praksi prikazana je na slici.

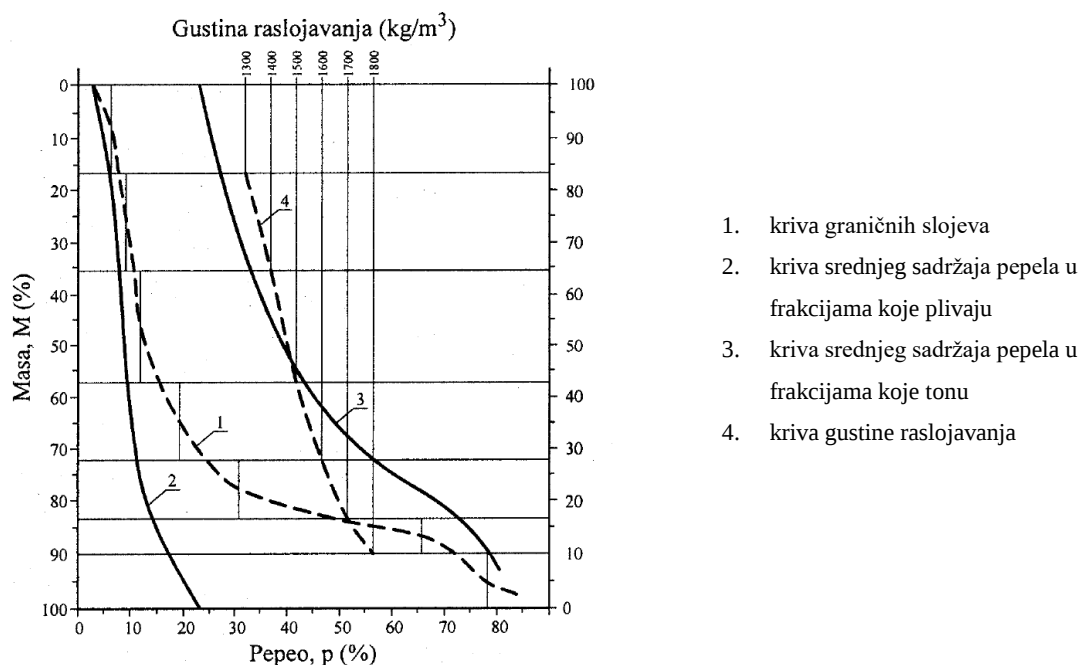


Slika 30. Kriva materijala koji se našao u pogrešnoj grupi u odnosu na razliku u specifičnoj težini tečnosti

Materijal koji je znatno teži ili znatno lakši od tekućine lako se i brzo raspodijeli u "pliva" ili "tone" frakciju, ali kako se specifična težina zrna približava specifičnoj težini tekućine, značajno se povećava količina zrna koja nisu pravilno raspoređena, tj. koja su otišla u pogrešnu kategoriju. Ova nesavršenost u odvajanju zrna pojavljuje u manjoj ili većoj mjeri kod svih procesa gravitacijske koncentracije.

3. 1. 2. Henry-Reinhardt-ove krive čišćenja uglja

Analizom pliva – tone dobijamo tabelarne podatke bazirane na specifičnoj težini, granulaciji te sadržaju jalovine i sumpora u reprezentativnom uzorku uglja. Grafičko predstavljanje i korištenje ovakvih podataka moguće je na više različitih načina. Najširu primjenu doživjelo je prikazivanje po metodu koju su razvili Henry i Reinhardt.



Slika 31. Krive čišćenja uglja po Henry-Reinhardt-u (Petrović 2008.)

Na apscisu nanosimo procenete pepela, dok na ordinati prikazujemo maseno učešće plivajuće frakcije koje smo dobili na određenim gustinama teške tekućine. Lijeva ordinata podijeljena je je odozgo prema dole, dok je na desnoj obrnuta situacije. Na gornjoj apscisi prikazujemo gustinu rastvora. Metoda grafičkog prikazivanja po Henry-Reinhardt-u predviđa crtanje četiri krive.

Kriva graničnih slojeva (*eng. Instantaneous ash curve*) omogućava da se izvrši procjena mogućnosti čišćenja nekog rovnog ugljena. Što je kriva graničnih slojeva strmija i što je relativno horizontalni dio kraći to se ugalj lakše i bolje čisti. Kada je kriva graničnih slojeva blago nagnuta tada je čišćenje tog uglja komplikovano i teško, a izdvajanje međuproizvoda je neophodno.

Kriva srednjeg sadržaja pepela u uglju (*engl. Cumulative floats*) služi za očitavanje masenog udjela i sadržaja pepela u čistom uglju i međuproizvodu. Lijeva ordinata prikazuje procentualno težinsko iskorištenje uglja, dok je na desnoj ordinati jalovina.

Kriva srednjeg sadržaja pepela u jalovini (*engl. Cumulative sinks*) se koristi za očitavanje masenog udjela i srednjeg sadržaja pepela u jalovini. Izrađuje se slično kao i prethodna, s tom razlikom da se određuju tačke presijecanja linija gustina i zbirnog sadržaja pepela u frakciji koja tone. Ova kriva omogućuje da se za čišćenje uglja unaprijed odredi najveći sadržaj pepela u frakciji koja tone za bilo koje težinsko iskorištenje čistog uglja.

Kriva gustina raslojavanja (*engl. Relative density curve*) se koristi za očitavanje gustine rastvora na kojoj se mogu dobiti proizvodi potrebnog kvaliteta.

Nakon iscrtavanja svih krivih moguće je bilansirati čišćenje uglja za različite uslove. Bilansiranje se može obaviti za dva slučaja:

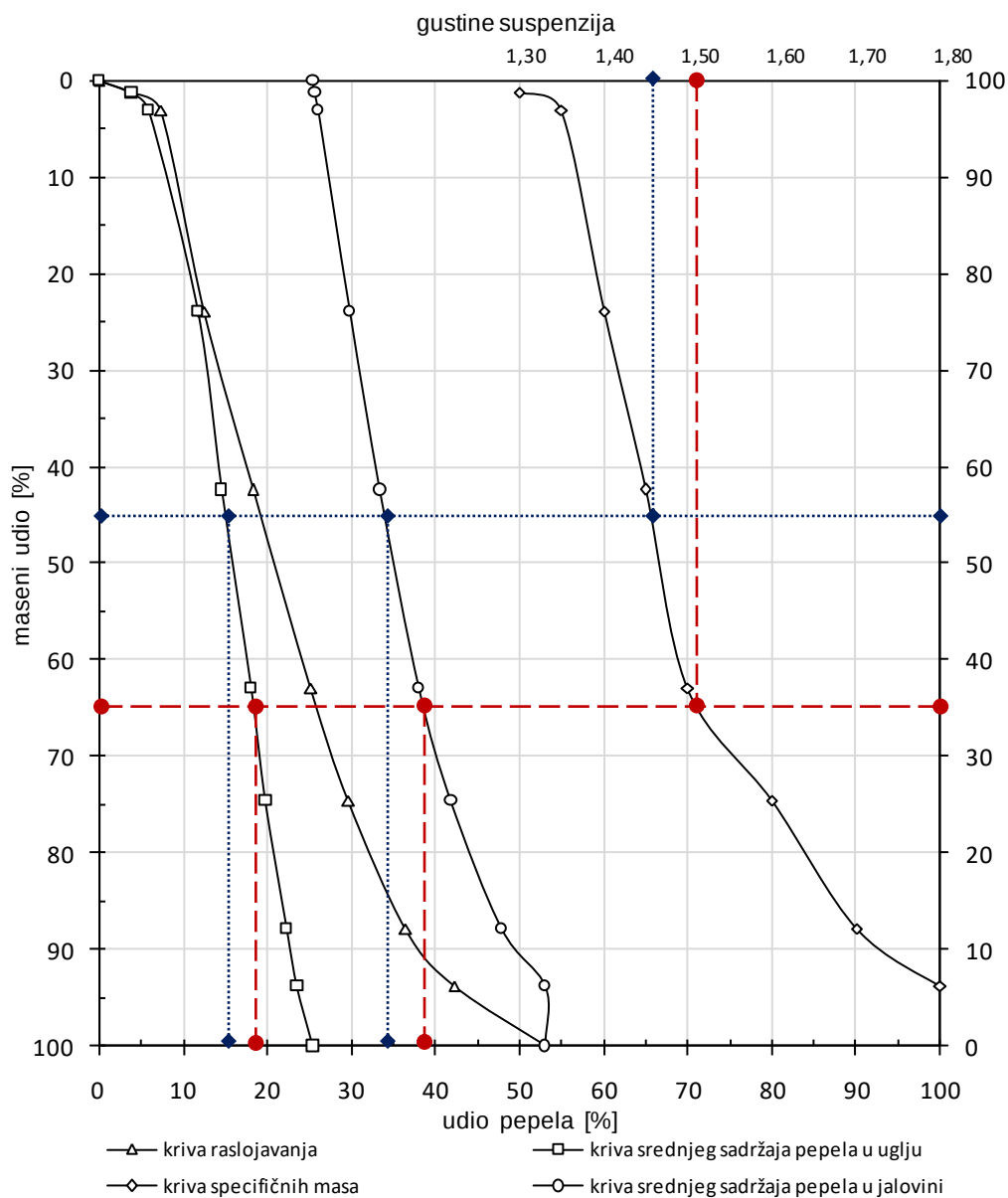
- da zadajemo maseno sudjelovanje čistog uglja, a ostali parametri se očitavaju
- da zadajemo kvalitet (sudjelovanje pepela) čistog uglja, dok ostale parametre očitavamo.

Henry – Reinhardt-ove krive omogućavaju izradu bilansa sa dva (čisti ugalj, jalovina) i sa tri (čist ugalj, međuproizvod i jalovina) proizvoda.

Kod gravitacijske koncentracije, ali i kod drugih vidova koncentracije, pojavljuje se pojam "težinsko iskorištenje" a koji se definiše kao količnik težine čistog i težine prerađenog rovnog uglja. Na sličan način određujemo i težinsko iskorištenje međuproizvoda i jalovine. Još jedan koristan parametar predstavlja i „organsko iskorištenje“ kojim pratimo odstupanje u iskorištenju u mašinama za preradu uglja. Organsko iskorištenje je odnos između postignutog težinskog iskorištenja i težinskog iskorištenja očitnog na krivama čišćenja za identičan sadržaj pepela koji smo dobili u proizvodu odvajanja. Ovaj parametar izražavamo u procentima, i kreće se od 60 do 99,9 %. Zavisi od oblika krive čišćenja i odabrane gustine odvajanja.

Očitavanje bilansa čišćenja uglja iz krivih čišćenja uglja može se izvršiti za dva proizvoda (ČU i J) i za tri proizvoda (ČU, M i J). Očitavanje može da ide preko zadatog sadržaja pepela u čistom uglju (ČU) ili preko zadatog masenog udjela čistog uglja (ČU).

Uzmimo za primjer da čisti ugalj treba da sadrži 15 % pepela. Na osnovu ovoga podatka, treba iz krivih čišćenja uglja odrediti koliki je maseni udio ili maseno iskorištenje (M%) čistog uglja i koja gustina odvajanja ČU i J.



Slika 32. H-R kriva rovnog uglja -120 +40 sa očitanim rezultatima

Zatim, treba odrediti maseni udio ili maseno iskorištenje jalovine (J) i sadržaj pepela u jalovini (p%). Rezultati očitavanja su prikazani u sljedećoj tabeli.

Tabela 12. Bilans čišćenja uglja, očitao iz krivih čišćenja za zadati sadržaj pepela od 15 %

Proizvodi	M%	p%	M% x p%	g/cm ³
Rovni ugalj	100	25,48	2548	
Čist ugalj	46	15	690	-1,46
Jalovina	54	34,4	1858	+1,46

Ako je maseni udio čistog uglja npr. 65 %, iz krivih čišćenja uglja treba odrediti koliki je sadržaj pepela u čistom uglju, i koja je njegova gustina raslojavanja od jalovine (J).

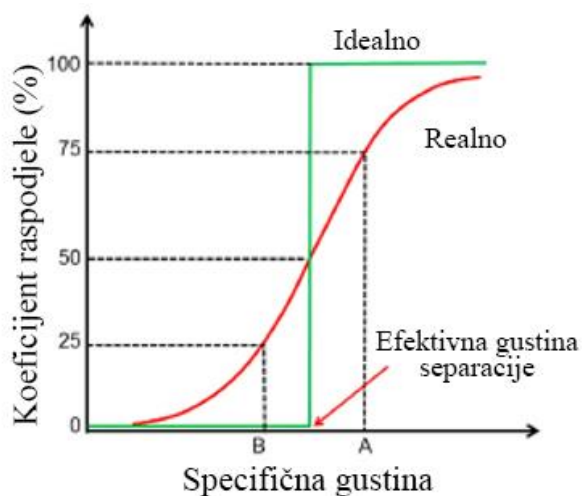
Tabela 13. Bilans čišćenja uglja, očitani iz krivih čišćenja za zadati maseni udio čistog uglja

Proizvodi	M%	p%	M% x p%	g/cm ³
Rovni ugalj	100	25,48	2548	
Čist ugalj	65	18,82	1223	-1,51
Jalovina	35	37,85	1325	+1,51

Nakon toga određujemo koliki je maseni udio ostatka uglja (jalovine) i koji je njegov sadržaj pepela.

3. 2. KONTROLA OŠTRINE ODVAJANJA UGLJA

S obzirom da se najveći dio uglja čisti postupcima gravitacijske koncentracije, od posebnog je interesa da se u postrojenjima za čišćenje uglja uvede kontrola tehnološkog procesa, koja utvrđuje odstupanja u odnosu na očekivane rezultate iz krivih čišćenja i zasniva se na utvrđivanju oštine odvajanja. Jedan od indikacija efikasnosti instalisane opreme, tj. usklađenosti rezultata predviđenih PT analizom je Kriva podionih brojeva (*Partition curve*, *Distribution curve*) koju je 1929. godine u upotrebu uveo holandski istraživač Tromp. Ista pokazuje procenat svake frakcije različitih specifičnih težina koje su prošle u odjeljak za čisti ugalj. Zrna će (pri specifičnoj težini fluida od 1,50) sa 50 % vjerovatnoće završiti u odjeljku za čisti ugalj. Kriva podionih brojeva pokazuje da se sa povećanjem specifične težine povećava i vjerovatnoća da će zrna završiti u odjeljku za čisti ugalj.



Slika 33. Trompova kriva podionih brojeva

Težinske odnose lakih i teških zrna kao i zalutalih zrna u proizvodima odvajanja možemo izraziti i brojčano tzv. podionim brojevima. Kod idealnog separatora, kriva podionih brojeva bi bila vertikalna linija na određenoj specifičnoj težini, što bi značilo da će sva zrna lakša od teške tečnosti otići u odjeljak za čisti ugalj, dok će zrna koja su teža od teške tečnosti završiti u odjeljku za jalovinu. Nagib krive podionih brojeva, ukazuje da li je oštrina odvajanja veća ili manja, tj. da li je raslojavane uspješno ili manje uspješno. Što je kriva strmija oštrina odvajanja je veća i obrnuto. Pomenutu strmost krive posmatramo u rasponu od 25-og do 75-og podionog broja. Generalno, kriva podionih brojeva postaje manje strma ako se smanjuje veličina čestica, ali i kada se širi opseg zrna.

4. MODELIRANJE I SIMULACIJA RADA MAŠINA TALOŽNICA ZA UGALJ

Postrojenja za pripremu uglja u većini rudnika na svijetu su izuzetno tehnološki zapostavljena. Investicije se većinom usmjeravaju u povećanje proizvodnje, dok se zanemaruje važnost procesa pripreme – obogaćivanja uglja bez obzira na ulogu koju ovi procesi imaju. I kada se dogode, investicije su obično usmjerene u najnužnije popravke da bi se održao proces, zanemarujući pritom unaprjeđenja koja bi mogla donijeti ogromne uštede kroz optimizaciju procesa. Postoje procjene da bi se ulaganja u mjernu i ostalu kontrolnu opremu, koja bi omogućila preciznu kontrolu, a samim time i "fino uštima vanje" radnih parametara vrlo brzo (za par mjeseci) isplatila, a kasnija korist bi predstavljala čistu dobit za kompaniju. Jednim od glavnih razloga za dug vremenski period koji prolazi dok se tehnička dostignuća ne implementiraju u postrojenjima pripreme uglja Lyman (1992.) smatra nedostatak tehničkog znanja i svjesnosti o mogućim uštedama ljudi koji rade i upravljaju ovim postrojenjima.

Svrha modeliranja proizvodnog procesa je mogućnost implementacije izrađenog modela u automatsko upravljanje datim procesom. Sve strožija pravila na tržištu uglja prinudit će rudarske kompanije da krenu putem uvođenja najprije mjernih a onda i sistema za optimizaciju upravljanjem postrojenjima za pripremu uglja. U stručnoj i naučnoj zajednici postoji izražen interes za bolje razumijevanje a time i kontrolu procesa pripreme uglja u mašinama taložnicama.

Svi modeli koji su razvijeni za mašine taložnice ne moraju nužno davati predikciju rezultata taloženja tj. proizvodnje, već isti mogu imati i ulogu analitičkih alata. Postoji čitav niz operacionih parametara koji utiču na proces taloženja, među kojima su frekvencija pulsacija, visina sloja, visina dizanja vode u radnom dijelu, brzina prolaska zrna kroz mašinu i slično. Postojeće teorije pružaju samo kvalitativna objašnjenja procesa što je nedovoljno, ako se posmatra sa stanovišta dizajniranja postrojenja i praćenja njihovog rada. Potrebno je razviti takve modele koji će objašnjavati i pratiti kretanje i ponašanje svakog zrna ponaosob, te njihovo međudjelovanje u smislu ponašanja zrna u mašini taložnici i parametara same mašine. Na taj način mnogi manje izraženi procesi koji se odvijaju u mašini taložnici moći će se kvantitativno definisati.

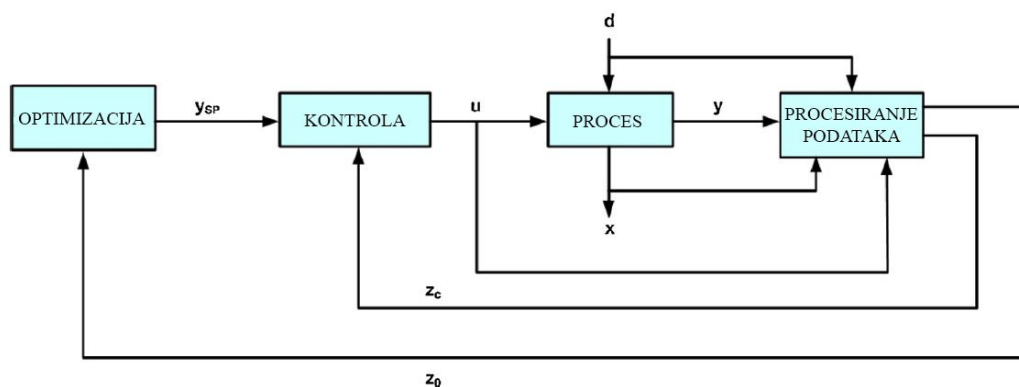
U jednoj stvari se slažu istraživači i praktičari koji se bave proučavanjem procesa, ponašanja i parametara rada mašina taložnica za ugalj: bez obzira na sve dosadašnje napore da se razvije model (ili još bolje cijeli simulator) koji bi na kvalitetan način predstavio procese i procesne parametre pripreme uglja u mašinama taložnicama, još uvijek nije predstavljen dovoljno dobar

model niti simulator koji bi dao rezultate koji bi opravdali napore uložene na dosadašnja istraživanja (Salopek 1990, Napier-Moon 1992, Mehrotra 1997. i mnogi drugi). Zbog obima zastupljenosti mašina taložnica u rudarskoj industriji, njihove važnosti te na kraju zbog ušteda koje bi se postigle ako bi se njihova efikasnost bar malo povećala, ovo polje istraživanja ostaje aktuelno.

Uspješan rad pojedinih oplemenjivačkih uređaja i procesa ovisi o čitavom nizu različitih parametara od kojih je neke vrlo teško pa i nemoguće izmjeriti. Ako takve veličine definišemo matematičkim izrazima, te ih ugradimo u matematički model baziran na izmjerenim veličinama i fizičkim i drugim zakonitostima, moguće je model potpunije definisati (Salopek 1990).

U usporedbi sa laboratorijskim i ispitivanjima na postrojenjima koja su u radu, kompjuterske simulacije nude jasne prednosti u procjeni kapaciteta, optimiziranja dizajna i procjenjivanja protoka (čvrstih i tečnih čestica, pulpe i sl.), koji podaci mogu biti korišteni za dimenzioniranje opreme (trakastih i drugih transportera, pumpi, cijevi i sl.).

Osim dobrih strana simulacije i njene jednostavnosti za upotrebu, postoji i opasnost od krajnosti pri radu na "šta-ako" analizama, gdje je neophodno paziti na realistične operative rangove u kojima su modeli validni te na limite opreme. Takođe je važno istaknuti da dobri simulacioni modeli u koje nije unešeno dovoljno podataka ili podaci nisu pouzdani teško mogu dati kvalitetne i tačne izlazne rezultate (*GIGO – Garbage In – Garbage Out*), Hodouin (2011.). Procesi pripreme mineralnih sirovina, u odnosu na druge industrijske sisteme (mehaničke, elektro sisteme i sl.), izuzetno su kompleksni. Razlozi za to leže u nelinearnosti, multivarijabilnosti i drugim nemjerljivim ili teško mjerljivim veličinama (stepen raščina-oslobođenosti minerala, minerologija, litologija i sl.). Iz istih razloga, njihovo mjerenje, kontrolisanje, te samo upravljanje ovom vrstom procesa je izuzetno kompleksno. Sa povećanjem kompleksnosti procesa pripreme javila se i potreba za što kvalitetnijim i sveobuhvatnijim mjerenjem tj. praćenjem radnih parametara uređaja, a samim time i njihovih korelacija, tj. uzročno-posljedičnih veza. Za modeliranje procesa u kojima postoji veliki broj veličina koje ne mogu biti precizno kvantitativno izražene, alati i senzori kojima se proces kontroliše važni su koliko i sam upravljački uređaj. Pošavši od premise da su za kvalitetan model potrebni kvalitetni ulazni podaci definiše kontrolnu petlju procesa modeliranja kako slijedi:



Slika 34. Kontrolna petlja procesa modeliranja (Hodouin, 2011.)

Pošto je to već realnost u nekim drugim industrijama (npr. nuklearnoj), Herbst i Flintoff (2012.) smatraju da nije daleko dan kada će se cijela postrojenja razvijati do u detalje na simulatorima, što će olakšati njihovu proizvodnju i skratiti vrijeme pokretanja proizvodnje u njima samima. Sredinom 60-tih godina prošlog vijeka, sa razvojem mjerne i upravljačke tehnike sve više se težilo automatizaciji procesa u PMS. Brza primjena novih upravljačkih tehnologija značila je veću produktivnost, a u nekim slučajevima i opstanak kompanija na tržištu. Tako je i danas. Implementacija naprednih tehnologija i pravovremena upotreba informacija imaju potencijal da optimiziraju produktivnost i uopšte poslovanje kompanije (Jamsa 2001.). To je ključna komponenta i mora postati zajednički nazivnik svih kompanija koje posluju u 21. vijeku. Naglasak se stavlja na kontrolu cjelokupnog procesa, više na integrisanje poslovne i proizvodne kontrole nego na kontrolu procesa u datom postrojenju (Flintoff 2002.) kako slijedi:

- upravljanje procesom se posmatra kao set aktivnosti fokusiran na upravljanje opremom koja čini određeni proizvodni proces. Pošto se radi o nelinearnim procesima, potrebno je mijenjati određene parametre postrojenja ili procesa, kako se mijenjaju ulazne karakteristike uglja
- upravljanje proizvodnjom je set aktivnosti fokusiran na viši menadžment rudnika. Osim proizvodnje uključuju i druge faktore kao što je redovno i vanredno održavanje sistema, promjene na tržištu i promjene ciljeva rudarske kompanije. Postiže se kvalitetnim planiranjem sa što više ulaznih podataka.

Manje – više sve kompanije u današnjem vremenu razumiju potrebu za kontrolisanjem procesa. Cilj svima je da se kroz kvalitetna mjerenja, modeliranje i simulaciju procesa donose kvalitetne inženjerske ali i menadžerske odluke.

Više od 150 godina traju pokušaji istraživača da kvantitativno opišu ponašanje mašina taložnica. Početak upotrebe računara u ovom procesu značajno je ubrzao stvari, te je nastao

veliki zamah koji se ogleda u činjenici da se pojavljuje sve više modela, koji vremenom postaju sve tačniji. Zbog svoje složenosti, modeliranje procesa gravitacijske koncentracije u mašinama taložnicama umnogome je zaostajalo za modeliranjem drugih separacijskih procesa, posebno flotacije. Tek je u zadnje vrijeme postignut značajan napredak u matematičkom modeliranju ovih procesa, što je doprinijelo njihovom boljem razumijevanju, a samim time i unaprjeđenju postojeće i razvoju novih linija opreme. Izrada modela ponekad je iznimno složen posao, jer se već pri modeliranju relativno jednostavnih uređaja pojavljuje veliki broj uticajnih parametara. Kompjuterska simulacija je maksimalno povezana sa matematičkim modeliranjem i realistična simulacija se jako oslanja na dostupnost tačnih i fizički smislenih modela. Sredinom 1970-tih pojavljuju se računari koji su cjenovno ali i programerski pristupačni, što omogućava njihovu upotrebu u praćenju, a kasnije i u modeliranju i simulaciji proizvodnih procesa. Kako je vrijeme prolazilo, ručno regulisanje i praćenje procesa sve više je zamjenjivano automatikom. Pojava PLC-a krajem 70-tih i DCS-a ranih 80-tih godina prošlog vijeka kao standardne opreme postrojenja, razvoj sve kvalitetnijih senzora, upotreba računara i naprednih upravljačkih tehnika, znatno je olakšalo proizvodnju u postrojenjima za pripremu uglja, povećala sigurnost i smanjila troškove proizvodnje na puno manji postotak u prodatom uglju.

Simulator je program ili skup programa koji, te na osnovu karakteristika ulazne sirovine i karakteristika postrojenja predviđa vrijednosti izlaznih veličina proizvoda, dok u isto vrijeme pruža detaljan numerički opis postrojenja i/ili procesa u njemu (Salopek 1988, Napier-Moon 1992.). Simulator je alat koji može mnogo pomoći svima koji rade sa postrojenjima za pripremu uglja i donose odluke u vezi sa njihovim radom, održavanjem, izmjenama i sl. Uspjeh simulatora cijeni se na osnovu njegove efikasnosti, a ista zavisi od njegove primjene. Korisna činjenica je da se simulacija odvija bez bojazni da bi se moglo naštetiti skupoj opremi i postrojenju kada isto radi u eksperimentalnim uslovima.

Simulacija kompleksnog inženjerskog postrojenja kakva su postrojenja za pripremu uglja moguće je jedino uz detaljno poznavanje svake gradivne komponente sistema, tj. parametara svakog od procesa koji čine postrojenje. Simulator je alat koji se može koristiti čak i kada sistem ne postoji u stvarnosti, ali su performanse simulatora i simuliranog procesa ili postrojenja dobre i pouzdane onoliko koliko su pouzdani podaci i poznavanje svakog od procesa u postrojenju. Opis ponašanja svakog od procesa u postrojenju bazira se na modelu koji se razvija za svaki od procesa. Simulator povezuje modelirano ponašanje svakog od procesa i objedinjuje njihovo ponašanje u ponašanje cijelog postrojenja.

Kompjuterski simulatori koji se koriste u pripremi mineralnih sirovina imaju relativno kratak istorijat. Sredinom 70-tih godina učinjeni su početni koraci, sa ulazima na izbušene kartice i izlazima u vidu grafova na matričnim štampačima. Danas postoje modeli i simulatori za gotovo sve uređaje i postrojenja koja se koriste za pripremu uglja, koji sa manjim ili većim uspjehom tj. tačnošću i pouzdanošću simuliraju pomenute procese.

Simulatori se koriste u tri glavne svrhe:

- izradu i dizajniranje procesa i postrojenja, odabir i dimenzionisanje opreme
- optimizaciju procesa
- edukacijske (trening) svrhe.

Pošto su moderna postrojenja za pripremu uglja izuzetno skupa za izradu i upotrebu, postoji izražena potreba da se koriste simulatori u gotovo svim fazama razvoja i eksploatacije da bi se što bolje optimizirao njihov rad. To se radi zato što i mala ušteda i optimizacija koja se postigne značajno će doprinijeti profitabilnosti postrojenja tokom njegovog eksploatacionog vijeka, a naročito ako se radi o visokotonažnim postrojenjima (Ford i King 1984., Wills 2016.):

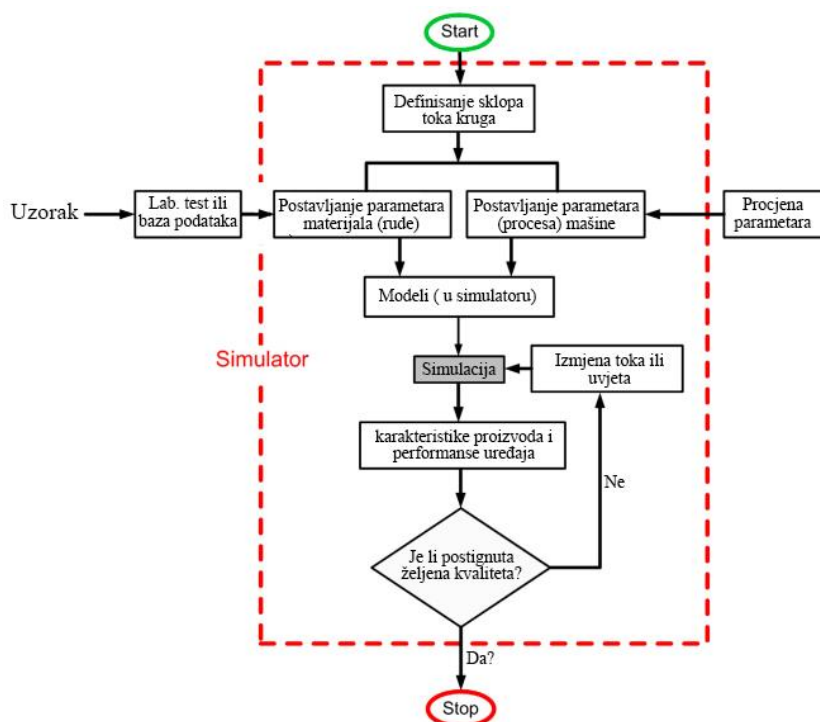
- u fazi istraživanja i razvoja simulatorom je moguće porediti različita rješenja uz minimum potrebnih ulaznih podataka
- kada se pronade finansijski isplativ moguće su provjere različitih alternativa koje obuhvataju veličinu postrojenja, prostorni raspored i druge elemente koji mogu uticati na optimalne performanse postrojenja
- u fazi izrade i implementacije pilot postrojenja, čim su dostupni osnovni podaci i mjerenja, moguće je napraviti prilično tačne procjene ponašanja i operativnih karakteristika postrojenja u punoj veličini i kapacitetu
- u fazi izgrađenog tj. postrojenja u radu, simulator se može koristiti u svrhu pronalaska najisplativijih uslova rada postrojenja, podizanje efikasnosti, za adaptiranje postrojenja na različite karakteristike ulaznih sirovina, kao i različite zahtjeve tržišta.

