

**UNIVERZITET U BEOGRADU**  
**RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET**

Saša S. Stojadinović

**SPREGA NEURONSKIH MREŽA I NUMERIČKIH  
MODELA ZA DEFINISANJE SIGURNIH  
RASTOJANJA KOD RAZLETANJA KOMADA PRI  
MINIRANJU**

Doktorska disertacija

Beograd, 2013

**UNIVERZITET U BEOGRADU**  
**RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET**

Saša S. Stojadinović

**SPREGA NEURONSKIH MREŽA I NUMERIČKIH  
MODELA ZA DEFINISANJE SIGURNIH  
RASTOJANJA KOD RAZLETANJA KOMADA PRI  
MINIRANJU**

Doktorska disertacija

Beograd, 2013

**UNIVERSITY OF BELGRADE**  
**FACULTY FOR MINING AND GEOLOGY**

Saša S. Stojadinović

**COUPLED NEURAL NETWORKS AND NUMERIC  
MODELS FOR FLYROCK SAFE DISTANCE  
DEFINITION**

Doctoral dissertation

Belgrade, 2013

---

**Mentor:**

Prof. dr Nikola Lilić, Zaštita na radu i zaštita životne sredine,  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – Geološki fakultet

**Članovi komisije:**

Prof. dr Ivan Obradović, Matematika i informatika,  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – Geološki fakultet

Van. prof. dr Radoje Pantović, Rudarstvo i geologija,  
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Doc. dr Miodrag Denić, Rudarstvo i geologija,  
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

**Datum odbrane:**

\_\_\_ . \_\_\_ . 2013.

---

---

*Mojoj Porodici*

---

---

*The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not “Eureka!” but “That's funny...”*

*Isaac Asimov*

---

---

# SPREGA NEURONSKIH MREŽA I NUMERIČKIH MODELA ZA DEFINISANJE SIGURNIH RASTOJANJA KOD RAZLETANJA KOMADA PRI MINIRANJU

## REZIME

Doktorska disertacija sa navedenim naslovom prezentuje rezultate istraživanja problema razletanja komada pri miniranjima. Cilj istraživanja bio je kreiranje opšteg i univerzalno primenljivog modela za prognozu maksimalnih dometa razletelih komada i definisanje sigurnih rastojanja. Kombinacijom terenskih istraživanja, numeričkog modeliranja balističkih trajektorija razletelih komada i adaptivne prirode neuronskih mreža definisan je koncept neuro-numeričke sprege. Sprega je objedinila univerzalnu primenljivost numeričkog modela i sposobnost prilagođavanja neuronskih mreža lokalnim uslovima u opšti model za prognozu maksimalnih dometa razletelih komada. Za potrebe sprege, a kao integralni deo disertacije, razvijen je metod za određivanje koeficijenta otpora vazduha nepravilnih komada baziran na principu terminalne brzine. Verifikacijom pojedinačnih modula sprege, Klasifikatora, Prediktora i Numerika izvršena je i verifikacija sprege kao sistema i dokazana njena sposobnost da pouzdano i precizno odgovori na različita pitanja vezana za problem razletanja komada.

***Ključne reči:** razletanje, miniranje, domet, sigurna rastojanja, numerički modeli, neuronske mreže, sprega, verifikacija*

**Naučna oblast:** Rudarsko inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Zaštita životne sredine i zaštita na radu

**UDK:** 510.644:519.87:550.34:614.83:622.235:624.042.7:681.3(043.3)

---

---

## **COUPLED NEURAL NETWORKS AND NUMERIC MODELS FOR FLYROCK SAFE DISTANCE DEFINITION**

### **ABSTRACT**

Doctoral dissertation with a given title presents the results of the research on blasting flyrock problem. Creation of a general and universally applicable model for the prediction of maximum flyrock throw and safe distance definition was the final aim of the research. The combination of field investigation and research, numerical modeling of ballistic trajectories of flyrock fragments and adaptive nature of neural networks defined the concept of neuro-numerical couple. The couple merged the universal applicability of the numeric model and the ability of neural networks to adapt to local conditions into a general model for the prediction of maximum flyrock throw. As an integral part of dissertation, a model for determination of drag coefficient of irregular shapes, based upon a terminal velocity principle, was developed for the purpose of the neuro-numeric couple. Verification of the couple as a system was performed by the verification of its individual modules, Classifier, Predictor and Numeric. The verification proved that neuro-numeric couple is capable to reliably and precisely provide answer to various questions related to flyrock problem

***Key words:** flyrock, blasting, throw, safe distance, numeric models, neural networks, couple, verification.*

**Scientific field:** Mining engineering

**Narrow scientific field:** Environmental engineering and safety engineering

**UDC:** 510.644:519.87:550.34:614.83:622.235:624.042.7:681.3(043.3)

---



---

## SADRŽAJ

1. Uvodna razmatranja	1
1.1 Uvod	1
1.2 Predmet i cilj istraživanja	1
1.3 Polazne hipoteze	3
1.4 Primjenjene metode istraživanja	4
2. Razletanje komada pri miniranjima na površinskim kopovima	6
2.1 Pojam razletanja	6
2.2 Tipovi razletanja	7
2.3 Uticajni faktori	9
2.3.1 Tehnički faktori	9
2.3.2 Prirodni faktori	11
2.4 Zakonska regulativa u oblasti razletanja komada	13
2.4.1 Nacionalna zakonska regulativa	13
2.4.2 Inostrana zakonska regulativa	14
3. Pregled i analiza dosadašnjih istraživanja	19
4. Osnovne postavke neuro-numeričke sprege i teorijska osnova	32
4.1 Cilj formiranja neuro-numeričke sprege	32
4.2 Teorijske osnove numeričkog modela	35
4.2.1 Fizika leta komada odminirane mase	36
4.2.2 Formiranje i rešavanje diferencijalnih balističkih jednačina	39
4.2.2.1 Numeričko rešenje	39
4.2.2.2 Runge Kutta algoritam IV reda	41
4.2.3 Faktori koji utiču na domet komada razletele mase	44

---

4.2.3.1 Dimenzije komada	45
4.2.3.2 Početni ugao izletanja	47
4.2.3.3 Koeficijent otpora vazduha	47
4.2.3.4 Početna brzina	48
4.3 Teorijske osnove neuronskih mreža	50
4.3.1 Veštačke neuronske mreže	50
4.3.2 Arhitektura primenjene neuronske mreže	55
4.3.2.1 Ulazno – izlazni podaci	57
5. Terenska istraživanja	59
5.1 Opis i specifikacija podataka	59
5.2 Osnovni podaci o miniranjima i radnoj sredini	62
5.2.1 Prečnik bušotine	62
5.2.2 Dužina bušotine	62
5.2.3 Nagib bušotine	62
5.2.4 Dužina čepa	63
5.2.5 Linija najmanjeg otpora	63
5.2.6 Rastojanje između bušotina	64
5.2.7 Interval usporenja	64
5.2.8 Broj slobodnih površina	64
5.2.9 Tip eksploziva	66
5.2.10 Masa eksplozivnog punjenja	66
5.2.11 Karakteristike radne sredine	66
5.2.12 Početna brzina razletanja	68
5.3 Određivanje početne brzine komada	68
5.3.1 Reversni balistički pristup	68

---

---

5.3.2	Određivanje početne brzine sa ultra-brzih snimaka	77
5.3.2.1	Određivanje razmere	78
5.3.2.1	Obrada snimaka i rezultati obrade	81
5.3.2.1.1	Obrada snimaka	81
5.3.2.1.2	Rezultati obrade snimaka	84
5.4	Određivanje koeficijenta otpora vazduha	85
5.4.1	Osnovni koncept određivanja koeficijenta otpora vazduha	85
5.4.2	Obrada podataka sa terena	87
5.4.3	Rezultati obrade podataka i diskusija	92
5.5	Ugao izletanja razletelih komada	94
6.	Kreiranje i obuka adaptivnih sistema	95
6.1	Definisanje dozvoljene greške	95
6.2	Arhitektura neuronskih mreža i rezultati obuke mreže	97
6.2.1	Prethodna obrada setova ulazno-izlaznih podataka	97
6.2.2	Arhitektura mreže sa osnovnim setom ulaznih podataka	100
6.2.3	Arhitektura mreže sa proširenim setom ulaznih podataka	103
6.2.4	Kompleksna arhitektura mreže	108
6.2.5	Priprema sistema za dalje korišćenje	110
7.	Implementacija i verifikacija sprege neuronskih mreža i numeričkih modela	113
7.1	Verifikacija sprege	118
7.1	Definisanje sigurnog rastojanja	122
8.	Zaključak	127
	Literatura	130

---

## **POPIS SLIKA DATIH U TEKSTU**

Slika 2.1 – Mehanizmi razletanja komada odminirane mase _____	8
Slika 2.2 – Kombinacija prirodnih i tehničkih faktora kao uzrok pojave razletanja komada odminirane mase _____	12
Slika 3.1 – Maksimalni domet razletelih komada _____	23
Slika 3.2 – Zavisnost početne brzine razletelih komada od specifične potrošnje eksploziva _____	24
Slika 3.3 – Zavisnost maksimalnog dometa razletelih komada od specifične potrošnje eksploziva _____	24
Slika 3.4 – Zavisnost početne brzine razletelih komada od redukovane linije najmanjeg otpora _____	25
Slika 3.4 – Pozicije udara razletelih komada o tlo (1000 simulacija, razletanje iz čela etaže) _____	27
Slika 3.5 – Pozicije udara razletelih komada o tlo (1000 simulacija, formiranje kratera) _____	28
Slika 3.6 – Polazne postavke pri formiranju kratera _____	30
Slika 4.1 – Osnovne sile koje u toku leta deluju na komad odminirane stenske mase _____	37
Slika 4.2 – Horizontalne i vertikalne projekcije brzine i otpora vazduha _____	40
Slika 4.3 – Tangencijalne i normalne komponente sila koje deluju na razleteli komad _____	42
Slika 4.4 – Zavisnost dometa razletelih komada od njihove veličine _____	44
Slika 4.5 – Zavisnost dometa razletelih komada od početnog ugla izletanja _____	47
Slika 4.6 – Uticaj početne brzine na domet razletelih komada _____	49
Slika 4.7 – Izgled i delovi biološkog neurona _____	51
Slika 4.8 – Veštački neuron _____	51

---

Slika 4.9 – Grafički prikazi nekih od aktivacionih funkcija	53
Slika 4.10 – Jednoslojna arhitektura mreže	53
Slika 4.11 – Višeslojna arhitektura mreže	54
Slika 4.12 – Definisavanje intervala poverenja	57
Slika 4.13 – Osnovna arhitektura primenjenih neuronskih mreža	58
Slika 5.1 – Geodetski snimak minske serije iz dnevnika miniranja	61
Slika 5.2 – Primarne (I) i sekundarne (II) slobodne površine pri rušenju stenske mase miniranjem	65
Slika 5.3 – Minsko polje sa položajem minskih serija	69
Slika 5.4 – Pogled na oštećene objekte sa etaže kamenoloma, razleteli komadi odminirane mase pronađeni na terenu i detalj oštećenja na objektu	70
Slika 5.5 – Trajektorije razletelih komada odminirane mase definisane približnim numeričkim rešenjem diferencijalnih balističkih jednačina	75
Slika 5.6 – Trajektorije razletelih komada odminirane mase definisane rešenjem diferencijalnih balističkih jednačina primenom RK-4 algoritma	75
Slika 5.7 – Zona ugrožena razletanjem komada odminirane mase sa P.K. Kamenica	76
Slika 5.8 – Određivanje rastojanja kamere od minske serije	78
Slika 5.9 – Osnovni princip fotografije i određivanje pseudo-žižne daljine	80
Slika 5.10 – Određivanje pređenog puta razletelog komada	80
Slika 5.11 – Određivanje faktora razmere	82
Slika 5.12 – Određivanje pređenog puta	83
Slika 5.13 – Udarni talas kao posledica probijanja zvučnog zida, sukcesivni snimci	84
Slika 5.14 – Sile koje deluju na slobodno padajući komad stenske mase	86

---

---

Slika 5.15 – Osnovni koncept određivanja razmere	88
Slika 5.16 – Primer određivanja razmere	90
Slika 5.17 – Proračun pređenih puteva	91
Slika 5.18 – Određivanje pređenih puteva u CAD programu	92
Slika 5.19 – Određivanje uglova razletanja	94
Slika 6.1 – Izgled matrice zabune (confusion matrix)	96
Slika 6.2 – Transformacija tekstualnih podataka o razletanju u numeričke	98
Slika 6.3 – Transformacija tekstualnih podataka o tipu eksploziva u numeričke	98
Slika 6.4 – Histogram intenziteta korelativne veze ulaznih i izlaznih parametara	99
Slika 6.5 – Arhitektura klasifikatora sa osnovnim setom ulaznih podataka	100
Slika 6.6 – Arhitektura prediktora sa osnovnim setom ulaznih podataka	101
Slika 6.7 – Grafički prikaz performansi prediktora sa osnovnim setom ulaznih podataka, interval poverenja od 95%	102
Slika 6.8 – Grafički prikaz performansi prediktora sa osnovnim setom ulaznih podataka, odstupanje od željene vrednosti +/- 10%	103
Slika 6.9 – Arhitektura klasifikatora sa proširenim setom podataka	105
Slika 6.10 – Arhitektura prediktora sa proširenim setom podataka	106
Slika 6.11 – Performanse klasifikatora sa proširenim setom ulaznih podataka, matrica zabune	107
Slika 6.12 – Grafički prikaz performansi prediktora sa proširenim setom ulaznih podataka, interval poverenja od 95%	107
Slika 6.13 – Grafički prikaz performansi prediktora sa proširenim setom ulaznih podataka, odstupanje od željene vrednosti +/- 10%	108

---

---

Slika 6.14 – Kompleksna arhitektura klasifikatora	109
Slika 6.15 – Kompleksna arhitektura prediktora	109
Slika 6.16 – Izgled grafičkog korisničkog interfejsa klasifikatora sa prikazom rezultata	111
Slika 6.17 – Izgled grafičkog korisničkog interfejsa Prediktora sa prikazom rezultata	112
Slika 7.1 – Šematski prikaz neuro-numeričke sprege	113
Slika 7.2 – Numerik razvijen u MS Excel-u	114
Slika 7.3 – Unos podataka u Numerik	115
Slika 7.4 – Proračun funkcija RK-4 algoritma	115
Slika 7.5 – Matrica rezultata Numerik-a	116
Slika 7.6 – Tabelarni prikaz rezultata i grafički prikaz trajektorije posmatranog komada	116
Slika 7.7 – Grafički prikaz rezultata Numerik-a ( $Y(t)$ , $X(t)$ , $\theta(t)$ i $v(t)$ )	117
Slika 7.8 – Grafička interpretacija verifikacije Klasifikatora	120
Slika 7.9 – Grafička interpretacija verifikacije Prediktora	121
Slika 7.10 – Zavisnost razlike u dometima od početne brzine	125

---

## **POPIS TABELA DATIH U TEKSTU**

Tabela 2.1 – Sigurna rastojanja pri primeni ANFO/Emulzionih smeša (1,2 g/cm <sup>3</sup> )	17
Tabela 2.2 – Sigurna rastojanja pri primeni ANFO	18
Tabela 5.1 – Pregled podataka o minskim serijama i karakteristikama radne sredine	61
Tabela 5.2 – Karakteristike primenjenih eksploziva	68
Tabela 5.3 – Fizičko-mehaničke karakteristike stenske mase	69
Tabela 5.4 – Karakteristike primenjenih eksploziva	71
Tabela 5.5 – Prognoza početne brzine i dometa prema literaturnim preporukama	73
Tabela 5.6 – Početni parametri razletelih komada	75
Tabela 5.7 – Podaci za proračun koeficijenta otpora vazduha	96
Tabela 6.1 – Performanse klasifikatora i prediktora sa osnovnim setom ulaznih podataka	104
Tabela 6.2 – Performanse klasifikatora i prediktora sa proširenim setom ulaznih podataka po varijantama	109
Tabela 6.3 – Performanse klasifikatora i prediktora sa proširenim setom ulaznih podataka i sa složenom arhitekturom po varijantama	113
Tabela 7.1 – Početni parametri razletelih komada	125
Tabela 7.2 – Razlika u dometima razletelih komada pri uvećanju brzine od 10%	126



# 1. UVODNA RAZMATRANJA

## 1.1 Uvod

Poslednjih pedeset godina je obeleženo globalnim trendom ekonomskog razvoja i industrijalizacije. Rezultat je porast potražnje za robom kako u razvijenim tako i u nerazvijenim državama. Posebno, potražnja za (baznim) metalima koji su osnova u građevinskoj, energetskejoj i mašinskoj industriji, beleži nagli rast. Primera radi, svetska proizvodnja bakra je konstantno rasla u poslednjih trideset godina (*USGS, 2009*) do 16,2 miliona tona bakra proizvedenih u 2010. (*USGS, 2011*).

Da bi se premostio jaz između ponude i potražnje proizvodnja rude, posebno na površinskim kopovima, je takođe rasla. Kopovi postaju sve veći, ostvaruju se sve veći kapaciteti a sve je praćeno ubrzanim tehnološkim razvojem u rudarstvu. Međutim, uprkos razvoju tehnologije, u čvrstim stenama bušačko minerski radovi i dalje imaju ogroman udeo u procesu odvajanja stenske mase od masiva.

Takođe uprkos napretku u tehnologijama eksploziva i miniranja, negativni efekti miniranja i dalje predstavljaju ozbiljan problem pri, kako površinskim tako i jamskim, minerskim operacijama. Seizmički efekti miniranja mogu ugroziti samo okolne objekte i rezultovati u materijalnoj šteti uz eventualni psihološki efekat na ljude. Sa druge strane, razletanje komada odminirane mase ima potencijal da ugrozi mehanizaciju, okolne objekte i ljudstvo. S obzirom na to da razleteli komadi odminirane mase mogu izazvati ozbiljne povrede, čak i fatalne, razletanje komada predstavlja najveću sigurnosnu pretnju pri miniranju.

## 1.2 Predmet i cilj istraživanja

Predmet ovog istraživanja je razletanje komada pri miniranjima i ugrožavanje ljudstva, mehanizacije i objekata. Povod za istraživanje i svakako njegov početak vezuju se za mnoge slučajeve ugrožavanja okoline razletelim komadima i konkretno za

incident sa masovnim razletanjem komada na PK Kamenica kod Kraljeva 2007. godine. U toku istrage i utvrđivanja uzroka razletanja došlo se do zaključka da parametri razletanja, pre svega dometi razletelih komada, dobijeni na osnovu preporuka iz literaturnih izvora ne odgovaraju realnoj situaciji na terenu. Naime, maksimalni dometi komada dobijeni računskim putem bili su i do deset puta manji od dometa razletelih komada na terenu. Detaljnijom analizom literaturnih preporuka, čak opšte prihvaćenih, došlo se do zaključka da je većina njih primenljiva u specifičnim slučajevima i da njihova primena može dovesti do ozbiljnih grešaka. Uprkos činjenici da se problematikom razletanja bavio veliki broj istraživača i da se istraživanja sprovode dugi niz godina, ne postoji opšte primenljiv prognozni model nezavistan od lokacije i uslova primene. To saznanje ukazalo je na neophodnost novog načina razmišljanja i novog pristupa problemu.

Sa inženjerskog stanovišta problem razletanja komada pri miniranju se svodi na dobijanja odgovora na dva pitanja:

1. Da li će u konkretnim uslovima neke minske serije doći do pojave razletanja?
2. Koliko je minimalno rastojanje na koje treba povući ljudstvo i mehanizaciju kako ne bi bili ugroženi razletelim komadima odminirane mase?

Cilj istraživanja je upravo dobijanje odgovora na ova dva pitanja. Odgovor na prvo pitanje je blago rečeno problematičan zbog nedovoljnog poznavanja uticaja faktora radne sredine. Definisanje sigurnih rastojanja, to jest definisanje maksimalnog dometa generalno je lako rešivo primenom numeričkih modela u vidu balističkih diferencijalnih jednačina. Problem se svakako javlja u pravom izboru ulaznih podataka, ponajviše pravilnoj i preciznoj prognozi početne brzine razletelih komada. S obzirom na rastuću primenu neuronskih mreža došlo se na ideju da se njihove sposobnosti učenja i mapiranja iskoriste i u rešavanju problema razletanja komada.

Polazeći od osnovne hipoteze da neuronske mreže, za date početne uslove, mogu predvideti pojavu razletanja došlo se do ideje sprege neuronskih mreža i

numeričkih modela za definisanje sigurnih rastojanja. Izlazni rezultat mreže u vidu prognoze pojave razletanja komada i prognozirane vrednosti početnih brzina razletelih komada predstavlja ulaz u numerički model. Numeričkim modelom to jest formiranjem i rešavanjem balističkih diferencijalnih jednačina leta razletelih komada definiše se njihov maksimalni domet i time i minimalno sigurno rastojanje. Naj taj način, to jest primenom pomenute sprege, moguće je pouzdano prognozirati pojavu razletanja pri miniranju, početne brzine razletelih komada i njihov maksimalni domet pa time i definisati minimalno sigurno rastojanje. Adaptivna priroda neuronskih mreža i njihova sposobnost učenja i prilagođavanja ne zavise od uslova u kojima se mreže primenjuju. Takođe, balističke jednačine su univerzalne jer su bazirane na osnovnim principima fizike koji su svuda identični. Logično je zaključiti da i sprega ova dva sistema neće biti zavisna od lokacije i specifičnih uslova i da će biti opšte i univerzalno primenljiva. Upravo ta univerzalna primenljivost je preduslov za definisanje pouzdanog modela ili metode za prognozu dometa razletelih komada i definisanje sigurnih rastojanja što je i krajnji cilj ovog istraživanja.

### **1.3 Polazne hipoteze**

Hipoteza istraživanja je u stvari skup osnovnih postavki do kojih se došlo analizom dosadašnjih istraživanja u oblasti razletanja komada pri miniranju i na osnovu zapažanja na terenu. Ove postavke, taksativno navedene, glase:

1. Neuronske mreže zbog svoje adaptivne prirode, kroz proces obuke, mogu definisati korelativne veze i obrasce ponašanja ulaznih varijabli i nadomestiti nedostatke koji proističu iz nepotpunog poznavanja uslova koji dovode do razletanja.
2. Neuronske mreže mogu, za konkretne uslove date minske serije, prognozirati pojavu razletanja komada odminirane mase i početnu brzinu razletelih komada.
3. Uspostavljanje direktne korelativne veze parametara miniranja i radne sredine sa maksimalnim dometom komada pri razletanju je pogrešno.

Razlog je činjenica da kad jednom započnu let trajektoriju komada i time i domet definišu sile propulzije i sile otpora na koje se ne može uticati.

4. Maksimalni domet najpreciznije se određuje formiranjem i rešavanjem diferencijalnih balističkih jednačina.
5. Ulazni parametri balističke jednačine, to jest početni uslovi su početna brzina komada i ugao lansiranja.
6. Početna brzina komada može se dovesti u vezu i pod uticajem je parametara miniranja i radne sredine.
7. Rešavanjem diferencijalne balističke jednačine moguće je prognozirati domet ili je, iz poznatog dometa i dimenzija komada, moguće doći do početnih uslova i utvrditi uzroke razletanja.
8. Komadi, bez obzira na dimenzije, imaju istu početnu brzinu. Do diferencijacije po brzinama dolazi u prvim trenucima leta usled naglog opadanja brzine.
9. Komadi iz prvih faza razletanja imaju veću početnu brzinu od komada iz kasnijih faza. Za analize je merodavna maksimalna brzina.

Skup ovih polaznih postavki sublimiran je u izraz polazne hipoteze koja glasi:

Minimalno sigurno rastojanje od razletelih komada pri miniranju može se pouzdano definisati primenom sprege veštačkih neuronskih mreža i numeričkih modela za prognozu maksimalnog dometa razletelih komada. Pri tome je primena neuro-numeričke sprege nezavisna od lokacije primene i specifičnih uslova koji na toj lokaciji vladaju. Iz tog razloga se neuro-numerička sprega može smatrati univerzalnim i opšte primenljivim modelom za prognozu dometa razletelih komada i definisanje sigurnih rastojanja.