U fazi dizajniranja postrojenja za pripremu uglja, dobar simulator može umnogome olakšati proces:

- pomoći inženjerima-projektantima da pronadu optimalan protok materijala
- osigurati da su specifikacije postrojenja ostvarive i realistične u svim okolnostima rada postrojenja (različite granulacije, mnogo jalovine, niske temperature i sl.)
- odabrati najpodesnije procese i operacije da budu uključene u postrojenje

- dimenzionisati procese, uređaje i cijelo postrojenje na najoptimalniji način da bi se izbjeglo poddimenzionisanje ali i skupo predimenzionisanje sistema ili njegovih dijelova
- optimizirati operacije u postrojenju da bi se dobila ekonomski najbolji odnos između čišćenja uglja i njegove cijene
- pravovremeno identificiranje i rješavanje "uskih grla"
- komparativna procjena uređaja od različitih proizvođača
- definisanje garancija koje ponuđači moraju ispunjavati.

Upotreba simulatora krije i određene opasnosti, te se rezultati koji se dobiju njihovom upotrebom moraju uzimati sa dozom opreza. To znači da modeli i simulatori moraju biti podešeni za upotrebu na konkretnom postrojenju, testirani sa podacima iz postrojenja te potvrđena njihova upotrebljivost na konkretnom postrojenju.



Slika 35. Blok šema (algoritam) simulatora (Napier-Munn 1996, Wills 2016.)

Napier-Monn i Lynch (1992.) posebnu važnost daju procesu "fitovanja" (uklapanja, podešavanja) formulara u modelu podacima sa datog postrojenja. Za modele koji rade sa linearnim parametrima radi se linearna regresiona analiza, a za nelinearne modele rade se nelinearne procedure procjene. Vrijednosti parametara za mašinu moraju se uzeti iz procesa. Poželjno je ne uzimati i podatke o ulaznim sirovinama iz istog izvora, već iz odvojenih laboratorijskih testiranja.

4. 1. KLASIFIKACIJA MODELA MAŠINA TALOŽNICA

Stotinjak godina rada mašina taložnica i njihovog ispitivanja nisu daleko odmakli u pogledu naučnog predstavljanja principa njihovog rada (Lyman 1992., Mukherjeea 2006.). Više značajnih napora je napravljeno u prošlosti da bi se formulisao jednostavan i praktično primjenjiv model koji će u sebi sadržavati korelacije važnih procesnih varijabli. Najkvalitetnijim modelima Salopek (1990.) smatra *teorijske* modele, zbog toga što proces u potpunosti opisuje nekim od poznatih fizikalnih zakona (npr. Zakon o održanju mase ili Stokesov zakon). U upotrebi su najčešće *fenomenološki* modeli koji pored fizikalne osnove sadrže i parametre čije se vrijednosti određuju eksperimentima i mjerenjima unutar samog procesa. *Empirijskim modelima* zovemo one koji nemaju fizikalne osnove, već se određuju na osnovu niza eksperimenata i regresijske analize. U zavisnosti od toga da li u sebi sadrže komponente ovisne o vremenu, postoje *statički* i *dinamički* modeli.

Modeli su obično bazirani na teorijama o taloženju koje su postavljali i dorađivali razni autori. Izdvajaju se tri osnovne klase modela (Sastry 1990., Napier-Munn 1992.).

1. Najefektivniji modeli koji su izrađeni na bazi naučnog razumijevanja procesa i osnovnih zakona fizike i hemije. Zbog svoje kompleksnosti, priprema uglja u mašinama taložnicama definitivno ne spada u ovakve procese
2. Modeli bazirani na intelektualnom konstruktumu spadaju u fenomenološke modele, realistično predstavljaju procese i u zadnje vrijeme pokazuju najveći potencijal kao korisni generalni algoritmi za simulaciju
3. Treću klasu modela čine oni koji su po svojoj prirodi empirijski, više matematička determinacija nego opis prirode procesa.

Lyman (1992.) dijeli teorije po kojima su kreirani modeli na klasične, teškotekućinske, koncepte potencijalne energije zrna i razne statističke koncepte. Najvećim problemom smatra činjenicu da su sve teorije previše pojednostavljene i da ne uspijevaju stvoriti kvalitetnu vezu između parametara u modelu i parametara očitanih sa mašine taložnice.

Radovi Vinogradova i Jinnouchi i sar. dali su veliki doprinos razumijevanju kretanja vode i zrna u taložnici, ali bez pokušaja da se karakterizira taloženje po specifičnim težinama.

Šira klasifikacija modela mašina taložnica je data u nastavku (Mishra i Mehrotra 2001., Xia i Peng 2007., Viduka 2013.):

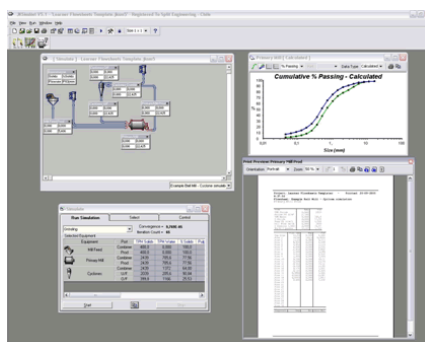
- modeli na bazi kretanja pojedinačnih čestica i vode – klasična teorija (Gaudin 1939.)

- modeli na bazi istraživanja potencijalne energije zrna (Mayer 1964.; Tavares i King 1995.)
- modeli zasnovani na numeričkim analizama
- modeli zasnovani na vještačkoj inteligenciji i mekom računarstvu.

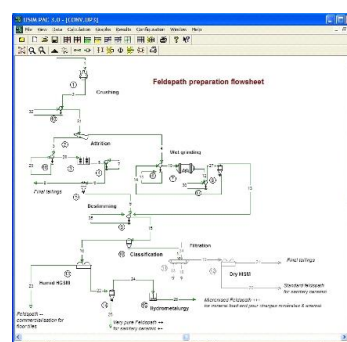
Većina pomenutih istraživanja i teorija potkrijepljena je manjim ili većim eksperimentalnim istraživanjima. Zbog važnosti za razumijevanje koncepta modeliranja mašina taložnica za ugalj, u radu će biti obrađeni značajniji modeli iz nabrojanih kategorija.

4. 1. 1. VIŠENAMJENSKI (UNIVERZALNI) SIMULATORI

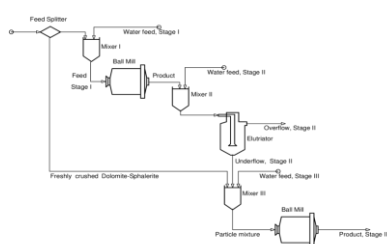
Postoje osnovni koncepti koje mora da zadovolji bilo koji simulator. To je omogućilo simuliranje cjelokupnih postrojenja za PMS, sa svim osnovnim i pratećim procesima. Ovakvi simulatori su robusni, obično se sastoje od više potprograma i vrlo su kompleksni za upotrebu. Najčešće korišteni ovakvi simulatori su JKSimMet, USimPac, Modsim, Limn (baziran na Microsoft Excelu).



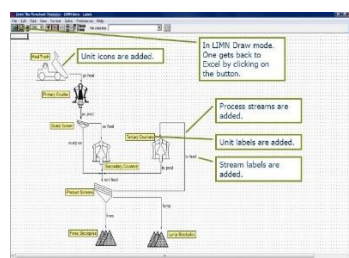
JKSimMet



USimPac



Modsim



Limn

Slika 36. Izgledi grafičkog interfejsa univerzalnih simulatora

Izrada ovako kompleksnih simulatora izuzetno je zahtjevan posao. Čak je i samo korištenje zahtjevno, jer je za njihovu pravilnu upotrebu, tj. upotrebu koja će dati relevantne rezultate potrebna dobra priprema (poznavanje procesa, veza među njima te načina kako sam softver sagleda te veze). Iako korisni, zahtjevniji su za korištenje te zahtijevaju da se njihova upotreba povjeri iskusnim inženjerima ili projektantima.

4. 1. 2. MODELIRANJE KRETANJA ČESTICA I VODE

Gaudinova hidrodinamička teorija² o ponašanju zrna u mašini taložnici iz 1939. godine u kojoj je naglašena međuzavisnost parametara u mašini taložnici predstavlja polazni osnov za veliki broj modela i simulatora razvijenih diljem svijeta. Istraživači su pokušavali kvantificirati ponašanje zrna u mašini taložnici kroz ponašanje svakog zrna ponaosob u odnosu različite hidrodinamičke uslove. Zbog velikog broja uticajnih parametara, sistem je simplificiran na razne načine, što je u konačnici dovelo do situacije da (često) isti ima malo toga zajedničkog sa originalnim – polaznim sistemom. Često kod istraživača nalazimo konfliktne rezultate, što doprinosi teoriji da je još uvijek dug put do potpunog razumijevanja i matematičkog a (samim time i modelskog) determiniranja procesa u mašinama taložnicama za ugalj.

Odnose između brzine taloženja, vremena taloženja, ponašanja vode ali i drugih operativnih parametara u mašini taložnici kroz razvoj modela istraživali su Rog i Lyman (1991.). Tačnije, njihov model detaljno opisuje odnos između brzine taloženja i tri parametra ponašanja vode, te zaključuju da pritisak vode iznad rešetke taložnice ima dominantan uticaj, iza čega slijedi uticaj amplitude vodenog stuba i uticaj ubrzanja vodenog stuba u radnom dijelu mašine taložnice. Pošto su ovi parametri lako mjerljivi, autori smatraju ovakav model podesnim za praćenje oscilacija u pri čišćenju uglja. Jedno od glavnih otkrića ovog modela je da odnos između pritiska u odjeljenju sa vazduhom i pomijeranja vode nije uvijek linearan, te da može biti izuzetno kompleksan. Mjerenja nivoa su vršena radioaktivnim mjeračem gustine.

Za svoju simulaciju Li i sar. (1993.) koristili su stohastički proces u matematici poznat kao Markovljev lanac³ koji stanja promatranog sistema sagleda na više načina. U svakom trenutku sistem može preći u novo stanje ili pak može ostati u istom stanju. Promjena stanja naziva se tranzicija. Ako kažemo da slijed stanja ima Markovljevo svojstvo to praktično znači da je svako naredno stanje vremenski neovisno o bilo kom prijašnjem stanju. Vektori vjerovatoće u tranzicionoj matrici pokazuju vjerovatnost promjene stanja tj. distribuciju materijala određene spocifične težine u koncentrat ili jalovinu. Stoga je kumulativna vrijednost elementa jednaka stanju lake frakcije, na osnovu čega je moguće izračunati vrijednosti ostalih elemenata, kao što je imperfekcija. Rezultati dobijeni na izlazu mašine taložnice gotovo su identični onima koji su predviđeni ovim modelom.

Pošavši od premise da bi se karakteristike mašina taložnica mogle unaprijediti ukoliko se poveća frekvencija oscilacija, Mukherjee i sar. (2005.) su istraživali kretanje vode kroz

² Više o pomenutoj teoriji pisano je u poglavlju 2.5.1.

³ Nazvan po ruskom matematičaru Andreyu Markovu

posteljicu kada postoji dodatni pritisak odozgo, tj. kada nije isključivo gravitaciona sila ta koja djeluje na zrna koja se kreću nadole. Kroz testiranja koja su uključivala mjerenja efikasnosti pri promjeni frekvencije, amplitude i oblika pulsacije, najbolje su se pokazala stanja u kojima su identični oblici pulsacije i za uzlaznu i silaznu putanju vode i zrna. Upotrebom pomenutog dodatnog pritiska, proširen je rang u kome se radni parametri mogu kretati. Obrađen je širok spektar parametara i korelacije među njima da bi se dobila optimalna kombinacija, što je kasnije testirano na raznim granulacijama i sastavu ulaznih sirovina.

Konciznu diferencijalnu jednačinu koja na univerzalan način opisuje pomijeranje slojeva u mašini taložnici napravio je Steiner (1996.), riješivši je po kriterijima brzine i pomijeranja sloja. Kao prvi kriterij uzet je ugao podizanja materijala u taložnici, dok je kao drugi uzet Froudeov broj⁴, kojim je povezano maksimalno ubrzanje fluida sa inicijalnim ubrzanjem sloja koji se razdvaja po specifičnoj težini. Pokazalo se da ugao dizanja materijala u taložnici navise zavisi od brzine vode, brzine (imaginarnog) klipa, te u konačnici od konačne brzine taloženja posmatranog sloja.

Model koji detaljno prati protok vode kroz mašinu taložnicu razvio je Mishra (1999.), te su njime analizirani razni oblici pulsacija kako bi se dobili optimalni rezultati stratifikacije. Model je postavljen na način da analizira dinamiku kretanja fluida u funkciji amplitude i frekvencije pulsacija, te uticaj na brzinu taloženja. Analize pokazuju da se nivo vode u radnom dijelu mašine taložnice ne podiže linearno u odnosu na pritisak zraka koji potiskuje vodu. Autori su mjerenja nivoa stratifikacije mjerili preciznim nuklearnim mjeračima gustine, što je omogućilo stvaranje tijesne veze sa glavnim parametrom – brzinom raslojavanja.

Za model ASTRAD autori Dieudonné i sar. (2006.) tvrde da kroz praćenje velikog broja radnih parametara ali i istorijskih podataka (dobivenih iz baza podataka koje se pune podacima iz rada postrojenja) daje solidne rezultate kada je riječ o predviđanju karakteristika sirovina koje izlaze iz mašina taložnica.

U cilju poboljšanja kontrole procesa u mašini taložnici i povećanja brzine taloženja, Liu i sar. (2016.) razvili su laboratorijski model kojim su detaljno proučavali stratifikacijske mehanizme u radnom dijelu mašine taložnice. Korištenjem novih tehnoloških dostignuća, u konkretnom slučaju ultra brzih video kamera, stavljeni su u korelaciju parametri mašina taložnica i video snimke visoke rezolucije pri čemu je omogućena uporedna analiza kretanja vode i zrna, te taloženja. Uočeno je da vrijeme za koji se izvrši jedna puna oscilacija (period), tačnije njegovo produžavanje, ima značajan uticaj na pulsiranje vode i zrna. Uporedbom video rezultata sa

parametrima, primijetno je da se stratifikacija zrna vrši u zadnjem stadiju uzlazne i početnim stadijima silazne putanje zrna.

Cierpisz (2017.) kreirao je dinamički model baziran na MatLab/Simulink koji analizira izlaz uglja i jalovine iz mašine taložnice, baziran na sljedećim premisama:

- slojevi uglja različitih specifičnih težina se ne miješaju
- distribucija gustoće slojeva uglja koji ulaze u zonu pražnjenja mašine taložnice mogu se aproksimativno odrediti iz podataka o ulaznoj sirovini.

Model je moguće koristiti da bi se razvio algoritam za upravljanje i automatizaciju ovog važnog procesa. Istraživanje dobija na važnosti kako se povećava upotreba online mjerenja pepela u izlaznom proizvodu, jer se povećava potreba za brzim djelovanjem.

4. 1. 3. MODELIRANJE NA BAZI POTENCIJALNE ENERGIJE ZRNA

Teoriju po kojoj je odvajanje čistog uglja od jalovine vezano za razliku u potencijalnim energijama slojeva zrna predložio je Mayer (1964.)⁵. Zasnovana je na pristupu koji, umjesto da prati ponašanje svakog zrna zasebno kao što je uobičajeno kod hidrodinamičkog pristupa, sagleda ponašanje čitavog skupa zrna u mašini taložnici. Stratifikacija je usko povezana sa smanjenjem potencijalne energije. Teorija ne pruža opis na koji način sistem prelazi u stabilno stanje, te ne može functionisati ako u sistem ulaze zrna sa raznolikom granulacijom. (Vetter 1987.).

Kingov model (1987.) jedan je od prvih uspješnih ne-empirijskih kvantitativnih modela baziranih na Mayerovoj teoriji koji predviđaju performanse mašina taložnica, a najvažnija mu je polazna osnova da "savršena stratifikacija nikada ne može biti postignuta". Profil taloženja unutar mašine taložnice je uvijek u dinamičkoj ravnoteži između stratifikacijskog i disperzivnog fluksa. Stratifikacijski fluks u tom smislu čini razlika u gustini jednog zrna i zrna koja ga okružuju, dok je disperzivni rezultat slučajnog (haotičnog) kretanja zrna. Model je razvijen za binarne sisteme.

Model predložen od strane Vetter i sar. (1987.) obrađuje kretanje zrna kroz teoriju vjerovatnoće interpretirajući konvencionalni balans hidrodinamičkih sila koje djeluju na zrno kao stohastičku diferencijalnu jednačinu. Iako ga autori ne smatraju ekstenzijom Mayerove teorije, model se uveliko naslanja na osnovne koncepte iz Kingovog modela (Crespo 2016.). Kinetički po prirodi, ovaj model dopušta predviđanje ponašanja zrna i njihovog rasporeda u cijelom radnom prostoru mašine taložnice, što je od značaja kada se rješavaju problemi vezani za

⁵ Mayerova teorija detaljno je opisana u poglavlju 2.5.2.

vrijeme koje zrno provede u taložnici i zapreminske kapacitete taložnice. Nedostatak mu je što je limitiran na zrna jednake veličine.

Simulacijski model u kojem se mjere parametri mašine taložnice sa 200 komada uglja prečnika 5 cm Beck i Holtham (1993.) koristili su za praćenje interakcije zrno-zrno i zrno-fluid. Interakcija tečne faze sa zrnima uključuje gravitacijsku, sile dinamike fluida i statičke sile. Model sile usisavanja korišten je da bi se izračunale sile inerakcije zrno-fluid. Interakcija zrno-zrno modelirana je na dva načina: kratkotrajni sudari koje opisuje model impulsivne sile i dugi frikcionni kontakti koje opisuje model napete opruge. Prebacivanje između ova dva modela ovisi o vremenu interakcije između dva zrna. Iako tretira pojedinačne sile, od primarnog značaja za model je ponašanje cijelog radnog prostora.

Modelom kojim su Tavares i King (1995.) pružili kvalitativno objašnjenje stratifikacijskog procesa zrna ujednačene krupnoće napravljena je modifikacija Mayerove teorije u smjeru da se omogući modeliranje zrna različitih veličina. Naime, Kingov model je rađen za ujednačenu krupnoću zrna, što kod mašina taložnica za pripremu uglja nije slučaj. Međutim, i dalje je teško širiti ovaj model na velike rangove krupnoća, jer je izražavanje takvih modela matematičkim putem izuzetno kompleksno.

Model je proširen od strane Rao (2007.) da bi obuhvatio efekte veličine zrna. Ista istraživanja potvrdila su da je efikasnost separisanja sitnih klasa u odnosu na krupne izuzetno niska.

Studija Wollacot-a (2018.) razmatra u kojoj mjeri se Kingov indeks taloženja može upotrijebiti u proračunima, nasuprot vjerovanju da nije primjenjiv za različitu krupnoću zrna. Autor je povećanjem preciznosti mjerenja i uporedbe rezultata došao do zaključka da postoje rasponi u krupnoći zrna u kojima razlike u dimenzijama zrna mogu biti zanemarene i Kingov se model može primjenjivati da adekvatno opiše procese taloženja u mašini taložnici.

4. 1. 4. MODELIRANJE NUMERIČKIM METODAMA

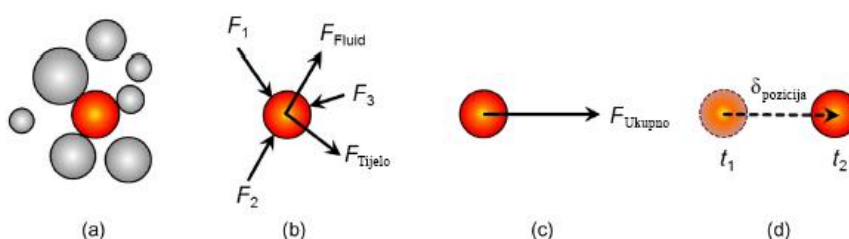
Istraživanje fenomena mašine taložnice upotrebom tehnika numeričkog modeliranja izaziva mnogo interesa u naučnoj i stručnoj javnosti diljem svijeta. Modele rada mašina taložnica koji su razvijeni tehnikama numeričke analize možemo podijeliti na sljedeći način:

- Metoda diskretnih elemenata (*Discrete Element Method - DEM*)
- Računarska dinamika fluida (*Computational Fluid Dynamics - CFD*)
- Hibridni modeli koji istovremeno koriste obje pomenute tehnike (*CFD i DEM*).

Računarska dinamika fluida i Metoda diskretnih elemenata su dvije vrlo važne grupe tehnika modeliranja koje su se pojavile zadnjih godina i koje se uveliko koriste u dizajniranju novih i redizajniranju postojećih uređaja za pripremu mineralnih sirovina.

DEM je numerička tehnika kojom se simulira ponašanje većeg broja čestica – zrna. Svako zrno je predstavljeno numerički i posjeduje svoje osobine (oblik, veličinu, osobine materijala, inicijalnu brzinu i sl). Radni prostor mašine taložnice podijeljen je na polja koja definišu poziciju svakog zrna. Nakon toga kretanje zrna se prati kroz kratke vremenske intervale (iteracije). Neka od zrna ostvaruju kontakt sa susjednim ili sa zidovima taložnice, nakon čega se računa zbir sila po svakom zrnu. Pomenuti metod modeliranja bazira proračun kretanja zrna na Drugom Njutnovom zakonu dinamike, kao i pojednostavljeni model kretanja fluida i mikromehaničkih procesa na čestičnom nivou. Uključene su sve sile koje djeluju na zrno i one opisuju međusobne kontakte između zrna, kao i kontakte zrna i zidova taložnice. Sile vučenja i hidrostatičke sile takođe su uključene u razmatranje. Pomenute tehnike modeliranja pretpostavljaju uniformnost fluida i ne uzimaju u obzir uticaj ne-uniformnih fluida na sile vučenja. Ovakvi modeli vrlo su hardverski zahtjevni, jer je potrebno obraditi veliki broj kalkulacija složenih jednačina, te je u jednom razdoblju bilo moguće rješavati samo dvodimenzionalne modele. U novije vrijeme Srinivasan i sar. (1999) istraživali su primjenu trodimenzionalnog DEM modela kroz inkorporiranje sile vučenja, da bi se u modelu uvažila poroznost sloja zrna.

Između ostalih, prednost DEM modela je i u tome što se glavne operativne varijable mašine taložnice (amplituda, frekvencija, visina sloja) lako mogu povezati sa brzinom taloženja.



Slika 37. Primjer DEM iteracija na zrnu a) identifikacija kontakata b) primjena sile c) sumiranje sila d) proračun pomijeranja zrna (Wills 2016.)

Kretanje zrna Mehrotra i Mishra (1997.) modelirali su korištenjem DEM metoda, dok je korespondirajuće kretanje tečne faze determinirano tehnikom markera i ćelije (MAC)⁶. Činjenica da se fluid kreće kroz sloj čestica kojem se osobine stalno mijenjaju, čini problem veoma kompleksnim, a autori vide rješenja u kombinovanju DEM i MAC tehnika modeliranja. Isti autori (2001.) modifikovali su svoj polazni DEM model koristeći Di Felice-ovu (1994.) korelaciju koja uzima u obzir efekat poroznosti i validira model u odnosu na eksperimentalne

podatke. Kao i u prethodnom eksperimentu, radni prostor mašine taložnice virtualno je podijeljen na kocke u kojima se zrna mogu kretati. Teoretski, zrno se može kretati u osam različitih kocki te se praćenjem kretanja zrna u svim kockama u koje može ući identificiraju kontakti sa drugim zrnima i zidovima taložnice. U kalkulisanoj ovih kontakata, zrnima je dozvoljeno preklapanje. Utvrdili su da je jedan od glavnih parametara sila plivanja koja nastaje pri stalnom potapanju uglja. Autori zaključuju da je za efikasan rad taložnice potrebno naći optimalnu amplitudu i frekvenciju rada, a najbolje je koristiti srednje vrijednosti, jer veoma visoke i veoma niske vrijednosti daju izrazito slabe rezultate taloženja. Takođe, i kada se nađe optimalan odnos ova dva parametra, on nije isti za različite oblike pulsacija.

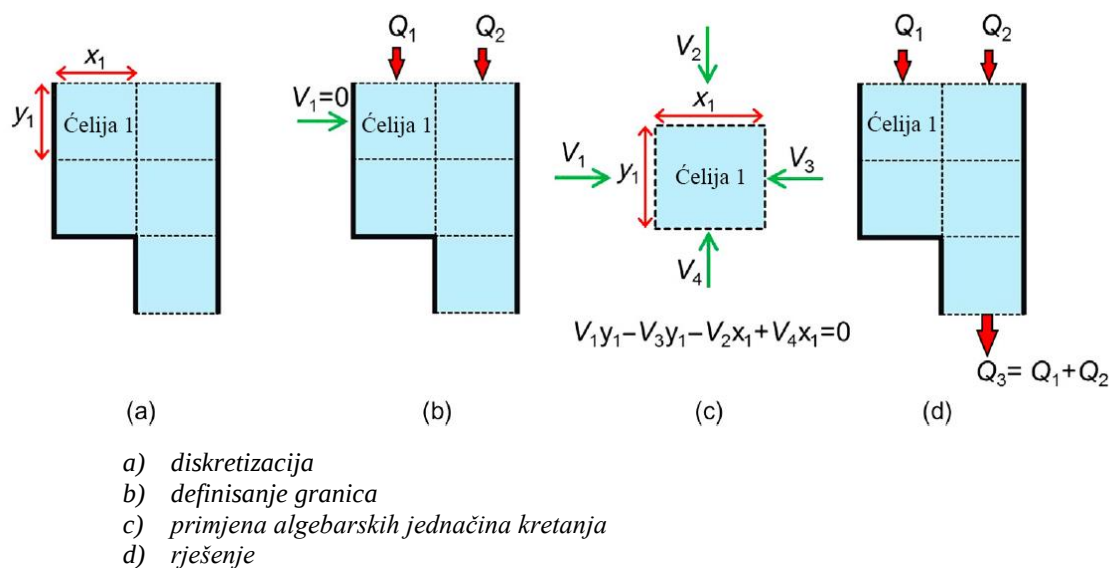
Taloženje u mašini taložnici Mukherjeea i Mishra (2006.) sagledavali su kao proces naizmjenične fluidizacije i defluidizacije sloja. Rađeno je modeliranje kroz numeričku analizu tri, prema mišljenju autora, ključna parametra: amplitude (kontrolise maksimalnu brzinu vode), karakteristika ulazne sirovine (granulacija, količine pojedinih frakcija, veličina zrna) i frekvencije pulsiranja. Maksimalna brzina vode i razmak među zrnima su glavni uticajni faktor na silu vučenja, koja opet najviše utiče na proces taloženja.

Da se zrna iste brzine taloženja a različitog prečnika mogu lako separisati pokazala su istraživanja Asakura i sar (2007.). Kretanje zrna opisuju BBO jednačinama⁷, a trodimenzionalno kretanje zrna i vode SIMPLE algoritmom⁸. Kontaktne sile među zrnima računata su uz pomoć DEM metoda, proširenog na zrna različite krupnoće. Rezultati simulacije pokazuju da se dvije vrste zrna, sa malom razlikom u specifičnoj težini mogu odvajati. Takođe je pokazano da izvedeno vrijeme odgovora može biti koristan parametar za analizu kretanja zrna pod uticajem gravitacije.

Kombinujući fenomenološki i DEM model, Crespo (2016.) koristi limitirani broj diskretnih elemenata (što kod klasičnog DEM modela nije moguće), te na taj način kreira dinamičku simulaciju distribucije poroznosti u radnom prostoru mašine taložnice.

Računarska dinamika fluida (CFD) predstavlja primjenu algoritama i numeričkih tehnika da bi se rješavali problemi toka fluida. U pomenutoj tehnici tijelo fluida (posuda određenog oblika) podijeljenja je na manje dijelove tzv. ćelije tetraedarskog ili heksaedarskog oblika. Svaka od karakteristika ćelije (masa, pritisak, temperatura, brzina i sl.) determiniše se algebarskom vrijednošću. Zakoni o održanju energije i mase primjenjuju se na svaku ćeliju, pazeći pritome

na odnose sa susjednim ćelijama, što sve zajedno čini sistem algebarskih jednačina sa varijablama koje predstavljaju karakteristike svake od ćelija.



Slika 38. Pojednostavljena primjena CFD tehnike na rješavanje dvodimenzionalnog problema kretanja fluida (Wills 2016.)

Tako sastavljen sistem jednačina rješava se iteracijama po CFD kodu, a rješenje je karakteristika putanje za svaku ćeliju. Jednom kada se izračuna putanja ćelije, moguće je izračunati i putanju cijelog fluidnog tijela (brzinu, smjer, pritisak).

Polazeći od premise da kod modela mašine taložnice koji koristi DEM postoji pretpostavka da je fluid idealan, Xia i sar. (2007.) razvili su model koristeći CFD da bi u razmatranje kretanja zrna uglja širokog spektra dimenzija i specifičnih težina u mašini taložnici uvrstili i ponašanje realnog fluida – pulpe. Kretanje fluida računato je direktnim rješavanjem Navier – Stoukovih jednačina, a zrna uglja se pomijeraju u okviru Lagranževog okvira (Lagrange), gonjena silama kretanja fluida i gravitacije. Uzeto je u razmatranje međudjelovanje zrno-zrno, ali i zrno-zid taložnice.

Razvoj multi-fizičkih simulacija (CFD i DEM modeli zajedno) značajno je povećao preciznost u modeliranju procesa, a najvažnije od svega je postojanje mogućnosti da se predvidi uticaj dizajn parametara na ponašanje opreme koja se dizajnira (Herbst i Flintoff 2012.). Istraživači koji su pokušali da modeliraju rad mašine taložnice upotrebom DEM i CFD modela istovremeno (Xia i sar. 2007., Asakura i sar. 2007.), rješavali su tečnu fazu koristeći Navier-Stokes-ove i jednačine kontinuiteta, kretanje zrna pojedinačno se promatralo rješavanjem po Drugom Njutnovom zakonu, dok je odnos tečne i čvrste faze tretiran Trećim Njutnovim zakonom. Ovakav pristup može pružiti detaljne informacije o putanjama zrna i tranzijentnim silama između zrna, kao i između zrna i fluida.

Nadalje, Xia i Peng (2007.) proučavali su koncept otežanog taloženja (hindered settling) u funkciji specifične težine i dimenzija zrna, te efekte sinusoidalnih pulsacija (tačnije njihove amplitude i frekvencije) na separaciju uglja i jalovine.

Većina studija koje koriste CFD i DEM zajedno za opisivanje procesa separisanja uglja i jalovine u mašinama taložnicama posmatraju vučnu silu gravitacije na svako zrno ponaosob, ali zanemaruju poroznost među zrnima. Većina istraživača koristila je sinusoidalne pulsacije osim Dong i sar. (2009.), koji je koristio pulsacije oblika naprijed nagnutih zubaca testere. Samo nešto više od 1000 sferičnih komada uglja korišteno je u istraživanju Viduka-e i sar. (2013.) koristeći CFD – DEM pristup modeliranju. Da bi se umanjili zahtjevi za procesorskom snagom, Navier-Stokes-ove jednačine rješavane su dvodimenzionalno, a debljina sloja nije prelazila zbir od pet prečnika zrna. Istraživano je pet različitih profila oscilacija: sinusoidalne, trokutaste, oblika unaprijed nagnutih zubaca testere, oblika unazad nagnutih zubaca testere, te trapezoidalni oblik. Ovako podešeni, svih pet profila pokazala su potencijal za separaciju zrna po gustini, sa razlikama u brzini taloženja, završetka taloženja i potrošene energije. Jasno je uočeno da ulazni kapacitet utiče na brzinu kretanja zrna kroz taložnicu. Ako se brzina vode u uzlaznoj putanji sporo povećava (što je slučaj kod sinusoidalnih profila), zrna se ne podižu ravnomjerno što dovodi do toga da se i cijeli tovar ne ponaša ravnomjerno. Istraživači zaključuju da je CFD-DEM sistem povoljan kao alat za modeliranje mašina taložnica za ugalj, a da bi daljnja istraživanja trebala biti usmjerena na slično istraživanje koje bi uključivalo promjenjive veličine amplitude i frekvencije oscilovanja.