## **1.4 Primenjene metode istraživanja**

Na početku istraživanja izvršeno je pretraživanje relevantnih servisa u cilju prikupljanja literaturnih izvora o prethodnim istraživanjima problema razletanja komada pri miniranju. Takođe, pretraživani su i izvori iz domena teorije neuronskih mreža kao i domena primene neuronskih mreža u geo naukama i rudarstvu. Pretraživanje je osim

stručnih i naučnih radova objavljenih u časopisima ili saopštenih na konferencijama obuhvatilo i stručne izveštaje, analize incidenata, preporuke i zakonsku regulativu.

Po prikupljanju literaturnih izvora izvršena je pre svega njihova sistematizacija i klasifikacija po oblasti i filtriranje po relevantnosti. Nakon toga izvršena je analiza literaturnih izvora sa kritičkim osvrtom na nedostatke predloženih modela i pristupa problemu razletanja.

Osnova istraživanja bila su terenska istraživanja sprovedena na površinskim kopovima u sklopu RTB Bor – Grupe. Terenska istraživanja podrazumevala su praćenje i snimanje miniranja ultra-brzom kamerom i obradu video snimaka u cilju dobijanja podataka o parametrima razletanja. Uporedo sa terenskim istraživanjima vršeno je numeričko modeliranje trajektorija razletelih komada kroz analizu sila koje deluju na razleteli komad u toku leta. Rezultat analize bile su diferencijalne balističke jednačine a metode njihovog rešavanja implementirane u softversko rešenje prerasle su u numerički modul sprege.

Podaci o parametrima razletanja postali su osnova za kreiranje neuronskih mreža. Kreirane su dve neuronske mreže, jedna za predikciju pojave razletanja a jedna za prognozu početne brzine razletelih komada. Sprovedena je odgovarajuća procedura obuke neuronskih mreža i validacije njihovih performansi u više varijanti osnovnih arhitektura i izabrane varijante sa najvećom pouzdanošću.

Konačno, izvršena je verifikacija pojedinih modula neuro-numeričke sprege primenom nezavisnog skupa podataka kako bi se potvrdila njihova pouzdanost i izvršila generalizacija i uopštavanje predloženog rešenja.

## 2. RAZLETANJE KOMADA PRI MINIRANJIMA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA

Cilj miniranja je da se stenska masa odvoji od masiva, usitni do određene potrebne granulacije i odbaci tako da se formira gomila odminiranog materijala određenog, predefinisiranog, oblika. Naravno, moguće je odbacivanje komada na udaljenosti van gomile. Takvo odbacivanje se smatra razletanjem i projektom miniranja se definiše zona dometa razletelih komada. U nekim slučajevima, komadi odminirane mase mogu biti odbačeni na udaljenosti koje su veće od predviđenih i projektovanih. U tim slučajevima govorimo o prekomernom razletanju (u zapadnoj literaturi se za ovu pojavu koristi termin „wild flyrock“ – divlje razletanje). Srpska regulativa (*Pravilnik o tehničkim normativima pri rukovanju eksplozivnim sredstvima i miniranju u rudarstvu. Sl. List SFRJ, 1988*) predviđa određivanje sigurnosne zone odnosno udaljenosti za zaštitu od odbačenih komada minirane mase. Za razliku od regulativa u drugim državama, naša regulativa ne propisuje ni metodologiju određivanja sigurnosne zone niti minimalna sigurna rastojanja.

### 2.1 Pojam razletanja

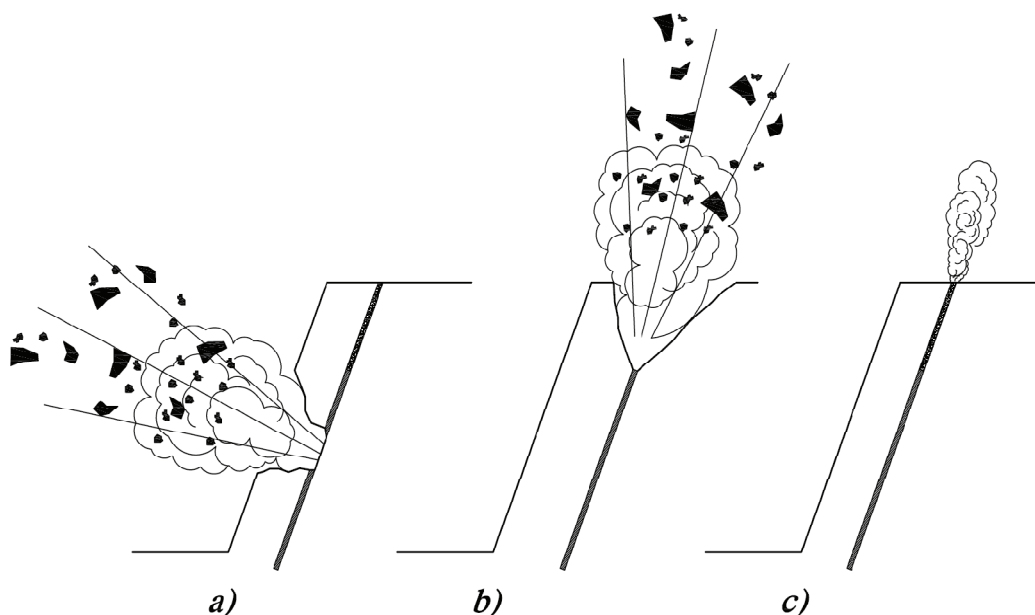
Terminologija koja se, vezano za razletanje komada pri miniranju, pojavljuje u stručnoj literaturi nije u potpunosti unifikovana tako da u startu treba definisati termine koji će biti korišćeni u daljem tekstu. Najbolju definiciju osnovnih pojmova kod razletanja možda daje Little (*Little, 2007*) pa je ona iz tog razloga i ovde usvojena.

- **Odbacivanje** – planirano pokretanje odminirane stenske mase u cilju formiranja potrebnog i željenog oblika gomile tako da odminirani materijal ostane u okviru zone miniranja.

- **Razletanje** – neželjeno odbacivanje komada odminirane mase van zone miniranja i gabarita gomile ali unutar projektovane sigurne (ekskluzione) zone. Ovaj vid razletanja, iako nepoželjan, je unutar predviđenih granica i ne predstavlja sigurnosnu pretnju.
- **Prekomerno razletanje** – Neočekivano i svakako neželjeno odbacivanje komada odminirane mase na udaljenosti dalje od onih definisanih sigurnom zonom. Predstavlja sigurnosnu pretnju po ljudstvo, mehanizaciju i objekte jer se, u opštem slučaju, ne preduzimaju nikakve preventivne mere van ekskluzione zone.
- **Razleteli komad** – Komad odminirane mase odbačen u vazduh i na udaljenost van gabarita gomile.
- **Balistička trajektorija** – Putanja kojom se razleteli komad kreće od trenutka izletanja do trenutka udara u tlo.
- **Početna brzina izletanja** – Maksimalna brzina sa kojom se razleteli komad odvaja od masiva i započinje let.
- **Ugao izletanja**– Ugao u odnosu na horizontalu pod kojim razleteli komad napušta masiv i započinje let.
- **Balistička diferencijalna jednačina** – diferencijalna jednačina koja opisuje dinamiku leta razletelog komada po balističkoj trajektoriji.

## **2.2 Tipovi razletanja**

Generalno, postoje tri mehanizma razletanja: izduvavanje čepa, formiranje kratera oko ušća bušotine i razletanje sa čela etaže (Slika 2.1). Četvrti, uslovni, tip je razletanje komada pri sekundarnom miniranju i ovde neće biti posebno razmatran.



**Slika 2.1** – Mehanizmi razletanja komada odminirane mase:  
a) razletanje sa čela etaže, b) formiranje kratera i c) izduvavanje čepa

**Formiranje kratera** je najčešće rezultat oslabljene zone čepa ili nedovoljne dužine čepa. Zona čepa se najčešće nalazi u sloju stenskog materijala koji je oslabljen i raspucan miniranjima na višoj etaži. U ovoj zoni se gasoviti produkti detonacije mogu infiltrirati u pukotinske sisteme i pratiti ih do slobodne površine što rezultuje formiranjem kratera oko ušća bušotine i razletanjem komada. U slučaju nedovoljne dužine čepa, samim tim nedovoljnog otpora po vertikali, dolazi do formiranja primarnog pukotinskog sistema pod dejstvom detonacionog talasa. Ovaj pukotinski sistem može doseći gornju površinu etaže. Infiltracijom gasovitih produkata detonacije ponovo dolazi do formiranja kratera na način koji je već opisan.

**Razletanje sa čela etaže** javlja se u slučajevima kada stub eksplozivnog punjenja preseca pukotinske sisteme ili oslabljene zone u masivu. Gasoviti produkti se infiltriraju u pukotinske sisteme prateći liniju najmanjeg otpora. Na taj način gasovi ističu u atmosferu i mogu saopštiti velike brzine komadima stenske mase. Do razletanja sa čela etaže takođe može doći i u slučajevima kada je usled greške u bušenju ili devijacije bušotine linija najmanjeg otpora prema čelu etaže smanjena.



**Izduvavanje čepa** je rezultat nedovoljne dužine čepa ili njegovog nepostojanja. Po detonaciji eksplozivnog punjenja nastali gasovi vrše pritisak na čep i u slučaju da je njegova dužina nedovoljna sile otpora nisu dovoljne da spreče isticanje gasova. Usled velikog pritiska gasova materijal čepa i okolni materijal bivaju „ispaljeni“ naviše analogno ispaljivanju zrna ili sačme iz puščane cevi. Otud i engleski termin „*rifling*“. U slučaju potpunog odsustva čepa nema otpora koji bi sprečili isticanje gasovitih produkata detonacije iz bušotine. Usled velikog pritiska i brzine isticanja, komadi stenskog materijala bivaju odvaljeni sa zidova bušotine i ispaljeni naviše.

## **2.3 Uticajni faktori**

Razletanje komada odminirane mase najčešće je rezultat nesklada između energije potrebne za usitnjavanje i odbacivanje stenske mase i energije primenjene u te svrhe. Do nesklada dolazi usled tehničkih i prirodnih faktora poput devijacije bušotina, nedovoljne linije najmanjeg otpora, nedovoljne dužine čepa, postojanja raspucalnih i oslabljenih zona u stenskoj masi itd. Dok se tehnički faktori mogu kontrolisati kroz precizno bušenje i kontrolu geometrije miniranja na prirodne faktore se najčešće ne može uticati.

### **2.3.1 Tehnički faktori**

Tehnički faktori od uticaja na pojavu razletanja su svi faktori koji su vezani za tehnološku fazu bušenja i miniranja. Do grešaka i ispoljavanja negativnog uticaja tehničkih faktora može doći u bilo kojoj fazi tehnološke operacije bušenja i miniranja, od projektovanja do iniciranja minske serije na terenu. Neadekvatna projektna dokumentacija, nepoštovanje projektne dokumentacije, nedovoljna ili neadekvatna obučenosť ljudstva, nemar, grube greške i ostalo su činioci koji mogu dovesti do grešaka i pojave razletanja.

Osnovni imperativ pri izvođenju bušačko minerskih radova je poštovanje projektne dokumentacije u smislu preciznosti bušenja i projektovanih parametara minske serije. Neprecizno bušenje najčešće rezultuje povećanjem ili smanjenjem linije najmanjeg otpora. Premala linija najmanjeg otpora prema slobodnoj površini usloviće usmeravanje energije eksploziva u tom pravcu. Kako je otpor stenske mase smanjen, višak energije eksploziva ispoljiće se u vidu preteranih vazdušnih udara i prekomernim razletanjem. Sa druge strane, prevelika linija najmanjeg otpora usloviće usmeravanje energije eksploziva u pravcu manjeg otpora što je najčešće naviše, ka gornjoj etažnoj ravni. Energija eksploziva u manjoj meri će biti utrošena na usitnjavanje stenske mase dok će se ostatak ispoljiti u vidu pojačanih seizmičkih potresa i razletanjem iz kratera ili čepa.

Devijacija bušotine takođe može dovesti do smanjenja linije najmanjeg otpora i efekata opisanih iznad.

Neadekvatan materijal čepa ili nedovoljna dužina čepa pružiće nedovoljan otpor pritisku gasovitih produkata detonacije. U tom slučaju dolazi od popuštanja/loma čepa i izduvavanju gasovitih produkata iz bušotine u atmosferu. Gasovi potiskuju materijal čepa kao i komade stenske mase koji se odvaljuju sa zidova bušotine saopštavajući im velike brzine što rezultuje razletanjem. U ekstremnim slučajevima dolazi do loma stenske mase u zoni čepa i formiranja kratera i pojave odgovarajućeg razletanja.

Preterana masa eksplozivnog punjenja znači unošenje viška energije u odnosu na potrebnu. Višak energije eksploziva uzrokuje preterano usitnjavanje stenske mase i preterano odbacivanje odnosno razletanje.

Prevelika koncentracija eksploziva u pojedinim delovima eksplozivnog stuba može se javiti u kavernoznim stenskim sredinama. U takvim slučajevima rezultat je lokalno povećanje energije eksploziva i već opisani efekti. U ovakvim slučajevima karakteristična je pojava razletanja sa čela etaže.

Loše izabrani intervali usporenja ili loše izvedeno vezivanje minske serije mogu rezultovati u detonaciji eksplozivnih punjenja u stešnjenim uslovima. Usled

prevelikih otpora u drugim pravcima energija eksploziva se usmerava ka najbližoj slobodnoj površini, to jest gornjoj etažnoj ravni i zoni čepa. U tom slučaju dolazi do izduvavanja čepa ili formiranja kratera.

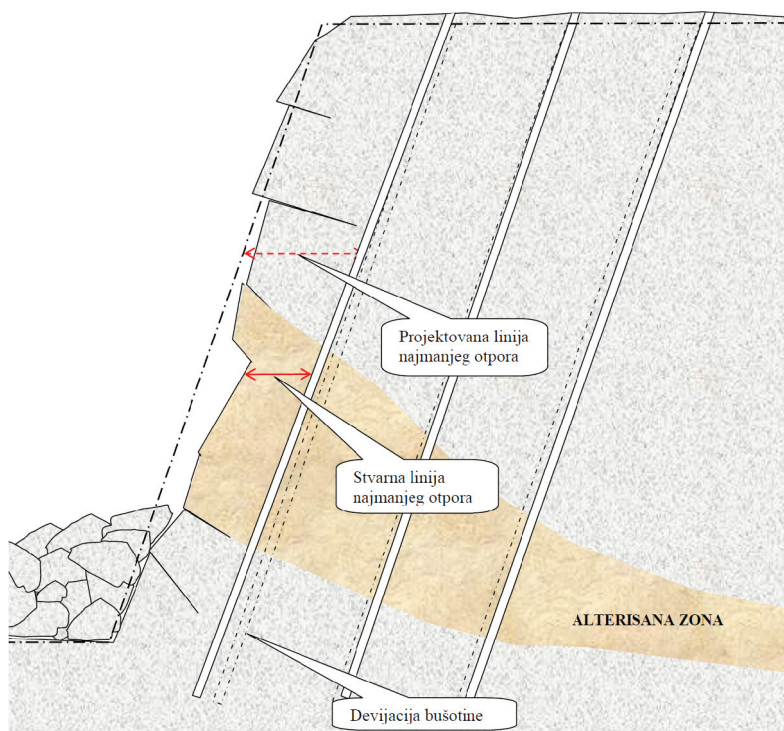
Analize incidenata sa razletanjem komada odminirane mase ukazuju da je u 80 – 90 % slučajeva uzrok razletanja bio ljudski faktor. Propusti u kontroli preciznosti bušenja, proveru stanja bušotina, etažne kosine i stanja stenskog masiva, nemar pri punjenju ili vezivanju minske serije kao i nestručnost ljudstva ili umor su ljudski faktori koji dovode do incidentnih situacija. Pravilnom obukom i adekvatnim sistemom nadzora ovaj rizik se može svesti na minimum.

### **2.3.2 Prirodni faktori**

Prirodni faktori ili faktori stenske sredine su uticajni faktori na koje se ne može uticati. Pre svega se odnose na geologiju i stanje stenskog masiva u kojem se izvode bušačko minerski radovi. Postojanje pukotinskih sistema, rasednih zona, zona oslabljene stenske mase, slojevitost masiva su sve činiooci koji, ukoliko se ne identifikuju ili predvide, mogu dovesti do pojave razletanja komada odminirane mase. Ukoliko stub eksplozivnog punjenja preseca pukotinski sistem ili zonu/sloj lošijih geo-mehaničkih karakteristika energija eksploziva će se usmeriti upravo ka najslabijim delovima masiva. Usled detonacionog talasa može doći do „otvaranja“ pukotinskih sistema ili preteranog raspucavanja slabijih zona stenskog masiva. To otvara put gasovitim produktima detonacije koji se infiltriraju u pukotinske sisteme i svojim dejstvom potiskuju materijal uzrokujući razletanje, najčešće sa čela etaže. Gornji, površinski, delovi etaže su često intenzivno raspucali usled minerskih radova i nabušenja na etaži iznad. Ukoliko dužina čepa nije dovoljna da prođe kroz ovu raspucalu zonu i dovoljno zahvati „zdravu“ stensku masu, gasoviti produkti detonacije se mogu infiltrirati u pukotinske sisteme i dovesti do formiranja kratera.

Svi ovi činiooci mogu se predvideti i pretnje uočiti adekvatnim pregledom sredine pre početka radova na punjenju minske serije. Pregled čela etaže i njegovog

stanja može ukazati na postojanje pukotinskih sistema ili oslabljenih zona. Pregledom gornje ravni etaže mogu se uočiti problematični delovi minske serije u kojima je potrebno preduzeti preventivne mere u smislu kvaliteta čepa i izmena u masi eksplozivnog punjenja.



**Slika 2.2** – Kombinacija prirodnih i tehničkih faktora kao uzrok pojave razletanja komada odminirane mase (Pantović et al., 2007, Stojadinović et al., 2011)

U najvećem broju slučajeva razletanje je posledica kombinacije tehničkih i prirodnih faktora (Slika 2.2) ali se ipak može tretirati ljudskom greškom. Nepreciznost bušenja i izrada bušotine sa devijacijom koja nije uzeta u obzir, sve to u zoni stenske mase sa postojanjem intenzivne raspucalosti i čelom i gornjom ravni etaže koje koji su oštećeni u prethodnom miniranju je siguran incident koji se može sprečiti adekvatnim i pravovremenim pregledom sredine, razumevanjem uslova koji u njoj vladaju i primenom odgovarajućih preventivnih mera.

## 2.4 Zakonska regulativa u oblasti razletanja komada

Imajući u vidu ozbiljnost problema razletanja komada odminirane mase i ozbiljnost posledica iznenađuje činjenica da je ovaj problem krajnje površno obrađen u rudarskoj i građevinskoj regulativi. Generalno, regulativa na globalnom nivou razletanje komada odminirane mase identifikuje kao hazard i propisuje da se moraju definisati sigurne zone odnosno da se miniranje tako izvede da komadi odminirane stenske mase ne budu odbačeni van definisane sigurne zone. Ni jedan propis ne definiše metodologiju određivanja sigurnog rastojanja ili princip prognoze dometa razletelih komada.

### 2.4.1 Nacionalna zakonska regulativa

Problem razletanja komada odminirane mase u srpskoj regulativi tretiran je u Pravilniku o tehničkim normativima pri rukovanju eksplozivnim sredstvima i miniranju u rudarstvu (Sl.List SFRJ 26/88).

...

#### 9. Određivanje sigurnih zona

*Član 109. Sigurna zona za zaštitu objekata, mašina, opreme, uređaja, instalacija i dr. mora se odrediti na osnovu seizmičkog (potresnog) delovanja mina i daljine odbacivanja komada odminiranog materijala.*

...

*11. Određivanje sigurnosne zone, odnosno udaljenosti za zaštitu od odbačenih komada miniranog materijala*

*Član 112. Sigurnosna zona, odnosno udaljenost unutar koje odbacivanje komada miniranog materijala nije opasno ljude i objekte mora se odrediti s obzirom na: položaj minskih bušotina, geometriju bušenja (izbojna linija, razmak između bušotina i*

nagib bušotina), masu i način eksplozivnog punjenja, specifičnu potrošnju eksploziva, koncentraciju, začepljenjeminskih bušotina i druge uticajne faktore.

*U sigurnosnu zonu ne smeju dopirati minirani materijal i komadi miniranog materijala. Sigurnosna zona se mora povećati kada se očekuje povećano razbacivanje materijala, na primer zbog konfiguracije terena ili zbog načina miniranja, vrste materijala koji se minira, vrste eksploziva itd.*

*Ako se unutar određene sigurnosne zone nalaze objekti, a miniranje se mora izvršiti, objekti se moraju zaštititi od štetnog delovanja miniranja posebnim minerskoseizmičkim merama i odgovarajućim sredstvima zaštite, npr. zaštitnom mrežom, vrećama peska, nasipom, zaštitnom ogradom i dr. Mora se obezbediti da zaštitna sredstva ostanu efikasna i u slučaju aktiviranja više eksplozivnih punjenja (mina).*

Prvi komentar na srpsku regulativu je svakako na temu zastarelosti. U poslednjih dvadeset godina je tehnologija miniranja i eksploziva znatno napredovala pa su pojedine odrednice Pravilnika neprimenljive u današnjim uslovima ili čak deluju neozbiljno.

Posmatrano sa aspekta razletanja komada definiciji sigurnosne zone nedostaju makar okvirne odrednice. Sam član 120 je tako napisan da se u slučaju incidenta, čak i ako su ispoštovane sve neophodne mere zaštite i prevencije, miner odmah može proglasiti krivim. Postaje jasno da se pri određivanju sigurne zone mineri moraju voditi iskustvom, a nažalost praksa pokazuje da nijedno sigurno rastojanje nije stvarno sigurno.

## **2.4.2 Inostrana zakonska regulativa**

Ni situacija u inostranoj regulativi nije značajno drugačija. U SAD-u je problem razletanja komada pri miniranju tretiran federalnim zakonom (*US Code of*

*federal regulations, 2013)* i to u delovima Zakona 29CFR1910.109, *Explosives and blasting agents* i 30CFR816.61 – 67, *Use of explosives*.

*1910.109(e)(1)(iii)*

*Kada se miniranje vrši u skućenim zonama ili u blizini objekata ili bilo kakvih instalacija koje mogu biti oštećene, minska serija mora biti pokrivena pokrivačem tako konstruisanim da omogući sprečavanje odbacivanja komada..*

*1910.109(e)(1)(iv)*

*Osobe ovlašćene da pripreme eksplozivna punjenja ili izvode minerske operacije moraju preduzeti sve razumne mere predostrožnosti, uključujući ali ne ograničavajući na znakove upozorenja, zastavice, barikade ili pokrivače od pletene žice kako bi obezbedili sigurnost javnosti i radnika.*

***Sec. 816.61 Primena eksploziva: Opšti zahtevi.***

*(3) Projekat miniranja mora da sadrži skice geometrije minskog polja, intervala usporenja i konstrukcije eksplozivnih punjenja i mora prikazati vrstu i količine eksploziva koji će biti primenjeni, kritične dimenzije i položaj i opšti opis objekata koje treba štiti kao i obrazloženje parametara iz Projekta kojima se štiti javnost i vrši usaglašavanje sa standardima u vezi vazdušnih udara, razletanja komada i vibracija tla iz odeljka 816.67.*

...

***Sec. 816.66 Primena eksploziva: Znakovi za miniranje, upozorenje i kontrolu pristupa***

*(c) Kontrola pristupa. Pristup zoni miniranja se mora kontrolisati kako bi se sprečilo prisustvo žive stoke ili neovlašćenih osoba sve dok ovlašćeni predstavnik ili miner ne utvrdi razumno da--*

*(1) Nema neuobičajenih opasnosti u vidu klizišta i neeksplozivnih eksplozivnih punjenja; i*

(2) Se pristup zoni miniranja može bezbedno nastaviti.

...

**Sec. 816.67 Primena eksploziva: Kontrola negativnih efekata.**

(c) Razletanje komada. Razleteli komadi koji se kreću kroz vazduh ili po tlu nesmeju biti odbačeni sa minskog polja--

(1) Više od jedne polovine rastojanja do najbližeg boravišta ili nastanjenog objekta;

(2) Van zone pod kontrolom koja se zahteva u skladu sa odeljkom 816.66(c); ili

(3) Van granice vlasništva.