Iako se IPG (InLine Pressure Jig) primarno ne koristi za pripremu uglja, Doing i sar. (2010.) smatraju da za to postoji veliki potencijal. Hibridnim kombinovanjem CFD i DEM pristupa, autori primjenjuju pulsacije oblika unaprijed nagnutih zubaca testere, da bi ispitali uticaj protoka fluida kao dominantnog parametra, ali i uticaj frekvencije i amplitude vibracija na separisanje uglja i jalovine. U istraživanje su kao promjenjive uvrštene i veličine kao što su dimenzije zrna i njegova specifična težina. Dobiveni numerički rezultati analizirani su u smislu uticaja sila na zrna, brzine fluida i zrna, kao i poroznosti sloja. Povećanjem frekvencije vibracija ili njihove amplitude u određenim granicama, u sistem se uvodi više energije te ubrzava taloženje. Takođe je dokazano da je ova vrsta taložnica, tačnije rezultati dobiveni njenom upotrebom (u našem slučaju oština odvajanja) veoma osjetljiva na promjenu bilo kog radnog parametra, a posebno na varijacije u kvalitetu ulazne sirovine.

5. MODELIRANJE MAŠINA TALOŽNICA PRIMJENOM FUZZY LOGIKE

Bazu za razvoj klasične logike dao je Aristotel još za vrijeme antičke Grčke. Prema ovoj, može se slobodno reći Zapadnoj logici, element može pripadati ili ne pripadati određenom skupu, dok su skupovi predstavljeni jasnim granicama, zbog čega su i obilježeni riječju *crisp* (engl. jasan, bistar). Drugim riječima, ovakva logika ne dozvoljava nepreciznost u iskazima.

Kod Fuzzy logike je drugačije stanje, tj. pripadnost elementa nekom skupu ne definiše se precizno, već se pripadnost skalarno definiše između vrijednosti 0 (ne pripada) i 1 (pripada), tako da istinitost bilo koje tvrdnje mjerimo procentima.

Fuzzy skup, a kasnije i Fuzzy logiku (Fuzzy - rasplinut, nejasan, neodređen) u matematiku i inženjerstvo uveo je profesor Lotfi Zadeh. Oblast matematičke nauke koja se bavi ovakvim sistemima nazvana je Teorija Fuzzy Skupova (Zimmerman 1994.).

Analizirajući kompleksne sisteme, Zadeh je zaključio:

Kako se kompleksnost sistema povećava, naša sposobnost da izvedemo precizne, a ipak značajne zaključke o njegovom ponašanju opada dok se ne dostigne prag iza kojeg preciznost i značaj (ili relevantnost) postaju gotovo međusobno isključive karakteristike... Teorija Fuzzy skupova je korak ka zbližavanju preciznosti klasične matematike i sveprisutne nepreciznosti stvarnog svijeta

Lotfi Zadeh, 1973

Njegov rad uopšteno gledano bazira se na odnosu između preciznosti i neizvjesnosti. Koristeći se standardnom logikom, zaključili bismo da što je više neizvjesnosti u izrazu, sve smo manje precizni u razumijevanju problema. Fuzzy logiku u užem smislu Zadeh posmatra kao logički sistem za proširenje klasične logike, dok je šire gledano vidi kao sinonim za teoriju Fuzzy skupova. Fuzzy logika, sa svojom intuitivnom prirodom i bliskošću sa prirodnim jezicima, nudi značajne prednosti u odnosu na konvencionalne pristupe u dizajnu, razvoju i implementaciji različitih sistema i aplikacija. Fuzzy logika omogućava da se situacije ili problemi opisuju i obrađuju u lingvističkim terminima kao što su „vruće“ ili „teško“ umjesto preciznih numeričkih vrijednosti kao što su „140 °C“ ili „180 kg“. Zbog brojnih prednosti takvog lingvističkog sistema, područja primjene Fuzzy logike proširila su se od potrošačke elektronike do industrijske kontrole, obrade informacija, finansijske analize i još mnogo toga (Tanaka 1993.). Ovakav pristup se prepoznaje kao vrijedan alat u izražavanju i rješavanju slučajeva u kojima postoji nesigurnost, neodređenost ili dvosmislenost i gdje mnogo toga zavisi od aproksimacija,

što je veoma čest slučaj u inženjerskoj i naučnoj praksi. Najvažnija primjena Fuzzy logike je u modeliranju i kontroli. Za nauku i tehniku Fuzzy logika je otvorila mnoge nove mogućnosti za istraživanje.

U mnogim slučajevima prilikom modeliranja ili kontrole nekog sistema nije potrebna velika preciznost u izražavanju određenih mjerenja ili drugih ulaznih podataka. Prilikom izrazito velikih sistema ponekad je velika preciznost čak i suvišna. Istu je moguće zamijeniti određenim generalizacijama, koje će pojednostaviti, olakšati i ubrzati proces, a ipak zadržati dovoljan nivo preciznosti. Dobra strana Fuzzy logike ogleda se u tome što ona dopušta približno shvatanje umjesto precizne definisanosti. U njoj se prilikom opisivanja i rješavanja problema koriste jednostavne, ljudskom razmišljanju bliske lingvističke formulacije podataka i stanja pojedinih dijelova ili elemenata procesa.

Doba Fuzzy kontrole započelo je 1974. godine kada je E.H. Mandani pokrenuo istraživanje mogućnosti primjene algoritama baziranih na Fuzzy logici za kontrolu malog postrojenja koristeći kontrolne zakone u formi AKO-TADA Fuzzy pravila, što je predstavljalo prvi Fuzzy kotroler (Dubois i sar. 1998.).

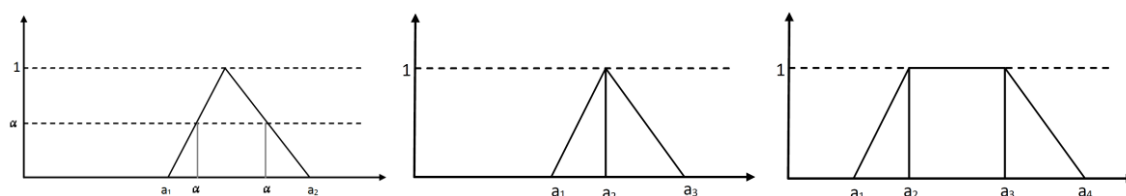
Nelinearni sistemi, vremenski varijantni sistemi, ekspertni sistemi i sistemi koji se teško modeliraju su primjeri u kojima Fuzzy logika ne samo da može smanjiti vrijeme razvoja, već može optimizovati efikasnost i performanse. Osim toga, Fuzzy logika se primjenjuje i u sistemima za automatsko upravljanje, u robotici, u raznim industrijskim uređajima, medicinskoj opremi, u vojnim sistemima, transportnim sistemima, telekomunikacijama, u sistemima za podršku odlučivanju, infrastrukturnim mrežama itd. Korištena je za unaprjeđenje rada raznih uređaja široke potrošnje (šporeta, frižidera, televizora, mašina za pranje rublja i posuđa) i u mnoge druge svrhe.

Primjena FL u rudarstvu započela je u sistemima za upravljanje flotacijskim postrojenjima, zatim postrojenjima za čišćenje uglja, za upravljanje ventilacijom i odvodnjavanjem rudnika, za upravljanje izvoznim postrojenjima, a u novije vrijeme u video nadzoru tehnoloških procesa koji koristi inteligentnu obradu video signala, u nadzornom i upravljačkom segmentu novije generacije „pametnih” rudarskih mašina, nakon toga u kvantitativnoj inženjerskoj analizi, modeliranju i simulaciji tehnoloških procesa. Ovo nije konačan popis, lista primjena se stalno širi (Miljanović 2011.).

Primjena ove teorije uvela je smisao relativnim kvantumima znanja te njihovoj važnosti i prioritetu kada je riječ o podacima vezanim za karakter stijenskih masa koje okružuju rudno tijelo, odabir načina iskopavanja, dizajnu rudničkih prostorija i sl.

Tolerancija prema nepreciznosti je u osnovi Mekog računarstva (engl. Soft Computing - SC) i Sistema baziranih na znanju (engl. Knowledge Based Systems), kojima između ostalih pripada i Fuzzy logika. Cilj ovakvog pristupa se ogleda u pojednostavljivanju, ubrzavanju i na kraju pojeftinjavanju rješavanja upravljačkih problema. Fuzzy logika koristi tehnike približnog rasuđivanja i pruža metode za oponašanje procesa razmišljanja na način kako to čine ljudi. Tačnije, Fuzzy logika se koristi za simulaciju ljudskog rasuđivanja uvođenjem nejasnoća i nepreciznog mjerenja u interpretaciju informacija.

Osnova Fuzzy logike leži u Teoriji Fuzzy skupova, a ključna komponenta pomenute teorije je pojam Fuzzy skupova. Fuzzy skupovi osnovni su elementi kojima se opisuje nepreciznost. Kod tradicionalnih skupova, element ili potpuno pripada skupu ili uopšte ne pripada skupu, dok kod Fuzzy skupova, element može djelomično pripadati skupu. Fuzzy broj je normalizovan i konveksan Fuzzy skup koji karakteriše *interval poverenja* $[a_1, a_2]$ i *stepen sigurnosti* α .

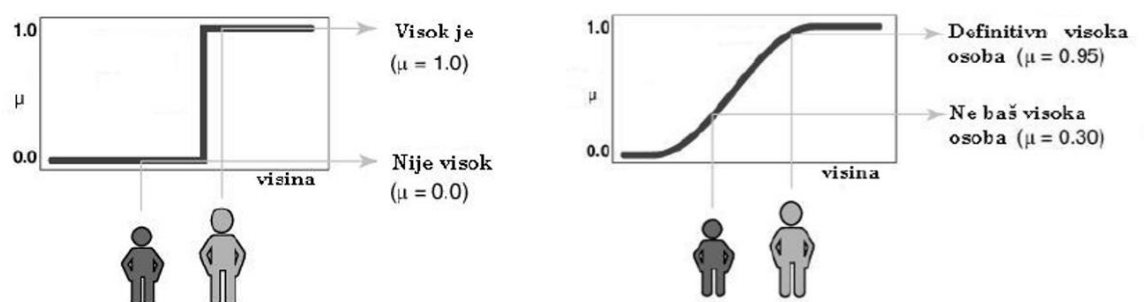


Slika 39. Fuzzy broj: Obični, trouglasti i trapezoidni

Nad Fuzzy brojevima definisane su i osnovne operacije: oduzimanje, sabiranje, dijeljenje i množenje. Da li neki elemenat x pripada skupu A u teoriji Fuzzy skupova opisuje se funkcijom pripadnosti $\mu_A(x)$ na sljedeći način

$$\mu_A = \begin{cases} 1, & \text{ako i samo ako } x \text{ pripada skupu } A \\ 0, & \text{ako i samo ako } x \text{ ne pripada skupu } A \end{cases}$$

Kod običnih skupova ako neki element pripada skupu kažemo da je stepen pripadnosti 1, a ako ne pripada kažemo da je stepen pripadnosti 0. Nasuprot tome, elementi u Fuzzy skupovima mogu djelimično pripadati skupu (npr. za stepen pripadnosti 0,7 znamo da element 70 % pripada datom skupu).



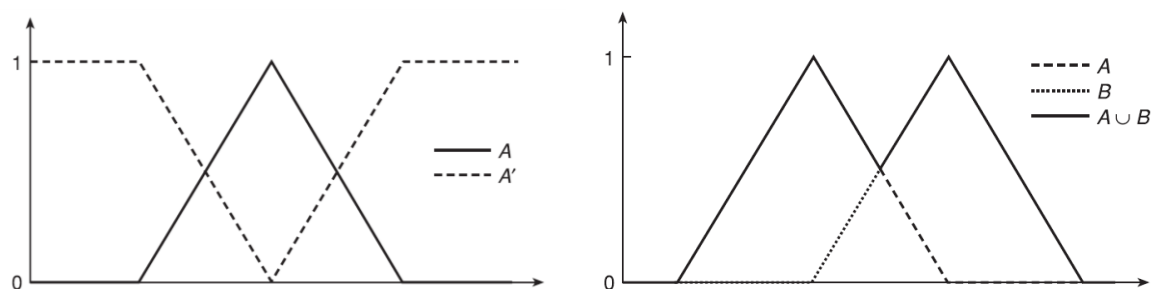
Slika 40. Stepen pripadnosti "Crisp" i "Fuzzy" skupovima

Stepen u kojem element pripada skupu naziva se stepen pripadnosti skupu. Fuzzy skup nema jasnih granica, tačnije to je onaj skup koji nema binarne karakteristike pripadnosti. Potrebno je imati na umu da postoji mnogo više informacija sadržanih u funkciji pripadanja Fuzzy skupu “visok” nego u funkciji pripadanja kod običnih skupova. Dvije identične izjave “x je visok (visoka osoba)” mogu nositi različite količine informacija (ili imati različit značaj) u zavisnosti od osnovne definicije skupa “visok”. Sa Fuzzy logikom, više informacija može biti pohranjeno u istoj lingvističkoj izjavi. Kada ljudi govore ili razmišljaju o konceptu „visoke osobe“, on ide daleko iznad apsolutne visine osobe. Ova sposobnost Fuzzy logike da uhvati i prenese “sive” nivoe istine je jedna od glavnih prednosti u odnosu na konvencionalnu logiku. Funkcija koja opisuje stepen (nivo) pripadnosti elementa nekom skupu naziva se funkcija pripadnosti (engl. membership function).

Tabela 14. Neke osobine Fuzzy skupova (Karray and De Silva 2004., Jovanović 2015.)

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	$A \cup X = X$ $A \cap X = X$ $A \cup \emptyset = A$ $A \cap \emptyset = \emptyset$

Baš kao što se tradicionalnim logičkim izjavama može manipulirati i kombinovati pomoću operatora "I", "ILI" i "NE", isto se može i sa Fuzzy logičkim tvrdnjama. Neki od Fuzzy operatora prikazani su na sljedećoj slici.

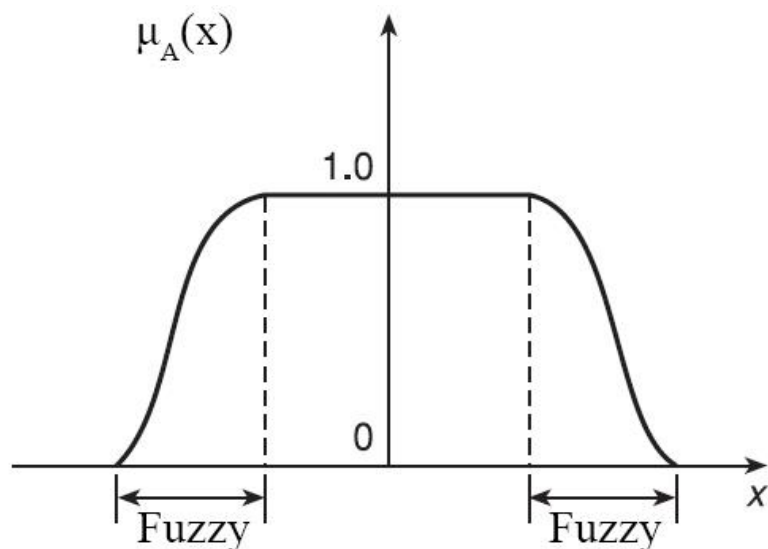


Slika 41. Izgled Fuzzy logičkih operatora "NE" i "ILI"

Kao što je naprijed navedeno, funkcija pripadnosti (*engl. Membership function*) daje stepen (ocjenu) vjerovatnoće pripadnosti elementa Fuzzy skupu A. Za obične skupove element X ili pripada nekom skupu, ili ne pripada. Ovo binarno pitanje članstva može se matematički predstaviti funkcijom indikatora

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

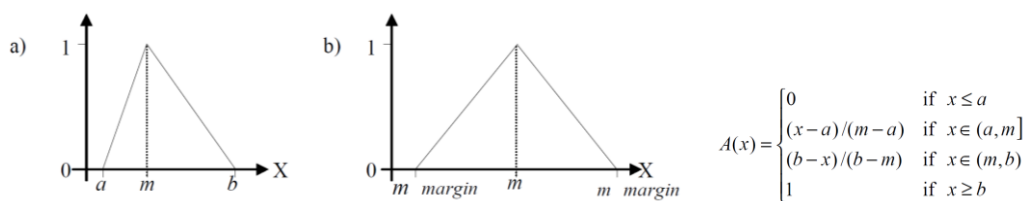
Funkcija pripadnosti elementima dodjeljuje numeričke vrijednosti iz intervala od 0 do 1.



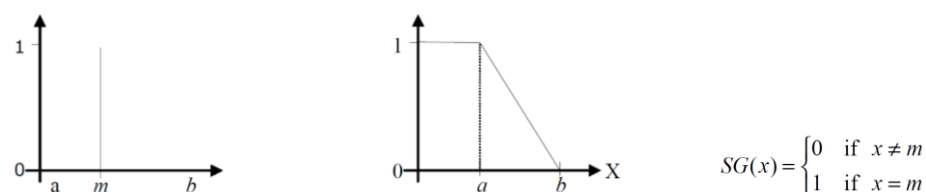
Slika 42. Funkcija pripadnosti Fuzzy skupu (Karray i Da Silva 2004.)

U zavisnosti od tipa funkcije pripadnosti, dobijaju se različiti tipovi Fuzzy skupova. Zadeh je predložio niz funkcija koje bi mogle biti klasificirane u dvije grupe: one sastavljene od ravnih linija koje su "linearne" i nasuprot tome Gausovi oblici, ili "zakrivljene" funkcije.

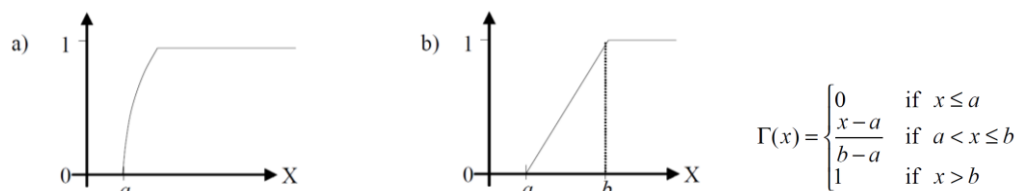
Trouglasti Fuzzy skup: a) opšti b) simetrični



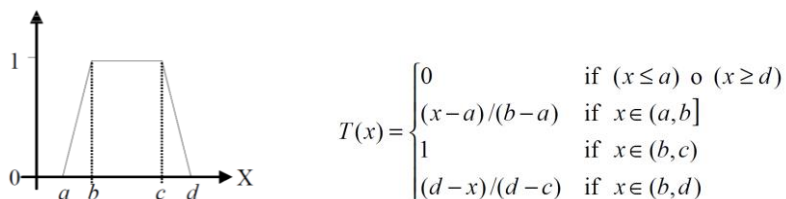
Singleton Fuzzy skup (lijevo) i L Fuzzy skup (desno)



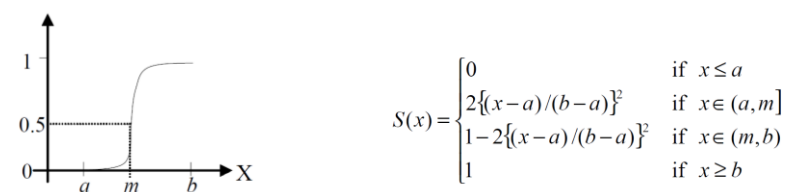
Gama Fuzzy skup: a) generalni i b) linearni



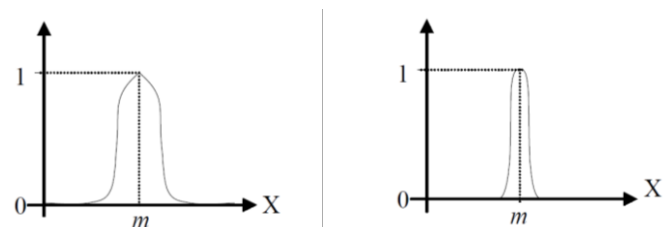
Trapezoidalni Fuzzy skup



S Fuzzy skup



Gausov (lijevo) i Pseudo-exponencijalni Fuzzy skup (desno)



$$G(x) = e^{-k(x-m)^2}$$

$$P(x) = \frac{1}{1+k(x-m)^2}$$

Slika 43. Tipovi Fuzzy skupova (Galindo 2005.)

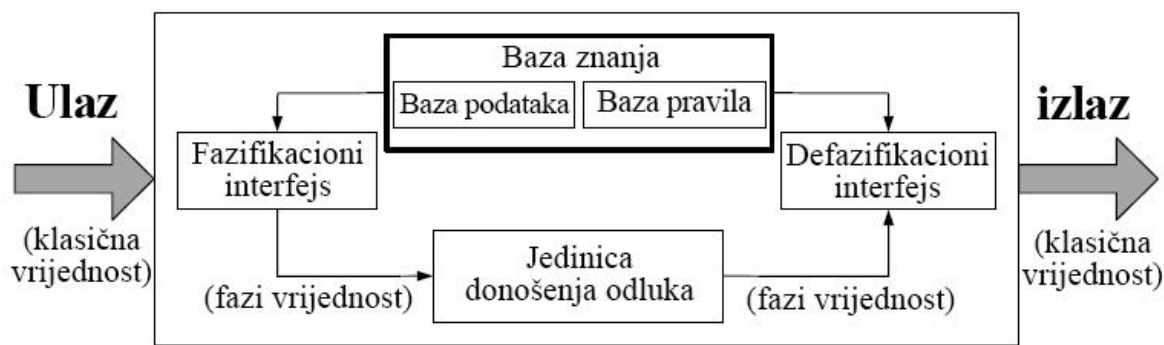
Fuzzy logika je način za generalizaciju klasičnih skupova. Koristeći Fuzzy skupove može se definisati koncept gdje granica između pripadanja i nepripadanja nekom skupu, odnosno posjedovanja i neposjedovanja nekog svojstva nije jasno (oštro) postavljena.

5. 1. Fuzzy zaključivanje

Fuzzy zaključivanje (eng. *Fuzzy inference* ili *Fuzzy reasoning*) predstavlja proces mapiranja ulaznih ka izlaznim signalima uz upotrebu Fuzzy logike. Zbog svoje multidisciplinarne prirode, Fuzzy sistemi zaključivanja u literaturi se nazivaju i: sistemi bazirani na Fuzzy pravilima, Fuzzy ekspertni sistemi, Fuzzy modeli, Fuzzy kontroleri, ili jednostavno Fuzzy sistemi. Mehanizmom Fuzzy zaključivanja modelira se proces približnog zaključivanja, kroz interpolaciju između Fuzzy pravila. Naravno, dobre interpolacije su takođe aproksimacije, i na taj način se izvodi približno zaključivanje. Donošenje zaključaka na osnovu nepreciznih informacija je jedna od osnovnih primjena Fuzzy logike.

Sistem Fuzzy zaključivanja se sastoji od (Bade 2013.):

- • lingvističke varijable,
- • Fuzzy pravila
- • i mehanizma Fuzzy zaključivanja.



Slika 44. Koncept Fuzzy zaključivanja (Sivanandam i sar. 2007, Jovanović 2015.)

Osnovno pravilo kod Fuzzy logičkog zaključivanja je kompozicijsko pravilo zaključivanja. Isto se bazira na *Modus Ponens* klasičnom pravilu zaključivanja na sljedeći način:

Premisa: ako je P onda je Q

Činjenica: P (ispunjen je uslov)

Zaključak: Q.

Tačnije, ako se ulaz sistema podudara sa ulazom Fuzzy pravila, i izlaz se mora podudarati sa izlazom pravila. Proces zaključivanja složena je kombinacija primjene svih elemenata Fuzzy

logičkih sistema: Fuzzy skupove, Fuzzy promjenjive, Fuzzy operatore, funkcije pripadnosti, baze Fuzzy pravila, baze podataka itd.

Iako literatura prepoznaje više Fuzzy sistema zaključivanja, najveću upotrebu među istraživačima i praktičarima imaju Mamdani i Sugeno sistemi. Pomenuta dva sistema se razlikuju u načinu determinisanja izlaza. Fuzzy Logic Toolbox, kao najčešće korišteni alat za simulaciju podržava samo dva pomenuta sistema.

Mamdanijev metod Fuzzy zaključivanja je najčešće korišten Fuzzy metoda zaključivanja. Bio je među prvim kontrolnim sistemima izgrađenim korištenjem teorije Fuzzy skupova. Predložio ga je 1975. Ebrahim Mamdani kao pokušaj kontrole kombinacije parnog motora i kotla sintetiziranjem skupa pravila lingvističke kontrole dobivenih od iskusnih operatora. Mamdani je svoj rad zasnovao na dokumentu Lotfi Zadeha iz 1973. o Fuzzy algoritmima za složene sisteme i procese odlučivanja. Cijeli proces zaključivanja po Mamdani sistemu sastoji se od pet koraka:

1. Fazifikacija ulaznih promjenjivih – ovim postupkom se ostvaruje pretvorba iz numeričkih u Fuzzy vrijednosti
2. Primjena I ili ILI Fuzzy operatora na unešene promjenjive
3. Primjena implikacije gdje je ulaz broj dobiven iz prethodnog koraka, a izlaz je Fuzzy skup
4. Agregacijom kombinujemo Fuzzy skupove - izlaze pravila u novi skup za svaku izlaznu promjenjivu
5. Defazifikacija je proces pretvorbe Fuzzy skupa koji dobijamo iz prethodnog koraka u klasičan broj. Postoji više metoda defazifikacije, a najčešće se upotrebljava centar gravitacije (ili izračunavanje centroida).

Prednosti Mamdani sistema:

- intuitivan je
- široko je prihvaćen od strane istraživača i praktičara
- dobro je prilagođen za primjenu lingvističkih varijabli.

Takagi-Sugeno-Kang, Takagi-Sugeno ili jednostavno Sugeno drugi je najčešće korišten tip Fuzzy modela zaključivanja. Razvijen je 1985. godine i sličan je Mamdani metodi po mnogo čemu. Prva dva dijela procesa Fuzzy zaključivanja, fazifikacija ulaznih promjenjivih i primjena Fuzzy operatora isti su kod oba modela. Prednosti Sugeno modela su:

- računski su efikasni
- kooperativnost sa PID kontrolerima (linearnom tehnikom)
- kooperativnost sa optimizacijom i adaptivnom tehnikom

- garantovan kontinuitet izlazne površi
- prilagođenost matematičkoj analizi.

Sistemi tipa Sugeno mogu se koristiti za modeliranje bilo kojeg sistema zaključivanja u kojem su izlazne funkcije pripadnosti bilo linearne ili konstantne.

Osnovnu razliku između Mamdani i Sugeno modela predstavlja činjenica da su Sugeno izlazne funkcije pripadnosti ili linearne ili konstantne. Pošto je Sugeno princip kompaktniji i računski efikasniji od Mamdani principa, isti se nameće kao praktičniji za korištenje.

Mamdani sistem se koristi za akumulaciju znanja. On omogućava opise znanja na način blizak našem (ljudskom) shvatanju stvari. Nasuprot tome, metoda zahtijeva široko kompjutersko proračunavanje.

Sugeno sistem je za razliku od Mamdani sistema izuzetno računarski efikasan. Pogodan je za rješavanje upravljačkih problema, posebno dinamičkih nelinearnih sistema. Sugeno sistem na izlazu koristi težinske proseke čime se izbjegava dugotrajan i opterećujući proces defazifikacije.

Fuzzy logički sistemi zaključivanja uspješno se primjenjuju u automatskoj kontroli, ekspertskim sistemima, klasifikaciji podataka, modeliranju, identifikaciji sistema, donošenju odluka, itd. Lingvističke promjenjive (varijable) su (za razliku od klasičnih brojčanih promjenjivih) riječi prirodnog jezika koje služe kao poveznica između numeričke vrijednosti podataka i našeg (ljudskog) poimanja i razumevanja.

Lingvističke varijable nam omogućavaju da tumačimo lingvističke izraze u terminima Fuzzy matematičkih veličina. To predstavlja jednu od osnovnih prednosti primjene Fuzzy logike.

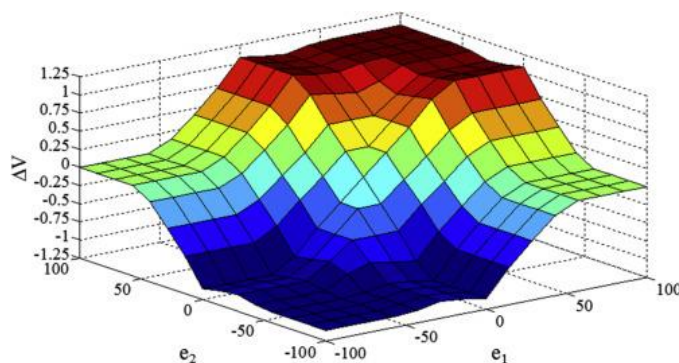
Lingvistička varijabla radi kao rječnik koji prevodi jezičke pojmove u Fuzzy skupove.

Govoreći o toploti vode, ustanovit ćemo opseg u kom se pretpostavlja da temperatura može oscilirati kao i šta smatramo „vrućom“ vodom. Preciznije, koje sve temperature voda može biti da bi je mi smatrali "vrućom".

Proces izračunavanja stepena članstva varijable u odnosu na funkcije članstva naziva se proces fuzzifikacije. Fuzzifikacijom preslikavamo numeričku (crisp) vrijednost ulaza u Fuzzy skup.

Fuzzy pravila (*engl. Fuzzy rules*) su skup pravila koja povezuju tipične ulazne i izlazne podatke ponekad na intuitivan način, ili na način vođen podacima. Sposobna su modelirati stručno mišljenje ili zdravorazumsko znanje često izraženo u lingvističkim terminima. Intuitivnu asocijaciju koja postoji između datih tipičnih ulaznih podataka i tipičnih izlaznih podataka teško je opisati na matematički ispravan način, zbog neizvjesne, često subjektivne prirode ovih informacija. Fuzzy pravila su alati koji su sposobni modelirati i koristiti takvu vrstu znanja.

Defazifikacija predstavlja postupak suprotan fazifikaciji, tokom kojeg se rezultat agregacije (najčešće presjek površi) pretvara u signal koji je razumljiv. Na izlazu kontrolera mora biti samo jedan signal, tj. da ima jedinstvenu vrijednost, koja se predstavlja realnim brojem. Najčešće korištene metode za defazifikaciju su centar gravitacije, centar najveće površi, centar suma, sredine maksimuma, prvog maksimuma, i visinska defazifikacija.



Slika 45. Defazifikacija procesa

Kada sve metode koje namjeravamo koristiti utvrdimo (metod fazifikacije, implikacije, operatora i defazifikacije) za svaku od kombinacija dvije ulazne varijable možemo na izlazu dobiti 3D površinu.