Kao što se iz citata vidi, zakon propisuje maksimalni dozvoljeni domet od polovine rastojanja do najbližeg stambenog ili drugog objekta u upotrebi i obavezu prekrivanja minskih serija teškim pokrovima u slučaju miniranja u neposrednoj blizini objekata ili instalacija. Kao i u srpskoj regulativi i ovde nema detaljnih odrednica o načinu kontrole razletanja ili određivanja sigurnih rastojanja.

Britanska regulativa propisuje specifikaciju, to jest projekat, miniranja koji je tako koncipiran da smanji rizik od razletanja van ekskluzivne zone na meru koja je „razumno izvodljiva“ i definiše neophodne preventivne mere (*Health and safety at quarries, 1999*). Najveća nedoumica i nedorečenost je koja je to razumno izvodljiva mera rizika?

**Specifikacija miniranja**

195 Svrha specifikacije miniranja je sprečavanje pojave opasnosti za vreme detonacije punjenja. Specifikacija miniranja mora biti urađena za svako minsko polje, u skladu sa uslovima na toj lokaciji.

196 Specifikacija miniranja mora biti urađena tako da:



(a) Obezbedi da je rizik od odbacivanja razletelih komada van određene ugrožene zone nizak koliko god je to razumno izvodljivo, i mora ukazati na sve posebne mere predostrožnosti potrebne da se smanjenje rizika omogući;

U Australiji je problem razletanja obrađen standardom *AS2187.2:Explosives – Storage and use. Part 2: Use of explosives*. Standard zahteva da se za svako miniranje, pre iniciranja minske serije, definiše ekskluziona zona ali ne navodi na koji način to treba izvršiti. Međutim, WorkSafe Victoria, državna institucija koja s bavi sigurnošću na radu, pripremila je vodič za određivanje sigurnih rastojanja pri primeni eksploziva (*Guidance note, 2011*). U vodiču su date preporuke o minimalnim sigurnim rastojanjima u zavisnosti od tipa eksploziva, prečnika bušotine, dužine čepa itd (Tabele 2.1 i 2.2). Ipak, i ove preporuke su samo orijentacione i ne garantuju potrebnu sigurnost.

**Tabela 2.1** – Sigurna rastojanja pri primeni ANFO/Emulzionih smeša (1,2 g/cm<sup>3</sup>)

Sigurno rastojanje (m)	Minimalna dužina čepa (m) za prečnike bušotina								
	51 mm	76 mm	89 mm	102 mm	114 mm	127 mm	140 mm	152 mm	165 mm
100	1,4	2,3	2,9	3,7	4,3	4,9	5,6	6,3	7,0
150	1,1	1,9	2,3	2,9	3,5	4,0	4,5	5,1	5,7
200	0,9	1,6	2,0	2,5	3,0	3,4	3,9	4,4	4,9
250	0,8	1,4	1,8	2,2	2,6	3,0	3,4	3,9	4,3
300	0,7	1,3	1,6	2,0	2,4	2,7	3,1	3,5	3,9
350	0,7	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	2,8	3,2	3,6
400	0,6	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,3
450	0,6	1,0	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1
500	0,5	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,3	2,6	2,9
550	0,5	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8
600	0,5	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6
650	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5
700	0,4	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,4
750	0,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,0	2,3
800	0,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,2

Razlog za ovakav „status“ razletanja komada odminirane mase verovatno leži u činjenici da još uvek ne postoji pouzdani model za prognozu pojave razletanja i dometa

razletelih komada. Za razliku od seizmičkih efekata miniranja i vazдушnih udara gde postoje razvijeni modeli prognoze, veliki broj uticajnih faktora i nepoznanica onemogućava lako uspostavljanje zavisnosti između parametara miniranja, parametara radne sredine i dometa razletelih komada. Upravo zbog toga se već više od pola veka u kontinuitetu sprovode istraživanja problema razletanja. Počev od četrdesetih godina prošlog veka do danas prezentovan je veći broj modela i metodologija za prognozu dometa razletelih komada koji su se pokazali u većoj ili manjoj meri uspešnim. Upravo zbog pomenutih nepoznanica po pitanju uslova radne sredine i interakcije eksploziva sa stenskom masom prezentovani modeli su bili uspešni u lokalnim uslovima primene. Do danas nije razvijen ni jedan model koji je zadovoljavajuće uspešan i precizan u svim uslovima i na svim lokacijama.

**Tabela 2.2** – Sigurna rastojanja pri primeni ANFO ( $0,8 \text{ g/cm}^3$ )

Sigurno rastojanje (m)	Minimalna dužina čepa (m) za prečnike bušotina								
	51 mm	76 mm	89 mm	102 mm	114 mm	127 mm	140 mm	152 mm	165 mm
100	1,2	2,0	2,5	3,1	3,7	4,2	4,8	5,4	6,0
150	0,9	1,6	2,0	2,5	3,0	3,4	3,9	4,4	4,9
200	0,8	1,4	1,7	2,1	2,5	2,9	3,3	3,7	4,2
250	0,7	1,2	1,5	1,9	2,2	2,6	2,9	3,3	3,7
300	0,6	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,3
350	0,6	1,0	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0
400	0,5	0,9	1,1	1,4	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8
450	0,5	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6
500	0,4	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2	2,5
550	0,4	0,8	0,9	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3
600	0,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,2
650	0,4	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1
700	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
750	0,3	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9
800	0,3	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8

### 3. PREGLED I ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Prva istraživanja problema razletanja počinju sa radovima Gurney-a četrdesetih godina prošlog veka (*Gurney, 1943*). Gurney je za potrebe američke vojske istraživao efekte eksploziva na okolni metal u granatama to jest određivao brzinu šrapnela pri detonaciji eksploziva. Njegova opšta formula za procenu početne brzine šrapnela postala je osnov za mnoga dalja istraživanja i ima formu

$$v_0 = \sqrt{2U} f(m_x/m_m), \quad (3.1)$$

gde su:

- $v_0$  - početna brzina šrapnela,
- $\sqrt{2U}$  - Gurney konstanta koja predstavlja karakteristiku primenjenog eksploziva,
- $m_x$  i  $m_m$  - mase (po jedinici dužine ili površine) eksploziva i potisnutog materijala.

Na osnovu Gurney-evih istraživanja Roth je (*Roth, 1979*) definisao funkciju  $f(m_x/m_m)$  kako bi jednačina (3.1) bila primenljiva pri miniranju u rudarstvu i dobio

$$m_x/m_m = \frac{\frac{Q}{l_b}}{\gamma_s W^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (3.2)$$

gde su:

- $Q$  - masa eksplozivnog punjenja,
- $l_b$  - dubina bušotine,

- $\gamma_s$  - gustina stene,  
 $W$  - linija najmanjeg otpora,  
 $\alpha$  - izbojni ugao.

Za razletanje koje dolazi iz vertikalnih kosina etaže Roth predlaže modifikovanu jednačinu (3.1) u formi

$$v_0 = \sqrt{2U'} \sqrt{m_x/m_m}, \quad (3.3)$$

gde je  $\sqrt{2U'} < \sqrt{2U}$  jer je smer detonacije tangencijalan na stenu. Roth dalje predlaže uzimanje  $\sqrt{2U'} = D/3$  za većinu eksploziva, gde je  $D$  detonaciona brzina eksploziva, dok za ANFO smeše predlaže  $0,44 D$ .

Ukoliko se u obzir uzmu i gubici energije eksploziva Roth daje izraz

$$v_0^2 = 2U' \frac{m_x}{m_m} \left[ 1 - \frac{k_1 E_s + k_2 E_c}{U'} \right] - 2k_3 E_r, \quad (3.4)$$

gde su:

- $E_s$  - seizmička energija po jedinici mase eksploziva,  
 $E_c$  - energija drobljenja jedinice mase stene,  
 $E_r$  - energija apsorbovana pri izbijanju jedinice mase stene,  
 $k_1, k_2, k_3$  - koeficijenti proporcionalnosti.

Dalje, Roth definiše maksimalni domet razletelih komada odminirane mase primenom balističkih trajektorija ali uz zanemarivanje otpora vazduha. Polazeći od osnovne formule za određivanje dometa u obliku

$$L_R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta_0}{g}, \quad (3.5)$$

gde su:

$\theta_0$  - početni ugao izletanja,

$g$  - gravitaciono ubrzanje

i uz uslov da je  $\theta_0=45^\circ$  dolazi do maksimalnog dometa kao

$$L_{R\max} = \frac{v_0^2}{g}. \quad (3.6)$$

Problem kod ovog pristupa predstavlja upravo zanemarivanje otpora vazduha i potpuno odsustvo parametara koji definišu veličinu razletelih komada. Primena izraza 3.6 rezultovaće maksimalnim dometom koji je predimenzionisan. Samim tim, potrebna ekskluziona zona će biti predimenzionisana što, u slučajevima kada se ugroženi objekti nalaze u blizini minske serije, rezultuje redukcijom parametara miniranja. Konačni rezultat primene ovog pristupa može biti skupo miniranje koje nije optimizovano i čiji efekti u smislu granulacije, položaja i oblika gomile odminiranog materijala nisu zadovoljavajući.

Nezavisno o Roth-a, Lundborg za Švedsku minersku fondaciju (Swedish detonic research foundation) sprovodi istraživanje i razvija teorijski model za određivanje maksimalnog dometa komada pri razletanju iz kratera za optimalne uslove (*Lundborg, 1981*). Polazeći od impulsa  $i$  koji saopštava sferično eksplozivno punjenje i postavljajući izraz za gustinu impulsa u nekoj tački na rastojanju  $R$

$$\int p dt = i \approx \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{R}. \quad (3.7)$$

Za konstantnu vrednost redukovano rastojanja  $R_r = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}}$  dobija

$$i \approx Q^{\frac{1}{3}} \approx d_e, \quad (3.8)$$

gde je  $d_e$  prečnik eksplozivnog punjenja. Daljim razvojem teorijskog proračuna dolazi do izraza za početnu brzinu komada

$$v_0 = \frac{10d_b \cdot 2600}{d\gamma_s}, \quad (3.9)$$

gde su:

$d_b$  - prečnik bušotine (“),

$d$  - prečnik letećeg komada (m).

Dalje, uz primenu standardnih balističkih jednačina i za specifičnu potrošnju eksploziva  $q \leq 0.2 \text{ kg/m}^3$  dolazi do maksimalnog dometa kao

$$L_{R\max} = 143d_b(q - 0,2), \quad (3.10)$$

gde je

$q$  - specifična potrošnja eksploziva,

i optimalne veličine letećeg komada kao

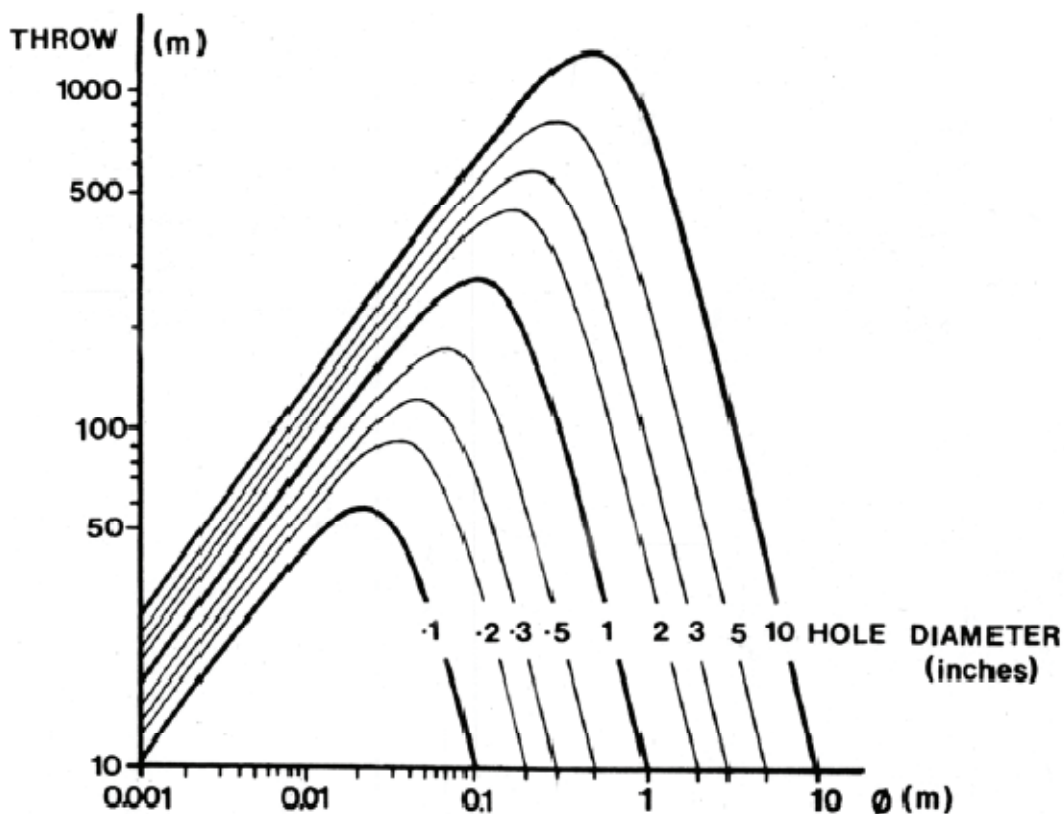
$$d = 0,1d_b^{2/3}, \quad (3.11)$$

Pri tome se pod pojmom optimalne veličine letećeg komada smatra onaj komad koji dostiže maksimalni domet. Upravo definisanje optimalne veličine komada pri razletanju je prvo predstavljanje koncepta da domet razletelih komada zavisi od njihove inercije i sila otpora vazduha.

Za uslove eksplozivnog punjenja sa neregularnom to jest nedovoljnom linijom najmanjeg otpora i neregularnom (smanjenom) dužinom čepa Lundborg predlaže određivanje maksimalnog dometa kao

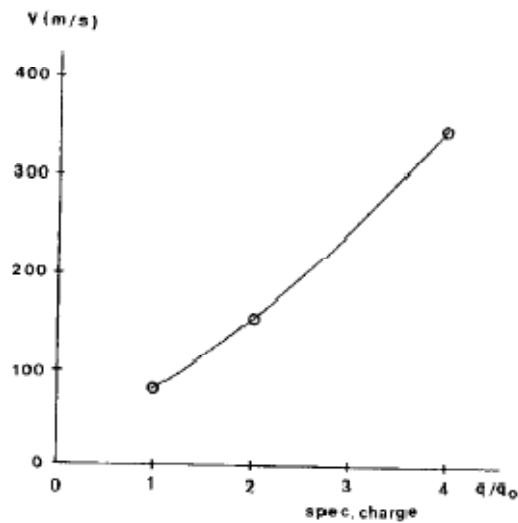
$$L_{R\max} = 260d_b^{2/3}. \quad (3.12)$$

Maksimalni domet razletelih komada čiji je prečnik različit od optimalnog može se odrediti iz nomograma (Slika 3.1).



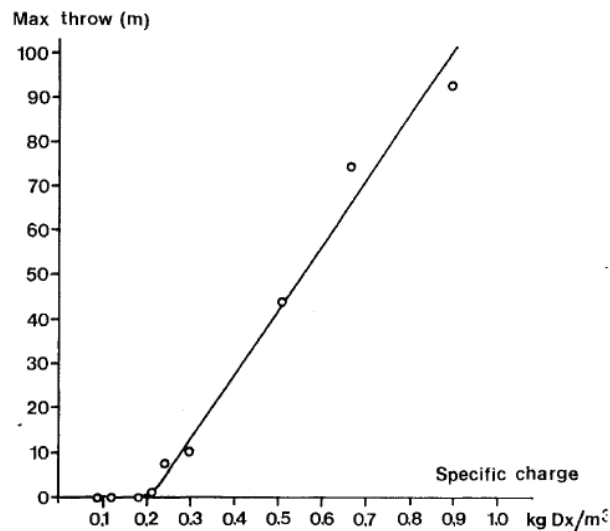
Slika 3.1 – Maksimalni domet razletelih komada (Lundborg, 1981)

Manje poznata ali ne manje značajna su istraživanja Ladegaard-Pedersen-a i Persson-a (*Ladegaard et al., 1973*) koji su sprovodili eksperimentalno istraživanje na modelima od pleksiglasa. Koristeći brzu fotografiju sa ekspozicijom od 0,1  $\mu$ s i snimkom u 210  $\mu$ s nakon iniciranja eksplozivnog punjenja mogli su, s obzirom na providnost pleksiglasa, da posmatraju formiranje pukotinskih sistema, penetraciju gasova i pomeranje odminiranog materijala. Varirajući prečnike bušotina i specifičnu potrošnju eksploziva došli su do zaključka da sa povećanjem specifične potrošnje eksploziva dolazi do poboljšanja granulacije ali i do povećanja početne brzine razletelih komada (Slika 3.2).



*Slika 3.2– Zavisnost početne brzine razletelih komada od specifične potrošnje eksploziva (Person et al., 1994)*

U terenskim eksperimentima koji su usledili Ladegaard-Pedersen i Persson su pratili maksimalni domet razletelih komada u zavisnosti od specifične potrošnje eksploziva (Slika 3.3). Granična vrednost specifične potrošnje eksploziva je  $0,2 \text{ kg/m}^3$  a sa povećanjem dolazi do naglog povećanja maksimalnog dometa.



*Slika 3.3 – Zavisnost maksimalnog dometa razletelih komada od specifične potrošnje eksploziva (Person et al., 1994)*



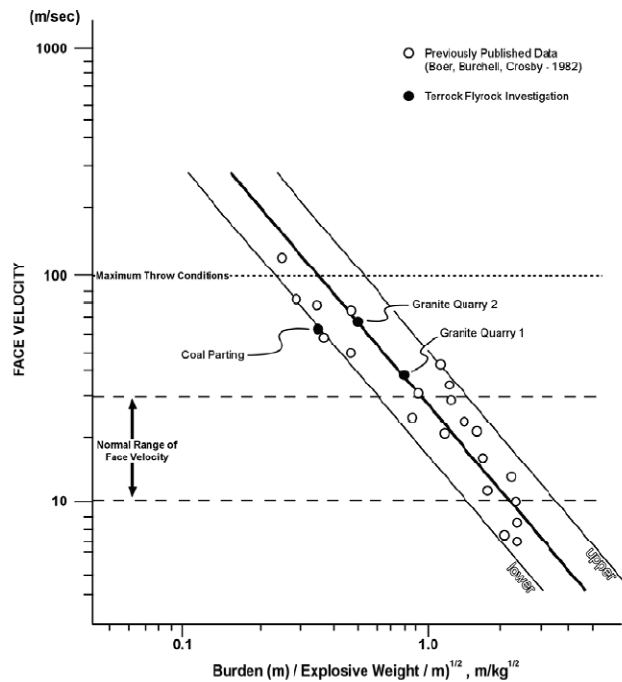
Istraživanja se nastavljaju u kontinuitetu prezentujući različite pristupe i različite rezultate (Person et al., 1994).

Workman i Calder (Workman et al., 1994) predstavljaju koncept da je maksimalni domet razletelih komada odminirane mase u funkciji početne brzine izletanja i redukovane linije najmanjeg otpora. Redukovana linija najmanjeg otpora predstavljena je kao  $W_R = \frac{W}{\sqrt{m_p}}$  gde je  $m_p$  masa eksploziva po m' eksplozivnog

punjenja. Koristeći svoje i rezultate Bauer-a, Burchell-a i Crosby-a (Bauer et al., 1982) (Slika 3.4) daju izraz za početnu brzinu razletelih komada u obliku

$$v_0 = k_L \left( \frac{\sqrt{m_p}}{W} \right)^{1,3}, \quad (3.13)$$

gde je  $k_L$  koeficijent koji zavisi od lokacije.



Slika 3.4 – Zavisnost početne brzine razletelih komada od redukovane linije najmanjeg otpora (Workman et al., 1994)

Polazeći od osnovne formule za određivanje dometa (3.5) i kombinujući je sa formulom (3.13) Richards i Moore (*Richards et al., 2002, Moor et al., 2005*) dolaze do opšteg izraza za određivanje maksimalnog dometa razletelih komada u obliku

$$L_{R\max} = \frac{k_p^2}{g} \left( \frac{\sqrt{m_p}}{W} \right)^{2,6} . \quad (3.14)$$

Daljim istraživanjem, a koristeći i rezultate Lundborg-a, Workman-a i St George i Gibson-a (*St. George et al., 2001*) definišu model za prognozu maksimalnog dometa komada pri razletanju za razletanje iz čela etaže, formiranje kratera i izduvavanje iz čepa kao (respektivno)

$$L_{R\max} = \frac{k_p^2}{g} \left( \frac{\sqrt{P}}{W} \right)^{2,6} , \quad (3.15)$$

$$L_{R\max} = \frac{k_p^2}{g} \left( \frac{\sqrt{P}}{l_c} \right)^{2,6} , \quad (3.16)$$

$$L_{R\max} = \frac{k_p^2}{g} \left( \frac{\sqrt{P}}{l_c} \right)^{2,6} \sin 2\beta , \quad (3.17)$$

gde su:

- $\beta$  - ugao nagiba bušotine,
- $m_p$  - masa eksploziva po m' eksplozivnog punjenja,
- $l_c$  - dužina čepa,
- $W$  - linija najmanjeg otpora,
- $g$  - gravitaciono ubrzanje,
- $k_p$  - koeficijent proporcionalnosti.

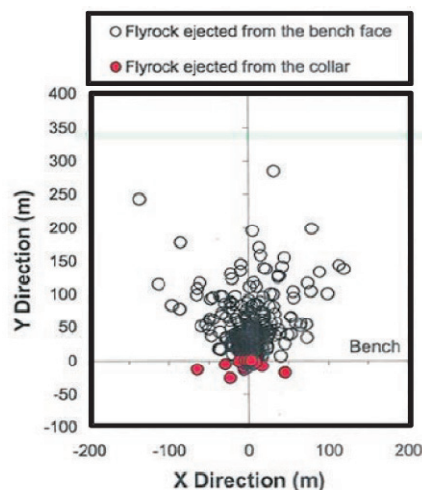
Na osnovu Mehanističkih Monte Carlo simulacija i 1000 ponavljanja St George i Gibson (*St. George et al., 2001*) definišu maksimalni domet razletelih komada za razletanje iz čela etaže i formiranje kratera (Slike 3.5 i 3.6) kao i predlog izraza za određivanje početne brzine razletelih komada odminirane mase u obliku

$$v_0 = \frac{3\rho_E D^2 \Delta T}{32d\rho_s}, \quad (3.18)$$

gde su:

$\rho_E$  - gustina eksploziva,

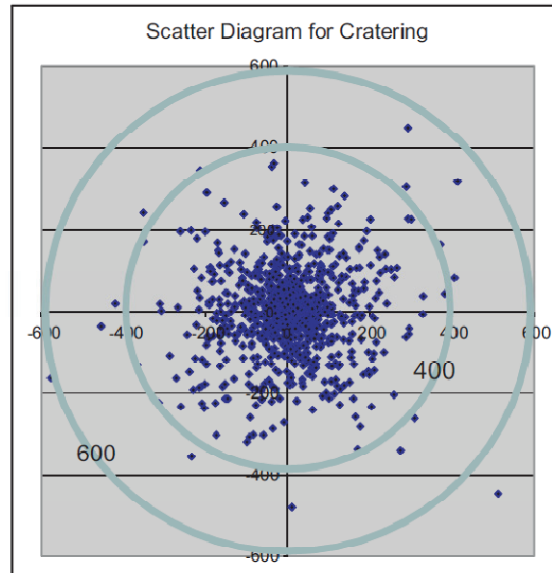
$\Delta T$  - trajanje inicijalnog impulsa ( $1,8 \cdot 10^{-6}$  s).



**Slika 3.5** – Pozicije udara razletelih komada o tlo (1000 simulacija, razletanje iz čela etaže) (*St. George et al., 2001*)

Model uzima u obzir dinamiku leta razletelih komada odminirane mase u smislu inercije i otpora vazduha ali je limitiran samo za ravan teren. Problematičan je i predloženi pristup definisanju početnih brzina komada jer autori pretpostavljaju konstantni pritisak gasovitih produkata detonacije koji je jednak polovini CJ, to jest detonacionog pritiska. Međutim, činjenica je da bušotinski pritisak znatno varira od maksimalne vrednosti do nule u roku od par mikrosekundi. Usled toga prognoza

početne brzine na osnovu izraza (3.18) može biti veoma pogrešna što su neka kasnija istraživanja i potvrdila (*Stojadinovic et al., 2011*).