5. 2. Fuzzy logika u upravljanju i modeliranju

Značaj automatske kontrole procesa široko je poznat u industriji prerade minerala. Pošto se radi o vrlo značajnim potencijalnim uštedama, u proteklih 40 godina, industrija je nastojala da maksimizira kapacitete takvih sistema kontrole procesa. Uprkos ovom kontinuiranom naporu, uloženi napor i sredstva nisu uvijek rezultirali očekivanim radom postrojenja (Li i sar. 2011.). Modeliranje procesa pripreme mineralnih sirovina u koje spada i modeliranje rada mašina taložnica za ugalj izrazito je fenomenološkog karaktera. Fizički i hemijski procesi koji se tom prilikom odvijaju modeliraju se upotrebom empirijskih podataka o radu postrojenja. Shodno tome, takvi modeli se baziraju na matematičkim relacijama između velikog broja podataka i koeficijenata koji se koriste zbog realnog opisivanja procesa.

Fuzzy logiku u kontrolu industrijskih sistema je uveo E. Mamdani 1976. godine. Koristi se za izradu kompjuterskih modela direktno iz inženjerskih podataka dobijenih iz sistema za pripremu mineralnih sirovina. Na taj način razvijaju se Fuzzy modeli koji koriste lingvističke termine za opisivanje odnosa između varijabli. Takvi Fuzzy lingvistički modeli oslanjaju se isključivo na podatke prikupljene iz sistema koji se modeliraju; oni nužno ne pretpostavljaju razumijevanje rada sistema u potpunosti (Karr i Weck 1996.).

Fuzzy modeliranje se odvija prema principima Fuzzy zaključivanja, a takvi modeli u principu su iterativni. Modeliranje i kontrola dinamičkih sistema pripadaju oblastima u kojima su tehnike Fuzzy skupa dobile značajnu pažnju, ne samo od naučne zajednice nego i od industrije. Fuzzy modeliranje zajedno sa drugim srodnim tehnikama (kao što su neuronske mreže) prepoznate su kao moćni alati koji mogu olakšati efikasan razvoj modela. Jedan od razloga za to je sposobnost Fuzzy sistema da integrišu informacije iz različitih izvora, kao što su fizički zakoni, empirijski modeli, mjerenja i heuristike.

Dvije osnovne odlike industrijskih procesa, u koje spadaju i procesi pripreme mineralnih sirovina, jeste da su kontrolisani i vođeni, tj. stalno se nadgledaju parametri rada, te da li operater vrši radnje potrebne da bi proces tekao planiranim tokom. Isto podrazumijeva sljedeće radnje i aktivnosti:

- monitoring procesa
- mjerenje i prikupljanje podataka (radnih parametara)
- analiza prikupljenih podataka
- dijagnosticiranje
- upravljačko djelovanje na proces (Miljanović 2012.).

Sve nabrojano ukazuje na to da su praćenje i upravljanje procesom vrlo važne stavke u sigurnosti i rentabilnosti procesa, te je u novom vremenu, kada su ove dvije odrednice (zajedno sa komponentom zaštite okoline) ključne za održivost kompanije, istim potrebno posvetiti značajnu pažnju, koja uključuje i primjenu najnovijih naučno-tehnoloških dostignuća.

Slabe performanse ljudskih operatera u kontrolnoj sobi sada se vide kao jedan od važnih razloga zašto ovakvi sistemi kontrole procesa ne isporučuju svoj puni potencijal. Da bi se ljudski faktor (zbog svoje "nesavršenosti" i subjektivnosti) u najvećoj mjeri zaobišao, rade se kompleksni i robusni sistemi upravljanja.

5. 2. 1. Fuzzy modeliranje

U inženjeringu upravljanja, modeliranje i identifikacija važni su koraci u dizajnu sistema za kontrolu i nadzor. Moderne metode prerade mineralnih sirovina, u kombinaciji sa rastućim zahtjevima koji se odnose na kvalitet proizvoda, fleksibilnost u proizvodnji i sigurnost, povećali su zahtjeve u pogledu performansi kontrolnih sistema. Proizvodnju često karakterišu česte promjene u kvalitetu ulazne rude, protoku proizvoda, proizvodnom asortimanu, radnim tačkama i radnim uslovima. Da bi se zadovoljili strogi zahtjevi kvalitete, kontrolni sistemi moraju garantovati visoke performanse u širokom rasponu radnih uslova. U ovim uslovima, modeliranje procesa često postaje glavno usko grlo za primjenu naprednih tehnika zasnovanih

na modelima u pripremi mineralnih sirovina. Mnogi sistemi nisu pogodni za konvencionalne pristupe modeliranja zbog nedostatka preciznog, formalnog znanja o sistemu, snažnog nelinearnog ponašanja, visokog stepena nesigurnosti itd.

Model predstavlja formalan opis sistema, izražen matematičkim simbolima, operacijama i relacijama, a modeliranje je proces kojim osobine sistema predstavljamo u obliku koji će omogućiti matematičku formalizaciju. Obično se koriste za proučavanje i unaprjeđivanje nekog sistema, procesa ili fenomena. Modele generalno dijelimo na:

- teoretske (fenomenološke) i
- eksperimentalne modele.

Teoretski modeli su zasnovani na opšteprihvaćenim prirodnim zakonima, a ulazne veličine i uticajni parametri su poznati i unaprijed definisani. Zbog toga što su ovo idealizirani modeli, a realnost unosi mnoge aproksimacije i nelinearnost, primjena ovakvih modela bez dodatnih prilagodbi je rijetka.

Eksperimentalni (empirijski) modeli nasuprot tome proces formalno opisuju poznatim parametrima i rezultatima mjerenja na sistemu koji je instaliran i u upotrebi. Isti imaju malo uporište u teoriji, te su zbog toga najčešće primjenjivi na uskom području.

U zavisnosti od operatora koji se pri modeliranju koriste, prepoznaju se dva tipa modela:

- matematički (koriste se standardne algebarske operacije) te
- logički modeli (koriste se logički operatori).

Razvijanje matematičkih modela realnih sistema je centralna tema u mnogim disciplinama inženjerstva i nauke. Modeli se mogu koristiti za simulacije, analizu ponašanja sistema, bolje razumijevanje osnovnih mehanizama u sistemu, projektovanje novih procesa i za sisteme kontrole. Razvoj matematičkog modela koji adekvatno predstavlja stvarnost je važan zadatak. Ako model nije dovoljno precizan, naredni koraci (analiza, predviđanje, sinteze kontrolera itd.) ne mogu biti uspješni. Međutim, postoji očigledna potreba za kompromisom između potrebne tačnosti modela i njegove složenosti. Modeli treba da pružaju informacije na najrelevantnijem nivou preciznosti (apstrakcija), suzbijajući nepotrebne detalje, kada je to prikladno. Ako je model suviše jednostavan, on ne može pravilno predstaviti proučene karakteristike sistema i ne služi svojoj svrsi. Međutim, model ne bi trebao biti ni previše složen da bi bio praktično iskoristiv. Uopšteno, modeli bazirani na Fuzzy logici bi trebao da zadovolje sljedeće minimalne zahtjeve:

- da varijable budu vremenski zavisne
- ulazne i izlazne podatke mora biti moguće opisati Fuzzy skupovima

- svako postrojenje je u određenoj mjeri nelinearno, tj. ulazi i izlazi imaju određeni nivo korelacije.

Zbog svega navedenog mogu postojati izvjesni nivoi greške na izlazu iz modela. Polazna ideja primjene Fuzzy logike u kontrolisanju procesa svodi se na definiranje kontrolnog algoritma na osnovu Fuzzy logičkih pravila. Fuzzy logika pruža mogućnost da se u algoritmima kontrole primijeni ljudsko znanje. Jedan od glavnih razloga za primjenu Fuzzy logike u kontrolisanju industrijskih procesa je to što se *algoritam kontrole baziran na znanju* opisuje metodama Fuzzy logike. Fuzzy modeli se mogu posmatrati kao logički modeli koji koriste pravila "ako-onda" za uspostavljanje kvalitativnih odnosa među varijablama u modelu. Fuzzy skupovi služe kao poveznica između kvalitativnih varijabli uključenih u pravila i numeričkih podataka na ulazima i izlazima modela. Priroda Fuzzy modela zasnovana je na pravilima i dozvoljava upotrebu informacija izraženih u formi izjava prirodnog jezika i samim tim čini modele transparentnim za interpretaciju i analizu. Na računskom nivou, Fuzzy modeli mogu se smatrati fleksibilnim matematičkim strukturama, sličnim neuronskim mrežama, koje mogu približiti veliku klasu složenih nelinearnih sistema do željenog stepena tačnosti (Babuška 1998.)

Sistemi se mogu predstaviti matematičkim modelima različitih oblika, kao što su algebarske u diferencijalne jednačine. Okvir modeliranja koji posmatramo temelji se na modelima zasnovanim na Fuzzy pravilima, koji opisuju odnose između varijabli pomoću ako-onda pravila. Ova pravila uspostavljaju logičke odnose između varijabli sistema povezivanjem kvalitativnih vrijednosti jedne s kvalitativnim vrijednostima druge varijable.

Da bi model imao upotrebnu vrijednost, poremećajni faktori (nelinearnosti) koji se dešavaju na ulazu, a koji su rezultat stohastičke (neuređene, slučajne) prirode sistema u pripremi mineralnih sirovina, moraju biti dio procesa modeliranja, tj. moraju imati uticaj na izlazne parametre modela. Jedno od rješenja ovako kompleksnog problema nudi primjena elemenata Fuzzy logike, mekog računarstva i sistema zasnovanih na znanju.

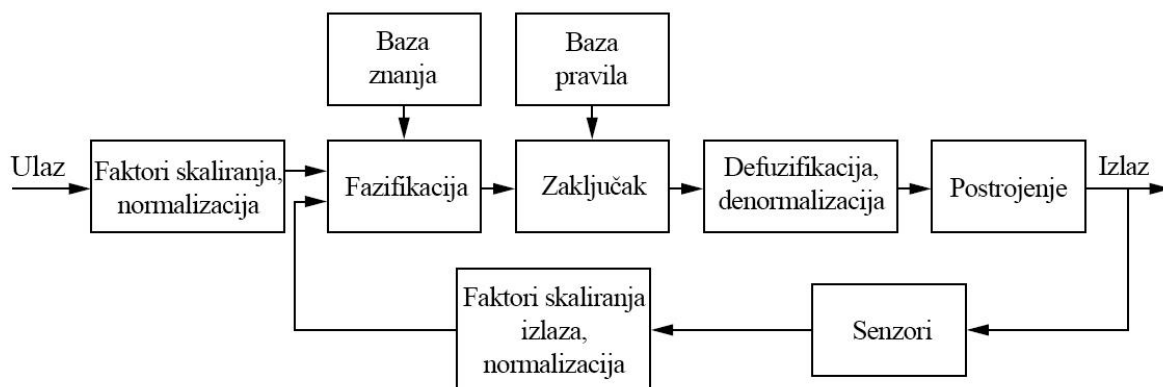
5. 2. 2. Fuzzy kontroleri

Fuzzy upravljanje pripada klasi "inteligentnog upravljanja", "upravljanja zasnovanog na znanju," ili "ekspertnog (stručnog) upravljanja." Fuzzy upravljanje u određivanju kontrolnih akcija koristi tehnike donošenja odluka zasnovane na Fuzzy logici.

U mnogim slučajevima kontrole industrijskog procesa, a naročito u pripremi mineralnih sirovina zbog izrazite nelinearnosti procesa, stepen automatizacije je prilično nizak. Postoji niz osnovnih, konvencionalnih upravljačkih petlji, ali je potreban ljudski operater tokom početne ili završne faze, za parametrisiranje regulatora, ili za prebacivanje između različitih upravljačkih

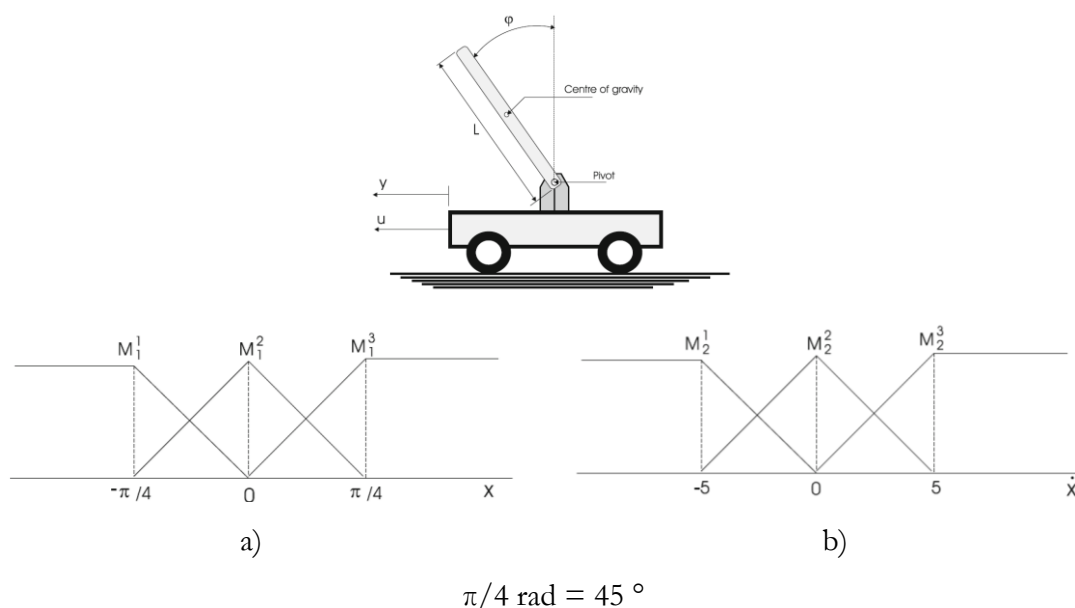
modula. Znanje ovog operatora se obično zasniva na iskustvu i ne može se izraziti diferencijalnim jednačinama niti standardnom upravljačkom logikom. Često je riječ o tipu "ako je situacija takva i takva, treba uraditi sljedeće". U ovom slučaju, Fuzzy kontrola nudi metod za predstavljanje i implementaciju znanja stručnjaka (Diankov i sar. 1996.).

Proces donošenja odluka u rudarskom inženjerstvu rijetko se može podvrgnuti rigoroznoj analizi, jer nema dovoljno podataka i nesavršenog znanja o mnogim faktorima. Odluke su najčešće zasnovane na iskustvu operatera.



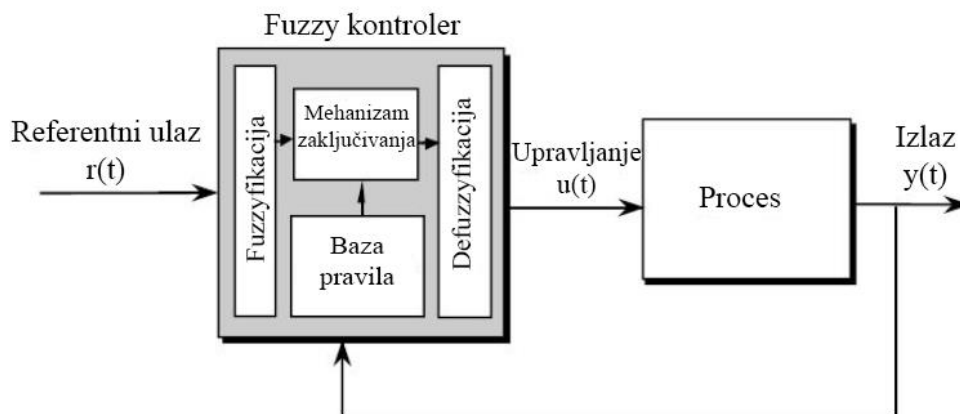
Slika 46. Blok dijagram Fuzzy logičkog upravljačkog sistema (Ross 2004.)

Jedan od prvih uspješnih primjera razvoja Fuzzy logičkog kontrolera je primjena istog na sistemu obrnutog klatna (Inverted pendulum). Radi se o standardnom upravljačkom problemu koji je upotrebom Fuzzy kontrolera uspješno riješen.



Slika 47. Funkcije pripadnosti ugla (a) i ugaone brzine (b) za obrnuto klatno (Matiai sar. 2014.)

Fuzzy kontroleri dizajnirani su posebno za nelinearne dinamičke sisteme sa mnogo ulaza i izlaza koji su tako složeni, da je vrlo teško ili čak nemoguće izgraditi tačan matematički model.



Slika 48. Blok šema Fuzzy kontrolera

Upravljački sistemi sa Fuzzy logičkim kontrolerom kao bazom, zasnivaju se na konceptu Fuzzy logike i Fuzzy sistema zaključivanja. Trend upotrebe ovih kontrolera u upravljanju industrijskim procesima je u stalnom porastu, posebno kada govorimo o složenim procesima. Fuzzy upravljanje je postalo popularno jer je ponudilo alternativu pretežno matematičkim metodama koje su se do tada koristile. Njegova popularnost je zasnovana na jednostavnosti dizajniranja pravila kontrole (direktno iz priručnika za operatera), 'razumljive' prirode rezultirajućih strategija kontrole od strane operatera postrojenja i drugih praktičara, nedostatka zavisnosti od preciznih modela procesa, i svojstvenu nelinearnu prirodu Fuzzy upravljanja.

Još od ranih 1970-ih, istraživači su prepoznali da skup pravila, koji se mogu predstaviti kao paradigma ekspertskog sistema i koriste Fuzzy aritmetičke / logičke pojmove, mogu prilično dobro emulirati klasične kontrolne sheme kao PID (*proporcionalno-integralni-derivativni*) algoritmi. Za realizaciju Fuzzy kontrolera potrebno je mnogo vremenskih i intelektualnih resursa.

Strategije zasnovane na Fuzzy kontrolerima koje utjelovljuju približno rasuđivanje ljudskih stručnjaka pronašle su brojnu primjenu u različitim područjima kao što su transportni sistemi, potrošačka elektronika, kućni aparati, industrijski procesi, finansijski sistemi itd. Fuzzy upravljanje je praktična alternativa za različite izazovne upravljačke primjene, budući da pruža pouzdan metod za konstrukciju nelinearnih kontrolera korištenjem heurističkih informacija. Takve informacije mogu doći od operatera koji je upravljao sistemom. U metodologiji projektovanja Fuzzy logičkih kontrolera, tražimo od ovog operatera da napiše niz pravila o tome kako kontrolisati proces, a zatim ta pravila uključimo u kontroler koji emulira proces

donošenja odluka čovjeka. U povoljnijem slučaju, heurističke informacije mogu doći od kontrolnog inženjera koji je izvršio opsežno matematičko modeliranje, analizu i razvoj algoritama upravljanja za određeni proces.

Iskustvo je pokazalo da zbog raznih razloga (najčešće je to neznanje tj. nedovoljna informisanost) projekt menadžeri izbjegavaju primjenu ovakvih kontrolera zato što u svom opisu sadrže pojmove kao što su "neizvjesnost". S jedne strane to je i razumljivo, dok s druge strane mnoga istraživanja pokazuju da Fuzzy pristup izradi kontrolera rješava probleme "neizvjesnosti". Kovačić i Bogdan (2005.) smatraju da je potrebno razvijati takve tehnike razvoja dizajna Fuzzy kontrolera koje su dovoljno jednostavne, lake za implementaciju, te iznad svega efektivne i iskoristive.

5. 2. 3. Primjena vještačke inteligencije i mekog računarstva

Da bismo razumjeli kako možemo simulirati proces ljudskog razmišljanja, potrebno je ispitati neke komponente naše sposobnosti razmišljanja. Djelomična lista može sadržavati sljedeće stavke (Meech 1995.):

- obrada simbola
- rješavanje problema korištenjem različitih tehnika
- matematička obrada
- empirijska regresijska analiza
- heurističko modeliranje
- objašnjavanje i opravdanje
- učenje i prilagođavanje
- praktikovanje introspekcije i pronalaska
- kreativnost
- generaliziranje i sumiranje
- korištenje višestrukih senzora (vid, sluh, miris, okus, dodir)
- generisanje višestrukog izlaza (govor, pisanje, crtanje, ručni signali, itd.).

Sposobnost ljudskih bića da pronađu rješenja za određene problematične situacije naziva se ljudska inteligencija. Ona se zasniva na sposobnosti simboličkog (egzaktnog i apstraktnog) izražavanja misli i interpretacije senzornih podražaja u obliku pokreta, govora, pisanja ili slika. Poznato je da ljudi imaju sposobnost da istovremeno obrađuju veliku količinu informacija i donose efektivne odluke, iako ni ulazne informacije ni posljedične radnje nisu precizno definisane. Nivo znanja i stečeno iskustvo ima veliki uticaj na stvarni uspjeh ljudskih akcija. Ljudsko razmišljanje i mehanizmi odlučivanja predstavljaju savršen model, koji naučnici i

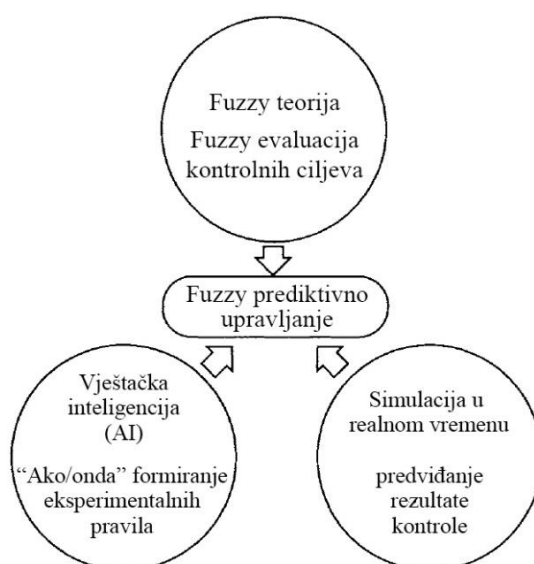
inženjeri pokušavaju da imitiraju i transformišu u praktična rješenja različitih tehničkih i netehničkih problema. Rezultat takvog razvoja su brojne procedure nazvane Metode vještačke inteligencije. Vještačka inteligencija (Artificial Intelligence - AI) napreduje s ciljem kompjuterizacije funkcije razmišljanja ljudskih bića.

Od ranih 1960-ih, vještačka inteligencija našla je svoj put u industrijskim primjenama - uglavnom u području stručnog donošenja odluka zasnovanih na znanju, te za dizajniranje i praćenje industrijskih proizvoda ili procesa. Izumom Fuzzy čipova 1980-ih, Fuzzy logika je dobila veliki poticaj u industriji, posebno u Japanu, gdje je ista zadobila neviđenu pažnju kako u akademskim krugovima tako i u industriji.

Pojam Meko računarstvo (Soft Computing - SC) se odnosi na upotrebu teorija Fuzzy logike, neuronskih mreža i evolutivnog računanja za rješavanje problema iz stvarnog svijeta koji se ne mogu na zadovoljavajući način riješiti korištenjem konvencionalnih i računarskih tehnika.

Meko računarstvo se razlikuje od konvencionalnog (tvrdog) računarstva po tome što je, za razliku od tvrdog računarstva, tolerantno na nepreciznost, neizvjesnost i djelomičnu istinu. U stvari, uzor za meko računarstvo je ljudski um. Vodeći princip mekog računarstva je: iskoristiti toleranciju za nepreciznost, neizvjesnost i djelomičnu istinu kako bi se postigla podnošljivost, robusnost i niska cijena rješenja (Zadeh 1976.).

Sa teorijske tačke gledišta, Fuzzy logika ima dodirne tačke sa svim važnijim aspektima teorije sistema: modeliranjem, identifikacijom, analizom, stabilnosti, sintezom, filtriranjem i procjenom (Zilouchian i Jamsidi 2001.).

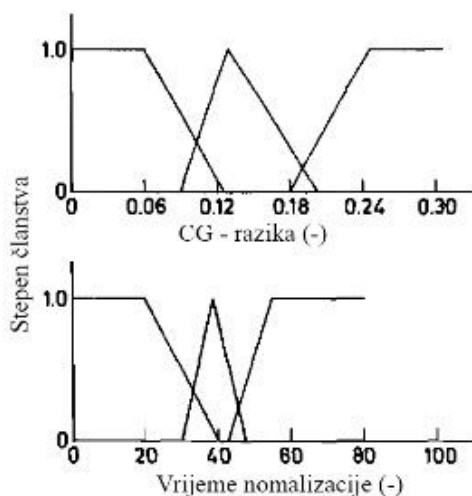


Slika 49. Elementi sistema prediktivne Fuzzy kontrole (Terano i sar. 2014.)

Meko računarstvo generalno gledajući predstavlja skup metodologija zasnovanih na računarskoj inteligenciji koje se koriste da se efikasno bave sistemima koje karakterišu složene strukture i koje su možda podvrgnute nekompletnom znanju i loše definisanoj dinamici. Metodologije i alati mekog računarstva mogu pomoći u dizajniranju, razvoju inteligentnih sistema koji posjeduju osobine prilagodbe, učenja i autonomnog rada. Od budućih generacija industrijskih mašina, postrojenja i sistema za podršku odlučivanju se očekuje da u proizvodnji proizvoda ili pružanju usluga rade bez prestanka, uz minimalnu ljudsku intervenciju. Biće neophodno da ovi sistemi održavaju konzistentnost i da se nose sa smetnjama i neočekivanim varijacijama u sistemu i njegovom radnom okruženju.

5. 3. FUZZY MODELIRANJE TALOŽNICA

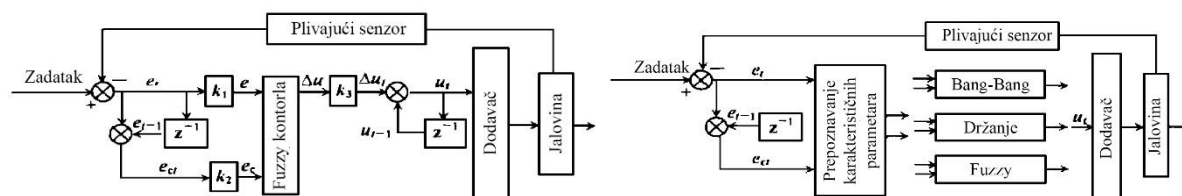
Mishra i Chakroborty (1995.) razvili su Fuzzy model za upravljanje frekvencijom i amplitudom pulsacija u svrhu optimiziranja procesa stratifikacije u mašini taložnici. Kao osnovu koristili su DEM model kojim su uspješno simulirali ponašanje 100 lakih i teških zrna, tj. njihovo taloženje. Pomenuti model tretirao je svako zrno zasebno, računajući sudaranje među njima kao i sudaranje sa zidovima radnog odjeljenja taložnice. Uticaj fluida na kretanje zrna računat je pojednostavljeno. Za vrijednosti Reynoldsovog broja $Re < 10^5$ koeficijent vučenja zrna računat je Abrahamovom jednačinom, dok je za veće vrijednosti uzeta konstanta 0,44. Predloženi Fuzzy kontroler mjeri nivo separisanja kroz parametar *Centar gravitacije* (misli se na centar gravitacije za proizvod i jalovinu) i predlaže adekvatne akcije. Pošto se zrna kreću, pomenuti parametar sam nije u mogućnosti da pravilno opiše nivo separisanja. Kao lingvističke varijable za *Centar gravitacije* i *Vrijeme* uzete su *Malo*, *Srednje* i *Veliko*.



Slika 50. Definisanje Fuzzy skupova za parametre *Centar gravitacije* i *Vrijeme* (Mishra i Chakroborty 1995.)

Kontrolišući frekvenciju i amplitudu pulsacija, kontroler je pokazao veliki potencijal u ubrzavanju taloženja zrna, te smanjenju energije potrebne za proces (i do 10%). Daljnji razvoj planiran je u eksperimentisanju sa većom količinom zrna različitih veličina.

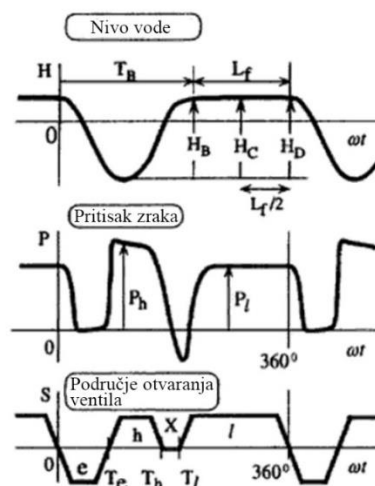
Pokušaj unaprjeđenja rada kroz regulisanje dinamike dopreme uglja u mašinu taložnicu upotrebom Fuzzy kontrolera izveli su Du i Lin (2002.). Iskustvo rada sa taložnicom pokazalo je da poroznost (popunjenost) radnog dijela mašine taložnice direktno vezana sa njenom efikasnošću, što je opet direktno vezano za brzinu ulaza rovnog uglja u taložnicu. Pošto se standardne tehnike upravljanja nisu pokazale odgovarajućim, autori su primijenili sistem Fuzzy kontrole. Kao polazni za ostvarivanje kontrole uzet je parametar *Visina jalovine*, koji dobijamo sa plovka - senzora koji tone kroz ugalj, a zaustavlja se na jalovini. Pošto se i senzor podiže i spušta u ritmu vodenih pulsacija, za vrijednost visine jalovine uzima se najniža vrijednost visine. Kada je visina jalovine visoka, dovoz rovnog uglja u taložnicu treba smanjiti i obratno.



Slika 51. Fuzzy kontrola ulaza uglja u mašinu taložnicu na osnovu visine sloja jalovine (Du i Lin 2002.)

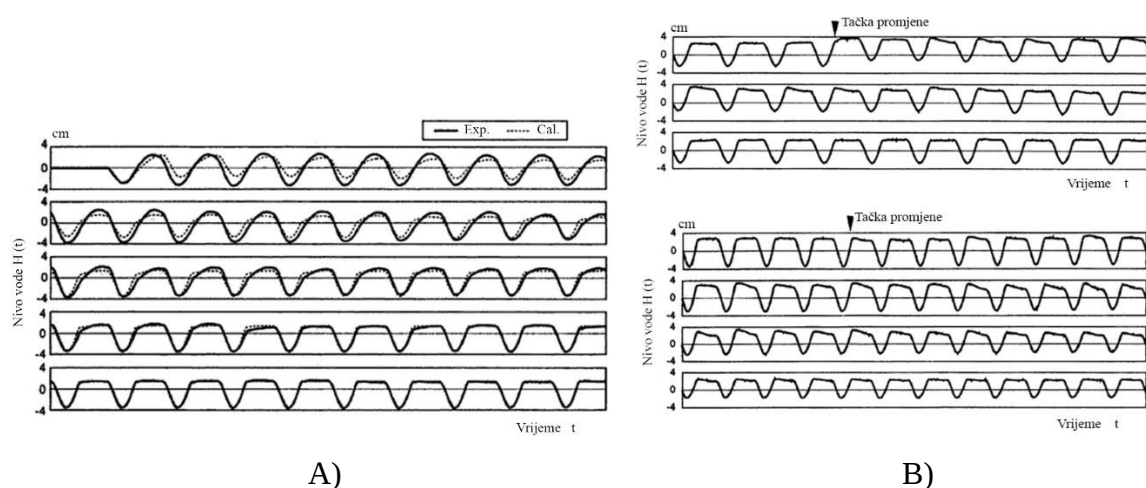
Na osnovu veličine greške koja se pojavljuje u očitavanju visine jalovine na senzoru, sistem mijenja način rezonovanja između tri moguća modela rada: Bang-bang (Uključeno/Isključeno), Stalno uključeno i Fuzzy brzina ulaza rude u mašinu taložnicu. U tu svrhu razvijeno je sedam nivoa lingvističkih varijabli za parametar *Veličina greške nivoa jalovine*, od najveće do najmanje. Autori tvrde da ovakav kontroler može održavati zadovoljavajući nivo poroznosti u radnom dijelu mašine taložnice, a samim tim i obezbijediti efikasan rad iste, te da ovakav kontroler predstavlja osnovu za inteligentno upravljanje mašinom taložnicom.

Sawata i sar. (1995.) su razvili Fuzzy kontrolni sistem za automatsko kreiranje i održavanje trapezoidnog oblika pulsacija vode (ovakav oblik pulsacija se pokazao kao najoptimalniji za pripremu uglja), što je donijelo značajna poboljšanja u brzini i ošttrini odvajanja. Na pilot TACUB taložnicu spojen je ventil kojim upravlja računar koji se ponaša kao Fuzzy kontroler. Trapezoidni oblik pulsacije se stvara na način da se velikom brzinom zrak upumpa i podigne zrna i vodu. Jedan vremenski period zrak ostaje u tom stanju, nakon čega se ispušta preko izlaznog ventila. Ventilima se upravlja pneumatski.



Slika 52. Odnos između nivoa vode, pritiska zraka i položaja ventila i primijenjena Fuzzy pravila (Sawata i sar. 1995.)

Mjerenje nivoa vode se obavlja senzorski, a grešku u mjerenju dobijamo kada od izmjerene vrijednosti oduzmemo referentnu vrijednost.



Slika 53. Uspostavljanje trapezoidalnog oblika pulsacija nakon pokretanja sistema iz (A) i ponovno uspostavljanje istog nakon poremećaja (B) (Sawata i sar.,1995.)

Predloženi sistem (osim trapezoidnih) može kreirati (i održavati) i drugačije oblike pulsacija, koje bolje odgovaraju ugljevinama sa određenim osobinama. Optimalne pulsacije se dobijaju pažljivim proučavanjem upotrijebljenih pulsacija i rezultata - brzine i oštine odvajanja.

6. FUZZY MODEL POSTROJENJA ZA ČIŠĆENJE UGLJA U MAŠINAMA TALOŽNICAMA

Disertacija doprinosi razvoju modernih sistema upravljanja procesima u rudarstvu, konkretno upravljanju procesima separacije uglja i jalovinskih materijala na bazi razlike u fizičkim svojstvima uglja u postupku gravitacijske koncentracije uglja. U tu svrhu, na osnovu podataka i (što je još važnije) praktičnih iskustava menadžmenta i uposlenika u separaciji RMU "Banovići" izrađen je model postrojenja za pripremu uglja upotrebom mašina taložnica.

Razvoj simulacionog modela, obuhvatio je pet koraka:

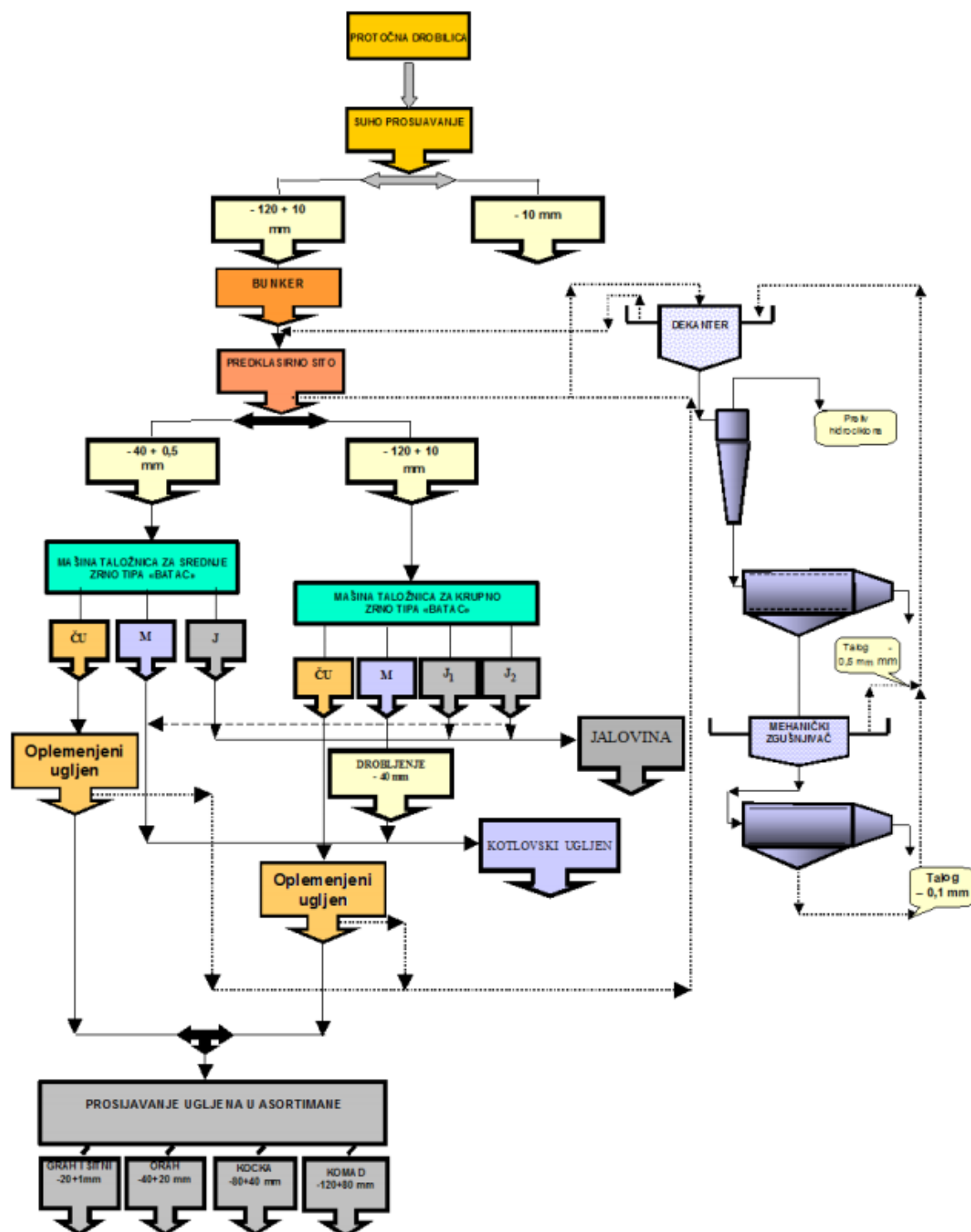
- definisanje koncepcije modela
- identifikacija obilježja procesa
- fazifikaciju tehnoloških i tehničkih parametara procesa
- razvoj blok-dijagrama simulacionog modela
- pokretanje i testiranje modela.

6. 1. ANALIZA TEHNOLOŠKOG PROCESA NA POSTROJENJU ZA SEPARACIJU UGLJA U BANOVIĆIMA

Eksploatacija mrkog uglja banovičkog bazena počela je prije II svjetskog rata na nekoliko manjih rudnika u privatnom vlasništvu. Intenzivan razvoj rudnika počinje poslije II svjetskog rata, izgradnjom pruge Brčko - Banovići. Tada je izgrađena i suha separacija - klasirница. Ubrzo počinje buran razvoj površinske eksploatacije i masovno otkopavanje uglja sa većim primjesama jalovine u rovnom uglju, pa ovakav kapacitet separacije nije mogao da zadovolji sve veće zahtjeve tržišta u pogledu kvaliteta uglja i kapaciteta. Zbog toga se već 1957. godine prelazi na oplemenjivanje uglja postupkom gravitacijske koncentracije u teškotekućinskim separatorima tipa "TROMP" za krupne i srednje klase uglja.

Godine 1982. izvršena je rekonstrukcija separacije, u sklopu čega je ugrađena mašina taložnica za srednje zrno $-40 +0,5$ tipa "Batac", kapaciteta 350 t/h i postrojenje za prečišćavanje tehnološke vode. Priprema rovnog uglja sa sistemom za suho odsijavanje uglja -10 mm puštena je u rad 1986. godine, što je znatno rasteretilo tehnološki proces od najsitnijih čestica koje se pojavljuju u sistemu tehnoloških voda. Naredne godine u rad je puštena mašina taložnica za krupne klase. U tehnološki proces oplemenjivanja uglja dolazi količina rovnog uglja i do 1000 t/h. Kada radi sistem za odsijavanje, u podrešetni proizvod ide oko 20 % uglja granulacije -10 mm, dok nadrešetni proizvod u količini od oko 80 % frakcije $+10$ mm ide u proces oplemenjivanja. Ova tehnologija omogućila je smanjenje gubitaka u procesu, posebno kroz

talog, smanjen je broj mašina čime se povećala pouzdanost rada postrojenja kao cjeline, pojednostavljeno je održavanje smanjenjem habanja i izbacivanjem magnetita. Tehnologija je ekološki čistija jer nema ispuštanja viška tehnološke vode u recipijente.



Slika 54. Tehnološka šema oplemenjivanja mrkog uglja gravitacionim postupkom na separaciji RMU Banovići sa sistemom za prečišćavanje tehnoloških voda (Petrović 2008.)

Kod granulometrijskog sastava rovnog uglja dolazi do značajnih oscilacija, ovisno od toga da li je ugalj iz jamske ili površinske eksploatacije. Takođe postoje odstupanja i u ovisnosti od momentalnih uslova i lokacije proizvodnih objekata. Parametri kvaliteta rovnog uglja dati su u sljedećoj tabeli.

Tabela 15. Pregled okvirnih vrijednosti parametara kvaliteta rovnog uglja

ANALIZA ROVNOG UGLJA	
Isparive materije (%)	30
Sumpor ukupni (%)	1,4
Sumpor vezani (%)	1,0
Sumpor gorivi (%)	0,4
Karbon C %	39,0
Sumpor gorivi S, (%)	0,9
Kiseonik + Azot; O ₂ + N ₂ , (%)	14,0
ANALIZA PEPELA	
SiO ₂ (%)	36,0
Fe ₂ O ₃ (%)	9,0
Al ₂ O ₃ (%)	11,0
TiO ₂ (%)	0,8
CaO (%)	29,0
MgO (%)	2,5
K ₂ O + Na ₂ O (%)	0,7
SO ₃ (%)	11,0
Tačka sinterovanja (°K)	1226 do 1706
Tačka omekšavanja (°K)	1436 do 1766
Tačka polulopte (°K)	1499 do 2003
Tačka razlivanja (°K)	1536 do 2076

U Separaciji RMU "Banovići" dvije mašine taložnice (za srednje i krupno zrno) sa pratećom instalisanom opremom i uređajima, čine bazu postrojenja za gravitacijsku koncentraciju, odnosno oplemenjivanje rovnog uglja.

Tabela 16. Pregled kapaciteta separacije na rovni ugalj

	Maksimalni (t/h)	Nominalni (t/h)	Radni (t/h)
Suho odsijavanje	1000	800	740
Mašine taložnice	880	750	600
Ukupno Separacija	1000	800	740

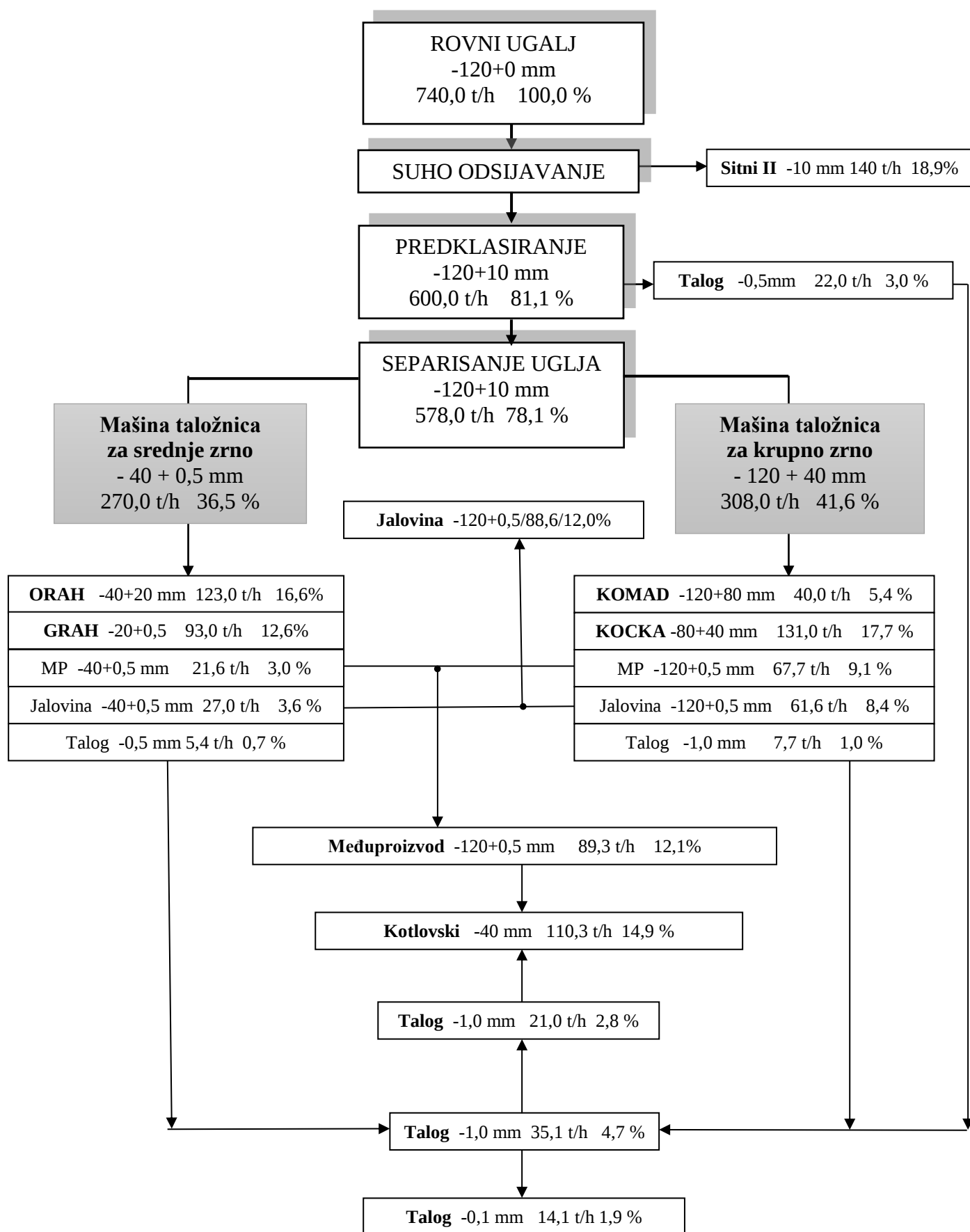
Tehničke karakteristike i radni parametri mašina taložnica su veoma promjenjive veličine.

Tabela 17. Pregled tehničkih karakteristika i radnih parametara mašina taložnica

Parametar	Mašina taložnica za srednje zrno	Mašina taložnica za krupno zrno	Z B I R N O
Dimenzije mašine (m)	7,59 x 4	7,59 x 4,5	-
Veličina zrna (mm)	-40 +0,5	-120 + 40	-120 +0,5
Kapacitet (t/h)	350 - 400	400 - 480	750 - 850
Frekvencija pulsacija	55 / min	55 / min	-
Debljina sloja uglja	13 cm	13 cm	-
Potrošnja vode u mašini taložnici	1200 m ³ / h	1200 m ³ / h	-
Količina komprimiranog zraka (m ³ /min)	12	12	24
Pritisak komprimiranog zraka (bar)	5 - 7	5 - 7	5 - 7
Količina radnog zraka (m ³ /min)	140	164	304
Pritisak radnog zraka (bar)	0,6	0,6	0,6
Specifično opterećenje (t/h/m ²)	14,6	14,8 - 17,8	29,4 - 32,4
Površina (m ²)	24	27	51
Zapremina korpe elevatora (l)	30	30	-
Količina radne vode (m ³ /h)	1300	1620	2920
Pritisak radne vode (bar)	0,8 - 1	0,8 - 1	0,8 - 1

Ulazni radni kapacitet u Separaciju kod učešća suho odsijanog uglja od 18,9 %, prema tome iznosi 740 t/h. Za ovu vrstu postrojenja radni kapacitet iznosi 80 % od nominalnog kapaciteta, što znači da radni kapacitet mašina taložnica iznosi 600 t/h rovnog uglja. Materijalni bilans rovnog uglja, jalovine i separisanog uglja (asortimana) dat je u nastavku.

Slika 55. Materijalni bilans separacije RMU "Banovići"



6. 2. KVANTITATIVNI I KVALITATIVNI PARAMETRI RADA POSTROJENJA

Proizvodnja uglja u RMU "Banovići" vrši se na dva površinska kopa ("Grivice" i "Turija") i u jamskoj eksploataciji (jama "Omazići").

Tabela 18. Proizvodnja rovnog uglja na RMU "Banovići" po pogonima u 2018. godini

MJESEC 2018. g.	ROVNI UGALJ				JALOVINA	ROVNI minus JALOVINA
	PK GRIVICE	PK TURIJA	PODZE- MNA	UKUPNO		
I	10.140	89.940	58.920	159.000	17.040	141.960
II	2.080	98.678	55.860	156.618	16.395	140.223
III	4.180	113.429	38.400	156.009	16.475	139.534
IV	0	113.020	34.880	147.900	16.415	131.485
V	16.360	123.380	26.980	166.720	18.680	148.040
VI	21.420	87.540	34.800	143.760	19.880	123.880
VII	71.240	54.500	27.780	153.520	18.290	135.230
VIII	70.980	65.700	60	136.740	12.880	123.860
IX	81.120	33.500	37.040	151.660	14.410	137.250
X	99.440	33.240	48.220	180.900	14.945	165.955
XI	92.520	29.080	49.412	171.012	13.625	157.387
XII	112.520	300	32.240	145.060	16.270	128.790
UKUPNO	582.000	842.307	444.592	1.868.899	195.305	1.673.594

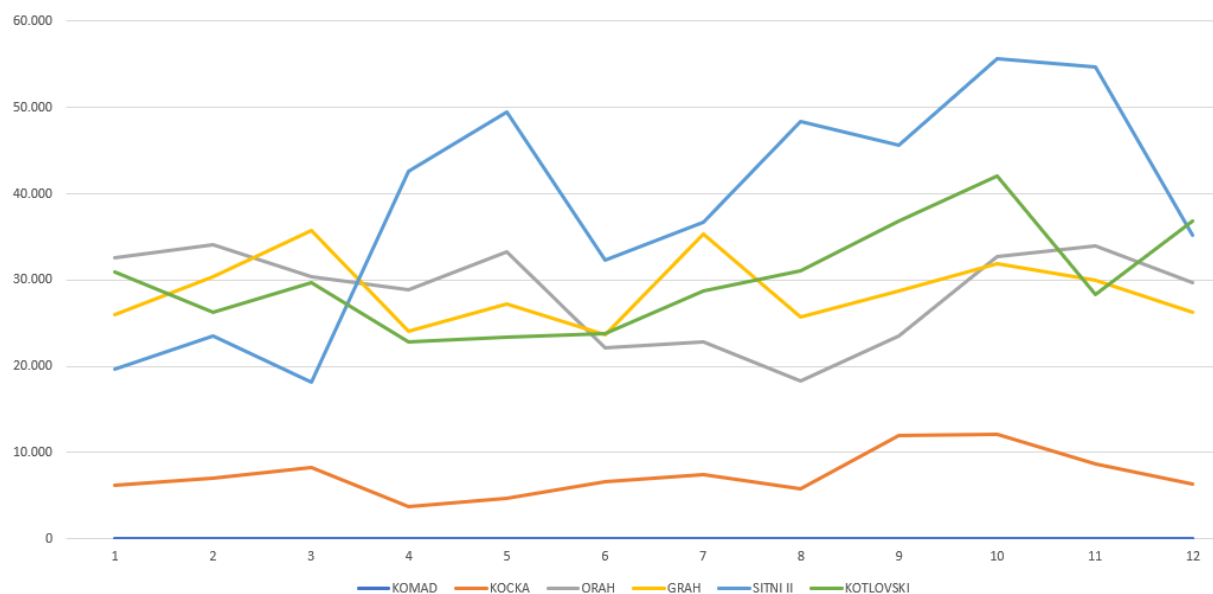
Razlika u podacima koja se pojavljuje kada se od ukupnog izvaganog rovnog uglja oduzme jalovina (oko 4 %) odnosi se na greške u vaganju, gubitke pri manipulaciji ugljem, smanjenje vlage usljed sušenja i slično.

Tabela 19. Parametri kvaliteta rovnog uglja (ulaz u model) po mjesecima 2018. godine

Mjesec 2018. g	Wuk	Pepeo	Sag. mat.	DTV
I	19,05	24,93	52,16	14,03
II	16,74	23,91	59,35	16,54
III	22,02	31,80	46,18	10,68
IV	21,89	35,63	42,48	10,49
V	12,77	24,37	62,86	18,62
VI	19,90	31,12	48,98	11,95
VII	15,58	30,29	54,13	14,37
VIII	16,67	28,04	55,29	15,25
IX	14,17	24,26	61,57	17,96
X	15,72	24,06	60,22	16,40
XI	12,40	30,46	57,14	15,92
XII	17,99	25,65	56,36	15,70
Prosjeck	17,08	27,88	54,73	14,82

Kvalitet uglja oscilira u širokim granicama. Prosječna vrijednost parametara kvaliteta rovnog uglja je sačinjena na osnovu uzoraka na ulazu u separaciju, što se uzima kao mjerodavan

podatak za dalja razmatranja u procesu oplemenivanja. Nakon prolaska kroz postrojenje za pripremu, dobija se ugalj različitih granulacija tj. asortimana. Sljedeći grafikon prikazuje mjesečnu proizvodnju pojedinih asortimana uglja koji izlaze iz separacije RMU "Banovići".



Slika 56. Dijagram proizvodnje pojedinih asortimana uglja po mjesecima 2018. godine (t)

Prikupljeni su parametri kvaliteta uglja za pojedinačne asortimane koji izlaze iz postrojenja separacije. Da bi se dobila ukupna vrijednost parametara kvaliteta separisanog uglja (zbir svih asortimana) za pojedini mjesec (vrijednost koju poredimo sa izlaznim parametrima iz modela), potrebno je izračunati tačan procentualni udio svakog pojedinog asortimana u ukupnoj proizvodnji separisanog uglja za dati mjesec, što je predstavljeno u sljedećoj tabeli.

Tabela 20. Procentualni udio pojedinih asortimana u separisanom uglju po mjesecima 2018. godine

MJESEC	KOMAD	KOCKA	ORAH	GRAH	SITNI II	KOTLOVSKI
I	0,02 %	5,33 %	28,24 %	22,52 %	17,07 %	26,81 %
II	0,02 %	5,77 %	28,08 %	25,04 %	19,42 %	21,68 %
III	0,02 %	6,71 %	24,85 %	29,21 %	14,90 %	24,32 %
IV	0,02 %	3,03 %	23,65 %	19,70 %	34,87 %	18,73 %
V	0,01 %	3,35 %	24,07 %	19,76 %	35,84 %	16,97 %
VI	0,02 %	6,07 %	20,38 %	21,80 %	29,79 %	21,95 %
VII	0,02 %	5,64 %	17,44 %	26,93 %	28,05 %	21,93 %
VIII	0,02 %	4,52 %	14,12 %	19,86 %	37,42 %	24,07 %
IX	0,01 %	8,13 %	16,05 %	19,56 %	31,12 %	25,13 %
X	0,01 %	6,96 %	18,77 %	18,30 %	31,90 %	24,06 %
XI	0,01 %	5,55 %	21,81 %	19,25 %	35,16 %	18,22 %
XII	0,01 %	4,75 %	22,07 %	19,53 %	26,21 %	27,42 %
2018.	0,02%	5,48%	21,63 %	21,79 %	28,48 %	22,61 %

Nasuprot procentualnom, količinski udio asortimana (desna strana tabele 22) dobija se množenjem izmjerene vrijednosti datog parametra kvaliteta u asortimanu (lijeva strana tabele) sa procentualnim udjelom tog asortimana u separisanom uglju (srednji dio tabele – podatak preuzet iz tabele 21.).

Tabela 21. Vrijednosti parametara kvaliteta separisanog uglja po asortimanima (izmjerene vrijednosti, procentualni i količinski udjeli)

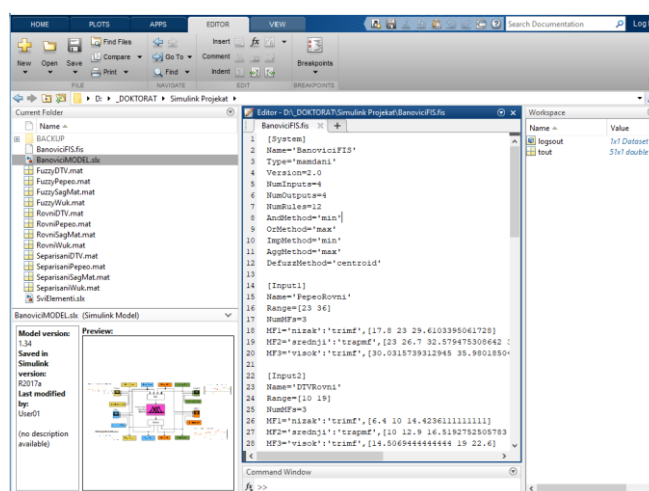
MJE- SEC	ASORTI- MAN	Parametri separisanog uglja (izmjerena vrijednost)				Procentualni udio asortimana u separisanom (iz tabele 21.)	Količinski udio parametra kvaliteta asortimana separisanog uglja			
		W _{uk.}	Pepeo	Sag. mat.	DTV		W _{uk.}	Pepeo	Sag. mat.	DTV
I	GRAH	26,39	18,73	54,88	15,02	22,52%	5,9435	4,2183	12,3599	3,3834
II	GRAH	22,16	14,99	62,85	18,08	25,04%	5,5482	3,7530	15,7357	4,5272
III	GRAH	27,11	16,50	56,35	15,41	29,21%	7,9180	4,8192	16,4582	4,4993
IV	GRAH	28,09	14,99	56,92	15,68	19,70%	5,5328	2,9525	11,2113	3,0892
V	GRAH	19,57	15,51	64,92	18,85	19,76%	3,8679	3,0655	12,8311	3,7252
VI	GRAH	21,68	16,37	61,95	16,80	21,80%	4,7259	3,5684	13,5042	3,6622
VII	GRAH	17,52	20,30	62,18	19,09	26,93%	4,7179	5,4665	16,7442	5,1409
VIII	GRAH	25,40	14,57	60,03	17,28	19,86%	5,0449	2,8939	11,9232	3,4327
IX	GRAH	14,66	16,79	68,55	20,26	19,56%	2,8682	3,2849	13,4115	3,9634
X	GRAH	23,22	17,07	59,71	17,49	18,30%	4,2483	3,1231	10,9244	3,1992
XI	GRAH	24,22	17,05	58,73	16,65	19,25%	4,6614	3,2814	11,3032	3,2037
XII	GRAH	19,83	18,22	61,95	18,31	19,53%	3,8724	3,5580	12,0975	3,5759
I	KOCKA	22,24	16,18	61,58	18,03	5,33%	1,1862	0,8630	3,2846	0,9615
II	KOCKA	22,27	15,28	62,45	17,36	5,77%	1,2845	0,8813	3,6019	1,0013
III	KOCKA	13,71	13,49	72,80	21,45	6,71%	0,9199	0,9051	4,8844	1,4394
IV	KOCKA	21,91	12,34	65,75	18,25	3,03%	0,6645	0,3743	1,9942	0,5535
V	KOCKA	11,96	17,16	70,88	21,76	3,35%	0,4003	0,5744	2,3726	0,7284
VI	KOCKA	20,91	13,44	65,65	17,88	6,07%	1,2682	0,8152	3,9818	1,0842
VII	KOCKA	20,37	12,15	67,48	19,07	5,64%	1,1499	0,6859	3,8092	1,0763
VIII	KOCKA	13,36	25,44	61,20	17,60	4,52%	0,6034	1,1489	2,7639	0,7950
IX	KOCKA	12,28	21,38	66,34	19,53	8,13%	0,9985	1,7384	5,3941	1,5876
X	KOCKA	11,51	15,81	72,68	21,93	6,96%	0,8016	1,1010	5,0615	1,5272
XI	KOCKA	12,39	25,43	62,18	17,77	5,55%	0,6878	1,4117	3,4517	0,9864
XII	KOCKA	15,70	20,68	63,62	17,89	4,75%	0,7458	0,9824	3,0223	0,8501
I	KOMAD	23,10	19,64	57,26	15,59	0,02%	0,0040	0,0034	0,0099	0,0027
II	KOMAD	14,85	13,92	71,23	20,80	0,02%	0,0024	0,0023	0,0117	0,0034
III	KOMAD	18,15	12,99	68,86	20,10	0,02%	0,0030	0,0021	0,0113	0,0033
IV	KOMAD	22,46	16,67	60,87	16,20	0,02%	0,0037	0,0027	0,0100	0,0027
V	KOMAD	15,22	16,90	65,50	18,35	0,01%	0,0022	0,0024	0,0095	0,0027
VI	KOMAD	12,15	17,24	70,61	21,18	0,02%	0,0022	0,0032	0,0130	0,0039
VII	KOMAD	18,89	20,16	60,95	16,33	0,02%	0,0029	0,0031	0,0093	0,0025

VIII	KOMAD	14,51	20,18	65,31	19,16	0,02%	0,0022	0,0031	0,0101	0,0030
IX	KOMAD	13,09	22,65	64,26	18,65	0,01%	0,0018	0,0031	0,0088	0,0025
X	KOMAD	20,91	15,67	63,42	17,64	0,01%	0,0024	0,0018	0,0073	0,0020
XI	KOMAD	12,10	29,30	58,60	14,82	0,01%	0,0016	0,0038	0,0075	0,0019
XII	KOMAD	12,43	28,47	59,10	15,37	0,01%	0,0019	0,0042	0,0088	0,0023
I	KOTLOVSKI	33,04	24,76	42,20	10,76	26,81%	8,8583	6,6383	11,3141	2,8848
II	KOTLOVSKI	21,26	47,58	31,16	4,37	21,68%	4,6092	10,3155	6,7556	0,9468
III	KOTLOVSKI	29,06	24,70	46,24	11,72	24,32%	7,0662	6,0060	11,2436	2,8498
IV	KOTLOVSKI	28,07	28,56	43,37	11,32	18,73%	5,2574	5,3492	8,1230	2,1200
V	KOTLOVSKI	24,09	22,81	53,10	15,15	16,97%	4,0870	3,8698	9,0086	2,5696
VI	KOTLOVSKI	32,49	19,67	47,84	12,71	21,95%	7,1311	4,3173	10,5002	2,7894
VII	KOTLOVSKI	24,87	21,46	53,67	14,99	21,93%	5,4537	4,7060	11,7693	3,2876
VIII	KOTLOVSKI	24,31	24,54	51,15	14,29	24,07%	5,8507	5,9061	12,3103	3,4394
IX	KOTLOVSKI	22,99	17,72	59,29	17,03	25,13%	5,7764	4,4522	14,8969	4,2791
X	KOTLOVSKI	23,47	22,18	54,35	15,45	24,06%	5,6458	5,3354	13,0740	3,7173
XI	KOTLOVSKI	23,13	19,61	57,26	16,26	18,22%	4,2136	3,5723	10,4310	2,9623
XII	KOTLOVSKI	22,36	26,09	51,55	12,92	27,42%	6,1319	7,1548	14,1368	3,5423
I	ORAH	22,89	13,46	63,65	17,86	28,24%	6,4650	3,8016	17,9772	5,0435
II	ORAH	23,34	19,83	56,83	15,48	28,08%	6,5543	5,5686	15,9589	4,3459
III	ORAH	20,89	12,15	66,87	18,75	24,85%	5,1910	3,0192	16,6168	4,6598
IV	ORAH	21,51	15,80	62,63	17,42	23,65%	5,0872	3,7368	14,8123	4,1199
V	ORAH	12,81	18,78	68,41	20,41	24,07%	3,0836	4,5206	16,4673	4,9123
VI	ORAH	19,59	22,85	57,56	15,08	20,38%	3,9919	4,6562	11,7292	3,0733
VII	ORAH	20,45	11,10	68,45	19,29	17,44%	3,5657	1,9354	11,9350	3,3640
VIII	ORAH	14,97	17,15	67,88	19,90	14,12%	2,1138	2,4216	9,5849	2,8098
IX	ORAH	13,49	14,26	72,25	21,65	16,05%	2,1650	2,2886	11,5955	3,4749
X	ORAH	12,86	16,04	71,10	21,27	18,77%	2,4137	3,0106	13,3450	3,9915
XI	ORAH	14,81	21,54	63,65	18,20	21,81%	3,2303	4,6983	13,8833	3,9698
XII	ORAH	15,29	22,08	62,63	17,89	22,07%	3,3747	4,8733	13,8232	3,9485
I	SITNI II	16,37	21,83	61,80	18,06	17,07%	2,7948	3,7269	10,5508	3,0826
II	SITNI II	19,16	21,91	58,93	16,17	19,42%	3,7203	4,2542	11,4424	3,1387
III	SITNI II	12,53	26,85	60,62	17,92	14,90%	1,8672	4,0012	9,0337	2,6706
IV	SITNI II	18,45	28,46	57,86	15,68	34,87%	6,4342	9,9251	20,1781	5,4682
V	SITNI II	20,25	27,76	51,99	12,40	35,84%	7,2570	9,9483	18,6316	4,4430
VI	SITNI II	18,73	25,34	55,93	15,48	29,79%	5,5800	7,5493	16,6626	4,6112
VII	SITNI II	14,71	30,55	54,74	16,03	28,05%	4,1256	8,5681	15,3524	4,4969
VIII	SITNI II	16,57	26,35	61,57	18,32	37,42%	6,2003	9,8599	23,0388	6,8551
IX	SITNI II	14,08	20,98	64,94	19,28	31,12%	4,3812	6,5282	20,2069	5,9995
X	SITNI II	16,61	23,24	60,15	17,62	31,90%	5,2993	7,4145	19,1903	5,6212
XI	SITNI II	16,11	27,27	56,62	15,28	35,16%	5,6644	9,5884	19,9082	5,3740
XII	SITNI II	16,68	26,20	57,12	16,37	26,21%	4,3722	6,8676	14,9723	4,2909

Ukupna vrijednost svakog parametra kvaliteta uglja (za dati mjesec) jednaka je zbiru kumulativnog učeća predmetnog parametra za sve asortimane za taj mjesec.