**Slika 3.6** – Pozicije udara razletelih komada o tlo (1000 simulacija, formiranje kratera) (*St. George et al., 2001*)

Pristup problemu razletanja na bazi procene rizika prvi je predstavio Davies (*Davies, 1995*). On je razmatrao minsko polje sa reprezentativnim vertikalnim čelom etaže visine 15 m i jedinstvenu, 300 m udaljenu metu. Kao pretnja je uzeto samo čelo koje je usmereno ka severu dok su čela okrenuta ka istoku, jugu i zapadu tretirana kao sigurna. Meta je predstavljala čelo širine 10 m koje je paralelno problematičnom, severno usmerenom, čelu. Dalje, pretpostavljeno je da meta nije stalno izložena (na primer pokretna mehanizacija) već da je verovatnoća njene izloženosti 0,05 (meta je izložena 20 puta na sat). Ukupan godišnji broj miniranja bio je 40 i maksimalni domet razletelih komada unutar ekskluzione zone je usvojen na 150 m. Prognozirana frekvencija pogodaka mete razletelim komadima odminirane mase koje će odleteti van ekskluzione zone data je kao

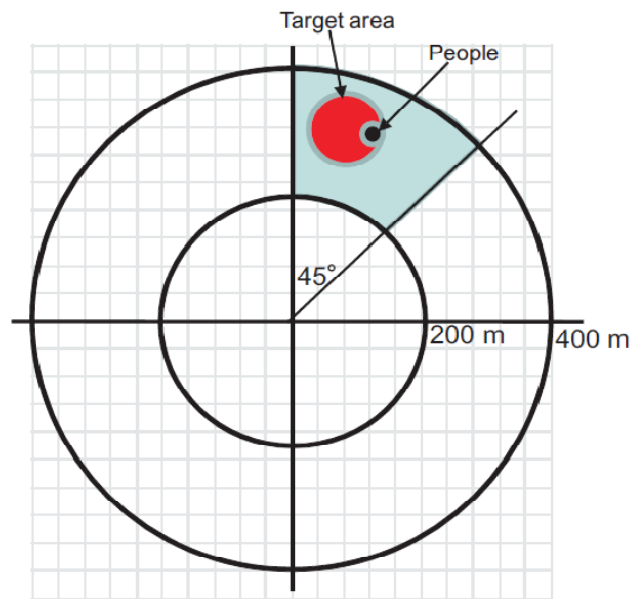
$$I = N \cdot \phi \cdot p_d \cdot p_p \cdot p_e, \quad (3.19)$$

gde su:

- $I$  - frekvencija pogodaka mete (udar/god),
- $N$  - ukupan broj miniranja godišnje,
- $\Phi$  - frekvencija pojavljivanja razletanja komada van ekskluzione zone,
- $p_d$  - verovatnoća da razleteli komad dosegne udaljenost mete,
- $p_p$  - verovatnoća da se razleteli komad nađe na putanji udara,
- $p_e$  - verovatnoća izloženosti mete.

T.N. Little (*Little, 2007*) daje svoju procenu rizika, to jest verovatnoću povrede ljudstva sa fatalnim ishodom pri razletanju komada odminirane mase iz kratera jedne bušotine. Polazne pretpostavke su:

- domet razletelih komada ima eksponencijalnu raspodelu;
- zona mete koja se posmatra je iza minske bušotine (jer je ispred definisana ekskluziona zona);
- perimetar oko bušotine je podeljen na 360 jednostepenih zona koje imaju istu verovatnoću (1/360);
- učestalost pojave razletanja iz kratera je pretpostavljena i iznosi 1%;
- posmatra se sektor mete definisan uglom od 45° (Slika 3.7) ( $P=47\ 124\ m^2$ );
- zona mete u posmatranom sektoru je  $20\ 000\ m^2$ ;
- površina unutar mete u kojoj ima ljudstva je  $20\ m^2$ ;
- ukupan broj miniranja godišnje je 3000;
- ranjivost čoveka u slučaju pogotka 15%.



**Slika 3.7** – Polazne postavke pri formiranju kratera (Little, 2007)

Verovatnoća povrede ljudstva sa fatalnim ishodom na godišnjem nivou data je kao

$$P_f = N \cdot p_c \cdot p_d \cdot p_t \cdot p_r \cdot p_e \cdot p_v, \quad (3.20)$$

gde su:

- $p_c$  - verovatnoća razletanja iz kratera (1/100),
- $p_d$  - verovatnoća da razleteli komad dosegne zonu mete,
- $p_t$  - verovatnoća da razleteli komad uleti u sektor mete (45/360),
- $p_r$  - verovatnoća da razleteli komad pogodi zonu mete unutar sektora (20 000/47 124),
- $p_e$  - verovatnoća da ljudstvo bude izloženo (20/20 000),
- $p_v$  - verovatnoća povrede (15 % na bazi *MSHA* procene).

I drugi istraživači su se bavili problemom razletanja komada pri miniranju bilo kroz procenu rizika i definisanja faktora sigurnosti (*Raina et al., 2007, 2011*) ili kroz ocenu sigurnosti (*Adhikari et al., 1999, Bajpayee et al., , Kecojević et al., 2005*).

U novije vreme svedoci smo napretka računarskih tehnologija i sve obimnije primene veštačkih neuronskih mreža (VNM) i mašinama podržanim vektorima (SVM) u svim granama nauke pa i u rudarstvu (*Monjezi et al., 2010a, 2011, Kamali et al., 2010, Khandelwal, 2010*). Mogućnost VNM-a da kroz trening i proces učenja predviđaju ishode nelinearnih problema i SVM-a da problem rešavaju u višedimenzionom prostoru u kojem je moguće uspostaviti linearne zavisnosti polako počinje da se iskorišćava i u rudarstvu. Počeci primene VNM i SVM u rudarstvu bili su kod prognoze brzina oscilovanja tla i intenziteta vazдушnih udara pri miniranju jer za ove probleme već postoje razvijeni pouzdani modeli predikcije. Na taj način je bilo moguće oceniti pouzdanost i preciznost primene naprednih modela. U novije vreme VNM i SVM se, uz određena ograničenja, primenjuju za prognozu dometa razletelih komada. Pod ograničenjima se ne misli na tehnička ograničenja VNM ili SVM već na odluke istraživača po pitanju ulazno izlaznih parametara (*Amini et al., 2010, Monjezi et al., 2010b, 2012*). Iako VNM i SVM omogućavaju gotovo neograničen broj ulaznih podataka u dosadašnjim istraživanjima je taj broj bio ograničen na manje od 10 parametara od kojih neki skoro da nisu smisleni. Na primer, izbor specifičnog bušenja ( $m/m^3$ ), je u potpunosti besmislen jer nema uticaja na pojavu razletanja. Sa druge strane, propust u uključivanju karakteristika eksploziva (gustina, detonaciona brzina) ili parametara radne sredine (rastojanje između pukotina, zapreminska masa, Jungov moduo elastičnosti) čine konstruisane mreže diskutabilnim i svakako primenljivim samo na lokaciji za koju su tretirane. Upravo činjenica da VNM i SVM imaju potencijal da prerastu u opšti model predikcije dometa razletelih komada nije iskorišćena. Razlog tome je možda činjenica da su VNM i SVM nove tehnologije, ili da je za obradu velikog broja podataka potrebno znatno vreme i procesorska snaga. Međutim, činjenica je da VNM i SVM imaju potencijal koji treba maksimalno iskoristiti.

## **4. OSNOVNE POSTAVKE NEURO-NUMERIČKE SPREGE I TEORIJSKA OSNOVA**

### **4.1 Cilj formiranja neuro-numeričke sprege**

U prethodnom izlaganju ukazano je na nedostatke i ograničenja predloženih rešenja za definisanje dometa razletelih komada a time i sigurnih rastojanja. Ovi nedostaci i ograničenja se pre svega odnose na ograničenost primene predloženih rešenja na specifične slučajeve i nedostatak jednog opšteg, univerzalno primenljivog rešenja. Uz to, pokušaj uspostavljanja veze između parametara miniranja i konačnog dometa razletelih komada je diskutabilan jer uticaj parametara miniranja na razleteli komad prestaje onog trenutka kada komad započne svoj let. Upravo zbog toga ovaj rad predstavlja pokušaj da se načini korak bliže opštem rešenju problema dometa razletelih komada primenom novih alata i tehnika u modeliranju.

Polazeći od činjenice da uticaj uslova koji vladaju u minskom polju prestaje u trenutku kada razleteli komad napusti masiv lako je zaključiti da se on dalje kreće balističkom putanjom. Na razleteli komad u toku leta deluju spoljne sile pa se njegovo kretanje i trajektorija mogu opisati formiranjem i rešavanjem jednačina dinamičke ravnoteže odnosno balističkih diferencijalnih jednačina. Krajnji, to jest maksimalni, domet komada definišu granični uslovi odnosno trenutak u vremenu kada razleteli komad padne na tlo. S obzirom na to da ove balističke jednačine nemaju svoje analitičko rešenje neophodno je njihovo približno numeričko rešavanje. Bilo koji postupak numeričkog rešavanja balističkih jednačina kretanja razletelih komada u stvari predstavlja numerički model za definisanje maksimalnog dometa razletelih komada pa time i sigurnog rastojanja.

Osim početnih uslova leta u smislu početne brzine i ugla izletanja, ni jedan drugi uticajni faktor ne zavisi od uslova minskog polja i sredine u kojoj se miniranje vrši. Prema tome, može se smatrati da numeričko modeliranje trajektorije predstavlja



opšti i univerzalno primenljiv pristup problemu razletanja. Kako balističke diferencijalne jednačine uzimaju u obzir sve uticajne parametre, to jest sve spoljne sile koje deluju na razleteli komad u toku njegovog leta, konačno rešenje predstavlja jako precizan i pouzdan podatak.

Svaki numerički model je onoliko dobar i pouzdan koliko su pouzdani i precizni ulazni podaci kojima se model „hrani“. Parametri koji utiču na kretanje razletelog komada i ujedno ulazni podaci numeričkog modela koji se ovde predstavlja su početna brzina razletelog komada, ugao izletanja, koeficijent otpora vazduha i masa razletelog komada. Svaki od ovih parametara, kao i način formiranja i rešavanja balističkih jednačina biće detaljno analiziran u toku daljeg izlaganja. Međutim, najveću nepoznanicu predstavlja faktor koji ujedno ima i najveći uticaj na maksimalni domet razletelog komada, početna brzina. Početna brzina razletelog komada i ugao izletanja predstavljaju granične uslove balističke diferencijalne jednačine i od njihove preciznosti i pouzdanosti zavisi i pouzdanost čitavog numeričkog modela. S obzirom na to da ova dva parametra opisuju uslove koji vladaju u trenutku kada razleteli komad napušta masiv, pored toga što predstavljaju početne uslove leta takođe predstavljaju i konačne, to jest završne uslove procesa detonacije i dejstva eksploziva na stensku masu. Prethodno izrečeno dovodi do zaključka da je, pre svega početna brzina komada, pod direktnim uticajem parametara miniranja i da se na taj način, preko početne brzine, može ostvariti veza parametara miniranja sa numeričkim modelom za definisanje maksimalnog dometa. Proces dejstva eksploziva na stensku masu, međusobne interakcije tehničkih parametara minske serije, parametara eksploziva i parametara radne sredine još uvek nisu u dovoljnoj meri izučeni. Upravo zbog svih ovih nepoznanica još uvek ne postoji pouzdan model za prognozu i proračun početne brzine razletelih komada ili pojave razletanja uopšte. Modeli opisani u prethodnom izlaganju predstavljaju empirijske rezultate i ne mogu biti pouzdano primenjeni na drugim lokacijama van onih na kojima su nastali.

U poslednje vreme svedoci smo napretka i ekspanzije inteligentnih adaptivnih modela predikcije i njihove primene u skoro svim oblastima ljudskog delovanja. Sposobnost veštačkih neuronskih mreža da pronalaze i mapiraju funkcionalne zavisnosti

između naizgled nespojivih parametara čini ih idealnim za modeliranje interakcija svih uticajnih parametara tokom dejstva eksploziva na stensku masu pri miniranju. Njihova adaptivna priroda i sposobnost prilagođavanja različitim uslovima ukazuje na mogućnost opšte primene, nezavisne od lokacije i karakteristika kako sredine tako i tehničkih uslova miniranja ili parametara primenjenog eksploziva. Upravo ovi pozitivni aspekti neuronskih mreža doveli su do ideje o formiranju sprege neuronskih mreža i numeričkih modela za definisanje dometa razletelih komada i sigurnih rastojanja. Pri tome bi zadatak neuronskih mreža bio da, za date uslove miniranja, daju odgovor na pitanje hoće li do razletanja doći i, ukoliko je odgovor pozitivan, kolika će biti početna brzina razletelih komada. Ovaj podatak kasnije predstavlja ulazni podatak numeričkog modela za definisanje dometa razletelih komada. Na taj način dobio bi se univerzalni model za definisanje sigurnih rastojanja pri miniranjima.

Numerički model koji se ovde predstavlja počiva na osnovnim zakonima fizike koji su univerzalni. Pored toga baziranje modela na uslovima dinamičke ravnoteže sila uzima u obzir sve uticajne parametre koji deluju na razleteli komad u toku leta. To numerički model čini preciznim i nezavisnim od lokacije primene i lokalnih uslova.

Sa druge strane pomenuta adaptivna priroda neuronskih mreža omogućava im i dozvoljava da se prilagode i implementiraju lokalne uslove u svoju arhitekturu što i njih čini opšte i univerzalno primenljivim.

Iz ovoga proizilazi da i primena sprege neuronskih mreža i numeričkih modela nije zavisna od lokacije i lokalnih uslova. Neuro-numerička sprega formirana kao rezultat ovog istraživanja i koja će biti objašnjena u daljem izlaganju ima za cilj da dokaže da je moguće prevazići sve probleme u smislu primenljivosti i pouzdanosti modela za prognozu dometa razletelih komada i definisanja sigurnih rastojanja. Svojom univerzalnom primenljivošću i visokom preciznošću predikcije neuro-numerička sprega svakako je superiorna u odnosu na dosada predložene prognozne modele.

Osim definisanja sigurnih rastojanja na koja treba povući ljudstvo i mehanizaciju neuro-numerička sprega može biti primenjena i u druge svrhe. U slučaju da se u blizini minskog polja nalaze objekti od značaja ili se miniranje obavlja u urbanoj

sredini uvek postoji opasnost od ugrožavanja objekata razletelim komadima. U takvim slučajevima neuro-numeričkom spregom se mogu definisati parametri miniranja tako da pri eventualnom razletanju komadi odminirane mase ne pređu neko prethodno definisano rastojanje.

Tekode, u slučaju forenzičke istrage incidenta sa razletanjem, na osnovu materijalnih dokaza sa terena neuro-numerička sprega može pomoći u pronalaženju uzroka koji su do razletanja doveli.

Sve prethodno navedeno ukazuje na to da sprega neuronskih mreža i numeričkih modela ima potencijal da, za razliku od modela koji su sada u primeni, u svim uslovima pouzdano i precizno definiše sigurna rastojanja ali i da pomogne u rešavanju različitih problema vezanih za razletanje komada pri miniranju.

## **4.2 Teorijske osnove numeričkog modela**

Sa poznavanjem početnih parametara leta i otpora kretanju razletelog komada njegova trajektorija se, od trenutka odvajanja od masiva do trenutka pada na tlo, može opisati primenom matematičkih izraza, to jest numerički modelirati.

Razleteli komad se, po odvajanju od masiva kreće balističkom putanjom, odnosno, rešavanje problema se svodi na proračune kosog hica. U uprošćenom slučaju, uz zanemarivanje otpora vazduha razleteli komad je u toku leta smo pod uticajem gravitacije i njegova trajektorija je parabola. U realnom slučaju, na razleteli komad pored gravitacije utiče i sila otpora vazduha što usložnjava opisivanje trajektorije. Međutim, posmatranjem razletelog komada u diskretnim trenucima vremena i analizom sila koje na razleteli komad deluju, mogu se formirati diferencijalne jednačine leta, to jest balističke jednačine koje predstavljaju matematički, numerički model trajektorije. Rešenje balističkih diferencijalnih jednačina predstavljaju koordinate razletelog komada u diskretnim trenucima vremena u predefinisanoj koordinatnoj sistemu. Grupe

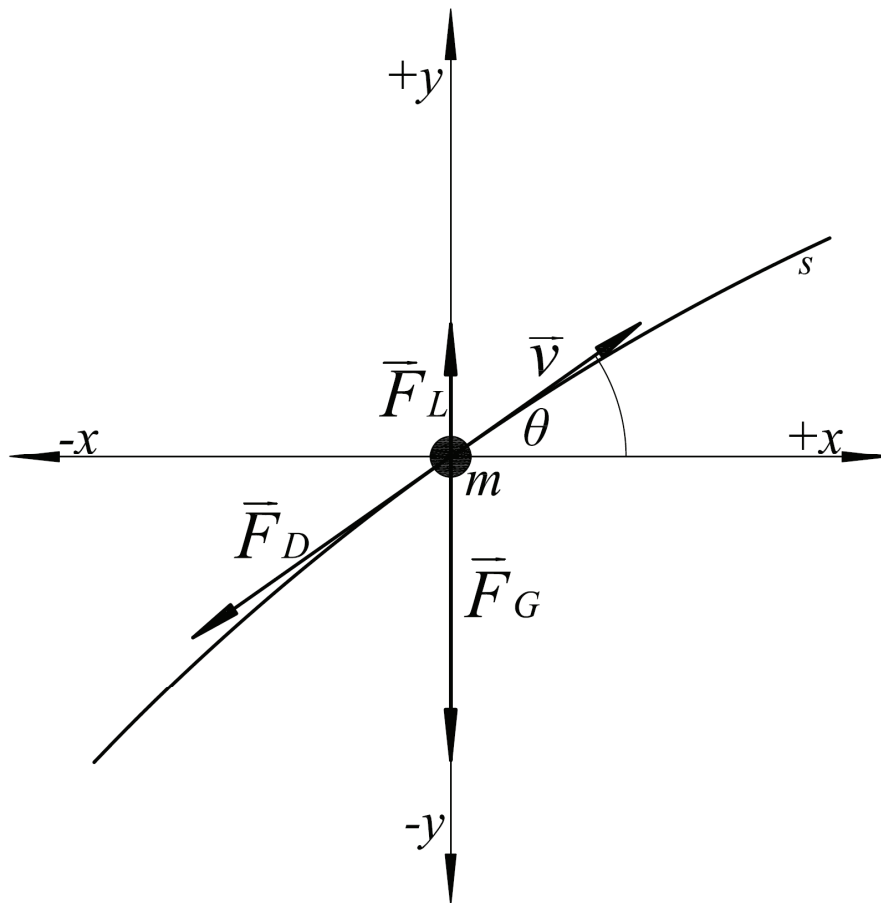
ovakvih parova podataka predstavljaju trajektoriju letećeg komada. Uz postavljanje određenih uslova u smislu trenutka udarca letećeg komada o tlo dobija se maksimalni domet razletelih komada odminirane mase. Time je moguće definisati/redefinisati sigurna rastojanja, naravno uz primenu odgovarajućih faktora sigurnosti, za ljudstvo, mehanizaciju i objekte. Variranjem ulaznih podataka u smislu početne brzine, ugla izletanja i veličine letećeg komada mogu se u kratkom vremenskom periodu definisati različite moguće varijante i predvideti najnepovoljniji slučajevi.

Definisanje trajektorija razletelih komada i određivanje maksimalnog dometa samo je jedan od rezultata koji se ovim pristupom mogu dobiti. Rešenjem balističke jednačine mogu se precizno definisati i uglovi upada komada pri njihovom padu na tlo, brzinu udara o tlo kao i energiju udara. Svi ovi parametri su smisleni sa inženjerskog stanovišta i mogu kasnije biti korišćeni u postupcima procene rizika, definisanja sigurnih zona i redizajnu tehnologije miniranja.

#### 4.2.1 Fizika leta komada odminirane mase

Prvi korak u sveopštem rešenju problema razletanja je analiza sila koje u toku leta deluju na komad odminirane stenske mase i primena drugog Njutnovog zakona kretanja. Osnovne sile koje deluju na komad koji se kreće putanjom  $s$ , u bilo kom trenutku vremena, su gravitaciona sila ( $F_G$ ), sila otpora vazduha ( $F_D$ ), i sila potiska ( $F_L$ ) (Slika 4.1).

U pojedinim slučajevima, balističke jednačine leta mogu uključiti i dodatne sile poput uticaja vetra ili Koriolisovog (Coriolis) efekta (inercijalna sila koja se javlja kao rezultat rotacije Zemlje) (*Saunderson, 2008, Cumin et al., 2009, Coriolis effect, 2013*) međutim, u slučaju razletanja komada pri miniranju ovi uticaji se mogu zanemariti. Uticaj vetra treba uzeti u obzir u onim slučajevima kada je masa razletelih komada mala, a Koriolisov efekat se može očekivati na visinama koje komadi razletele mase ne mogu da dostignu.



**Slika 4.1** – Osnovne sile koje u toku leta deluju na komad odminirane stenske mase

Tokom leta, u bilo kom trenutku, prema Drugom Njutnovom zakonu ravnotežno stanje može biti definisano vektorskom jednačinom

$$\vec{F} = \vec{F}_G + \vec{F}_D + \vec{F}_L, \quad (4.1)$$

ili

$$m\vec{a} = \vec{F}_G + \vec{F}_D + \vec{F}_L, \quad (4.2)$$

gde je  $\mathbf{a}$  ubrzanje sistema. Gravitaciona sila, sila otpora vazduha i potisak su definisani sledećim izrazima:

$$F_G = mg, \quad (4.3)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_A A_P C_D v^2 = C_1 v^2, \quad (4.4)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_A A_P C_L v_f^2 = C_2 v_f^2, \quad (4.5)$$

gde su:

- $m$  - masa komada odminirane mase,
- $g$  - gravitaciono ubrzanje,
- $\rho_A$  - gustina vazduha,
- $A_P$  - površina poprečnog preseka letećeg komada (po ravni normalnoj na pravac leta),
- $C_D$  - koeficijent otpora vazduha,
- $v$  - brzina letećeg komada,
- $C_L$  - koeficijent potiska,
- $v_f$  - brzina slobodnog toka (brzina toka vazduha daleko od bilo kakvih objekata i granica u neporemećenom delu toka).

Zbog male vrednosti potisak se u slučaju analize leta komada pri razletanju može zanemariti.

Jednačina (4.2) je polazna tačka za formiranje diferencijalnih jednačina balističkog leta razletelih komada. Konačno rešenje je skup parova podataka  $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  koji definišu trajektoriju, pa samim tim i maksimalni domet razletelih komada odminirane mase. Zbog složenosti samih jednačina i nemogućnosti da se balističke jednačine reše analitički, ovde se predlažu dva pristupa formiranju i rešavanju diferencijalnih jednačina. Prvi pristup je približno numeričko rešenje a drugi pristup je primena Runge-Kutta algoritma četvrtog reda.

## 4.2.2 Formiranje i rešavanje diferencijalnih balističkih jednačina

### 4.2.2.1 Numeričko rešenje

Ukoliko se projektuje na horizontalnu ( $x$ ) i vertikalnu ( $y$ ) osu (*Slika 4.2*) jednačina (4.2) može biti predstavljena i ispisana kao sistem od dve diferencijalne jednačine:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -F_{Dx} = -C_1 v^2 \cos\theta \\ m\ddot{y} &= -mg - F_{Dy} = -mg - C_1 v^2 \sin\theta \end{aligned} \quad (4.6)$$

gde su:

- $\ddot{x}$  - horizontalna komponenta ubrzanja sistema,
- $\ddot{y}$  - vertikalna komponenta ubrzanja sistema,
- $\theta$  - ugao između vektora brzine (tangenta) i horizontalne ose.

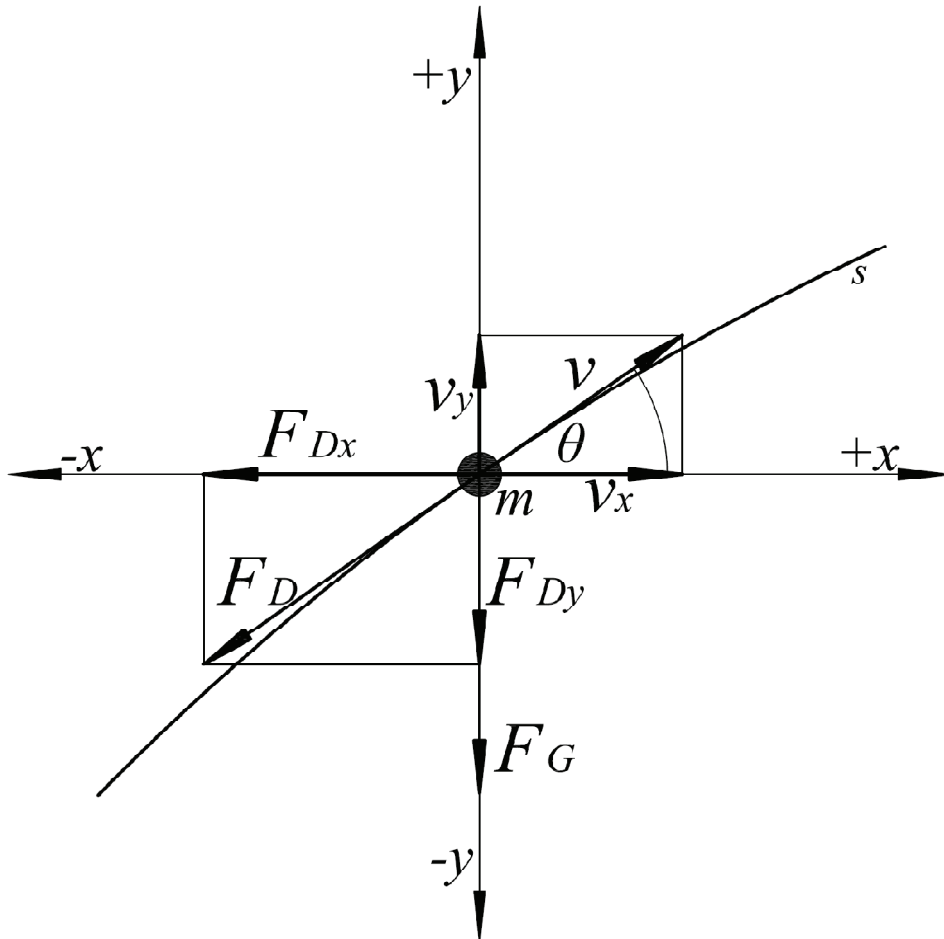
Kako je ugao  $\theta$  promenljiv u vremenu sinusna i kosinusna funkcija se definišu kao

$$\begin{aligned} v_y = v \sin\theta &\Rightarrow \sin\theta = \frac{v_y}{v} \\ v_x = v \cos\theta &\Rightarrow \cos\theta = \frac{v_x}{v} \end{aligned} \quad (4.7)$$

gde su  $v_x$  i  $v_y$  horizontalna i vertikalna komponenta brzine, respektivno.

Za početne uslove  $t=0 \rightarrow x=x_0, y=y_0, v=v_0$  i  $\theta=\theta_0$  ( $v_0, \theta_0$  – početna brzina i ugao izletanja) sistem jednačina (4.6) se može predstaviti kao:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_0 &= -\frac{1}{m} C_D v_0^2 \frac{v_{x0}}{v_0} \\ \ddot{y}_0 &= -g - \frac{1}{m} C_D v_0^2 \frac{v_{y0}}{v_0} \end{aligned} \quad (4.8)$$



**Slika 4.2** – Horizontalne i vertikalne projekcije brzine i otpora vazduha

U bilo kom trenutku leta komada odminirane mase parametri leta se mogu proračunati kao:

$$\begin{aligned} v_{x(i+1)} &= v_{x(i)} + \ddot{x}_{(i)} \Delta t \\ v_{y(i+1)} &= v_{y(i)} + \ddot{y}_{(i)} \Delta t \end{aligned} \quad (4.9)$$



$$v_{(i+1)} = \sqrt{v_{x(i)}^2 + v_{y(i)}^2}, \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{(i+1)} &= -\frac{I}{m} C_1 v_{(i)}^2 \frac{v_{x(i)}}{v_{(i)}}, \\ \ddot{y}_{(i+1)} &= -g - \frac{I}{m} C_1 v_{(i)}^2 \frac{v_{y(i)}}{v_{(i)}}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

i konačno,

$$\begin{aligned} x_{(i+1)} &= x_{(i)} + v_{x(i)} \Delta t + \frac{\ddot{x}_{(i)} \Delta t^2}{2}, \\ y_{(i+1)} &= y_{(i)} + v_{y(i)} \Delta t + \frac{\ddot{y}_{(i)} \Delta t^2}{2}, \end{aligned} \quad (4.12)$$

gde je  $\Delta t$  vremenski korak.

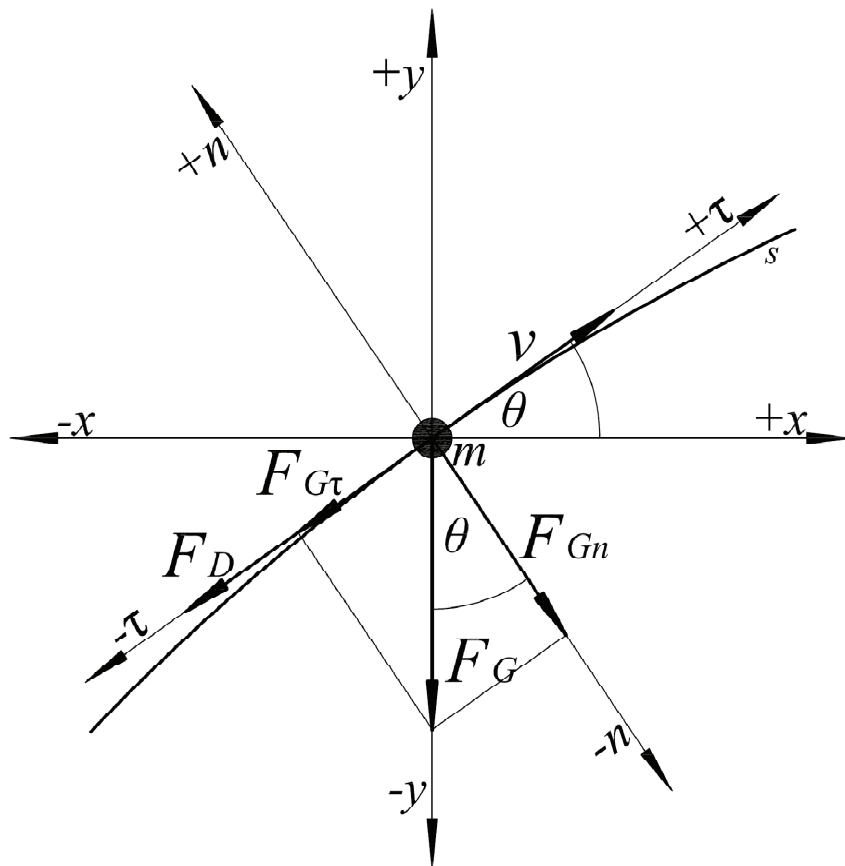
Sistem jednačina (4.12) daje koordinate letećeg komada odminirane mase u diskretnim trenucima vremena  $(x, y)$ . Grafički prikaz ovih parova podataka predstavlja trajektoriju letećeg komada. Maksimalni domet komada  $x_{max}$  određuje se iz uslova  $y=0$  (pad komada na tlo).

#### 4.2.2.2 Runge-Kutta algoritam IV reda

Za slučaj primene Runge-Kutta algoritma četvrtog reda (**RK-4**) balističke jednačine leta komada odminirane mase se formiraju projektovanjem jednačine (4.2) na pravce normale i tangente na trajektoriju (Slika 4.3). Jednačina (4.2) onda postaje sistem jednačina

$$\begin{aligned} ma_{\tau} &= -F_{G_{\tau}} - F_D = -mg \sin \theta - C_1 v^2 \\ ma_n &= -F_{G_n} = -mg \cos \theta \end{aligned}, \quad (4.13)$$

gde su  $a_{\tau}$  i  $a_n$  tangencijalno i normalno ubrzanje.



**Slika 4.3** – Tangencijalne i normalne komponente sile koje deluju na razleteli komad

U bilo kom trenutku leta razleteli komad prati putanju  $s$ . Putanja  $s$  se može posmatrati kao kriva sastavljena od niza kružnih lukova sa odgovarajućim radijusima  $R_c$ . Jedno od svojstava, odnosno karakteristika, zakrivljene putanje  $s$  je krivina  $\kappa$ . U diferencijalnoj geometriji krivina se izražava kao (Banchoff et al., 2003, Dietz et al., 2011)

$$\kappa = \frac{d\theta}{ds}, \quad (4.14)$$

ali takođe i kao

$$\kappa = \frac{1}{R_c}, \quad (4.15)$$

pa se onda može definisati

$$\frac{1}{R_c} = \frac{d\theta}{ds}. \quad (4.16)$$

Prema definiciji brzine kao prvom izvodu puta po vremenu brzina se može predstaviti kao

$$v = \frac{ds}{dt}. \quad (4.17)$$

Dalje, iz osnovne dinamike je poznato da su tangencijalno i normalno (radijalno) ubrzanje definisani kao

$$a_\tau = \frac{dv}{dt} \text{ i } a_n = \frac{v^2}{R_c}. \quad (4.18a, 4.18b)$$

Ukoliko se vektor brzine projektuje na horizontalnu i vertikalnu osu i uz transformacije  $a_\tau = \frac{dv}{dt}$  i  $a_n = \frac{v^2}{R_c}$ , gde je  $\frac{1}{R_c} = \frac{d\theta}{ds}$ , i uz  $v = \frac{ds}{dt}$ , set jednačina (4.13) se može drugačije napisati i predstaviti kao

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= -g \sin \theta - \frac{C_1}{m} v^2 = -g \sin \theta - C v^2 \\ \frac{d\theta}{dt} &= -\frac{g \cos \theta}{v} \\ \frac{dx}{dt} &= v \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} &= v \sin \theta \end{aligned} \quad (4.19)$$

Ovaj set jednačina (4.19) je sistem diferencijalnih jednačina koji se može rešiti primenom RK-4 algoritma čija je forma (*Mathews et al., 2004, Butcher, 2008*):

$$\begin{aligned} v_{i+1} &= v_i + \frac{h}{6} (f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4) \\ \theta_{i+1} &= \theta_i + \frac{h}{6} (g_1 + 2g_2 + 2g_3 + g_4) \end{aligned}, \quad (4.20)$$

gde je  $h$  vremenski korak i:

$$\begin{aligned}
 \frac{dv}{dt} &= f(t_i, v_i, \theta_i) & \frac{d\theta}{dt} &= g(t_i, v_i, \theta_i) \\
 f_1 &= f(t_i, v_i, \theta_i) & g_1 &= g(t_i, v_i, \theta_i) \\
 f_2 &= f\left(t_i + \frac{h}{2}, v_i + \frac{h}{2}f_1, \theta_i + \frac{h}{2}g_1\right) & g_2 &= g\left(t_i + \frac{h}{2}, v_i + \frac{h}{2}f_1, \theta_i + \frac{h}{2}g_1\right), \\
 f_3 &= f\left(t_i + \frac{h}{2}, v_i + \frac{h}{2}f_2, \theta_i + \frac{h}{2}g_2\right) & g_3 &= g\left(t_i + \frac{h}{2}, v_i + \frac{h}{2}f_2, \theta_i + \frac{h}{2}g_2\right) \\
 f_4 &= f(t_i + h, v_i + hf_3, \theta_i + hg_3) & g_4 &= g(t_i + h, v_i + hf_3, \theta_i + hg_3)
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

i,

$$\begin{aligned}
 x_{i+1} &= x_i + \frac{h}{6}(p_1 + 2p_2 + 2p_3 + p_4) \\
 y_{i+1} &= y_i + \frac{h}{6}(q_1 + 2q_2 + 2q_3 + q_4)
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

gde su:

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= p(t_i, v_i, \theta_i) & \frac{dy}{dt} &= q(t_i, v_i, \theta_i) \\
 p_1 &= f(t_i, v_i, \theta_i) & q_1 &= f(t_i, v_i, \theta_i) \\
 p_2 &= f\left(t_i + \frac{h}{2}, v_i + \frac{h}{2}f_1, \theta_i + \frac{h}{2}g_1\right) & q_2 &= f\left(t_i + \frac{h}{2}, v_i + \frac{h}{2}f_1, \theta_i + \frac{h}{2}g_1\right) . \\
 p_3 &= f\left(t_i + \frac{h}{2}, v_i + \frac{h}{2}f_2, \theta_i + \frac{h}{2}g_2\right) & q_3 &= f\left(t_i + \frac{h}{2}, v_i + \frac{h}{2}f_2, \theta_i + \frac{h}{2}g_2\right) \\
 p_4 &= f(t_i + h, v_i + hf_3, \theta_i + hg_3) & q_4 &= f(t_i + h, v_i + hf_3, \theta_i + hg_3)
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

I u ovom slučaju sistem jednačina (4.22) daje koordinate razletelog komada odminirane u diskretnim trenucima leta i time i trajektoriju.

### 4.2.3 Faktori koji utiču na domet komada razletele mase

Ukoliko se analizira sistem jednačina (4.6) lako se zaključuje da su osnovni faktori koji utiču na krajnji domet razletelog komada njegove dimenzije koje određuju

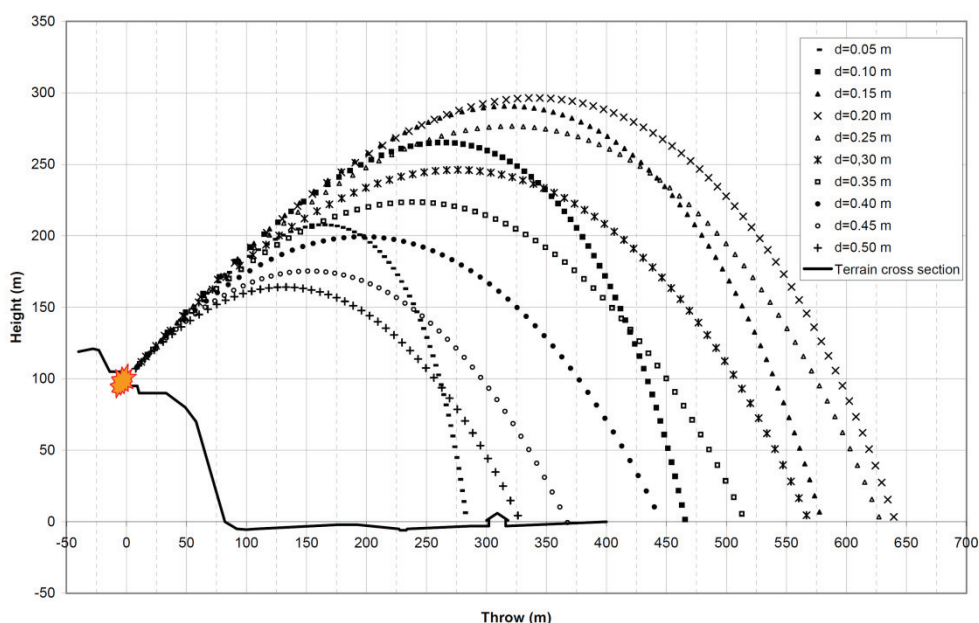
masu i površinu poprečnog preseka, početni ugao izletanja, početna brzina i koeficijent otpora vazduha.

#### **4.2.3.1 Dimenzije komada**

Prilikom miniranja na površinskim kopovima, a i uopšte, komadi odminirane stenske mase su krajnje nepravilnog oblika. Zbog drobljenja stenske mase komadi često imaju oštre ivice i ravne površine jer do cepanja najčešće dolazi po ravnima diskontinuiteta. Dimenzije komada u pojedinim pravcima se često razlikuju pa se ne može govoriti o jedinstvenoj dimenziji komada već o nekoj srednjoj dimenziji komada, odnosno srednjem prečniku  $d$ , koja se može definisati kao aritmetička sredina tri najizraženije dimenzije.

Veličina razletelog komada, to jest njegove dimenzije, definiše njegovu masu pa prema tome i njegovu inerciju i impuls kretanja. Dimenzije komada takođe definišu i površinu poprečnog preseka komada na koju deluje otpor vazduha. Kada dođe do pojave razletanja pri miniranju nemoguće je pouzdano predvideti granulometrijski sastav razletele stenske mase. Veličine razletelih komada mogu biti od nekoliko milimetara do 60 i više centimetara. Međutim, činjenica je da komadi srednjeg prečnika, u rasponu od 20 do 35 cm imaju potencijal da dostignu maksimalni domet, veći od manjih i krupnijih komada (Slika 4.4).

Razlog za ovu razliku u dometima leži u balansu sila koje teže da razleteli komad održe u kretanju i sila koje se ovom kretanju suprotstavljaju. Kada se jednom nađe u vazduhu razleteli komad nastavlja svoje kretanje po inerciji to jest zbog impulsa kretanja koji mu je saopšten pri izletanju, a koji je u skladu sa klasičnom mehanikom proizvod mase i brzine. Prema tome, za istu početnu brzinu kretanja, komad veće mase imaće veći impuls.



*Slika 4.4 – Zavisnost dometa razletelih komada od njihove veličine*

Sa druge strane, kretanju razletelog komada se suprotstavlja sila otpora vazduha koja je proizvod površine poprečnog preseka i kvadrata brzine. U skladu s tim, za istu brzinu, veći komad je, zbog veće površine poprečnog preseka, izložen većoj sili otpora vazduha.

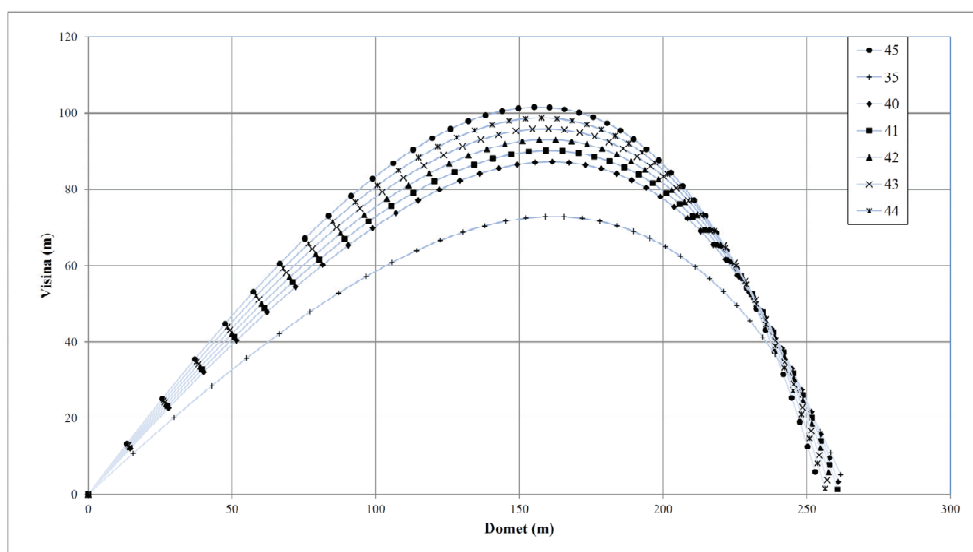
Najmanji komadi pri izletanju, zbog male mase, imaju mali impuls tako da je njihova težnja da se održe u kretanju brzo nadvladana otporom vazduha. Najveći komadi, iako pri izletanju imaju veliki impuls, zbog velike površine poprečnog preseka takođe brzo bivaju nadvladani silama otpora vazduha. Kod komada srednjih prečnika je odnos sila koje podržavaju kretanje i sila koje mu se suprotstavljaju u takvom odnosu da omogućuje postizanje najvećih dometa (relativno veliki impuls kretanja, a dovoljno mala površina poprečnog preseka i mali otpor vazduha).

Bez obzira na činjenicu da razleteli komadi srednjeg prečnika dostižu najveće domete, pri određivanju dometa razletelih komada pri miniranju, poželjno je varirati veličinu komada tako da se pokrije čitav opseg dimenzija. Na taj način rezultat

proračuna neće biti samo maksimalni domet razletelih komada već površina koja predstavlja ugroženu zonu, to jest zonu udara oko minske serije.

#### 4.2.3.2 Početni ugao izletanja

U toku razletanja komada pri miniranju fragmenti stenske mase mogu biti izbačeni iz zone razletanja pod bilo kojim vertikalnim uglom u rasponu od 0 do 90 stepeni. Iz opšteg kursa fizike je poznato da se, u slučaju zanemarenog otpora vazduha, maksimalni domet očekuje od komada stenske mase izbačenog pod uglom od  $45^\circ$ . Međutim, u realnim slučajevima maksimalni domet ostvaruju komadi stenske mase izbačeni pod uglom koji je u rasponu od 35 do 43 stepena (Slika.4.5) u zavisnosti od ostalih parametara.



*Slika 4.5 – Zavisnost dometa razletelih komada od početnog ugla izletanja*

#### 4.2.3.3 Koeficijent otpora vazduha

U dinamici fluida koeficijent otpora vazduha ( $C_D$ ) predstavlja bezdimenzionu veličinu koja se koristi da kvantifikuje sile otpora. Koeficijent otpora vazduha sačinjavaju dve vrste otpora, otpor trenja i otpor oblika. Otpor trenja se javlja usled

viskoziteta vazduha (u opštem slučaju fluida kroz koji se telo kreće) i hrapavosti površine tela. Otpor oblika se javlja pri većim brzinama kretanja tela usled pojava turbulencija u strujanju vazduha (fluida) oko tela koje se kreće, i pojave vrtloga i polja niskih pritisaka iza tela.

Na početku istraživanja problema razletanja razleteli komadi stenske mase su aproksimirani sferama (*Stojadinovic et al., 2011*). Koeficijent otpora vazduha za sferu je u rasponu od 0,07 do 0,5 međutim, usvojena je vrednost od 0,8 da bi se kompenzovala neregularnost oblika i hrapavost površine. S obzirom na to da razleteli komadi po svom obliku znatno odstupaju od sfere, da pri kretanju kroz vazduh često rotiraju oko jedne ili više osa, da je na njihovim oštrim ivicama moguća pojava vrtloga i slično, postavilo se pitanje ispravnosti ovakve odluke. Kako bi se povećala preciznost balističkog pristupa, to jest numeričkog modela za definisanje dometa razletelih komada bilo je neophodno pronaći način za određivanje, makar približne, vrednosti koeficijenta otpora vazduha. Iz tog razloga je definisan još jedan numerički model, takođe na osnovu balističkih diferencijalnih jednačina. Specifičnost ovog modela je u činjenici da se primenjuje specijalni slučaj balističke jednačine, to jest diferencijalna jednačina slobodno padajućeg objekta uz uslov terminalne brzine. Detalji ovog modela biće razmotreni i objašnjeni kasnije.

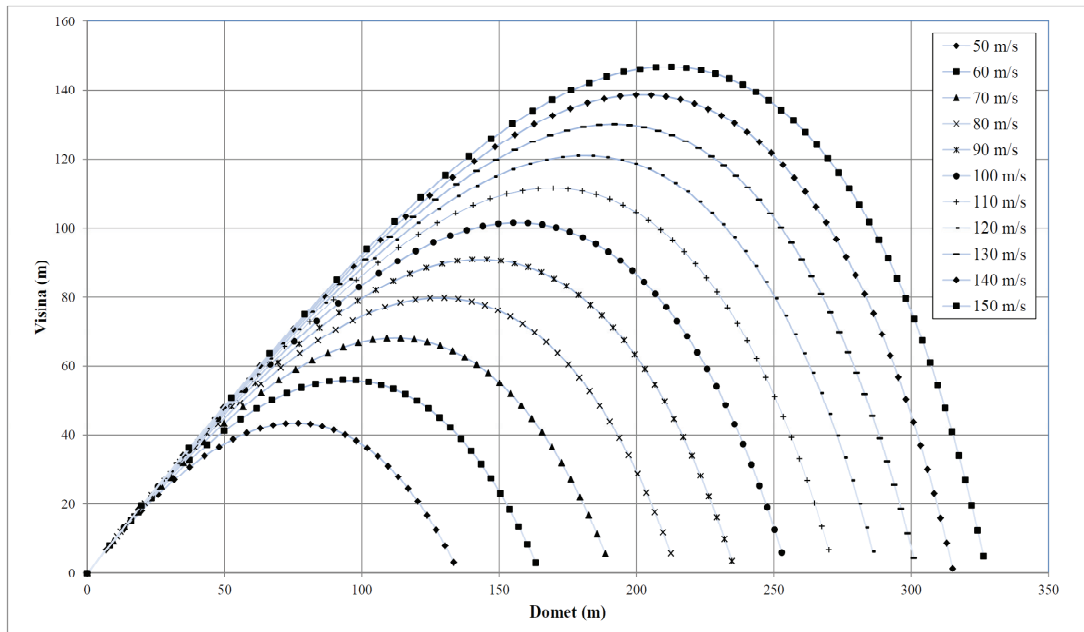
#### **4.2.3.4 Početna brzina**

Početna brzina izletanja razletelih komada odminirane mase je parametar sa najvećim uticajem na domet. Pored činjenice da od početne brzine zavisi i početni impuls kretanja, od početne brzine zavise i sile otpora vazduha. Pri razletanju komadima odminirane mase mogu biti saopštene i jako velike brzine reda veličine par stotina metara u sekundi.