6. 3. RAZVOJ MODELSKE PROCEDURE

Računarsko modeliranje i simulacija predstavljaju pogodno sredstvo za dizajn i evaluaciju složenih sistema. Osnovna prednost empirijskih modela je da njihova primjena često zahtijeva manje troškove radne snage i vremena. Modeliranje se pomoću Fuzzy modela vrši na podacima prikupljenim iz procesnih sistema bez potrebe za prethodnim razumijevanjem fizike procesa. Model postrojenja izrađen je u programskom paketu MatLab verzija 2017a, koji je programski jezik visokog nivoa. Naziv mu je nastao od riječi MATrix LABoratory, jer kao osnovnu strukturu koristi matricu (niz).



Slika 57. Prikaz varijabli modela u radnom okruženju programa MatLab R2017a

MATLAB-a je nastao krajem 1970. godine na univerzitetima Novi Meksiko i Stanford. Program omogućava analiziranje i obradu podataka te njihovo grafičko predstavljanje, izradu algoritama, modela i aplikacija. Naročito je pogodan za vizualizaciju podataka, obradu signala te sistemske analize. Programski moduli Fuzzy Logic Toolbox i Simulink, kroz pristupe simboličkom računarstvu, vještačkoj inteligenciji i višim domenima simulacije, šire mogućnosti primjene MATLAB-a u akademskim, istraživačkim i industrijskim domenima. Izrađeni model se sastoji iz dva dijela:

- osnovu modela čini Fuzzy modeliranje podataka u modulu Fuzzy Logic Toolbox
- daljnje modeliranje vršeno je u modulu Simulink koji podržava grafičko predstavljanje modela.

Simulink model predstavlja matematički model problema prikazan u grafičkom, blok dijagramskom obliku. Promjenjive ulaza i izlaza posmatraju se kao signali, a blokovi su povezani strelicama koje označavaju tok simuliranog procesa, odnosno tok signala. Model predstavlja grafičku specifikaciju funkcionalnih komponenata koje se tokom simulacije mogu mijenjati. Analiza efikasnosti modela vršena je upotrebom specijaliziranog statističkog programskog paketa IBM SPSS i naprednih statističkih funkcija Microsoft Excela.

Promjenjivi kvalitet uglja na ulazu u postrojenje vrši ključni uticaj na efektivnost i efikasnost rada postrojenja za pripremu. Zadatak menadžmenta separacije je vrlo jednostavan: maksimizacija iskorištenja uz optimalne troškove. Većina procesa bazirana je na manualnoj regulaciji i kontroli parametara procesa, primjeni iskustvenog i ekspertskog znanja, analogije i sl. Iako na prvi pogled primitivan, ovakav način rada je izuzetno efikasan, jer su nadležnosti za funkcionisanje dijelova postrojenja podijeljene. Međutim, napredak tehnike donosi nove izazove koji se odnose na mogućnosti unaprjeđenja performansi i u konačnici ekonomskih pokazatelja vođeni Zakonom velikih brojeva, gdje niz malih ušteda kroz duži vremenski rok donosi ogromne uštede i povećanje konkurentnosti, te osiguranje dugoročne održivosti kompanije.

U tom smislu, pažljivim i redovnim praćenjem parametara procesa, moguće je utvrditi obrasce i razviti modele koji bi pratili rad postrojenja i signalizirali ukoliko se neki od parametara procesa udalji od optimalnih, što može dovesti do neželjenih posljedica u smislu odstupanja od učinka, utroška energije, materijalnih resursa, narušavanja operativne stabilnosti, povećanja troškova proizvodnje, umanjeње nivoa bezbjednosti na radusmanjenu bezbjednost rada i sl.

Optimizaciju metodologije vođenja procesa prerade uglja treba treba pronalaziti u savremenim naučnim i tehničkim metodama i pristupima. U postrojenjima za čišćenje uglja postoji tendencija uvođenja složenijih upravljačkih procedura. Potrebno je uvesti automatske upravljačke sisteme u mjeri u kojoj to sam proces dozvoljava, te u kojoj je to ekonomski opravdano. Dizajn upravljačkih sistema podrazumijeva temeljno razumijevanje cijelog tehnološkog procesa, njegova svojstva i interakcije između opreme u postrojenju.

6. 3. 1. Odabir parametara kvaliteta ulazne sirovine i izlaznog proizvoda

Pretpostavka uspješnog modeliranja procesa čišćenja uglja, podrazumijeva akviziciju i obradu velikog broja podataka. Ulazne promjenjive različito utiču na ponašanje sistema i odvijanje procesa. Prikupljanje podataka za empirijske modele moguće je vršiti online i offline metodama, tj. u realnom ili pak proširenom vremenu:

- offline podaci mogu biti smjenski ili dnevni, te podaci dobiveni posebnim uzorkovanjem
- kod online metoda prikupljanje podataka radi se isključivo instrumentacionom tehnikom, ali se analiziranje podataka može vršiti i offline.

Za kvalitetno modeliranje neophodno je sakupiti što je moguće više podataka o postrojenju i njegovom radu. U tom smislu, trebalo bi obuhvatiti sve stadije prerade uglja. Raspolaganje tako velikim brojem podataka omogućit će uspostavu zavisnosti između promjenjivih veličina koje utiču na proces pripreme uglja u mašinama taložnicama i odbace one veličine čije je dejstvo zanemarivo.

Tabela 22. Relevantni parametri ulazne sirovine (rovnog uglja) i izlaznih parametara modela (parametri čija se vrijednost predviđa), te fazifikovane lingvističke vrijednosti

	Oznaka parametra	Min	Max	Prosječna vrijednost	Fuzzy opseg	Lingvistička vrijednost
ULAZNE PROMJENJIVE (ROVNI UGLJ)	RovniWuk	12,40	22,91	17,66	7,91 10,07 14,19	Nizak
					13,97 17,14 21,43	Srednji
					20,00 25,79 30,10	Visok
	RovniPepeo	23,91	35,63	29,77	17,80 23,00 29,61	Nizak
					23,00 26,70 32,58 35,90	Srednji
					30,03 35,98 41,18	Visok
	RovniSagMat	42,68	62,86	52,77	33,60 42,00 51,38	Nizak
					42,18 56,28 58,08 62,78	Srednji
					51,85 63,00 68,65	Visok
	RovniDTV	10,49	18,62	14,56	6,40 10,00 14,42	Nizak
					10,00 12,90 16,52 18,90	Srednji
					14,50 19,00 22,60	Visok
IZLAZNE PROMJENJIVE (FUZZY MODELIRANE)	FuzzyWuk	16,00	24,06	20,03	10,39 13,82 16,39	Nizak
					14,77 18,27 21,93	Srednji
					20,66 25,02 26,36	Visok
	FuzzyPepeo	17,90	25,39	21,65	13,44 17,00 21,03	Nizak
					17,10 19,50 23,70 25,84	Srednji
					21,37 26,02 28,57	Visok
	FuzzySagMat	53,25	66,11	59,68	47,40 53,00 58,60	Nizak
					53,08 56,00 63,80 66,80	Srednji
					61,38 66,98 72,58	Visok
	FuzzyDTV	13,83	19,51	16,67	9,87 12,67 15,87	Nizak
					13,60 15,60 17,30 19,20	Srednji
					16,60 20,40 22,90	Visok

Tabela prikazuje fazifikaciju odabranih promjenjivih (Wuk – ukupna vlaga, pepeo, sagorive materije, DTV – donja toplotna vrijednost), minimalne, maksimalne i prosječne vrijednosti za

navedene parametre te Fuzzy opseg za lingvističke vrijednosti pomenutih promjenjivih (za ulazne i izlazne podatke iz modela).

Kao što je pojašnjeno u teorijskom i dijelu rada koji se bavi opisom procesa oplemenjivanja uglja u separaciji RMU "Banovići", na isti utiče mnoštvo faktora. Parametri koji su uzeti prilikom izrade modela su takvi da je njihova značajnost za proces velika, a dostupnost moguća. Osim parametara koji su uzeti kao osnova izrade modela, postojao je i dio parametara koji će se u daljem razmatranju smatrati konstantnim. U okviru fazifikacije određuju se funkcije pripadnosti za svaku ulaznu i izlaznu promjenjivu. Svakoj od funkcija pripadnosti dodijeljen je odgovarajući tip i opseg.

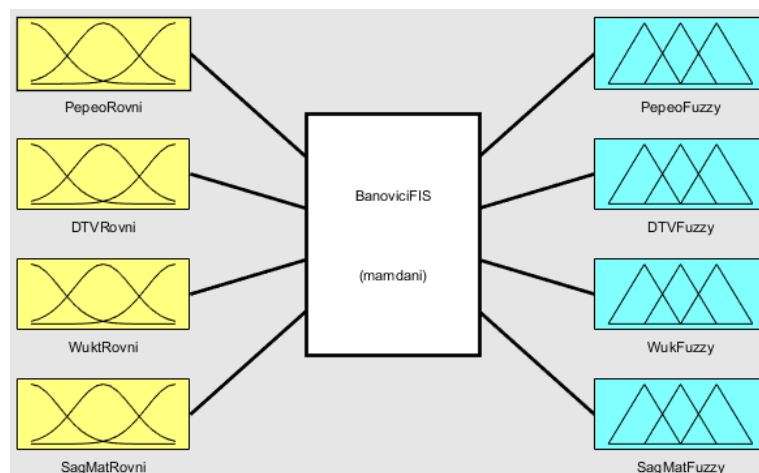
Tabela 23. Parametri separisanog uglja (kumulativno po mjesecima 2018. godine) upotrijebljeni za komparaciju sa izlaznim podacima iz modela

Mjesec 2018. g.	Wuk	Pepeo	Sag. mat.	DTV
I	25,25	19,25	55,50	15,36
II	21,72	24,78	53,51	13,96
III	22,97	18,75	58,25	16,12
IV	22,98	22,34	55,33	15,35
V	18,70	21,98	59,32	16,38
VI	22,7	20,91	56,39	15,22
VII	19,02	21,36	59,62	17,37
VIII	19,82	22,23	59,63	17,35
IX	16,19	19,30	65,51	19,31
X	18,41	19,99	61,60	18,06
XI	18,46	22,56	58,99	16,50
XII	18,5	23,44	58,06	16,21
Prosjek	20,39	21,41	58,48	16,43

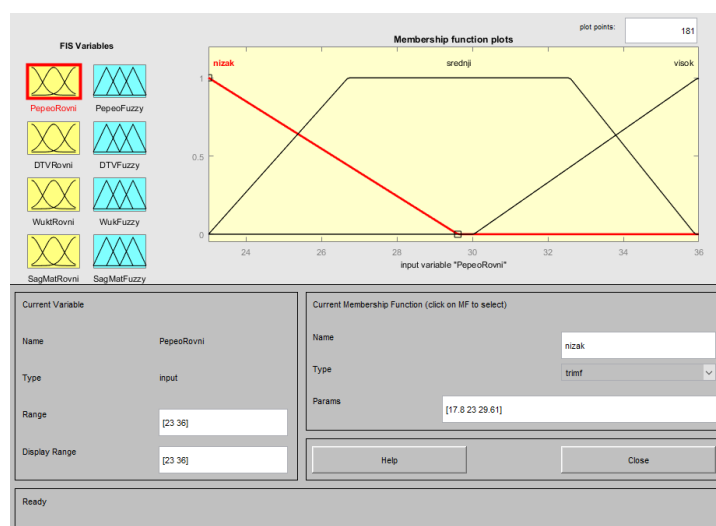
Klasirati parametre po značajnosti nije jednostavno pošto efekti čišćenja ne zavise samo od svojstava rovnog uglja, već i od vođenja tehnološkog procesa.

6. 3. 2. Definisanje funkcija pripadnosti i fuzzy pravila

U nastavku su prikazane sekvence modela u MATLAB-u koje se odnose na formiranje i prikaz Fuzzy pravila, i prikaz odnosa Fuzzy promjenjivih.



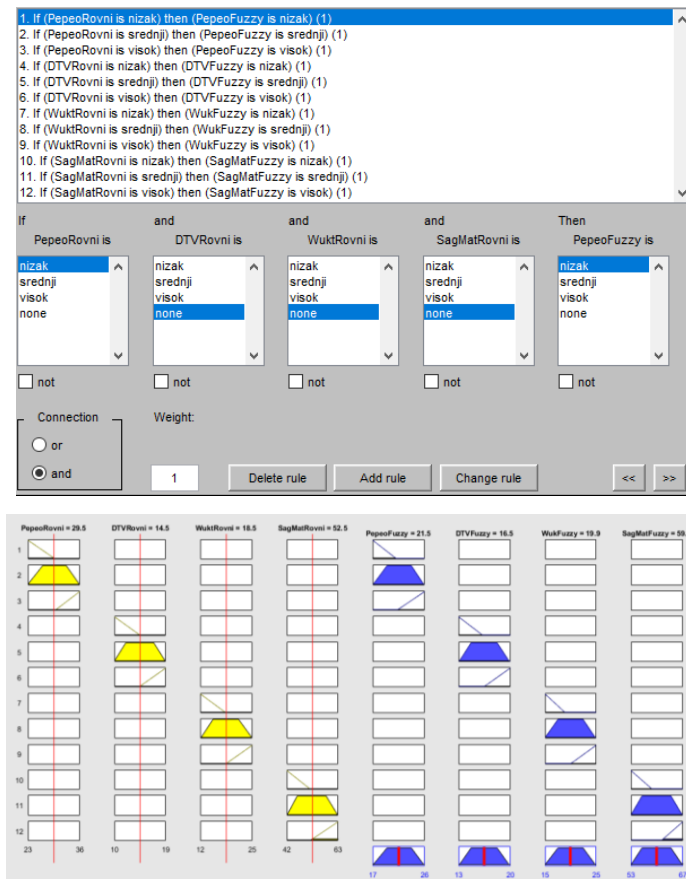
Slika 58. Definisanje ulaznih i izlaznih varijabli Fuzzy modela



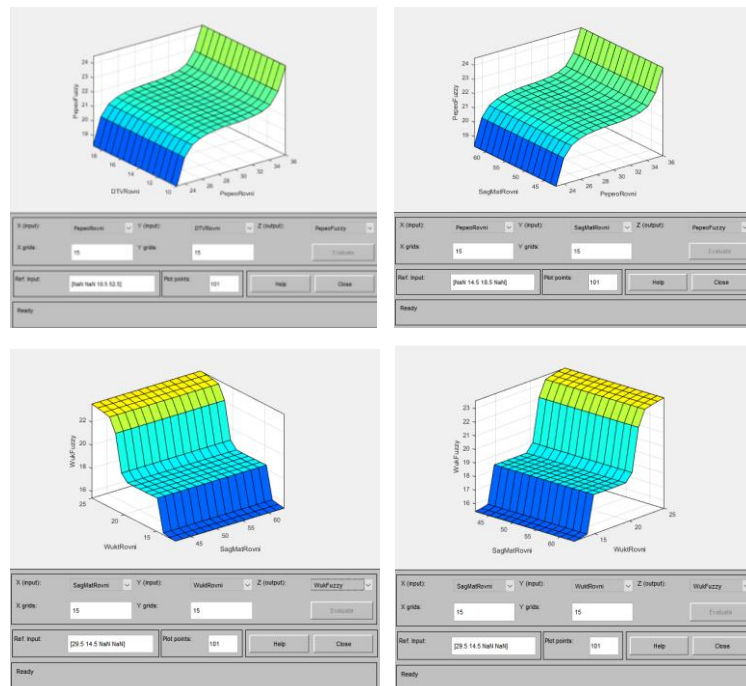
Slika 59. Dodjeljivanje Fuzzy vrijednosti parametrima u modelu

Radi pojednostavljenja procesa modeliranja korišteni su trapezoidni i trouglasti oblik funkcije pripadnosti. Kod računarskih modela zasnovanih na Fuzzy matematici zavisne promjenive u sistemu koji se modeluje opisuju se lingvističkim terminima kao određena funkcija nezavisnih promjenjivih. Kod Fuzzy upravljačkih sistema, pravila uključena u Fuzzy model odgovaraju ljudskom tumačenju. Na ovaj način, i Fuzzy kontroleri i Fuzzy modeli opisuju direktnu vezu između „ulaznih“ i „izlaznih“ promjenjivih koristeći lingvistička pravila i funkcije pripadnosti koje definišu lingvističke termine koji se pojavljuju u pravilima.

Fuzzy pravila formirana su na osnovu poznavanja procesa pripreme uglja u mašinama taložnicama. Sljedeće slike prikazuje detalje baze pravila modela, izgled rezultujućih površina na izlazu iz modela te programske specifikacije i vizuelni izgled razvijenog modela za pripremu uglja u mašinama taložnicama.



Slika 60. Formiranje Fuzzy pravila u modelu pripreme uglja u mašinama taložnicama



Slika 61. Vizuelni pregled rezultujućih površina koje je dao model

```

[System]
Name='BanoviciFIS'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=4
NumOutputs=4
NumRules=12
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='PepeoRovni'
Range=[23 36]
NumMFs=3
MF1='nizak': 'trimf', [17.8 23
29.6103395061728]
MF2='srednji': 'trapmf', [23 26.7
32.579475308642 35.9]
MF3='visok': 'trimf', [30.0315739312945
35.9801850424056 41.1801850424056]

[Input2]
Name='DTVROvni'
Range=[10 19]
NumMFs=3
MF1='nizak': 'trimf', [6.4 10
14.4236111111111]
MF2='srednji': 'trapmf', [10 12.9
16.5192752505783 18.9]
MF3='visok': 'trimf', [14.5069444444444
19 22.6]

[Input3]
Name='WuktRovni'
Range=[12 25]
NumMFs=3
MF1='nizak': 'trimf', [7.91475308641975
10.0747530864198 14.1947530864198]
MF2='srednji': 'trimf', [13.968879988958
3 17.1373456790123 21.4373456790123]
MF3='visok': 'trimf', [20
25.7868157286045 30.1]

[Input4]
Name='SagMatRovni'
Range=[42 63]
NumMFs=3
MF1='nizak': 'trimf', [33.6 42
51.3819444444445]
MF2='srednji': 'trapmf', [42.18148148148
15 46.2814814814815 58.0814814814815
62.7814814814815]
MF3='visok': 'trimf', [51.8457208943716
62.9998875610383 68.6457208943716]

[Output1]
Name='PepeoFuzzy'
Range=[17 26]
NumMFs=3
MF1='nizak': 'trimf', [13.4 17
21.0347222222222]
MF2='srednji': 'trapmf', [17.1 19.5 23.7
25.8402777777778]
MF3='visok': 'trimf', [21.3694444444444
26.0208333333333 28.5694444444444]

[Output2]
Name='DTVFFuzzy'
Range=[13 20]
NumMFs=3
MF1='nizak': 'trimf', [9.87077872012336
12.6707787201234 15.8737108188888]
MF2='srednji': 'trapmf', [13.6
15.6040863531226 17.3 19.2]
MF3='visok': 'trimf', [16.5971472629144
20.4 22.9]

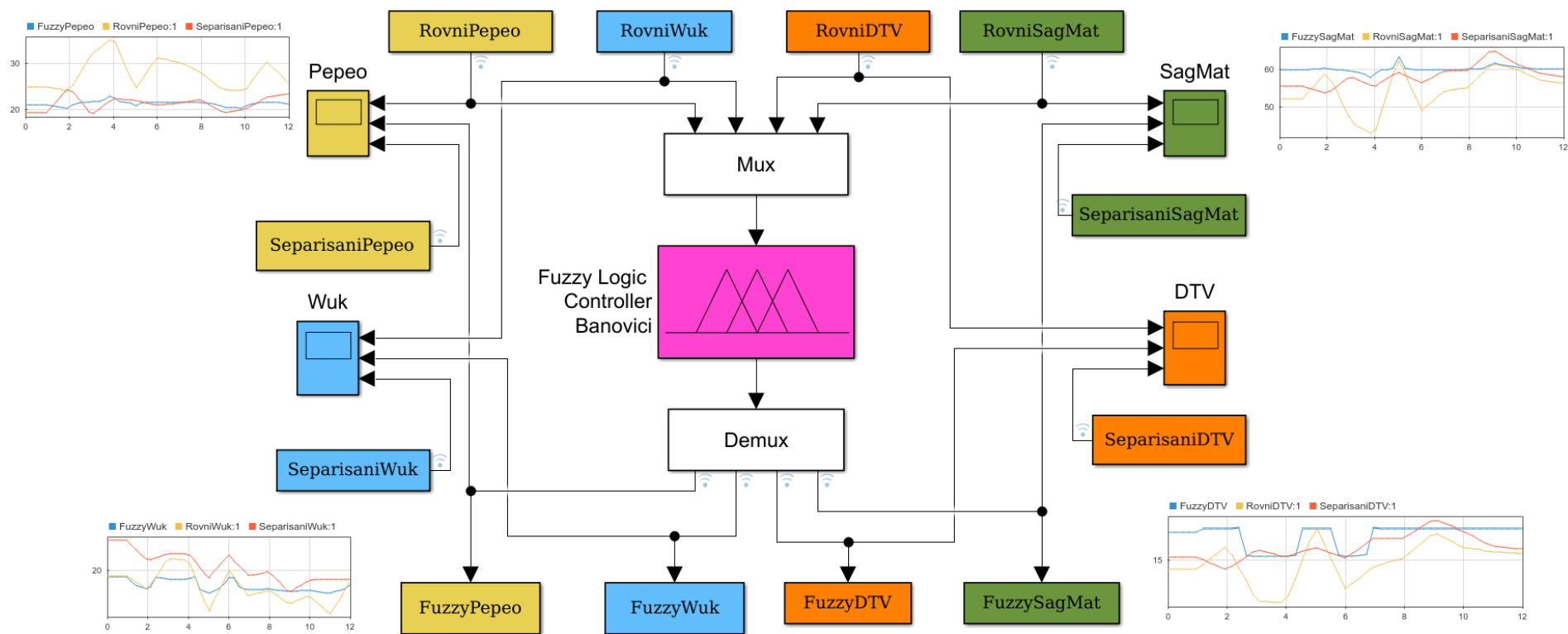
[Output3]
Name='WukFuzzy'
Range=[15 25]
NumMFs=3
MF1='nizak': 'trimf', [10.3901234567901
13.8236623927963 16.3901234567901]
MF2='srednji': 'trimf', [14.771604938271
6 18.2716049382716 21.9339025481405]
MF3='visok': 'trimf', [20.6592592592593
25.0187041320426 26.3592592592593]

[Output4]
Name='SagMatFuzzy'
Range=[53 67]
NumMFs=3
MF1='nizak': 'trimf', [47.4 53 58.6]
MF2='srednji': 'trapmf', [53.07561728395
06 56 63.8 66.8]
MF3='visok': 'trimf', [61.3784117193524
66.9784117193524 72.5784117193523]

[Rules]
1 0 0 0, 1 0 0 0 (1) : 1
2 0 0 0, 2 0 0 0 (1) : 1
3 0 0 0, 3 0 0 0 (1) : 1
0 1 0 0, 0 1 0 0 (1) : 1
0 2 0 0, 0 2 0 0 (1) : 1
0 3 0 0, 0 3 0 0 (1) : 1
0 0 1 0, 0 0 1 0 (1) : 1
0 0 2 0, 0 0 2 0 (1) : 1
0 0 3 0, 0 0 3 0 (1) : 1
0 0 0 1, 0 0 0 1 (1) : 1
0 0 0 2, 0 0 0 2 (1) : 1
0 0 0 3, 0 0 0 3 (1) : 1

```

Slika 62. Izgled izvršne datoteke Fuzzy modela za postrojenje za pripremu uglja u Banovićima na ulazu u SIMULINK model



Slika 63. Model postrojenja razvijen u modulu SIMULINK programskog paketa MatLab, verzija 2017a. Kao osnova poslužio je Fuzzy model razvijen u modulu Fuzzy Logic Toolbox istog programskog paketa

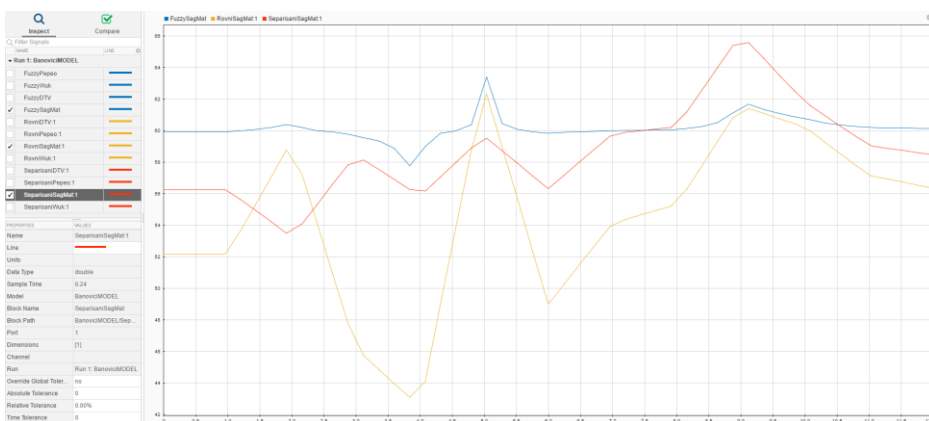
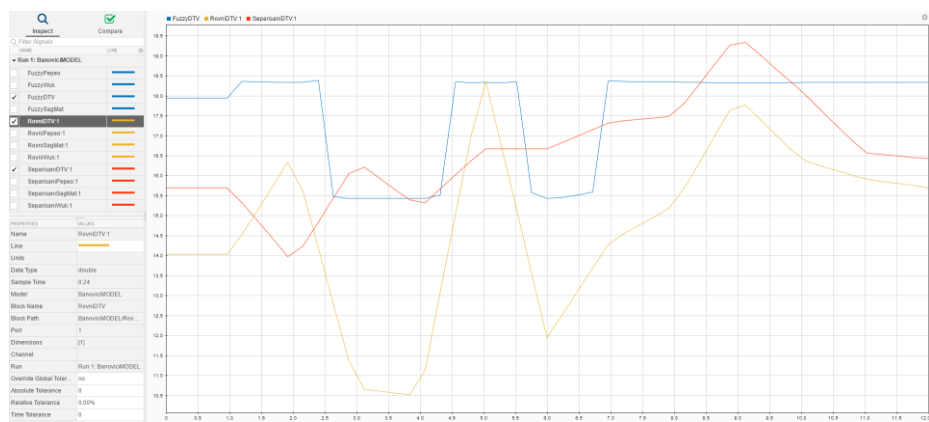
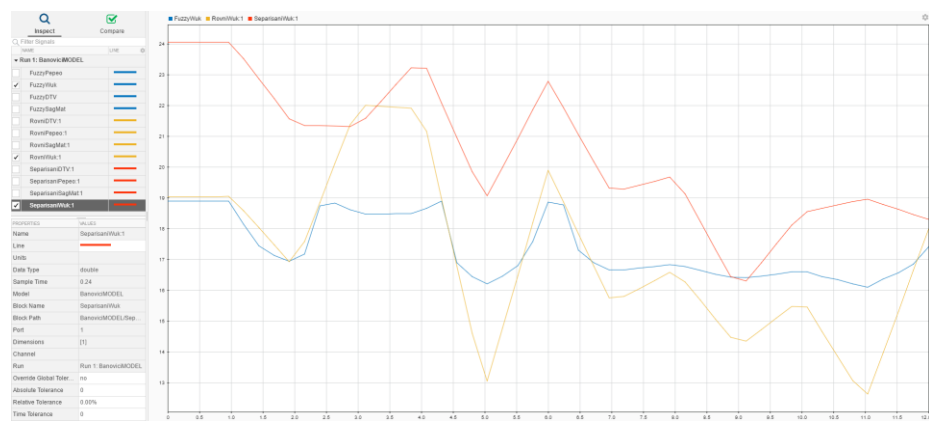
6. 4. REZULTATI MODELIRANJA I DISKUSIJA

Na formiranom modelu izvršena su testiranja. Simuliran je realni proces, što obezbjeđuje osnovu za objektivnu komparativnu analizu modelskih i stvarnih ishodnih rezultata procesa čišćenja uglja. Radi provjere validnosti razvijenog Fuzzy modela, vršena je simulacija procesa čišćenja uglja u mašinama taložnicama. Model je testiran upotrebom realnih ulaznih kvalitativnih i kvantitativnih podataka rovnog uglja dobijenih posmatranjem procesa pripreme uglja u mašinama taložnicama separacije RMU "Banovići". Eksperimentalna provjera Fuzzy modela, izvedena je praćenjem ulaznih i izlaznih parametara.