Imajući u vidu činjenicu da je sila otpora vazduha proporcionalna kvadratu brzine, moguć je slučaj da za iste ostale parametre komad sa većom brzinom ostvari manji domet od sporijeg komada. Međutim, ovo se dešava u retkim, ekstremnim



slučajevima i generalno, sa povećanjem početne brzine razletelih komada raste i njihov domet (Slika 4.6)



*Slika 4.6 – Uticaj početne brzine na domet razletelih komada*

Određivanje početne brzine razletanja predstavljalo je najveći problem u toku istraživanja. Zbog kompleksnosti samog problema primenjeni pristupi problemu određivanja početne brzine i način na koji su one određene obrađene su posebnim poglavljem.

## 4.3 Teorijske osnove neuronskih mreža<sup>1</sup>

Iako se prvi model veštačke neuronske mreže (Artificial Neural Network – ANN) pojavio još 1943. godine (*Kriesel, 2005*), interesovanje za neuronske mreže raste tek u poslednjih desetak godina, a same mreže bivaju uspešno primenjene na rešavanju problema u najrazličitijim oblastima.

Veštačke neuronske mreže su matematički (računarski) modeli inspirisani strukturom i funkcionisanjem bioloških nervnih sistema. To što pokušavaju da oponašaju funkcionisanje bioloških nervnih sistema čini ih adaptivnim sistemima koji uče na primerima, pronalaze zavisnosti između podataka koje naizgled ne postoje, pronalaze nove načine obrade podataka ili menjaju režim svog rada kako bi došle do optimalnog rešenja za razliku od klasičnih računarskih modela koji se oslanjaju na linearno programiranje i ispunjavanje predefinisanih programa i algoritama. Ova adaptivnost omogućava primenu veštačkih neuronskih mreža posebno pogodnom za rešavanje problema koji nisu dovoljno izučeni ili problema kod kojih se ne mogu uspostaviti linearne zavisnosti uticajnih parametara, a postoji dovoljan broj podataka za obuku mreže.

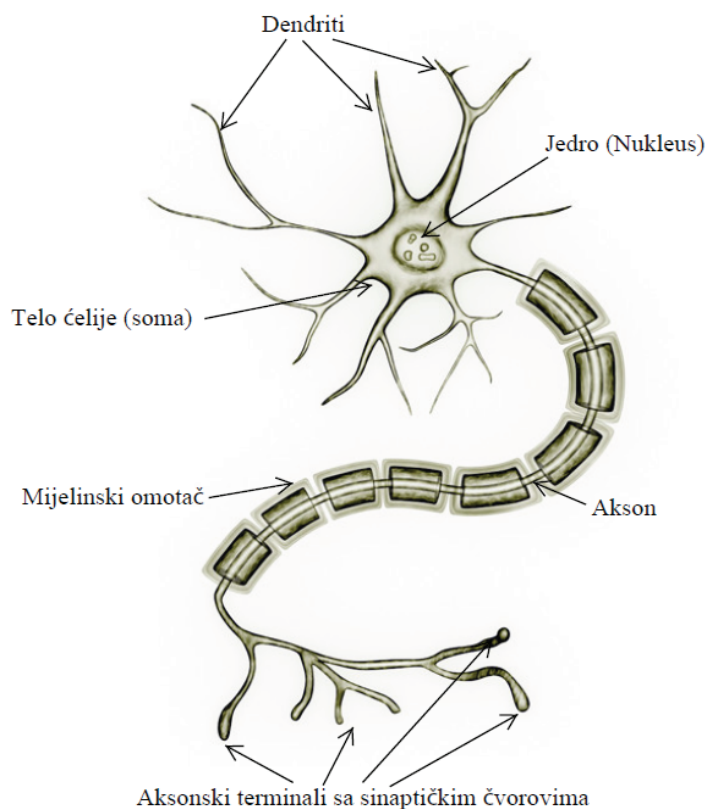
### 4.3.1 Veštačke neuronske mreže

Veštačke neuronske mreže se, analogno biološkim nervnim sistemima, sastoje od pojedinačnih, međusobno povezanih neurona. Nervna ćelija odnosno neuron (Slika 4.7) sastoji se od tela ćelije (soma) i dva tipa nastavaka ili nervnih vlakana, dendrita i aksona. U telu ćelije se nalazi jedro kao nosilac DNK i obrađuju se ulazni signali koji do tela ćelije dolaze putem dendrita. Ukoliko jačina dolaznih signala pređe određenu vrednost ili prag neuron se aktivira i kao rezultat obrade ulaznih signala formira izlazni

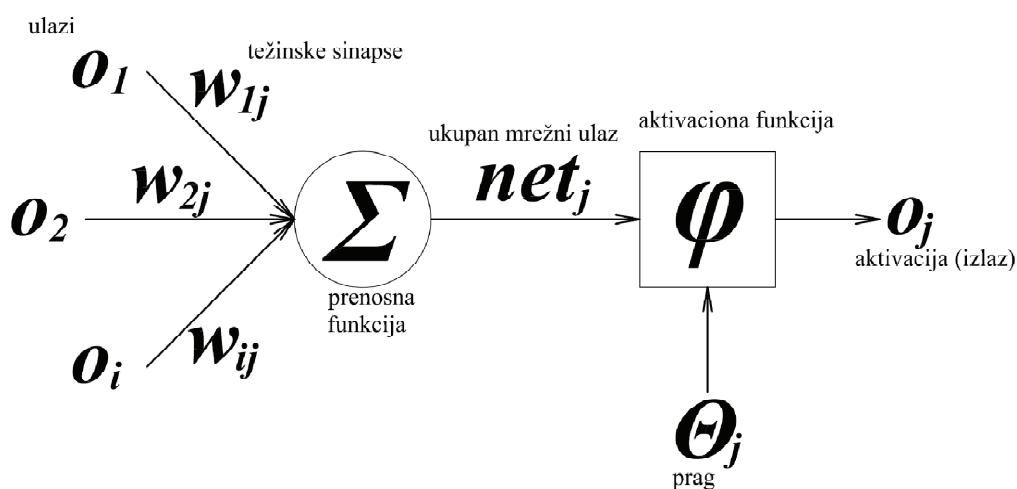
---

<sup>1</sup>Tekst prezentovan u ovom poglavlju rezultat je sublimacije saznanja dobijenih proučavanjem više literaturnih izvora. Kako nije moguće navode u tekstu vezati za samo neke izvore ovde se navodi lista izvora koji su analizirani u toku izrade ovog dela teksta (*Čabarkapa et al.2008 , Gershenson 1997, Girish 2007, Kriesel 2005, Madić&Radovanović, 2011*)

signal koji se prenosi na drugi neuron ili grupe neurona preko aksona. Veza i prenos signala između neurona (akson – dendrit) ostvaruje se preko sinapsi koje dolazni signal mogu da pojačaju (eksitacija) ili oslabe (inhibicija).



Slika 4.7 – Izgledi delovi biološkog neurona



Slika 4.8 – Veštački neuron

Analogno biološkom neuronu i veštački neuron (Slika 4.8) prima više ulaznih signala. Proizvoljni neuron  $j$  iz mreže može biti povezan sa  $n$  neurona i primati njihove izlazne signale  $o_i(o_1, o_2, o_3...o_n)$ . Veza bilo kog neurona  $i$  sa neuronom  $j$  definisana je težinskom sinapsom  $w_{ij}$ . Težinske sinapse, kao kod biološkog neurona, mogu biti ekscitacione ( $>0$ ) ili inhibitorske ( $<0$ ). U „telu” neurona se ulazni signali ponderisani težinskim faktorima transformišu u ukupni mrežni ulaz ( $net_j$ ) neurona izračunavanjem propagacione funkcije. Najčešća propagaciona funkcija je težinska (ponderisana) suma

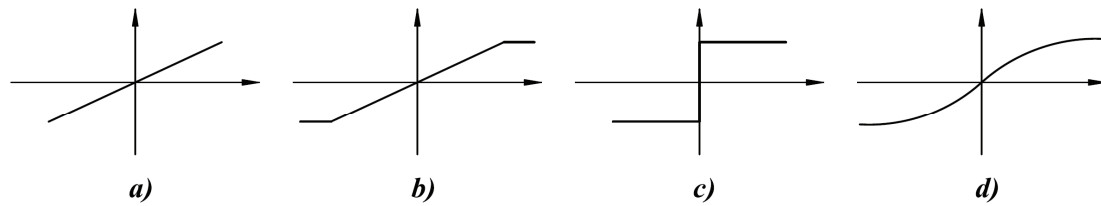
$$net_j = f_{prop}(o_1, o_2 \dots o_n; w_{1j}, w_{2j} \dots w_{nj}), \quad (4.24a)$$

$$net_j = \sum_{i=1}^n (o_i w_{ij}). \quad (4.24b)$$

Svaki neuron je u svakom trenutku vremena do izvesne mere aktivan (*bias*). Reakcija neurona na pobudu u vidu ulaznih signala, odnosno njihove vrednosti, zavisi od aktivacionog stanja neurona. Aktivaciono stanje definiše obim aktivnosti neurona (ili kraće aktivaciju)  $\varepsilon_j$  i rezultat je aktivacione funkcije i praga aktivacije  $\Theta_j$ . Aktivaciona funkcija u trenutku  $t$  transformiše ukupni mrežni ulaz neurona  $net_j$  i prethodno aktivaciono stanje neurona  $\varepsilon_j(t-1)$  u novo aktivaciono stanje  $\varepsilon_j(t)$  uzimajući u obzir aktivacioni prag  $\Theta_j$ . Kako i aktivacioni prag može biti promenljiv u vremenu može se pisati  $\Theta_j = \Theta_j(t)$  a aktivaciona funkcija se može predstaviti kao

$$\varepsilon_j(t) = f_{act}[net_j(t), \varepsilon_j(t-1), \Theta_j(t)]. \quad (4.25)$$

Najprostija aktivaciona funkcija je binarna funkcija praga (Heaviside-ova funkcija) kod koje, ukoliko je vrednost ulaza veća od praga aktivaciona funkcija uzima vrednosti  $\pm 1$  (u zavisnosti od polariteta ulaza) dok je u ostalim slučajevima konstantna (0). Često se sreću i funkcije znaka ili sigmoidne funkcije (Slika 4.9).



**Slika 4.9** – Grafički prikazi nekih od aktivacionih funkcija  
 a) linearna, b) semi-linearna, c) pragovska i d) sigmoidna

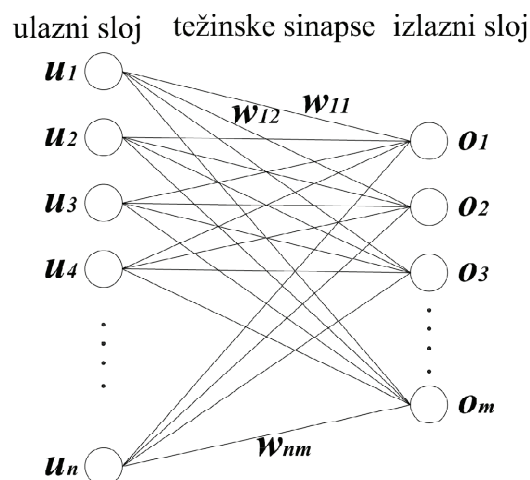
Ukoliko vrednost aktivacione funkcije pređe predefinisani prag neuron biva aktiviran i izračunava vrednost (veličinu) svog izlaznog signala  $o_j$  koju putem aksona šalje drugim neuronima u mreži. Vrednost izlaznog signala izračunava se izlaznom funkcijom neurona  $f_{out}$  kao

$$o_j = f_{out}(\varepsilon_j) \quad (4.26)$$

Najčešća izlazna funkcija je identičnost pa je

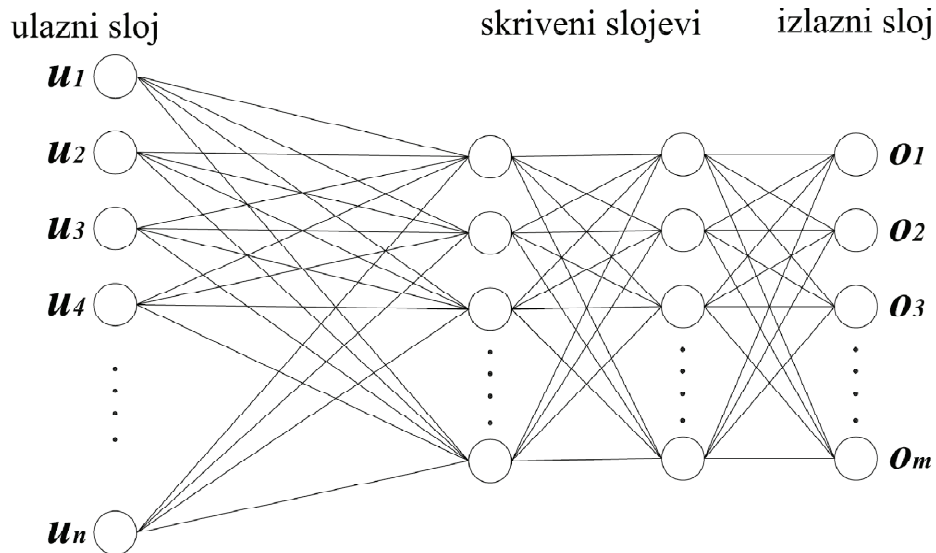
$$f_{out}(\varepsilon_j) = \varepsilon_j \Rightarrow \varepsilon_j = o_j \quad (4.27)$$

Kao što se biološki neuroni vezuju u nervni sistem tako se i veštački neuroni vezuju da formiraju veštačku neuronsku mrežu pri čemu su neuroni unutar mreže grupisani u slojeve čime se i definiše arhitektura mreže.



**Slika 4.10** – Jednoslojna arhitektura mreže

Ukoliko u mreži postoje samo jedan ulazni i jedan izlazni sloj govori se o jednoslojnoj mreži (Slika 4.10), a ako se između ulaznog i izlaznog sloja nalazi jedan ili više skrivenih slojeva onda je takva mreža višeslojna (Slika 4.11).



Slika 4.11 – Višeslojna arhitektura mreže

Mreže kod kojih signali putuju samo u jednom smeru, od ulaza ka izlazu, su takozvane *feed forward* mreže, odnosno mreže sa propagacijom signala unapred. Mreže kod kojih se uvodi povratna sprega, to jest vraćanje izlaznog signala na ulaz su takozvane rekurentne mreže. Naravno, moguća je i kombinacija ova dva tipa mreže.

Veštačke neuronske mreže su adaptivni sistemi što znači da su samomodifikujući matematički modeli koji mogu da koriste spoljašnje (ulazne) podatke za podešavanja svojih parametara u cilju postizanja optimalnog izlaza odnosno definisanja kompleksnih „obrazaca“ ponašanja varijabli. Ova adaptivnost i podešavanje podataka ostvaruje se procesom „učenja“ mreže.

Proces učenja u stvari predstavlja stalno menjanje težinskih sinapsi (i aktivacionih pragova) kako bi se postigle željene vrednosti izlaza. Postoje tri osnovna procesa ili paradigmi učenja, nadgledano (supervizorsko), nenadgledano (nesupervizorsko) i pojačano (kombinacija).

Kod nadgledanog učenja postoji set ulaznih podataka kojima odgovara set poznatih izlaznih podataka sa tačnim vrednostima. Proces učenja se sastoji u definisanju težinskih sinapsi tako da se pronađe funkcija koja preslikava skup ulaznih podataka u skup izlaznih podataka. Ulogu učitelja koji nadgleda proces učenja preuzima neki od metoda za minimizaciju greške preslikavanja (najčešće najmanja srednja kvadratna vrednost).

Kod nenadgledanog učenja za set ulaznih podataka ne postoji set odgovarajućih izlaznih podataka. Pošto nema seta izlaznih podataka nemoguće je odrediti grešku kojom bi se ocenilo potencijalno rešenje. Kako nema nadzora mreža sama pronalazi veze i sličnosti između ulaznih parametara kako bi najbolje opisala obrasce ponašanja ulaznih varijabli.

Pojačano učenje predstavlja kombinaciju prethodne dve paradigme pri čemu svakom setu ulaznih podataka odgovara set izlaznih podataka. Međutim, umesto tačnih vrednosti kao kod nadgledanog učenja, kod pojačanog učenja mreža dobija samo informaciju da li je sračunata izlazna vrednost tačna ili ne, naravno uz nagradu ili kaznu (*Girish, 2007*)

### **4.3.2 Arhitektura primenjene neuronske mreže**

Zadatak koji je stavljen pred mrežu u ovom konkretnom slučaju bilo je pitanje hoće li u konkretnim uslovima minske serije doći do razletanja ili ne i, ukoliko je odgovor pozitivan, kolika će biti početna brzina razletelih komada. Zbog toga je osnovna ideja bila formirati višeslojnu mrežu sa ulaznim slojem koji sadrži odgovarajući broj ulaznih neurona, skrivenim slojevima i izlaznim slojem koji sadrži dva izlazna neurona. Jedan izlazni neuron daje odgovor na pitanje o pojavi razletanja u formi da/ne, +/- ili 1/0, dok drugi izlazni neuron daje odgovor na pitanje o početnoj brzini u formi konkretne brojne vrednosti.

Međutim, u početnim analizama takva konstrukcija mreže nije dala zadovoljavajuće rezultate u smislu prihvatljive greške predikcije. Detaljnijom analizom

problema došlo se do zaključka da je ovakva arhitektura mreže i postavka problema pogrešna jer se od mreže tražilo da, praktično u jednom koraku, reši dva različita problema. Naime, odgovor na pitanje hoće li u konkretnim uslovima minske serije doći do razletanja ili ne je problem klasifikacije a ne prognoze pa u tom smislu i arhitektura mreže mora biti drugačija. Iako je u osnovi primenjena mreža *multy layer perceptronsa* feed forward propagacijom signala, način funkcionisanja klasifikatora i prognostičke mreže se razlikuju kroz tipove implementiranih funkcija, u načinima obrade signala i opšte, u procesu mapiranja.

Sa druge strane, odgovor na pitanje kolika će biti početna brzina komada je problem predikcije, odnosno definisanja funkcije.

Imajući prethodno u vidu rešenje je pronađeno u formiranju dve nezavisne neuronske mreže. Prva neuronska mreža je klasifikator čiji je zadatak da za zadati set ulaznih podataka definiše hoće li doći do razletanja ili ne. Ukoliko je izlazni podatak ove mreže pozitivna identifikacija razletanja onda se isti set ulaznih podataka prosleđuje drugoj neuronskoj mreži kojom se definiše početna brzina komada.

Za izradu neuronskih mreža korišćen je softverski paket *Peltarion Synapse* u verziji 1.5.2. Mreže su kreirane korišćenjem wizard-a implementiranih u software. Razlog za to je činjenica da sam software ima implementiranu fazi logiku koja, na osnovu veličine uzorka, definisane kompleksnosti problema, potpunosti podataka i slično, definiše optimalnu arhitekturu neuronske mreže. Pored toga, u software je implementirana opcija „*load best system*“ koja za cilj ima sprečavanje preteranog treninga mreže (overtraining).

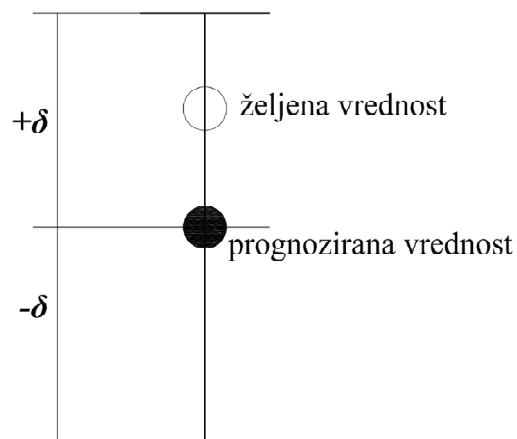
Za obuku mreže korišćeni su setovi podataka dobijeni terenskim istraživanjima. Pri tome je za potrebe validacije mreže iz početne grupe podataka izdvojeno 15% podataka koji nisu učestvovali u obuci. Kriterijum kvaliteta obuke mreže je default korišćenog software-a, minimum srednje kvadratne greške.

Za potrebe klasifikacije su korišćeni svi setovi podataka dok su za potrebe prognoze korišćeni samo setovi podataka koji su odgovarali bušotinama koje su rezultovale razletanjem. S obzirom na to da bi kod bušotina koje nisu rezultovale



razletanjem početna brzina bila jednaka nuli veliki broj nultih vrednosti bi uslovio značajnu grešku u predikciji.

Srednja kvadratna greška je takođe mogla biti korišćena i kao kriterijum za ocenu performansi mreže. Međutim, primenjeni software kao kriterijum performansi koristi interval poverenja od 95 % definisan tako da izlaz mreže  $\pm\delta$  obuhvate 95% željenih vrednosti (slika). Pri tome se teži da  $\delta$  bude minimalno ili manje od neke predefinisane vrednosti. Dodatni kriterijum je bio da razlika izlazne i željene vrednosti ne bude veća od određenog, prethodno definisanog procenta željene vrednosti.



*Slika 4.12 – Definisiranje intervala poverenja*

Za ocenu performansi klasifikatora korišćena je matrica konfuzije (confusion matrix) pri čemu je prihvatljiv broj ili procenat pogrešno klasifikovanih podataka bio predefinisano.

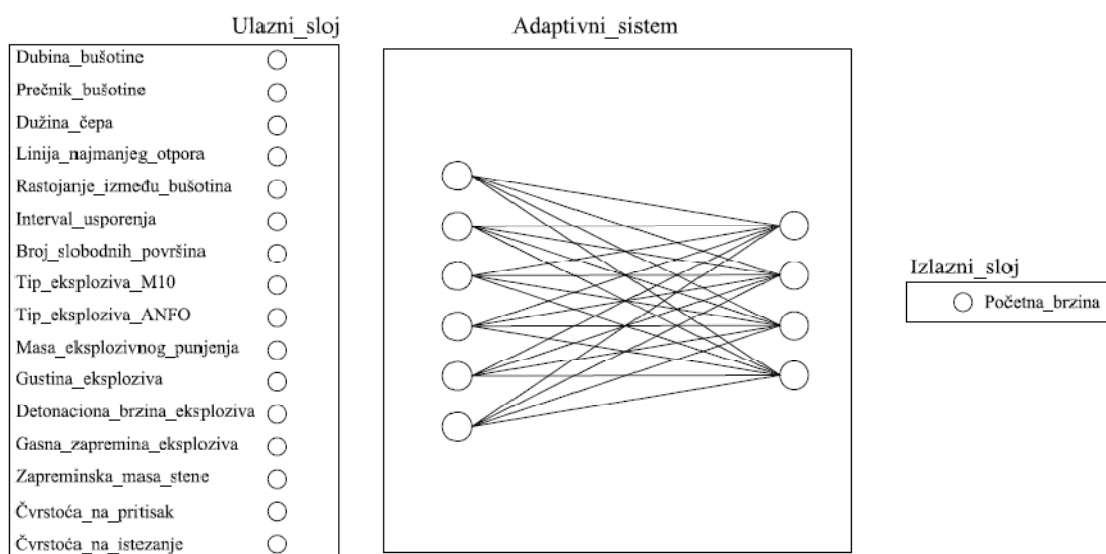
#### **4.3.2.1 Ulazno – izlazni podaci**

I u slučaju klasifikatora i u slučaju prognoze korišćen je isti set ulaznih podataka. Set ulaznih podataka sadržao je osnovne parametre o miniranju (o geometriji minske serije, šemi rušenja i primenjenom eksplozivu) i o parametrima radne sredine.