Tabela 24. Izlazne vrijednosti odabranih parametara kvaliteta uglja iz Fuzzy modela

Mjesec 2018. g.	Wuk	Pepeo	Sag. mat.	DTV
I	18,40	20,80	59,95	19,50
II	16,76	20,70	60,31	19,70
III	18,49	21,60	59,62	16,30
IV	18,52	22,65	58,38	16,30
V	16,42	21,45	61,89	19,92
VI	18,04	21,58	59,88	17,00
VII	16,54	21,54	60,00	19,55
VIII	16,61	21,45	60,09	19,75
IX	16,46	20,60	61,40	19,92
X	16,52	20,51	60,78	19,86
XI	16,36	21,52	60,22	19,81
XII	17,09	21,14	60,13	19,79
Prosjek	17,18	21,30	60,22	18,95

Provjera validnosti je izvedena simuliranjem realnog procesa koji se odvija, iz čega su dobiveni izlazni modelski podaci, koji su u kasnijoj fazi upotrebom statističkih metoda upoređeni sa stvarnim podacima takođe dobivenim iz procesa. Detaljni grafovi vrijednosti svakog od odabranih kvalitativnih parametara uglja (za rovní i separisani ugalj, te rezultat Fuzzy simulacije) dati su na sljedećoj slici.



Slika 64. Uporedni pregled rezultata Fuzzy modeliranja sa podacima o rovnom i separisanom uglju

6. 4. 1. Odstupanja modelskih i stvarnih kvalitativnih parametara uglja

Kao najčešći razlog za nepreciznost i netačnost u modeliranju ali i u samom vođenju procesa oplemenjivanja većina istraživača i praktičara nalazi u stohastičnosti procesa. Činjenica je da u većini postupaka pripreme mineralnih sirovina, a samim time i pripremi uglja, stohastičnost nije opšta karakteristika svih parametara procesa, već se odnosi gotovo isključivo na ulazne parametre mineralne sirovine. Od velike je važnosti izvesti karakterizaciju mineralne sirovine, tj. utvrditi opsege važnih ulaznih parametara sirovine, mada čak i potpun uvid u karakteristike mineralne sirovine ne predstavlja nikakvu garanciju za uspješno modeliranje i u konačnici uspješnost u vođenju procesa.

Greška predviđanja poslužila je kao jedan od kriterija za ocjenu prediktivnih svojstava modela. Izračunava se prema sljedećoj formuli:

$$\varepsilon = y_{pr} - y_{st}$$

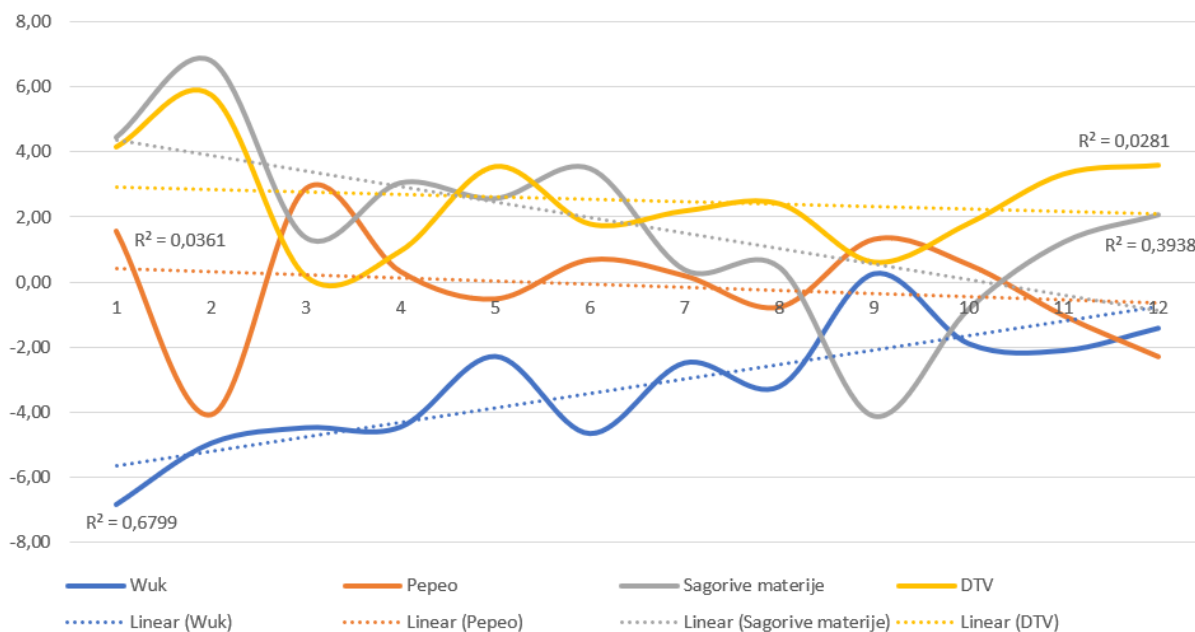
Jednačina 11

gdje je

y_{pr} – predviđena vrijednost tehnološkog parametra

y_{st} – stvarna vrijednost tehnološkog parametra

Sljedeći dijagram predstavlja dobivene vrijednosti greške predviđanja za svaki od modeliranih parametara i prikaz trenda greške.



Slika 65. Vrijednosti greške predviđanja za Fuzzy model pripreme uglja u mašinama taložnicama

Trend greške predviđanja kreće se od 4,5 do -5,5, sa tendencijom da svaka od trend linija teži ili presijeca nultu vrijednost. Kumulativnim posmatranjem trenda greške predviđanja kvalitativnih parametara uglja može se konstatovati da ista uglavnom teži nuli, ili se kroz vrijeme približava nultoj vrijednosti. Takođe, sa dijagrama je vidljivo da su greške gotovo linearno uslovljene, tj. gdje je trend greške jednog parametra visok, najčešće je visok i trend greške ostalih parametara i obratno. Njihovi trendovi kroz vrijeme opadaju, što je vjerovatno rezultat vremenskih prilika u eksploataciji i pri transportu uglja. Ovo ukazuje na dobre generalne postavke modela, kao i na uticaj faktora koji su modeliranjem smatrani konstantnim. Dobivene vrijednosti nedvosmisleno pokazuju da je model više nego primjenjiv kako za teoretska ispitivanja, tako i za praktične svrhe.

Ovakav rezultat eksperimentalnih testova razvijenog Fuzzy modela procesa čišćenja uglja u mašinama taložnicama na primjeru separacije uglja u RMU "Banovići" oslonjen je na:

- Pouzdanost i kvalitet ulaznih podataka iz realnog procesa
- Adekvatno postavljen procesni algoritam i simulacioni model i
- Korektno izvedenu estimaciju i fazifikaciju modelskih parametara.

Neispunjavanjem bilo kog od navedena tri uslova, model gubi atribut pouzdanosti.

Rezultati pokazuju da postavljeni Fuzzy model dobro oslikava proces čišćenja uglja u mašinama taložnicama.

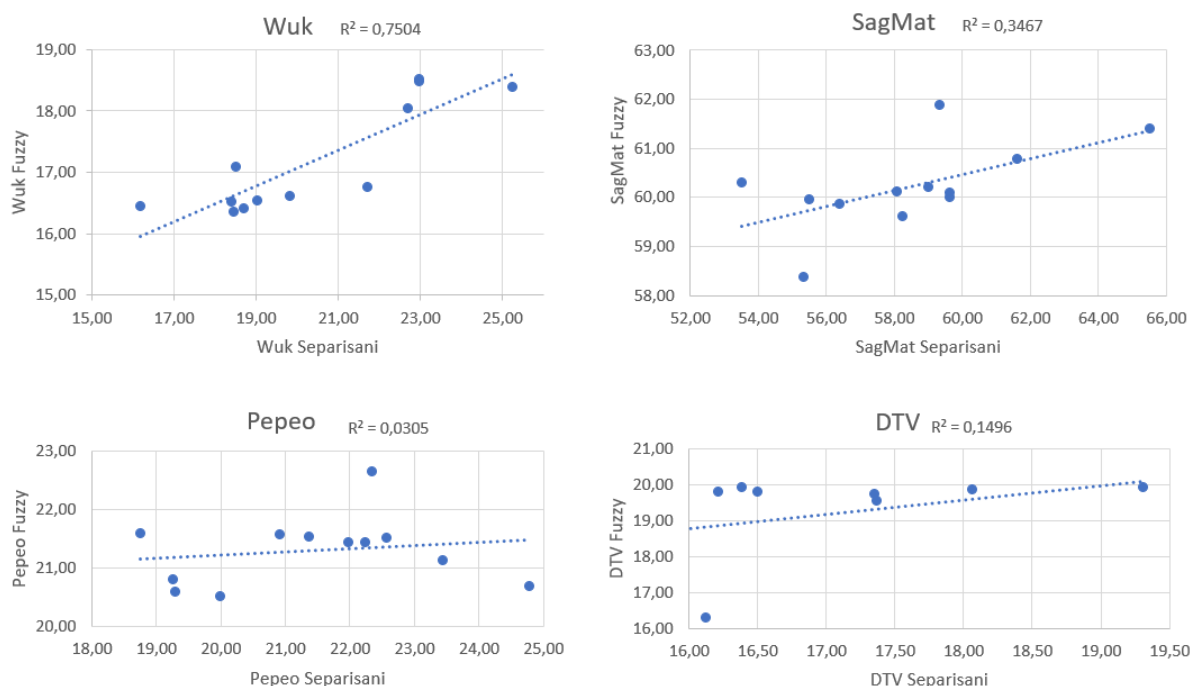
6. 4. 2. Statistička analiza rezultata modeliranja

Kod empirijskih modela, (modela baziranih na realnim podacima sakupljenim iskustvenim posmatranjem, mjerenjima, zaključivanjem i simulacijama) utvrđujemo korelaciju između ulaznih i izlaznih promjenjivih.

Tabela 25. Statistička povezanost stvarnih i vrijednosti predviđenih Fuzzy modelom

	Wuk i Fuzzy WUK	Pepeo i Fuzzy Pepeo	Sagorive materije i Fuzzy Sagorive materije	DTV i Fuzzy FTV
Koeficijent korelacije R	0,866	0,175	0,589	0,387
Koeficijent determinacije R^2	0,750	0,030	0,347	0,150
Prilagođeni R^2	0,725	-0,066	0,281	0,065
Standardna greška RMSE	0,47028	0,61422	0,74564	1,42465

U cilju utvrđivanja mogućnosti modela da pomoću zadatih (ulaznih) parametara izvrši predikciju tehnoloških pokazatelja procesa pripreme uglja u mašinama taložnicama izvršena je regresiona analiza podataka korištenjem programa IBM SPSS i Microsoft Excel.



Slika 66. Analiza rezultata modeliranja pomoću linearne regresije

Regresionom analizom razmatrana je korelacija realnih (izmjenjenih) procesnih vrijednosti za odabrane kvalitativne parametre uglja i vrijednosti dobijenih Fuzzy modeliranjem procesa.

Tabela 26. Analiza varijanse (ANOVA) implementiranog modela

		SS	df*	MS	F	SF
W _{uk}	Regresija	6,651	1	6,651	30,072	0,000
	Ostatak	2,212	10	0,221		
	Ukupno	8,862	11			
Pepeo	Regresija	0,119	1	0,119	315	0,587
	Ostatak	3,773	10	0,377		
	Ukupno	3,891	11			
Sagorive materije	Regresija	2,951	1	2,951	5,307	0,044
	Ostatak	5,560	10	0,556		
	Ukupno	8,510	11			
DTV	Regresija	3,571	1	3,571	1,750	0,214
	Ostatak	20,296	10	2,030		
	Ukupno	23,868	11			

Obrazloženje kolona u tabeli: SS – suma kvadrata odstupanja, df – broj stepeni slobode, MS – srednja kvadratna greška (SS/df), F – vrijednost F-testa, SF – Statistička značajnost F testa

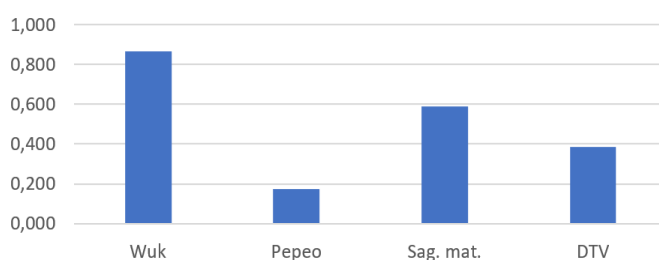
Statističke metode koriste se za utvrđivanje veza između zavisnih i nezavisnih promjenjivih kao i za procjenu parametara koji figurišu prilikom procjene funkcionalnih zavisnosti.

Tabela 27. Regresiona statistička analiza stvarnih parametara kvaliteta separisanog uglja i vrijednosti dobivenih Fuzzy modeliranjem

	Wuk	Pepeo	Sagorive materije	DTV
C	0,292	0,157	0,163	0,397
SE	0,053	0,101	0,071	0,299
t	5,484	0,561	2,304	1,327
p	0,000	0,000	0,044	0,214
L95	0,173	-0,168	0,005	-0,270
U95	0,411	0,281	0,321	1,063

Obrazloženje redova u tabeli: C – vrijednost koeficijenta, SE – srednja kvadratna greška koeficijenta, t – vrijednost t-testa za koeficijente (C/SE), p – statistička značajnost t-testa, L95 – donja granica intervala povjerenja, U95 – gornja granica intervala povjerenja

Za rezultate dobivene regresionom analizom konstatujemo da su slični rezultatima iz prethodnog primjera. Drugim riječima, srednje i visoke vrijednosti koeficijenata korelacije ukazuju na postojanje jakih veza između stvarnih i predviđenih vrijednosti tehnoloških pokazatelja. Model dobro prati promjene realnih vrijednosti parametara tj. njihov rast ili pad tokom vremena.



Slika 67. Koeficijent korelativnosti stvarnih i vrijednosti predviđenih Fuzzy modelom

Uočava se da je većina koeficijenata korelacije prilično visoka, što ukazuje na dobre uzajamne veze između stvarnih i predviđenih vrijednosti izlaznih promjenjivih.

S obzirom da rezultujuće površine fazilogičkog modela dobro oslikavaju karakteristike realnog procesa pripreme uglja u mašinama taložnicama, postavke modela su korektne. Najveći koeficijenti korelacije stvarnih i predviđenih vrijednosti dobijeni su za vlagu i količinu sagorivih materija. Najveće greške predviđanja prisutne su kod procjene donje toplotne moći uglja i količine pepela. Mogu se uočiti odstupanja između vrijednosti koje je predvidio model i realnih procesnih podataka.

Do znatnijih odstupanja stvarnih i predviđenih vrijednosti je najverovatnije došlo usljed fluktuacija u procesnim podacima, a iste mogu biti izazvane raznim faktorima, npr: promjenjiva dinamika procesa zbog zastoja u radu, oscilacije u procesnim parametrima koji su

smatrani konstantnim (frekvencija oscilacija, dinamika ulaza materijala u mašinu taložnicu, kvalitet povratnih voda i sl.)

Rezultati modeliranja su mogli biti približniji da se u znatnijoj mjeri koristila tehnika "fitovanja" podataka. Međutim, tu postoji zamka da se prevelikim korištenjem ove tehnike model podesi preusko (samo za jedan raspon podataka ili samo za jedno vremensko razdoblje), čime se njegova upotreba znatno ograničava.

7. ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Zbog sve snažnije konkurencije na svjetskom tržištu uglja, ali i sve većih pritisaka za unaprjeđenje i primjenu standarda zaštite životne sredine, jedna od ključnih stvari za profitabilnost i opstanak bilo kojeg rudnika uglja jeste efikasan proces pripreme uglja. U tom smislu, detaljno kontinuirano praćenje ovog kompleksnog procesa i redovno analiziranje radnih parametara čini početnu instancu za kontrolu i iznalaženje ekonomski opravdanih rješenja unaprjeđenja procesa. U tom smislu svaka, čak i mala ušteda u vremenu, materijalu ili energiji dugoročno donosi značajne ekonomske efekte. Istraživačko usmjerenje ove doktorske disertacije je sagledavanje mogućnosti primjene Fuzzy logike u modeliranju procesa pripreme uglja mašinama taložnicama, sa teorijskog i praktičnog aspekta. U teoretskom dijelu disertacija daje opsežan pregled teorijskih postavki kao i pregled svjetskih iskustava o odabranoj temi. Upotreba empirijskih modela generalno u pripremi uglja poboljšava razumijevanje tehnoloških pokazatelja konkretnog postrojenja te unaprjeđuje razumijevanje složenih veza među njima. Eksperimentalna istraživanja i testiranja modela provedena su u virtuelnom okruženju programskog paketa MATLAB, te njegovim modulima Fuzzy Logic Toolbox i Simulink, dok je obrada dobijenih rezultata rađena u programima IBM SPSS i MS Excel.

Na primjeru postrojenja za čišćenje uglja Separacija RMU Banovići izvršena su testiranja modela koja su pokazala primjenjivost i pouzdanost modela, koja se ogleda u malim odstupanjima izlaznih pokazatelja u odnosu na pokazatelje stvarnog procesa čišćenja uglja.

Provedena istraživanja potvrđuju svjetske trendove da su metode Fuzzy logičkog modeliranja pogodan alat za modeliranje i simulaciju procesa sa više promjenjivih parametara, pojednostavljujući do sada vrlo teško provedive analize velikih količina podataka koji nastaju praćenjem rada kompleksnih industrijskih postrojenja pripreme uglja u mašinama taložnicama, te olakšavajući izvođenje zakonitosti u radu i pronalaženje načina za optimizaciju i unaprjeđenje rada pomenutih postrojenja.

Dobijeni rezultati i širina tematske oblasti predstavljaju dobru osnovu za dalja istraživanja. Shodno tome, preporuke su za što skorije opremanje postrojenja sljedećom opremom:

- kvalitativni i kvantitativni analizatori uglja i jalovine u realnom vremenu (online)
- opreme za upravljanje i nadzor pulsacijama u mašinama taložnicama
- kontrolu brzine ulaza rude u mašinu taložnicu
- detaljniju analizu visine sloja materijala u mašinama taložnicama i sl.

Ista oprema će kroz relativno malu investiciju omogućiti detaljniju kontrolu i analizu procesa pripreme uglja u mašinama taložnicama, te u kombinaciji sa modelima omogućiti unaprjeđenje pomenutih procesa.

8. LITERATURA

1. Abbott J., Miles N.J. 1991. Smoothing and interpolation of float/sink data for coals, *Minerals Engineering*, Volume 4, Issues 3–4, Pages 511-524
2. Adams, E.W., 1974. The logic of ‘almost all’. *Journal of Philosophical Logic*, 3(1-2), pp.3-17.
3. Ahmed M. M., 2011. Optimization of A Jigging Process Using Statistical Technique, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 31:2, 112-123
4. Alderman, J. K. 2013. Future industrial coal utilization: forecasts and emerging technological and regulatory issues. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation* (pp. 85-101).
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*
6. Anderson C. G., Dunne R. C., Uhrie J. L, 2014. Mineral processing and extractive metallurgy - 100 years of innovation -Society for Mining, Metallurgy, and Exploration
7. Aplan, F.F. 2003. Gravity concentration. In: *Principles of Mineral Processing*. Edited by Fuerstenau M.C. and Han K.N., Littleton, CO: SME. pp. 185–219.
8. Arnold B. J., Klima M. S., Bethell P. J., 2007. Designing the coal preparation plant of the future, *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*
9. Arnold, B. J. 2013. Coal formation. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Production* (pp. 31-52).
10. Asakura K., Nagao M., Mizuno M. Harada S., 2007, Numerical Simulation of Particle Motion in a Jig Separator. In *ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference* (pp. 385-391). American Society of Mechanical Engineers.
11. Asakura, K., Nagao, M. and Mizuno, M., 2007. Simulation of Particle Motion in a Jig Separator. *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, 7(Special Issue), pp. s21-s26.
12. Baade C., 2010. Enhanced process control – maximizing coal handling preparation plant productivity, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 30: 239–251,
13. Babich, A., Senk, D. 2013. Coal use in iron and steel metallurgy. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation* (pp. 267-311).
14. Babuška, R., 1998. Fuzzy modeling for control. Springer Science & Business Media.
15. Bainbridge L., 1983. Ironies of Automation, *Automatica*, Volume 19, Issue 6, Pages 775-779
16. Bandopadhyay, S., 1987. Fuzzy algorithm for decision making in mining engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 5(2), pp.149-154.
17. Beck A. J. G., Holtham P. N., 1993. Computer simulation of particle stratification in a two-dimensional batch jig, *Minerals Engineering*, Vol. 6, No. 5, pp. 523-536
18. Bećarević A., 2004. Analiza efikasnosti rada mašina taložnica na separaciji RMU Banovići primjenom Trompovih krivulja, *Diplomski rad*, Rudarsko-geološko-građevinski fakultet Tuzla
19. Bede B., 2013. *Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic*, Springer
20. Bellman, R.E., Zadeh, L.A., 1970. Decision-making in a fuzzy environment. *Management science*, 17(4), pp.B-141.
21. Benović T. L., 2013. Fazi modelovanje čišćenja uglja u autogenoj suspenziji, *Doktorska disertacija*, Rudarsko-geološki fakultet Beograd
22. Bergh, L., 2016. *Artificial Intelligence in Mineral Processing Plants: An Overview*.

23. Bhaskar B., Yadav A. S., Bhadoria R. S., 2013. Transportation System of Coal Distribution: A Fuzzy Logic Approach using MATLAB
24. Bhattacharya S., Maheshwari A., Panda M., 2016. Coal Cleaning Operations: The Question of Near Gravity Material, Transactions of the Indian Institute of Metals, Volume 69, Issue 1, pp 157-172
25. Bjureby E., Britten M., Cheng I., The true cost of coal, 2008, Greenpeace International
26. Bogdan, Ž., Živković, S.A., Dokmanović, V. i Merić, J. 2007. Tehnologije čistog ugljena u strategiji razvoja elektroenergetskog sustava. Journal of Energy, 56 (4), 398-431.
27. Bowen, R.M. and Jowett, A., 1986. Coal cleaning calculations based on alternatives to standard washability curves. Fuel, 65(1), pp.28-33.
28. Brožek M., Surowiak A., 2010. Argument of Separation at Upgrading in the Jig. Archives of Mining Sciences, 55(1), pp.21-40.
29. Budge G., Brough J., Knight J., Woodruff D. and McNamara L., 2000. Review of the worldwide status of coal preparation technology, RJB Mining Consultancy Ltd and Baker Process
30. Burt R. O., 1987. Gravity Concentration Methods, in Mineral Processing Design, Martinus Nijhoff Publishers, Volume 122 of the series NATO ASI Series pp 268-
31. Burt, R. O., 1999. The role of gravity concentration in modern processing plants, Minerals Engineering, Vol. 12, No. 11, pp. 1291-1300
32. Cierpisz S., 2003. Simulation of coal preparation processes – static and dynamic models, Journal of the Polish Mineral Engineering Society
33. Cierpisz S., 2015. Control systems of coal products discharge from a jig. Mining–Informatics, Automation and Electrical Engineering, 53.
34. Cierpisz S., 2017. A dynamic model of coal products discharge in a jig, Minerals Engineering 105
35. Cierpisz S., 2017. A dynamic model of coal products discharge in a jig. Minerals Engineering, 105, pp.1-6.
36. Cierpisz S., Joostberens J., 2015. Monitoring of coal separation in a jig using a radiometric density meter, IFAC-PapersOnLine 48-17, 074–079
37. Cierpisz S., Kryca, M. Sobierajski, W., 2016. Control of coal separation in a jig using a radiometric meter. Minerals Engineering, 95, pp.59-65.
38. Cipriano, A., 2010. Industrial products for advanced control of mineral processing plants. In Sbárbaro D., del Villar R., 2010. Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants (pp. 287-308). Springer London.
39. Clemente, J., Clemente, F. 2013. Social and economic value of coal. In The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation (pp. 3-20).
40. Coal preparation, 2001, Technology status report, Department for Business Innovation & Skills, Governemnt of UK
41. Cooper B. R., Ellingson W. A., 1984. The Science and Technology of Coal and Coal Utilization, Plenum Press, New York
42. Crespo E. F., 2016. Modeling segregation and dispersion in jigging beds in terms of the bed porosity distribution, Minerals Engineering 85, 38–48
43. Čalić N. 1990. Teoretske osnove pripreme mineralnih sirovina, Rudarsko-geološki fakultet Beograd
44. Damberger, H. H., Harvey, R. D., Ruch, R.R. Thomas Jr, J., 1984. Coal characterization (pp. 7-46 In: Cooper B. R., Ellingson W. A., The Science and Technology of Coal and Coal Utilization, Plenum Press, New York
45. Darling P., 2011. Mining Engineering Handbook, 3rd edition Vol I & II, SME

46. De Aguiar J. M. E., 2015. Phenomenological Numerical Modelling of a Mineral Jig using Parallel Processing, Doctoral thesis, University of Porto, Portugal
47. De Lange T. Venter P. E., 1987. The Use of Simulation Tromp Partition Curves in Developing the Flowsheet of Plant Extensions at Grootegeluk Coal Mine, Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries, Volume 2: Metallurgy. Johannesburg, SAIMM, pp. 295 - 311.
48. Demir, I., Khan, L. A., Lytle, J. M. 1999. Advances in coal cleaning. In American Chemical Society, fuel preprint, presented at the American Chemical Society Annual Meeting, Anaheim (pp. 110-114).
49. Demirbas M. F. 2007. Progress of Fossil Fuel Science, Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, Volume 2, Issue 3
50. Dieudonné V., Jonkers A., Loveday G., 2006. An approach to confidently predicting jiggling performance, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy
51. Dobby G.S. and Rao S.R. eds. 1989. Processing of Complex Ores-Proceeding of the International Symposium.
52. Dong K. J., Kuang S. B., Vince A., Hughes, T. Yu A.B., 2010. Numerical simulation of the in-line pressure jig unit in coal preparation. Minerals Engineering, 23(4), pp.301-312.
53. Driankov, D., Hellendoorn, H. Reinfrank, M., 1996. Introduction. In An Introduction to Fuzzy Control (pp. 1-36). Springer Berlin Heidelberg.
54. Drzymala, J., 2007. Mineral processing - foundations of theory and practice of mineralogy, Wroclaw University of Technology
55. DU Chang-long and LIN Ming-xing, 2002. A fuzzy control system of the variable construction for the feeding coal in the jiggling process. Journal of Coal: English, 8(1), pp.107-109.
56. Dubois D., Nguyen H. T., Prade H., Sugeno M., 1998. Fuzzy Systems - Modeling and Control, The Springer Handbook Series on Fuzzy Sets
57. Dubois, D. and Prade, H., 1988. Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty. Springer Science & Business Media.
58. Erik N. Y., Yilmaz I., 2011. On the use of conventional and soft computing models for prediction of gross calorific value (gcv) of coal, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 31: 32–59
59. EURACOAL-21st-Century.pdf
60. EURACOAL-Coal-industry-across-Europe-6th.pdf
61. Fallon N. E., Gottfried B. S., 1985. Statistical representation of generalized distribution data for float-sink coal-cleaning devices: Baum jigs, Batac jigs, Dynawhirlpools, International Journal of Mineral Processing, Volume 15, Issue 3, Pages 231-236
62. Fecko, P., Tora, B., Tod, M. 2013. Coal waste: handling, pollution impacts and utilization. In The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation (pp. 63-84).
63. Fikkers, A. 2013. Coal resources, production and use in established markets. In The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation (pp. 105-117).
64. Filo G., 2010. Modelling of fuzzy logic control system using the matlab simulink program, Politechniki Krakowskiej
65. Flintoff B., 2002. Introduction to process control, in Mular, A. L., Bhappu R. B., 2002. *Mineral processing plant design, practice, and control*, proceedings, 2nd ed., Society for Mining, Metalurgy and Exploration
66. Ford M. A., King R. P., 1984. The simulation of ore-dressing plants. International Journal of Mineral Processing, 12(4), pp.285-304.