Izlazni podatak klasifikatora bio je u formi da/ne dok je izlazni podatak mreže za prognozu bio konkretna vrednost početne brzine.

Osnovna ideja je bila da se unos podataka u mrežu maksimalno pojednostavi pa su u tom smislu za ulazne parametre izabrani oni koji se već nalaze u dnevniku miniranja. Tako je definisan set od 17 ulaznih podataka: dubina bušotine, prečnik bušotine, nagib bušotine, prisustvo vode, dužina čepa, linija najmanjeg otpora, rastojanje između bušotina, interval usporenja, broj slobodnih površina, tip eksploziva, masa eksplozivnog punjenja, gustina eksploziva, detonaciona brzina eksploziva, gasna zapremina eksploziva, zapreminska masa stene, čvrstoća na pritisak stene i čvrstoća na istežanje stene.

Definisanjem ovih ulaznih podataka definisana je i osnovna arhitektura primenjenih neuronskih mreža (Slika 4.13).



**Slika 4.13** – Osnovna arhitektura primenjenih neuronskih mreža

## **5. TERENSKA ISTRAŽIVANJA**

U cilju formiranja modela bilo je neophodno sprovesti terenska istraživanja i prikupiti neophodne podatke. Terenska istraživanja su sprovedena tokom 2011 i 2012 godine na površinskim kopovima bakra Veliki Krivelj i Cerovo i na kamenolomu krečnjaka Krivelj. Cilj istraživanja je bio praćenje proizvodnih miniranja kako bi se, pre svega, dobio uvid u obim razletanja i uslove pod kojima se razletanje javlja. Najveći deo terenskih istraživanja sproveden je na PK Veliki Krivelj iz prostog razloga što je miniranja na ovom kopu najčešća i vrše se u proseku deset puta nedeljno. Dodatni razlog su i razlike u radnim sredinama u kojima se vrši miniranje (ruda/jalovina, andezit/krečnjak/porfirdiorit...).

Pre početka terenskih ispitivanja bilo je neophodno definisati koji su to potrebni podaci i na koji način će podaci biti prikupljeni. Sa stanovišta numeričkih modela bilo je neophodno prikupiti podatke o svim veličinama koje imaju uticaja na kretanje razletelog komada, to jest na njegovu trajektoriju. U tom smislu bilo je potrebno prikupiti podatke o početnoj brzini razletelih komada, uglu izletanja, dimenzijama razletelih komada kao i parametre otpora vazduha.

Sa stanovišta neuronskih mreža bilo je potrebno prikupiti podatke o svim parametrima koji utiču na pojavu razletanja.

### **5.1 Opis i specifikacija podataka**

U okviru poglavlja dva faktori koji utiču na pojavu razletanja su kategorisani u dve grupe, tehničke i prirodne. Shodno tome, i pri pripremama za terenska istraživanja su potrebni podaci kategorisani u dve kategorije sa podkategorijama. Prvu kategoriju čine podaci o tehničkim parametrima, to jest parametrima koji su pod uticajem minera. U okviru podataka o tehničkim parametrima izvršena je podela u tri podgrupe tako da su

podaci klasifikovani u podatke o geometriji miniranja, o šemi rušenja stenske mase i o karakteristikama eksploziva. U okviru kategorije podataka o prirodnim faktorima nije vršena kategorizacija. Pregled prikupljenih podataka dat je u tabeli 5.1.

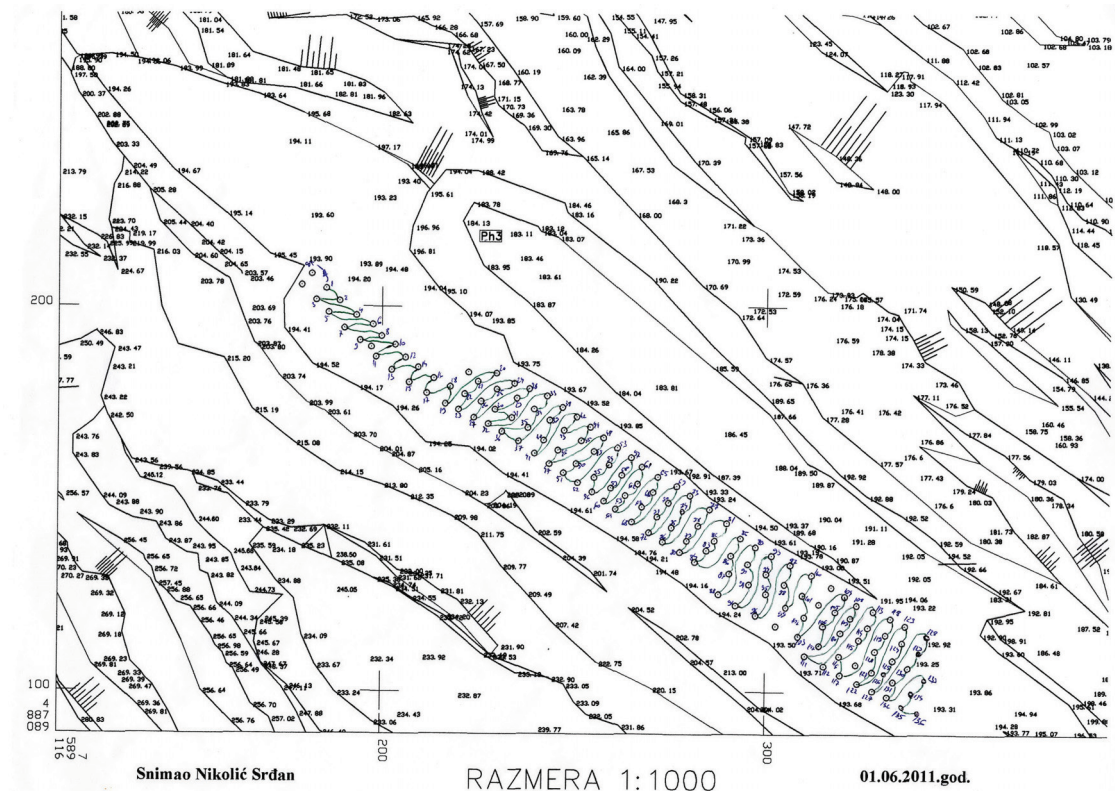
Pored podataka o parametrima koji utiču na pojavu razletanja u toku terenskih istraživanja prikupljani su i podaci o samom razletanju, to jest evidentirana je pojava razletanja, tip razletanja i početna brzina i ugao izletanja.

**Tabela 5.1** – Pregled podataka o minskim serijama i karakteristikama radne sredine

Naziv	Oznaka	Podgrupa	Grupa
Dubina bušotine	$l_b$	Geometrija minskog polja	Tehnički faktori
Prečnik bušotine	$d_b$		
Nagib bušotine	$B$		
Dužina čepa	$l_c$		
Linija najmanjeg otpora	$W$		
Rastojanje između bušotina	$A$		
Usporenje	$\tau$	Šema rušenja	
Broj slobodnih površina	$N_{sp}$		
Tip eksploziva	$X_t$	Karakteristike eksploziva	
Masa eksplozivnog punjenja	$Q$		
Gustina eksploziva	$\rho_E$		
Detonaciona brzina eksploziva	$D$		
Gasna zapremina eksploziva	$V_g$		
Zapreminska masa stene	$\gamma_s$	Karakteristike sredine	
Pritisna čvrstoća stene	$\sigma_p$		
Zatezna čvrstoća stene	$\sigma_i$		
Ovodnjenost bušotine	$H_2O$		

Podaci o geometriji minske serije preuzeti su iz dnevnika miniranja koje, za svako miniranje ponaosob, vodi minerska služba PK Veliki Krivelj jer ova služba izvodi miniranja i na PK Cerovo i na kamenolomu Kriveljski kamen. Sastavni deo dnevnika miniranja je i geodetski snimak minske serije u odgovarajućoj razmeri (Slika 5.1) i sa kojeg su očitane vrednosti linija najmanjeg otpora i rastojanja između bušotina. Na

geodetskom snimku je prikazan i način iniciranja serije sa unesenim vrednostima usporenja pa je bilo moguće sprovesti vremensku analizu šeme iniciranja i preuzeti podatke o intervalima usporenja i broju slobodnih površina.



*Slika 5.1 – Geodetski snimak minske serije iz dnevnika miniranja*

Iz dnevnika miniranja su takođe preuzeti i podaci o primenjenom eksplozivu u smislu tipa eksploziva i mase eksplozivnog punjenja. Podaci o karakteristikama eksploziva su preuzeti iz kataloga proizvođača za odgovarajući eksploziv.

Podaci o karakteristikama sredine su preuzeti iz projektne dokumentacije rudnika (*Tehnička dokumentacija rudnika, 1996, 2011a, 2011b*).

Podaci o razletanju i o početnim brzinama i uglovima razletanja komada dobijeni su obradom snimaka posmatranih miniranja. Podaci o otporu vazduha dobijeni su takođe na osnovu video snimaka posmatranih miniranja.

## **5.2 Osnovni podaci o miniranjima i radnoj sredini**

### **5.2.1 Prečnik bušotine**

Prečnik bušotine je jedan od jako bitnih parametara minske serije. U direktnoj je vezi sa masom eksploziva koja se može smestiti u bušotinu jer sa dužinom eksplozivnog punjenja definiše raspoloživa zapreminu za smeštaj eksploziva.

Na površinskom kopu Veliki Krivelj se izrađuju minske bušotine sa prečnicima od 250 i 110 mm. Na PK Cerovo se miniranje vrši bušotinama prečnika 250 mm dok se na kamenolomu Kriveljski kamen miniranje obavlja bušotinama prečnika 76 mm.

### **5.2.2 Dužina bušotine**

Dužina ili dubina bušotine je takođe parametar kojim se, preko raspoložive zapremine, definiše masa eksplozivnog punjenja. Pri praćenim miniranjima su evidentirane različite dužine bušotina sa minimalnom vrednošću od 5,5 m, maksimalnom od 17 m i srednjom vrednošću od 9,9 m uz standardnu devijaciju od 2,8 m. Razlike u dužini bušotina se pre svega javljaju zbog razlika u visinama etaža kao i usled lokalnih uslova konkretnih minskih serija.

### **5.2.3 Nagib bušotine**

Nagib bušotine predstavlja ugao ose bušotine u odnosu na horizontalnu ravan. S obzirom na to da je na svim posmatranim lokacijama ugao bušenja iznosio 90° ovaj podatak je kasnije eliminisan iz analize jer nije imao uticaja na ishod.

### **5.2.4 Dužina čepa**

Začepljenje bušotine se vrši kako bi se gasoviti produkti eksplozije zadržali u bušotini i kako bi se dejstvo pritiska gasovitih produkata usmerilo na okolnu stensku masu. Usled nedovoljne dužine čepa gasoviti produkti detonacije mogu izbiti čep i napustiti bušotinu kroz zonu čepa. Na taj način se energija pritiska ne usmerava ka okolnoj steni već predstavlja gubitak. Usled smanjenog otpora gasoviti produkti deluju kao propelant izbacujući materijal čepa naviše ili deluju na stensku masu pri vrhu bušotine formirajući kratera. U oba slučaja je rezultat razletanje komada stenske mase, ili u vidu izduvavanja čepa ili u vidu razletanja iz kratera. Maksimalna izmerena vrednost dužine čepa iznosila je 11 m, minimalna 4,5 m a srednja vrednost 5,9 m uz standardnu devijaciju od 1,6 m.

### **5.2.5 Linija najmanjeg otpora**

Linija najmanjeg otpora predstavlja minimalno rastojanje od eksplozivnog punjenja (bušotine) do slobodne površine. Energija eksploziva usmerava se ka slobodnoj površini jer je u tom pravcu otpor manji pa veličina linije najmanjeg otpora, uz rastojanje između bušotina definiše zapreminu stenskog materijala kojem će biti saopštena energija eksploziva. Kako je ranije objašnjeno, svaki disbalans između potrebne i saopštene energije rezultuje pojavom neželjenih efekata miniranja. Linije najmanjeg otpora evidentirane u toku rada iznosile su od 3,1 do 30 m sa srednjom vrednošću od 5,8 m i standardnom devijacijom od 2,8 m. Pri tome treba naglasiti da su projektovane vrednosti linija najmanjeg otpora u rasponu od 4 do 7 m ali na terenu svakako dolazi do odstupanja, u nekim slučajevima i značajnih. Vrednosti linija najmanjih otpora od 30 m ne predstavljaju pravo rastojanje od slobodne površine već vrednost koja je usvojena u slučajevima stešnjenog punjenja. Naime, u nekoliko slučajeva su miniranja vršena na etažama koje se nalaze na dnu kopa. U tom slučaju prvo-inicirane bušotine, odnosno eksplozivna punjenja u njima, deluju u stešnjenim uslovima, bez slobodnih površina. U takvim slučajevima linija najmanjeg otpora ima praktično beskonačnu vrednost. Međutim, s obzirom da bi usvajanje beskonačne

vrednosti bilo skopčano sa velikim greškama usvojene su vrednosti linije najmanjeg otpora koje eksplozivna punjenja ne mogu savladati a koje će u dovoljnoj meri uticati na rezultate analize ali neće rezultovati sistemskom greškom.

### **5.2.6 Rastojanje između bušotina**

Rastojanje između bušotina predstavlja rastojanje između dve bušotine u istom redu. Sva objašnjenja data za liniju najmanjeg otpora u smislu uticaja na pojavu neželjenih efekata miniranja i maksimalne vrednosti važe i za rastojanje između bušotina. Rastojanja između bušotina kretala su se u opsegu od 2,5 do 28 m. Srednja vrednost iznosi 6,1 m dok je standardna devijacija 3,7 m.

### **5.2.7 Interval usporenja**

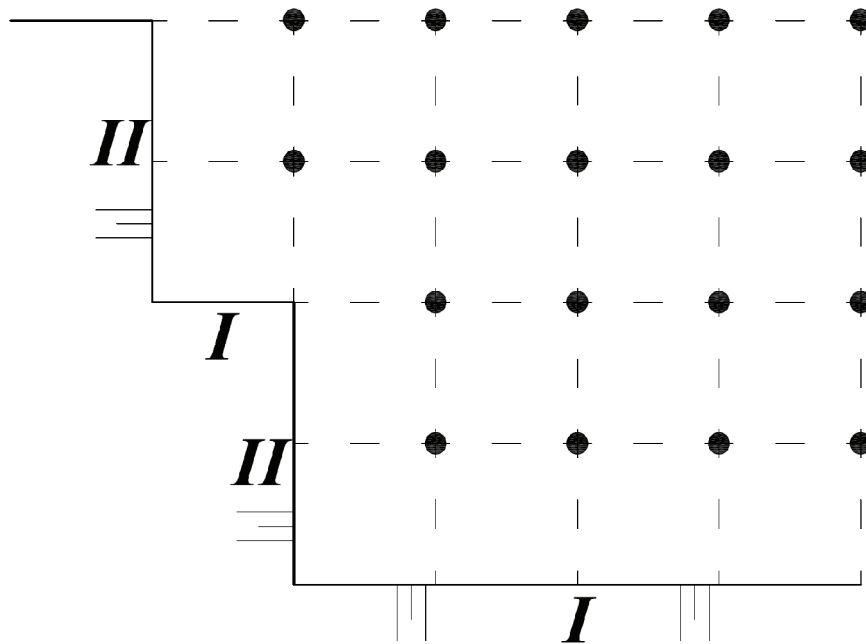
Interval usporenja predstavlja vremenski interval između dve sukcesivne detonacije a kombinacijom odgovarajućih intervala usporenja se postiže željeni redosled rušenja stenske mase i broj eksplozivnih punjenja, to jest ukupna masa eksploziva koja se jednovremeno inicira. Pri posmatranim miniranjima korišćena su usporenja od 17 i 25 ms između bušotina u redu i 25 i 42 ms između pojedinih redova. Analizom dnevnika miniranja i prikazanih šema iniciranja zaključeno je da su kombinacije usporenja između bušotina i između redova uvek bile takve da onemogućavaju jednovremeno iniciranje dva eksplozivna punjenja i da je minimalni interval usporenja između dve sukcesivne detonacije iznosio 9 ms.

### **5.2.8 Broj slobodnih površina**

Broj slobodnih površina prema kojima se usmerava dejstvo eksplozivnog punjenja zavisi od šeme rušenja stenske mase. Drugim rečima, pravilnim rasporedom usporivačkih elemenata redosled detonacija eksplozivnih punjenja i rušenje stenske



mase se tako vode da se svakom eksplozivnom punjenju omogući stvaranje maksimalnog broja slobodnih površina. Na taj način se energija eksploziva usmerava ka ograničenoj zapremini stene čime se postižu najbolji efekti miniranja. Prilikom posmatranih miniranja eksplozivna punjenja su imala 0, jednu ili dve slobodne površine. U slučajevima kada je miniranje vršeno na najnižim etažama, to jest na dnu kopa prvo-inicirano eksplozivno punjenje nema ni jednu bočnu slobodnu površinu. U tom slučaju se govori o stešnjenjnoj sredini i energija eksploziva se generalno usmerava naviše, prema gornjoj ravni etaže, često rezultujući pojavom razletanja. Eksplozivna punjenja koja se nalaze na početku reda imaju samo jednu slobodnu površinu, ili prema kosini etaže (I red) ili prema prethodnom redu. Ostala punjenja, u zavisnosti od šeme rušenja, najčešće imaju po dve slobodne površine, primarnu prema prethodnom redu i sekundarnu, prema prethodnoj bušotini iz istog reda (Slika 5.2).



**Slika 5.2** – Primarne (I) i sekundarne (II) slobodne površine pri rušenju stenske mase miniranjem

### 5.2.9 Tip eksploziva

Pri svim praćenim miniranjima korišćena su dva tipa eksploziva, Majdanit 10 i ANFO J proizvođača TRAYAL. Majdanit je korišćen u slučajevima kada je u minskim bušotinama bila prisutna voda, zbog njegove otpornosti na vodu. U uslovima suvih bušotina primenjivan je ANFO. Karakteristike eksploziva koje imaju uticaja na performanse eksploziva i pojavu razletanja su gustina eksploziva, detonaciona brzina i gasna zapremina (zapremina gasovitih produkata eksplozije) i to su parametri korišćeni u daljoj analizi. Karakteristike eksploziva date su u tabeli 5.2.

*Tabela 5.2 – Karakteristike primenjenih eksploziva*

Karakteristika	Oznaka	Jedinica	Majdanit 10	ANFO-J.1
Gustina	$\rho_E$	g/cm <sup>3</sup>	1,06 – 1,25	0,95 – 1,00
Detonaciona Brzina	D	m/s	min. 3500	2000 – 2500
Bilans kiseonika	O <sub>2</sub>	-	Uravnotežen	Uravnotežen
Gasna zapremina	V <sub>g</sub>	dm <sup>3</sup> /kg	1085	1045
Toplota eksplozije	Q <sub>x</sub>	kJ/kg	2770	3872

### 5.2.10 Masa eksplozivnog punjenja

Masa eksplozivnog punjenja varirala je od 60 do 450 kg sa srednjom vrednošću od 232,7 kg i standardnom devijacijom od 71,8 kg.

### 5.2.11 Karakteristike radne sredine

Kako su posmatrana miniranja vršena na tri različita površinska kopa morale su biti uzete u obzir karakteristike svih radnih sredina u kojima su miniranja vršena. Podaci o karakteristikama radne sredine su obuhvatili čvrstoću na pritisak, čvrstoću na istezanje i zapreminsku masu. Sa aspekta miniranja karakteristika stene koja bi najbolje definisala ponašanje stene pri detonaciji eksplozivnog punjenja je svakako Jungov moduo

elastičnosti. Nažalost, u tehničkoj dokumentaciji rudnika ne postoji ovaj podatak i jedini način da se on obezbedi bi bila nova laboratorijska ispitivanja. Takva ispitivanja nije bilo moguće sprovesti. Podatak o raspucalosti stenske mase takođe nije obezbeđen jer su površine etaža na kojima se vršilo miniranje generalno bile zasute materijalom pa pukotinski sistemi nisu bili vidljivi. Kosine etaža su takođe bile prekrivene pa pokušaji da se do podatka o raspucalosti primenom specijalizovanih software-a za obradu fotografija (SplitEng SplitFX) nisu urodili plodom. Iz tog razloga su u daljoj analizi korišćeni dostupni podaci prikazani u tabeli 5.3.

**Tabela 5.3 – Fizičko-mehaničke karakteristike stenske mase**

Kop		Vrsta stene	Zapreminska masa $\gamma_s$	Čvrstoća na pritisak $\sigma_p$	Čvrstoća na istezanje $\sigma_i$
			t/m <sup>3</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>
PK Veliki Krivelj	K + 320	Hidrotermalno izmenjene stene	2,506	311,936	34,682
		Hornblenda biototski andezit	2,615	846,55	68,85
		Kvarcdiorit	2,543	425,2	55,675
	K + 260	Hidrotermalno izmenjene stene	2,565	631,5	90,407
		Hornblenda biototski andezit	2,563	890,017	103,525
		Kvarcdiorit	2,545	681,65	79,675
	K + 160	Hidrotermalno izmenjene stene	2,643	675,129	69,829
		Hornblenda biototski andezit	2,667	732,3	87,867
		Kvarcdiorit porfir	2,517	407,3	46,933
		Skarn	2,568	489,5	60,75
		Krečnjak	2,430	675,263	66,578
	PK Cerovo		Hloritisani andezit	2,498	330,900
Sveži andezit			2,608	480,520	99,000
Kamenolom Krivelj		Krečnjak	2,642	1366,500	181,260

### **5.2.12 Početna brzina razletanja**

Početna brzina razletelih komada je parametar koji ima najveći uticaj na maksimalni domet razletelih komada. Iz tog razloga je bilo od izuzetne važnosti odrediti realne vrednosti početnih brzina na terenu. Pored činjenice da su izmerene vrednosti početnih brzina korišćene u procesu obuke i validacije neuronskih mreža treba istaći i činjenicu da su merene, to jest realne, vrednosti početnih brzina korišćene i u postupku verifikacije neuro-numeričke sprege kao kontrolni parametar za prognoziranje vrednosti.

Određivanje početne brzine razletanja predstavljalo je najveći problem u toku istraživanja. Zbog kompleksnosti samog problema primenjeni pristupi problemu određivanja početne brzine i način na koji su one određene obrađene su posebnim poglavljem.

## **5.3 Određivanje početne brzine komada**

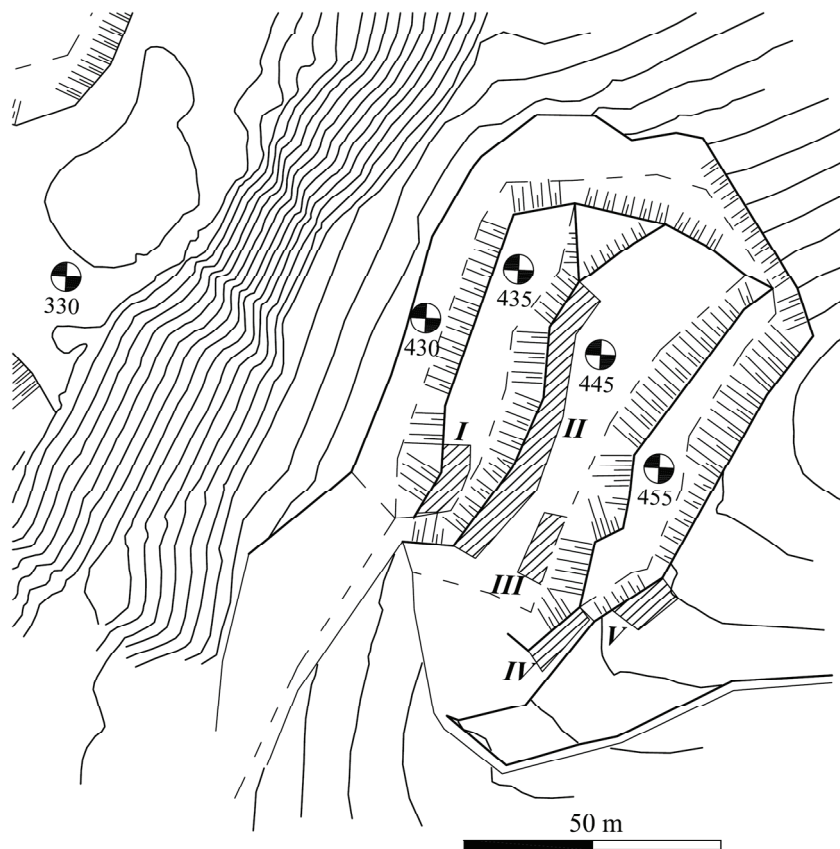
### **5.3.1 Reversni balistički pristup**

U ranoj fazi istraživanja i primene balističkog numeričkog modela za definisanje dometa razletelih komada podaci i početnim brzinama razletelih komada određivani su na osnovu evidentiranih dometa reversnim proračunom. Balistički numerički model je prvi put primenjen za forenzičke potrebe i u daljem tekstu se navodi primer reversnog proračuna i opis procedure na realnom primeru.