67. Gagarin S. G., Gyulmalieva A. M., Yu. Tolchenkin A., 2008. Trends in Coal Beneficiation: A Review, *Coke and Chemistry*, Vol. 51, No. 2, pp. 31–42., Allerton Press, Inc.
68. Galindo, J. ed., 2005. *Fuzzy Databases: Modeling, Design and Implementation*. IGI Global.
69. Galvin K. P., 2006. Options for washability analysis of coal — a literature review, *Coal Preparation*, 26:4, 209-234
70. Galvin, K. Iveson, S.M., 2013. Cleaning of coarse and small coal in: Osborne D., 2013. In: *The coal handbook: Towards cleaner production*, Coal Production, Woodhead Publishing Limited
71. Gegov A., Petrov, N. Vatchova, B., 2010. Advanced modelling of complex processes by rule based networks. In *Intelligent Systems (IS)*, 2010 5th IEEE International Conference (pp. 197-202). IEEE.
72. Gegov, A., 2007. *Complexity management in fuzzy systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
73. Glad, T. and Ljung, L., 2000. *Control theory*. CRC press.
74. Gottfried B. S., 1982. Statistical representation of generalized distribution data for float-sink coal-cleaning devices: Sand cones, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 8, Issue 1, March 1981, Pages 89-91
75. Govindarajan, B. and Rao, T.C., 1994. Indexing the washability characteristics of coal. *International journal of mineral processing*, 42(3-4), pp.285-293
76. Guillaneau J. C., Villeneuve J., Durance M. V., Brochot S., Fourniguet G., 1995. *Simulation Improvements in Mineral Processing*, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*
77. Gupta A., Yan D. S., 2016. *Mineral Processing Design and Operations*. An Introduction, Second edition, Elsevier
78. Gupta V., Mohant M.K., 2006. Coal preparation plant optimization: A critical review of the existing methods, *Int. J. Miner. Process.* 79, pp. 9–17
79. Gupta V., Mohanty M., Mahajan A., Biswal S.K., 2007. Genetic algorithms - A novel technique to optimize coal preparation plants, *Int. J. Miner. Process.* 84, pp 133 – 143
80. Gutić S. 2007. *Analiza radova drobiličnog postrojenja rovnog uglja i utjecaj na kvalitet oplemenjivanja u separaciji RMU Banovići*, magistarski rad, RGGF Tuzla
81. Harris, D. J., Roberts, D. G. 2013. Coal gasification and conversion. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation* (pp. 427-454).
82. Harris, J., 2001. *An introduction to fuzzy logic applications* (Vol. 23). Springer Science & Business Media.
83. Harris, J., 2005. *Fuzzy logic applications in engineering science*. Springer Science & Business Media.
84. Hellmann M., *Fuzzy Logic Introduction*
85. 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*, Editors: Young C. A., Luttrell G. H. *International Symposium on Separation Technologies for Minerals, Coal, and Earth Resources*, Part of the 2011 SME Annual Meeting.
86. Hodouin D., 2011. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants, *Journal of Process Control* 21, 211–225
87. Hodouin D., Carvalhoc M.T., Berghd L., 2001. State of the art and challenges in mineral processing control, *Control Engineering Practice* 9, 995–1005
88. Honaker Q., 2010. *International Coal Preparation Congress 2010 conference proceedings* - Society for Mining

89. Honaker Q., Forrest W. R., 2003. Advances in gravity concentration, Society for Mining
90. Horikawa S., Takeshi Furuhashi, Yoshiki Uchikawa, 1992. On fuzzy modeling using fuzzy neural networks with the back-propagation algorithm, IEEE Transactions on Neural Networks, Volume 3, Issue 5
91. Ignjatović M., Magdalinović S., Milanović D., Urošević D., 2011. – Ugalj - Industrijska priprema i tehnologije čišćenja, Bor
92. Ilchner B., Grant N. J. Russell K. C., 1991. Materials Beneficiation, Springer New York, Charles Burroughs Gill
93. International Energy Agency, 2016. Coal information 2016.
94. Jamsa-Jounela S.L., 2001. Current status and future trends in the automation of mineral and metal processing, review, Control Engineering Practice 9, pp. 1021–1035
95. Jamshidi, M., 1996. Large-scale systems: modeling, control, and fuzzy logic.
96. Jevremović Č., 1984. Priprema mineralnih sirovina
97. Jevremović, Č.; Priprema mineralnih sirovina, Tuzla, 1984. godine.
98. Jonas R.K., Craw I.A., 2012. Paradigm Shift in Advanced Control for Mining. In: Separation Technologies for Minerals, Coal, and Earth Resources, Editors: Young C. A., Luttrell G. H. International Symposium on Separation Technologies for Minerals, Coal, and Earth Resources, Part of the 2011 SME Annual Meeting.
99. Jovanović I., 2015. Model inteligentnog sistema adaptivnog upravljanja procesom prerade rude, Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet Beograd
100. Juniper, L., Schumacher, G. 2013. Advances in pulverised fuel technology: understanding coal comminution, combustion and ash deposition. In The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation (pp. 312-351).
101. Kandel, A. and Langholz, G., 1993. Fuzzy control systems. CRC press.
102. Kapur, P.C., 1983. A fast numerical method for evaluating the performance of float-sink coal-cleaning equipment. International Journal of Mineral Processing, 10(2), pp.81-88.
103. Karr C. L., Weck B., 1996. Computer modelling of mineral processing equipment using fuzzy mathematics, Minerals Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 183-194
104. Karr, C.L. Weck, B., 1996. Self-adjusting fuzzy model for mineral processing systems. In Fuzzy Systems, 1996., Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on (Vol. 1, pp. 559-563). IEEE.
105. Karray, F.O., De Silva, C.W., 2004. Soft computing and intelligent systems design: theory, tools, and applications. Pearson Education.
106. Kesimal A., 2002. Application of fuzzy multiple attribute decision making in mining operations, Mineral Resources Engineering, Vol. 11, No. 1
107. King R. P., 1999. Practical Optimization Strategies for Coal-washing Plants, Coal Preparation, 20: 1-2, 13-34
108. King R. P., 2012. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems 2nd ed, SME
109. King, R. P., 1987. A quantitative model for gravity separation unit operations that rely on stratification. In APCOM 87: Proceedings of the 12th International Conference on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries (pp. 141-151).
110. Knežević D., 2001. Priprema mineralnih sirovina, RGF Beograd
111. Kovacic Z., Bogdan S., 2005. Fuzzy controller design: theory and applications (Vol. 19). CRC press.
112. Kuang Y. L., Xie J. X., Ou Z. S., 2004. Properties of a Jigging Bed Analyzed with a High Speed Analyzer, Coal Preparation Volume 24, Issue 5-6

113. Laguitton, D. and Leung, J., 1989. Advances in expert system applications in mineral processing. In *Processing of Complex Ores-Proceeding of the International Symposium*
114. Laskowski, J.S., 2001. Coal preparation. *Developments in mineral processing*, 14, pp.1-8.
115. Leiviskä K., 2001a, *Industrial Applications of Soft Computing*, Mineral and Metal Processing Industries, Springer-Verlag
116. Leonard J. W., Hardinge B. C., 1991. *Coal Preparation* - 5th edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, CO, I SBN 0 – 87335-104-5
117. Li X., Abbott J., 1993. Simulation of the Jigging Process, *Coal Preparation*, 13:3-4, 197-207
118. Li X., McKee D. J., Horberry T., Powell M. S., 2011. The control room operator: The forgotten element in mineral process control, *Minerals Engineering*, Volume 24, Issue 8, Pages 894–902
119. Lin I. J., Krush-Bram M., Rosenhouse G., The beneficiation of minerals by magnetic jigging: Part 2. Identification of the parameters and verification of the mathematical model for the theoretical analysis of the mineral particles motion in the magnetic jig, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 54, Issue 1, June 1998, Pages 29-44.
120. Lin, I. J., Knish-Bram, M. and Rosenhouse, G., 1997. The beneficiation of minerals by magnetic jigging, Part 1. Theoretical aspects. *International journal of mineral processing*, 50(3), pp.143-159.
121. Lind, P., Yalcin, T. and Butcher, J., 2003. Computer simulation of the Bullmoose coal preparation plant. *Coal Preparation*, 23(3), pp.129-145.
122. Liu Y., Xie J., Zhang M. Kuang Y., 2016. Study on the Model System of Jig with Flexible Air Chamber and Pulsating Current Characteristics. In XVIII International Coal Preparation Congress (pp. 797-802). Springer International Publishing, in Litvinenko Vladimir (eds.) 2016. XVIII International Coal Preparation Congress 28 June—01 July 2016. Saint-Petersburg, Russia, Springer International Publishing
123. Longwell, J.P., Rubin, E.S., Wilson, J., 1995. Coal: energy for the future. *Progress in Energy and Combustion Science*, 21(4), pp.269-360.
124. Lovell H. L., Moorehead R. G., Luckie P. T., Kindig J. K. 1991. Hydraulic concentration, in *Coal Preparation*, 5th ed., Leonard J. W., Hardinge B. C., 1991. Society of Mining Engineers, Littleton, 1991, pp. 301-367.
125. Luttrell G. H., 2013. Optimization, simulation and control of coal preparation plants. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Production* (pp. 560-586).
126. Lyman G. J., 1992. Review of Jigging Principles and Control, *Coal Preparation*, 11:3-4, 145-165
127. Majumder A. K., Barnwal J. P., Ramakrishnan N., 2004. A New Approach to Evaluate the Performance of Gravity-Based Coal Washing Equipment, *Coal Preparation*, 24: 277–284,
128. Malhotra D., Taylor P. R., Spiller E., LeVier M., 2009. Recent advances in mineral processing plant design, Society for Mining, Metallurgy and Exploration
129. Mamdani, E.H., 1974. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* (Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588). IET.
130. Matía F., Marichal G.N., Jiménez E. eds., 2014. *Fuzzy Modeling and Control: Theory and Applications*. Paris, France, Atlantis Press.
131. McNeill M., Thro E., 1994. *Fuzzy Logic – A Practical Approach*, AP Professional
132. Meech A., Jordon L. A. 1993. Development of a self-tuning fuzzy logic controller, *Minerals Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 119-131

133. Meech J. A., 1995. AI Applications in the Mining Industry into the 21st Century,
134. Meech J. A., 2006. The evolution of intelligent systems in the mining industry, *Mineral Process Modelling, Simulation and Control*
135. Mehrotra S. P., Mishra B. K. 1997. Mathematical modeling of particle stratification in jigs
136. Meloy, T. P., 1983. Analysis and optimization of mineral processing and coal-cleaning circuits—circuit analysis. *International Journal of Mineral Processing*, 10(1), pp.61-80.
137. Miller B. G., 2005. *Coal Energy Systems*, Elsevier Academic Press
138. Miller K., 2013. *Coal Analysis*. In: *The coal handbook: Towards cleaner production*, Coal Production, Woodhead Publishing Limited
139. Miljanović I., 2008. Fazi logičko upravljanje procesima u pripremi mineralnih sirovina, *Monografija, Rudarsko-geološki fakultet Beograd*
140. Miljanović I., 2008. Fazi logika u upravljanju kvalitetom uglja, *Elektroprivreda, Časopis Zajednice Jugoslovenske Elektroprivrede*, ISSN 0013-5755, Vol. 61 No. 3, pp. 67-73.
141. Miljanović I., Vujić S., 2008. Fuzzy model of the computer integrated decision support and management system in mineral processing, *Yugoslav Journal of Operations Research*, Vol. 18., No.2 pp. 253-260. IMAM
142. Miljanović I., Vujić S., 2013. Fazi logika u rudarstvu, *Akademija inženjerskih nauka Srbije i Rudarski institut Beograd*
143. Mishra B. K., Mehrotra S.P., 1998. Modelling of particle stratification in jigs by the discrete element method, *Minerals Engineering*, Vol. 11, No. 6, pp. 511-522,
144. Mishra B. K., Mehrotra S.P., 2001. A jig model based on the discrete element method and its experimental validation, *International Journal of Mineral Processing* 63, 177–189
145. Mishra B.K., Adhikari B., 1999. Analysis of fluid motion during jigging. *Minerals engineering*, 12(12), pp.1469-1477.
146. Mishra B.K., Chakroborty P., 1995. Explorations into fuzzy logic control of stratification in jig (No. CONF-9510120--). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, CO (United States). IN *Proceedings of the XIX International Mineral Processing Congress: Comminution and simulation and control*
147. MIT, 2007. *The Future of Coal, Interdisciplinary study*, Massachusetts Institute of Technology
148. Modelling and control of mineral processing plant's using neural networks. In *Expert Systems in Mineral and Metal Processing: Proceedings of the IFAC Workshop*, Espoo, Finland, 26-28 August 1991 (p. 25). Elsevier.
149. Mohanta S., Mishra B.K., 2009. On the adequacy of distribution curves used in coal cleaning—A statistical analysis. *Fuel*, 88(11), pp. 2262-2268.
150. Montgomery D. C., 2012. *Design and analysis of experiments*, 8-th edition, Arizona State University
151. Mukherjee A. K., Chandra, S., 2002. A robust statistical method to evaluate unit operation in coal washery, *International Journal of Mineral Processing* 66 145– 162
152. Mukherjee A. K., Dwivedi V. K., Mishra B. K., 2005. Analysis of a laboratory jigging system for improved performance, *Minerals Engineering* 18, pages 1037–1044
153. Mukherjee A. K., Mishra B. K., 2006. An integral assessment of the role of critical process parameters on jigging, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 81, Issue 3, Pages 187–200
154. Munoz 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

155. Napier-Munn T.J., Lynch A.J., 1992. The modelling and computer simulation of mineral treatment processes — current status and future trends, *Minerals Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 143-167
156. Nelson, P. F. 2013. Environmental issues: emissions, pollution control, assessment and management. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation* (pp. 21-62).
157. Niedoba T., 2013. Statistical analysis of the relationship between particle size and particle density of raw coal. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49.
158. Noble A., Luttrell G. H., 2015. Review of state-of-the-art processing operations in coal preparation, *International Journal of Mining Science and Technology*
159. Oki T., Hazumi T., Umemiya Y. Kobayashi M., 2010. Influence of Water Pulsation with Different Frequency and Amplitude on Orbit of a Particle Placed on a Fixed Screen. *Materials transactions*, 51(1), pp.156-164.
160. Osborne D. G., 1986. *Fine Coal Cleaning by Gravity Methods: A Review of Current Practice*, Coal Preparation
161. Osborne D., 2013. *The coal handbook: Towards cleaner production*, Woodhead Publishing Limited
162. Osborne D.G. Fonseca A.G., 1992. Coal preparation - The past ten years. *Coal Preparation* 115-143.
163. Osborne, D. G., Gupta, S. K. 2013. Industrial uses of coal. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Production* (pp. 3-30).
164. Osborne, D. G., Sharples, M., Lien, L., Schumacher, G., Babich, A., Harris, D., Carras, J. 2013. Future directions toward more efficient and cleaner use of coal. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation* (pp. 497-528).
165. Ottley, D. J., 1986. Gravity Concentration In Modern Mineral Processing, In: *Mineral Processing at a Crossroads: Problems and Prospects*, Edited by Wills B. A., Barley R.W.
166. Passino, K.M., Yurkovich, S. Reinfrank, M., 1998. *Fuzzy control* (Vol. 2725). Reading, MA: Addison-wesley.
167. Patyra, M.J. and Mlynek, D.J. eds., 1996. *Fuzzy logic: implementation and applications*. Springer Science & Business Media.
168. Peng F. F., Luckie P. T. Separation evaluation, in *Coal Preparation*, 5th ed., Society of Mining Engineers, Littleton, 1991, pp. 658-716.
169. Peterson, D.J., 2001. *New forces at work in mining: industry views of critical technologies*. Rand Corporation.
170. Petrović M. 2008. Priprema i oplemenjivanje ugljena, RGGF Tuzla
171. Petrović M., Bećirović M., (2006.) Tehnološka analiza gravitacijske koncentracije mrkog ugljena na separaciji rmu "Banovići" primjenom Trompovih krivulja
172. Petrović, M., 2008. Priprema i oplemenjivanje uglja, Tuzla
173. Petrović, M.; Gutić, S.; Gutić, K.; Kvalitet oplemenjenog ugljena na Separaciji RMU "Banovići" u funkciji granulometrijskog sastava rovnog ugljena, Međunarodni rudarski simpozij, Dubrovnik 2006. godine.
174. Pfaff S., Salopek B., 2004. Primjena planiranja eksperimenata u oplemenjivanju mineralnih sirovina, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik Zagreb*, Vol. 16 str. 97-106
175. Piegat, A., 2013. *Fuzzy modeling and control* (Vol. 69). Physica.
176. Pielot J., Pielucha, W., 2016. Analysis of effects of coal enrichment in jigs at changing grain composition of the feed, *Mining Informatics, Automation and Electrical Engineering*, R. 54, nr 2, 48-54
177. Pismensky A. Ulshin V., 2014. Synthesis of extreme control system of coal cleaning in jigs. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 14(2).

178. Poirier, P.J., Meech, J.A., 1993. Using fuzzy logic for on-line trend analysis. In Control Applications, 1993., Second IEEE Conference on (pp. 83-86). IEEE.
179. Polulyakh O.D., D.O. Polulyakh, V.I. Chmylev, Yu. N. Filippenko, 2010. Hydraulic Jigging with Horizontal-Stationary alluvial Bottom layer In: Honaker Q., 2010. International Coal Preparation Congress 2010 conference proceedings - Society for Mining, pages 333-339
180. Projektna tehnička dokumentacija RMU "Banovići" d.d. Banovići.
181. Pryor E. J., 1965. Mineral processing, third edition, pp 295-323
182. Rafezi F., Jorjani E. Karimi Sh., 2008. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Prediction of Calorific Value Based on the Analysis of U.S. Coals, 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8), 5th. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering
183. Rao B. V., 2007. Extension of particle stratification model to incorporate particle size effects, Int. J. Miner. Process. 85 (2007) 50–58
184. Rao B. V., Kapur P.C., 2008. Simulation of multi-stage gravity separation circuits by size–density bivariate partition function, International Journal of Mineral Processing 89, 23–29
185. Reid K. J., Maixi L, Shenggui Z., 1985. Computer reliability analysis of coal-cleaning distribution curves, International Journal of Mineral Processing 14, pp 301-312
186. Reid K. J., Maixi L., Shenggui Z., 1985. Simulating Coal Preparation Distribution Curves, Coal Preparation, 1:2, 231-249
187. Reid K. J., Maixi L., Shenggui Z., 1985. Coal-cleaning distribution curve simulation: Fitting six different models by microcomputer, International Journal of Mineral Processing, 14, 291-299
188. Robl T., Oberlink A., Jones R. 2017. Coal Combustion Products CCPs, 1st Edition, Characteristics, Utilization and Beneficiation
189. Rong R. X. Lyman G. J., 1993. A new energy dissipation theory of jig bed stratification. Part 1: Energy dissipation analysis in a pilot scale baum jig (pages 165-188), Part 2: A key energy parameter determining bed stratification (pages 189-207), International Journal of Mineral Processing
190. Rong R. X., Lyman G. J., 1985. Computational Techniques for Coal Washery Optimization - Parallel Gravity and Flotation Separation, Coal Preparation, 2:1, 51-67
191. Rong R.X. 1986: Analysis of jig behaviour in coal preparation plants in China. Proc. Austral. Inst. Min. Metall., 291, 59 - 65.
192. Rong R.X., Lyman G.J., 1991. Modelling jig bed stratification in a pilot scale Baum jig. Minerals Engineering, 4(5-6), pp.611-623.
193. Ross, T. J., 2004. Fuzzy logic with engineering applications, Second Edition,
194. Roubos J. A., Mollov S., Babuska R., Verbruggen H.B., 1999. Fuzzy model-based predictive control using Takagi–Sugeno models, International Journal of Approximate Reasoning 22, pp. 3–30
195. Salama, A. I. A., Mikhail, M.W., 1985. Coal preparation flowsheet signal flowgraph. Coal Preparation, 2(2), pp.127-141.
196. Salama, A.I., 1991. Graphical techniques for estimating the separation characteristics based on mass distribution. Coal Preparation, 9(1-2), pp.51-63.
197. Salama, A.I., 1998. Coal washability characteristics index utilizing the M-curve and the CM-curve. International journal of mineral processing, 55(2), pp.139-152.
198. Salopek B., Pfaff S., Garapić M., Filipović S., 1990. Upotreba računala u oplemenjivanju mineralnih sirovina, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, str. 121-128
199. Sarker R.A., Gunn E.A., 1995. Determination of a coal preparation strategy using a computer based enumeration method.

200. Sawata, Y., Kawashima, S. and Inoue, J., 1995. Fuzzy control of the wave pattern of pulsation in an air-pulsated jig. *New Trends in Coal Preparation Technologies and Equipment*, 1, p.167.
201. Sbarbaro D., del Vilar R., 2010. *Advanced Control and Supervision in Mineral Processing plants*, Advances in Industrial Control series, Springer, 332 p. IMAM
202. Sbárbaro D., del Villar R., 2010. *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants*, Springer-Verlag London Limited
203. Schumacher, G., Juniper, L. 2013. Coal utilisation in the cement and concrete industries. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation* (pp. 387-426).
204. Sen K., Choudhury A., Gupta R. D., Ghose S. and Haque, R., 1994. Composite washing of coals from multiple sources: Optimization by numerical technique. *International journal of mineral processing*, 41(1-2), pp.147-160.
205. Seraphin C. Abou, Thien-My Dao, 2009. *Fuzzy Logic Controller Based on Association Rules Mining: Application to Mineral Processing*, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science Vol II, San Francisco, USA IMAM
206. Sikora T., Bedkowski Z., Smyla J. 2012 Automation of technological processes in a coal preparation plant and useful systems and devices for monitoring of coal quality, *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, vol. 36, No. 3
207. Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N., 2007. *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*, Springer
208. Solnordal C., Hughes T., Gray S. Schwarz P., 2009. CFD Modelling of novel gravity separation device. In *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO Melbourne (pp. 9-11).
209. Speight J. G. 2005. *Handbook of Coal Analysis*
210. Srinivasan R., Mishra B. K., Mehrotra S. P., 1999. Simulation of Particle Stratification in Jigs, *Coal Preparation*, 20:1-2, 55-70
211. Steiner, H.J., 1996. A contribution to the theory of jigging, Part I: Similarity criteria of the motion of jig layers. *Minerals engineering*, 9(6), pp.675-686.
212. Studija gravitacijske koncentracije mrkog uglja, RGF Tuzla, 1996. godine.
213. Subba Rao D.V., 2011. *Mineral Beneficiation - A Concise Basic Course*, Taylor & Francis Group, LLC
214. Sugeno M., Yasukawa T., 1993. A Fuzzy-Logic-Based approach to qualitative modeling, *IEEE Transactions on fuzzy systems*, Vol. 1, No. 1.
215. Sugeno, M. and Kang, G.T., 1988. Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy sets and systems*, 28 (1), pp.15-33.
216. Sugeno, M. and Takagi, T., 1983. Multi-dimensional fuzzy reasoning. *Fuzzy sets and systems*, 9(1-3), pp.313-325.
217. Sugeno, M. Tanaka, K., 1991. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system. *Fuzzy sets and systems*, 42(3), pp.315-334.
218. Suresh, N., Vanangamudi, M. and Rao, T.C., 1996. A performance model for water-only gravity separators treating coal. *Fuel*, 75(7), pp.851-854.
219. Surowiak A., Brozek M., 2016. A physical model of separation process by means of jigs, *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 52, 228–243
220. Takagi, T., Sugeno, M., 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (1), pp.116-132.
221. Tanaka, Y., 1993. An overview of fuzzy logic. In *WESCON/93. Conference Record*, (pp. 446-450). IEEE.

222. Tarjan, G., 1974. Application of distribution functions to partition curves. *International Journal of Mineral Processing*, 1(3), pp.261-264.
223. Tavares L. M., 1999. Monte Carlo Simulations on the Potential Energy Theory of Jigging, *Coal Preparation*, 20:1-2, 71-83
224. Tavares L. M., King R. P., 1995. A Useful Model for the Calculation of the Performance of Batch and Continuous Jigs, *Coal Preparation*, 15, p. 99.
225. Terano, T., Asai, K. Sugeno, M. eds., 2014. *Applied fuzzy systems*. Academic Press.
226. Thibault, J., Flament, F. and Hodouin, D., 1991.
227. Thomas, L. P. 2013. Coal resources and reserves. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Production* (pp. 80-106).
228. Turner, J. F., 1991. Gravity concentration, past, present and future. *Minerals Engineering*, 4(3-4), pp.213-223.
229. U.S. Energy Information Administration, 2016. *International Energy Outlook 2016*
230. Venter, J.J., Bearman, R.A. and Everson, R.C., 1997. A novel approach to circuit synthesis in mineral processing. *Minerals engineering*, 10(3), pp. 287-299.
231. Vetter D. A., Wright D.W. Brouckaert, C.J., 1987. A Dispersion Model of Autogenous Particle Separations, with Specific Application to the Batch Jigging of Particles. Mintek.
232. Viduka S. M., Feng Y. Q., Hapgood K., Schwarz M. P., 2013. Discrete particle simulation of solid separation in a jigging device, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 123, Pages 108-119
233. Vujic S., Benovic T., Miljanovic I., Hudej M., Milutinovic A., Pavlovic P. 2011, Fuzzy linear model for production optimization of mining systems with multiple entities, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume 18, Number 6, Page 633
234. Vujic S., Benovic T., Miljanovic I., Hudej M., Milutinovic A., Pavlovic P., 2011. Fuzzy linear model for production optimization of mining systems with multiple entities, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume 18, Number 6, Page 633
235. Weinstein R., Snoby, R. 2007. Advances in dry jigging improves coal quality. *Mining Engineering*, 59(1), 29-34.
236. Wheelock, T.D. Markuszewski, R., 1984. Coal preparation and cleaning. In: *The Science and Technology of Coal and Coal Utilization*, Edited by Cooper B. R., Ellingson W. A., Plenum Press, New York (pp. 47-123)
237. Wills B. A., 2016. *Mineral Processing Technology*, 8-th edition, Butterworth Press
238. Witteveen H.J., Dalmijn W. L. Van der Valk, H., 1991. The porosity distribution in a jig. *Preprints XVII IMPC, Dresden*, 3, pp.9-20.
239. Witteveen, H. J. 1995. The response of a uniform jig bed in terms of the porosity distribution, *Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology*.
240. Woollacott L.C., Bwalya M., Mabokela L., 2015. A validation study of the King stratification model. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(2), pp.93-101.
241. Woollacott, L. C., 2018. On the size dependence of the King stratification index, *Minerals Engineering* 124 (2018) 86–97
242. *World Energy Resources: Coal*, World Energy Council 2013
243. Xia W., Xie G., Peng Y., 2015. Recent advances in beneficiation for low rank coals, *Powder Technology* 277, 206–221
244. Xia Y. K. Peng F. F., 2007. Numerical simulation of behavior of fine coal in oscillating flows. *Minerals engineering*, 20(2), pp.113-123.

245. Xia Y., Felicia F. Peng F.F., Wolfe W., 2007. CFD simulation of fine coal segregation and stratification in jigs, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 82, Issue 3, Pages 164-176.
246. Yager, R.R. and Zadeh, L.A. eds., 2012. *An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems*. Springer Science & Business Media.
247. Ya-Li K., Jin-Wu Z., Li W., Chao Y., 2008. Laws of motion of particles in a jiggling process, *Journal of China University of Mining & Technology* 18, 0575–0579
248. Yaqun H., Shan L., Maixi L., Yali K. Huaiyu L., 2002. A profit-oriented expert system for coal washery optimization. *Coal Preparation*, 22(2), pp.93-107.
249. Yin, X., He, Z., Niu, Z., Li, Z. S. (2018). A hybrid intelligent optimization approach to improving quality for serial multistage and multi-response coal preparation production systems. *Journal of manufacturing systems*, 47, 199-216.
250. Yordanova S., Tsekova R., Tabakova B., Mladenov V., 2007. MATLAB Real-Time Two-Level Fuzzy Control of Nonlinear Plant, *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on SYSTEMS*, Agios Nikolaos, Crete Island, Greece, July 23-25
251. Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), pp.338-353.
252. Zadeh, L.A., 1968. Fuzzy algorithms. *Information and control*, 12(2), pp.94-102.
253. Zadeh, L.A., 1971. Quantitative fuzzy semantics. *Information sciences*, 3(2), pp.159-176.
254. Zadeh, L.A., 1973. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic*, 3, pp.28-44.
255. Zadeh, L.A., 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3), pp.199-249.
256. Zadeh, L.A., 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—II. *Information sciences*, 8(4), pp. 301-357.
257. Zadeh, L.A., 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III. *Information sciences*, 9(1), pp. 43-80.
258. Zadeh, L.A., 1984. Making computers think like people [fuzzy set theory]. *IEEE spectrum*, 21(8), pp.26-32.
259. Zadeh, L.A., 1992. Knowledge representation in fuzzy logic. In *An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems* (pp. 1-25). Springer US.
260. Zadeh, L.A., 1996. Towards a theory of fuzzy systems. *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers by Lotfi A. Zadeh*, pp.83-104.
261. Ze-lin, Z., Jian-guo, Y., Yu-ling, W., Wen-Cheng, X. and Xiang-yang, L., 2011. A study on fast predicting the washability curve of coal. *Procedia Environmental Sciences*, 11, pp.1580-1584.
262. Zheng, L., Yan, J. 2013. Thermal coal utilization. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation* (pp. 237-266).
263. Zilouchian A., Jamshidi M., 2001. *Intelligent control systems using soft computing methodologies*, CRC Press IMAM
264. Zimmermann, H. J., 1987. *Fuzzy sets, decision making, and expert systems*. Springer Science & Business Media.
265. Zimmermann, H. J., 2006. *Fuzzy set theory—and its applications*. Springer Science & Business Media.

8. 1. INTERNET IZVORI

<http://www-rohan.sdsu.edu/doc/matlab/toolbox/fuzzy/fuzzytu6.html>

<http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall07/cos436/HIDDEN/Knapp/fuzzy004.htm>

https://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_control_system

<http://www.mathworks.com/help/fuzzy/types-of-fuzzy-inference-systems.html>

BIOGRAFIJA AUTORA

Ruzmir Avdić je rođen 10. 09. 1976. u Tuzli. Završio je srednju elektrotehničku školu u Tuzli. Za vrijeme studija na Rudarsko-geološko-građevinskom fakultetu u Tuzli pokazivao interes za naučnim angažmanom i aktivno se uključio u više naučno-istraživačkih i studentskih projekata. Neki od naučnih skupova na kojima je učestvovao još za vrijeme studija:

- svjetski rudarski simpozij "Podgrađivanje podzemnih prostorija sidrenjem", Aachen, Njemačka 2001. godine
- naučni skup "Ekološka zaštita u rudarstvu", Miskolc, Mađarska, 2003. godine
- razvoj programa akademske saradnje Njemačke vlade i Jugoistočne Europe, Erlangen, Njemačka, 2005. godine.

Kao stipendista DAAD (*Deutscher Akademischer Austausch Dienst*), u svrhu izrade diplomskog rada godine 2004. boravio tri mjeseca na RWTH Tehničkom Univerzitetu (*Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule*) u Aachenu, Njemačka.

Diplomski rad odbranio 2005. godine i stekao titulu Diplomirani inženjer rudarstva.

Postdiplomski studij upisao akademske 2006/2007. Magistarski rad pod nazivom: "*Uloga tehnološkog procesa oplemenjivanja uglja na separaciji RMU "Đurđevik" u lancu onečišćivača slivnog područja rijeke spreče*" pod mentorstvom prof. dr. Miroslava Petrovića odbranio 2010. godine završio sa prosječnom ocjenom 9,7.

Više godina zaredom angažovan kao vanjski saradnik na Rudarsko-geološko-građevinskom fakultetu u Tuzli, tačnije na užoj naučnoj oblasti "Priprema mineralnih sirovina, materijali, transport i izvoz u rudarstvu" na predmetima: Priprema mineralnih sirovina, Tehnologija tehničkih materijala, Građevinski materijali, Hidraulički i pneumatski transport i Transport i izvoz. Auditorne i laboratorijske vježbe izvodio na rudarskom, geološkom, građevinskom i odsjeku sigurnost i pomoć.

Stručni ispit za samostalno tehničko rukovođenje u rudarstvu položio 25. 7. 2012. godine.

Kao smjenski inženjer radio u Rudniku soli "Tuzla, na ležištu "Tetima".

Bio član Organizacionog odbora XIV Balkanskog kongresa o pripremi mineralnih sirovina održanog u Tuzli juna 2011 godine. Takođe, obavljao dužnost sekretara redakcije publikacije "Proceedings of the XIV Balkan Mineral Processing Congress".

Više od 20 godina veoma uspješno se bavi informacionim tehnologijama i za to vrijeme stekao je iskustvo u radu sa opštim i specijaliziranim inženjerskim softverima, izradi i upravljanju bazama podataka, statističkoj obradi podataka i programiranju. Odlično govori engleski, služi se njemačkim i ruskim jezikom.

Izjava 1.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem
da je doktorska disertacija

Naslov rada

''Modeliranje gravitacijske koncentracije uglja primjenom Fuzzy logike''

Naslov rada na engleskom jeziku

''Modeling the gravitational concentration of coal by using Fuzzy logic''

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da doktorska disertacija, u cjelini ili u dijelovima, nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Banjoj Luci 12.07.2019. g.

Potpis doktoranta



Izjava 2.

Izjava kojom se ovlašćuje Univerzitet u Banjoj Luci
da doktorsku disertaciju učini javno dostupnom

Ovlašćujem Univerzitet u Banjoj Luci da moju doktorsku disertaciju pod naslovom

''Modeliranje gravitacijske koncentracije uglja primjenom Fuzzy logike''

koja je moje autorsko djelo, učini javno dostupnom.

Doktorsku disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

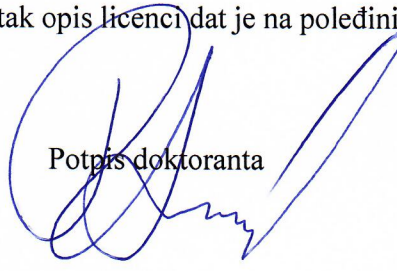
Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u digitalni repozitorijum Univerziteta u Banjoj Luci mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

U Banjoj Luci 12.07.2019. g.

Potpis doktoranta



Izjava 3.

Izjava o identičnosti štampane i elektronske verzije
doktorske disertacije

Ime i prezime autora Ruzmir Avdić

Naslov rada Modeliranje gravitacijske koncentracije uglja primjenom Fuzzy logike

Mentor dr. sc. Igor Miljanović, redovni profesor, Rudarsko-geološki fakultet,
Univerzitet u Beogradu

Izjavljujem da je štampana verzija moje doktorske disertacije identična elektronskoj verziji koju sam predao za digitalni repozitorijum Univerziteta u Banjoj Luci.

U Banjoj Luci 12.07.2019.g. Potpis doktoranta