5. Maja 2007. Godine na površinskom kopu (kamenolomu) Kamenica kod Kraljeva došlo je do izrazitog razletanja komada odminirane mase i ozbiljnih oštećenja objekata koji se nalaze u blizini. Nakon razletanja bilo je neophodno sprovesti analizu incidenta i utvrditi uzroke razletanja kako bi se sprečili budući incidenti.

Sam kop ima uzdignut položaj u odnosu na procesnu platformu okolni teren. Nalazi se na vrhu brda na koti K+430 m. Materijal iz kamenoloma se gravitacijski spusta niz 100 m visoku liticu do glavne platforme gde se dalje procesuiru.

Minsko polje pri pomenutom događaju sastojalo se od pet pojedinačnih minskih serija sa ukupno 122 bušotine prečnika 76 mm (Slika 5.3). Raspored bušotina je bio šahovski sa projektovanom linijom najmanjeg otpora  $W=2,8$  m i rastojanjem između bušotina  $A=3$  m. Bušotine su bile nagnute i paralelne čelu etaže. Visina etaže iznosila je 14 m a ugao kosine etaže bio je  $70^\circ$ . Dubina bušotina je varirala od 3 m (serija I) do 15,5 m (serija II). Korišćene su dve vrste patroniranog eksploziva, Emulgit 82 GP 60/2000 i Emex AN 65/2500 u ukupnoj količini od 4 467 kg. Karakteristike eksploziva date su u tabeli 5.4. Za iniciranje eksplozivnih punjenja utrošeno je 130 Nonel-a sa površinskim usporenjem od 17 ms i bušotinskim usporenjem od 500 ms. Maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja iznosila je 63,5 kg (*Pantovic et al., 2007*).



**Slika 5.3** – Minsko polje sa položajem minskih serija (*Stojadinović et al., 2011*)

Tabela 5.4 – Karakteristike primenjenih eksploziva

Karakteristika	Oznaka	Jedinica	Majdanit 10	ANFO-J.1
Gustina	$\rho_E$	$\text{g/cm}^3$	1,2	1,2
Detonaciona Brzina	D	m/s	4100	4700
Bilans kiseonika	O <sub>2</sub>	%	-1,41	-3,5
Gasnazapremina	V <sub>g</sub>	$\text{dm}^3/\text{kg}$	868	1011
Toplota eksplozije	Q <sub>X</sub>	$\text{kJ/kg}$	4058	3040

Kako je pri miniranju došlo do razletanja i, kao rezultat, ozbiljnog oštećenja nekoliko okolnih objekata (Slika 5.4) bilo je neophodno izvršiti uviđaj na terenu. Cilj uviđaja je bio utvrđivanje obima razletanja u smislu veličine i broja razletelih komada kao i ugrožene površine kako bi se utvrdili uzroci razletanja i redefinisala sigurna zona. Uviđajem je utvrđeno da su prečnici razletelih komada varirali od 3 do 50 i više cm i da je u proseku pao jedan komad na svakih 16 m<sup>2</sup>.



Slika 5.4 – Pogled na oštećene objekte sa etaže kamenoloma, razleteli komadi odminirane mase pronađeni na terenu i detalj oštećenja na objektu

Međutim, nije bilo moguće pregledati kompletan teren i na taj način utvrditi veličinu ugrožene zone pa je stoga primenjen numerički model i formirane su diferencijalne balističke jednačine u cilju definisanja trajektorija i maksimalnog dometa. Jednačine su formirane na način objašnjen u okviru tačke 4.2.2 i rešene primenom opisanih postupaka približnog numeričkog rešenja i RK-4 algoritma.

Jednačine su formirane i rešavane za leteće komade odminirane mase prečnika 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 i 50 cm. Osnovni ulazni parametri diferencijalnih jednačina su bili masa letećih komada, ugao izletanja i početna brzina. Leteći komadi su aproksimirani sferama čiji su prečnici odgovarali srednjim dimenzijama razletelih komada.

Masa komada je sračunata prema formuli

$$m = \frac{4}{3} \left( \frac{d}{2} \right)^3 \pi \gamma_s \quad (5.1)$$

Za ugao izletanja je uzeta vrednost od  $45^\circ$  a odluka je donesena na osnovu približno istog nagiba pukotina u masivu i pretpostavke da su pukotinski sistemi uticali na ugao izbacivanja.

Najveći problem bio je određivanje početne brzine komada. U literaturi se može naći više metoda za određivanje početne brzine komada opisanih u okviru tačke 3. Međutim, primena formula za određivanje početne brzine razletelih komada po Roth-u, Lundborg-u i St.George-u nije dala rezultate koji su bili u skladu sa situacijom na terenu (Tab. 5.5). Workman – Calder i Richards – Moor koncept nije bio primenljiv jer nije bilo dovoljno podataka za sprovođenje regresivne analize i definisanje koeficijenta lokacije.

**Tabela 5.5–** Prognoza početne brzine i dometa prema literaturnim preporukama

Kriterijum	Početnabrзина $v_0$ (m/s)	Dometa $L_R$ (m)
Gurney-Roth	313	1220
Lundborg	1,52	3,5
St.George	23	65

Sve ovo navelo je na zaključak da opisani pristupi i koncepti nisu opšte primenljivi i da su visoko zavisni od lokacije i uslova miniranja. Iz tog razloga je bio potreban drugačiji pristup.

Rešenje koje nije zavisilo od uslova lokacije je bila primena reversnog balističkog pristupa. Sa poznatom masom komada i maksimalnim dometom utvrđenim na terenu bilo je moguće formirati balističke diferencijalne jednačine leta zanemarujući otpor vazduha. U uslovima bez otpora vazduha jednačina (4.2) postaje

$$m\vec{a} = \vec{F}_G, \quad (5.2)$$

a sistem jednačina (4.6) postaje:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= m \frac{d^2x}{dt^2} = 0 \\ m\ddot{y} &= m \frac{d^2y}{dt^2} = -mg \end{aligned} \quad (5.3)$$

Integracija ovih diferencijalnih jednačina daje analitičke izraze za proračun  $x$  i  $y$  koordinata letećeg komada u bilo kom trenutku vremena:

$$x = x_0 + v_0 t \cos \theta, \quad (5.4 a)$$

$$y = y_0 + v_0 t \sin \theta - \frac{gt^2}{2}. \quad (5.4 b)$$

Vreme  $t$  iz jednačine (4.28 a), uz početni uslov da je  $x_{(0)} = 0$ , može se izraziti kao



$$t = \frac{x}{v_0 \cos \theta} \quad (5.5)$$

Zamenom u jednačini (4.28 b) za početne uslove da je za  $t=t_{max}$   $y=0$ , početna brzina se može izraziti kao

$$v_0 = x \sqrt{\frac{g}{2y_0 \cos^2 \theta + 2x \sin \theta \cos \theta}} \quad (5.6)$$

U vreme kada je izrađivana studija pošlo se od logične pretpostavke da, usled inercije, najveći komadi imaju najmanje početne brzine. Kako komadi prečnika 50 cm, kao najveći, nisu pronađeni na udaljenostima većim od 320 m, ova veličina komada je iskorišćena za proračun minimalne početne brzine. Za početne uslove  $x_{(0)}=0$ ,  $y_{(0)}=100$  m,  $x=320$  m, prema jednačini (5.6) početna brzina komada prečnika 50 cm iznosila je 47 m/s. Pošto je u ovom proračunu zanemaren otpor vazduha, stvarna početna brzina je dobijena uvećanjem vrednosti dobijene proračunom za 15-20 %. Na taj način je za početnu brzinu komada prečnika 50 cm usvojena vrednost od 55 m/s. Logika je govorila da najmanji komadi imaju najveću početnu brzinu. Kako je većina komada prečnika 5 cm pronađena na udaljenostima manjim od 350 m ponovo je primenjen opisani reversni balistički pristup i njihova početna brzina određena na 150 m/s. Početne brzine komada ostalih dimenzija su slobodno procenjene jer nije bilo materijalnih dokaza o njihovom maksimalnom dometu (Tabela 5.6).

**Tabela 5.6**– Početni parametri razletelih komada

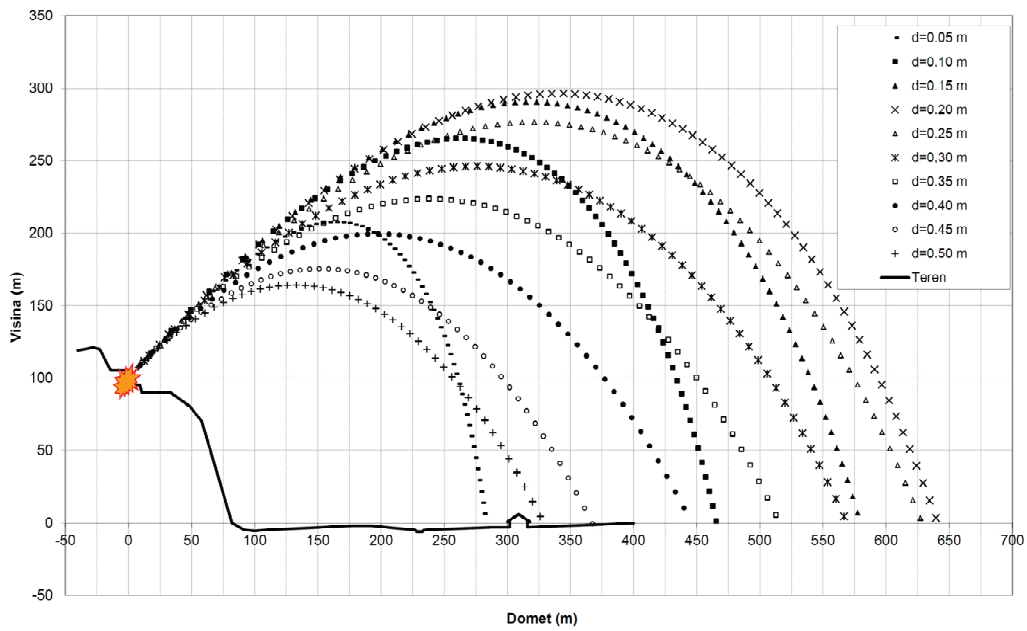
Veličina komada m	Početna brzina m/s	Masa komada kg	Površina poprečnog preseka m <sup>2</sup>
0,05	150	0,17	0,002
0,10	140	1,36	0,008
0,15	130	4,59	0,018
0,20	120	10,89	0,031
0,25	105	21,26	0,049
0,30	90	36,74	0,071
0,35	80	58,34	0,096
0,40	70	87,08	0,126
0,45	60	123,99	0,159
0,50	55	170,08	0,196

Upravo zbog toga, to jest određivanja maksimalnog dometa komada srednjih prečnika, formirane su diferencijalne balističke jednačine ali sada uzimajući u obzir otpor vazduha. Za koeficijent otpora vazduha usvojen je koeficijent otpora za sferu koji se nalazi u granicama od 0,07 do 0,5 (*NASA, 2013*). Međutim, kako bi se uzela u obzir neregularnost oblika letećih komada odminirane mase i grubost njihove površine u proračunu je korišćena vrednost koeficijenta otpora vazduha od  $C_D=0,8$ .

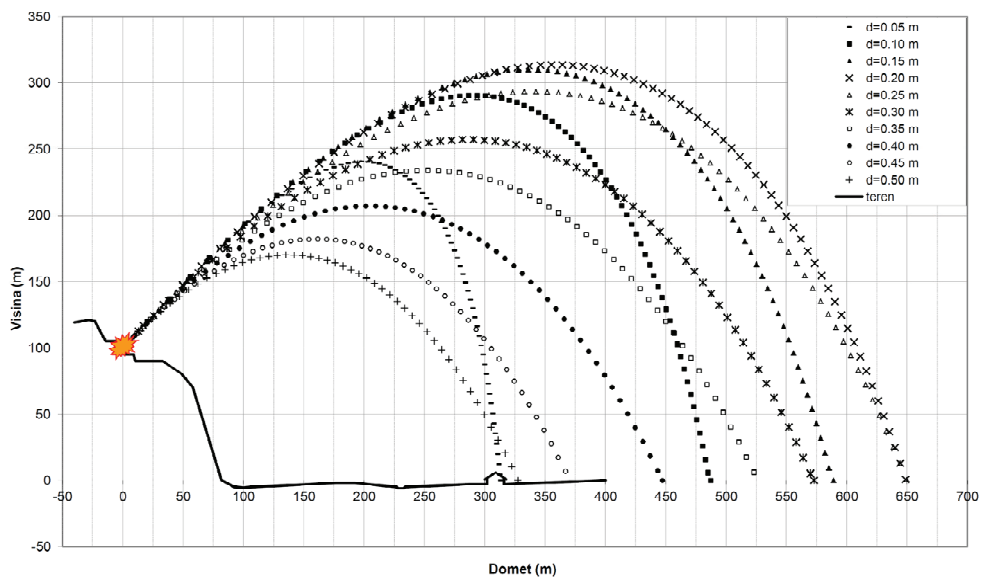
Trajektorije letećih komada odminirane mase su sračunate i grafički prikazane primenom približnog numeričkog rešenja i RK-4 algoritma. Ulazni parametri bili su:

Veličina komada	- $d=5-50$ cm
Početna brzina	- prema tabeli 4.2
Ugao izletanja	- $\theta = 45^\circ$
Masa komada	- prema tabeli 4.2
Površina poprečnog preseka-	prema tabeli 4.2
Koef. Otpora vazduha	- $C_D = 0.8$
Gustina vazduha	- $\rho = 1.2044$ kg/m <sup>3</sup>
Vremenski korak	$dt, \Delta t = 0.2$ s

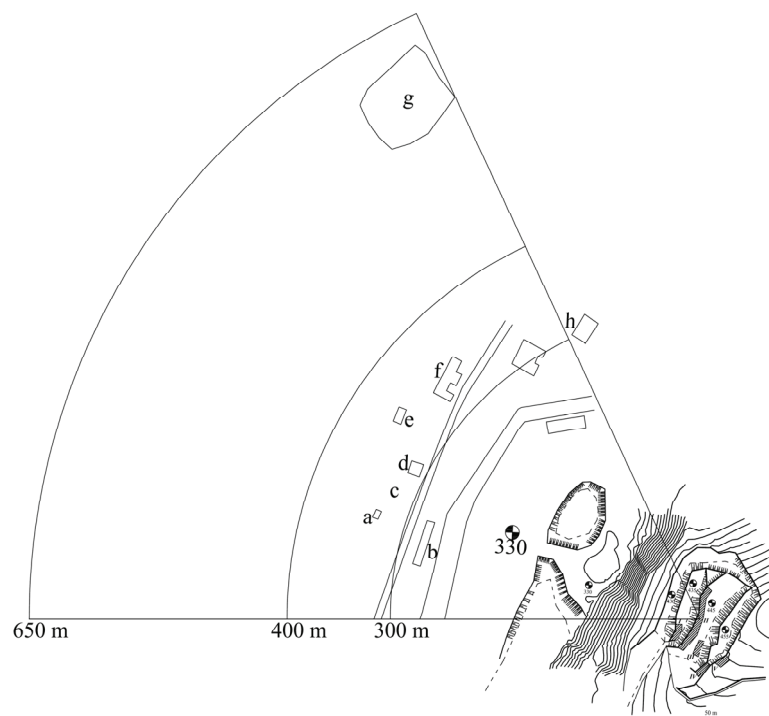
Trajektorije letećih komada odminirane mase prikazane su na slikama 5.5 i 5.6, a ugrožena zona na slici 5.7.



*Slika 5.5 – Trajektorije razletelih komada odminirane mase definisane numeričkim rešenjem diferencijalnih balističkih jednačina*



*Slika 5.6 – Trajektorije razletelih komada odminirane mase definisane rešenjem diferencijalnih balističkih jednačina primenom RK-4 algoritma*



**Slika 5.7** – Zona ugrožena razletanjem komada odminirane mase sa PK Kamenica

Kao što se sa slika može videti, maksimalni domet razletelih komada pri miniranju od 5. maja 2007. godine iznosio je 650 m za komade prečnika 20 i 25 cm. To se poklapa sa izjavama očevidaca koji tvrde a su komadi odminirane mase padali i u ribnjak udaljen 500 m od minskog polja.

Poklapanje situacije na terenu sa rešenjima diferencijalnih balističkih jednačina dalo je potvrdu primeni reversnog balističkog pristupa za određivanje početnih brzina razletelih komada. Međutim, iako se u praksi pokazalo da je ovakvo rešenje funkcionalno, ono iz nekoliko razloga nije moguće usvojiti kao zadovoljavajuće. Prvi razlog je usvojena vrednost koeficijenta otpora vazduha od 0,8 što nije u skladu sa rezultatima terenskih ispitivanja opisanim u okviru tačke 5.4. Drugi razlog je metodologija određivanja početne brzine komada. Određivanje početne brzine komada izvršeno je na osnovu materijalnih dokaza prikupljenih postakcidentno, za uslove koji važe na PK Kamenica i samo za forenzičke potrebe. Primena na drugim kopovima je moguća takođe za forenzičke potrebe ali nikako za potrebe prognoze dometa razletelih komada. Pored toga, kasnija istraživanja sa terena ukazuju na to da razleteli komadi u

trenutku izletanja imaju istu početnu brzinu, bez obzira na njihove dimenzije. Do diferencijacije po brzinama dolazi u kasnijim fazama razletanja (komadi koji se odvajaju od masiva kasnije imaju manje početne brzine). Takođe, do diferencijacije po brzinama dolazi i kasnije tokom leta zbog već objašnjenog ekvilibrijuma inercijalnih sila i sila otpora vazduha. Sve ovo uslovalo je zaključak da je neophodan novi način za prognozu početne brzine razletelih komada koji neće zavisiti od lokalnih uslova.

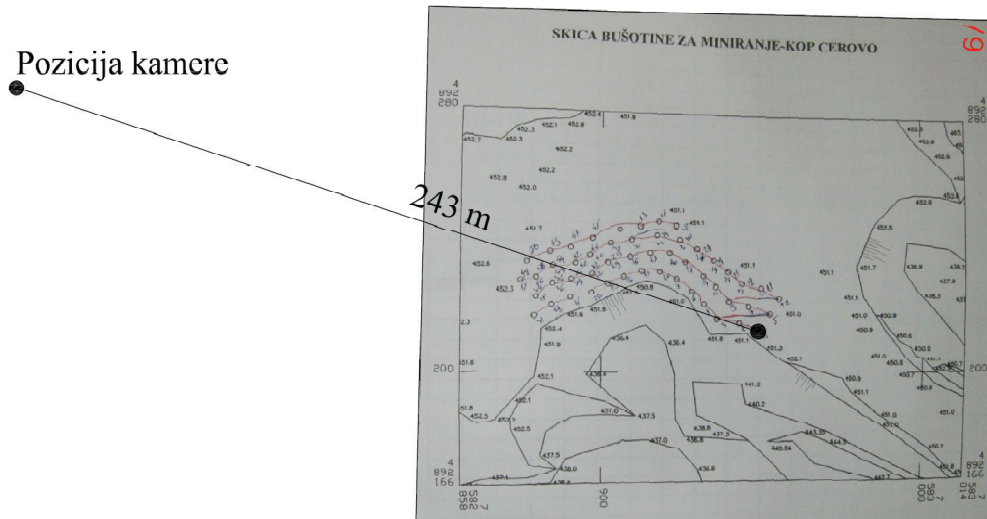
S obzirom na rastuću primenu neuronskih mreža u svim oblastima naučnog istraživanja izvršen je pokušaj da se adaptivne osobine neuronskih mreža i njihove mogućnosti mapiranja korelativnih odnosa između naizgled nespojivih parametara iskoriste za prognozu početne brzine razletelih komada na osnovu geotehničkih parametara miniranja. Na taj način dobio bi se opšte primenljiv, univerzalni neuro-numerički model za prognozu dometa razletelih komada i definisanje sigurnih rastojanja. Međutim, da bi se dobio uvid u realne vrednosti početnih brzina razletelih komada i da bi se dobili podaci o početnim brzinama bilo je neophodno sprovesti dodatna terenska istraživanja.

### **5.3.2 Određivanje početne brzine sa ultra-brzih snimaka**

Da bi se došlo do realnih podataka o vrednostima početnih brzina razletelih komada miniranja su snimana ultra-brzom kamerom. Za snimanje je korišćena kamera Casio EXILIM FH – 20, sa optičkim zumom od 20X i mogućnošću snimanja sa brzinama od 210, 420 i 1000 fps. S obzirom na to da kvalitet snimaka opada sa povećanjem brzine snimanja minske serije su snimane sa brzinom od 210 fps u rezoluciji od 480 x 360 piksela. Detaljni podaci o tehničkim karakteristikama korišćene kamere mogu se pronaći u literaturi (*Casio, 2013*). To praktično znači da je kamera registrovala 210 snimaka u jednoj sekundi i da je kao rezultat dobijen video snimak koji je sedam puta sporiji od realne situacije.

Položaj kamere pri snimanju je bio na udaljenosti od 150 – 300 m od najbliže bušotine u zavisnosti sigurnosnih uslova i na uzvišenom položaju u odnosu na minsku seriju da bi se obezbedila maksimalna vidljivost. Rastojanja od kamere do minske serije

sračunata su iz razlika u koordinatama pri čemu je položaj minske serije određen sa geodetskog snimka dok je položaj kamere određen ručnim GPS uređajem (Slika 5.8).



*Slika 5.8 – Određivanje rastojanja kamere od minske serije*

Jednom obezbeđen, video snimak miniranja je obrađen kako bi se iz njega izvukli pojedinačni frejmovi, to jest slike, sa kojih je moguće odrediti brzinu razletelih komada. Osnovna ideja je bila da je, upoređivanjem dva sukcesivna snimka, moguće odrediti rastojanje koje je između snimaka prevalio razleteli komad. Kako su snimci registrovani brzinom od 210 snimaka u sekundi vremenski interval koji je protekao između sukcesivnih snimaka iznosio je 4,7619 ms. Poznavanjem pređenog puta i proteklog vremena bilo je moguće odrediti brzinu.

### 5.3.2.1 Određivanje razmere

Prvi problem koji je trebalo rešiti bilo je određivanje realne vrednosti pređenih puteva na osnovu odgovarajućih vrednosti izmerenih na snimcima. Drugim rečima bilo je neophodno odrediti razmeru snimka. Prva ideja je bila postavljanje neke vrste razmernika na samu minsku seriju tako da on bude vidljiv na snimku. Iako logično ovo rešenje nije u praksi moglo dati pouzdane podatke zbog činjenice da se bušotine nalaze na različitim rastojanjima od objektiva kamere pa zbog perspektive ne bi bilo moguće

svuda primeniti istu razmeru. Postavljanje više razmernika po celom minskom polju nije bilo prihvatljivo jer bi zahtevalo vreme a sama radnja postavljanja bi predstavljala smetnju minerima i svojevrsni sigurnosni rizik.

S obzirom na to da se položaj minskih bušotina, za svaku seriju ponaosob, geodetski snima, donesena je odluka da se geodetski snimak, to jest sama minska serija, koriste kao reper za određivanje dimenzija.

Imajući u vidu optičke principe fotografije i uz poznavanje rastojanja između dve tačke na snimku kao i rastojanje između te dve tačke na terenu moguće je odrediti razmeru, odnosno faktor razmere kojim treba pomnožiti izmerene dužine sa snimka da bi se dobile njihove vrednosti na terenu.

Ukoliko je na terenu vrednost poznate dužine jednaka  $AB$  (Slika 5.9) a na snimku ta dužina iznosi  $A'B'$  pri čemu je udaljenost  $AB$  od sočiva kamere jednaka  $L_1$ , moguće je odrediti pseudo-žižnu daljinu  $f$  iz odnosa

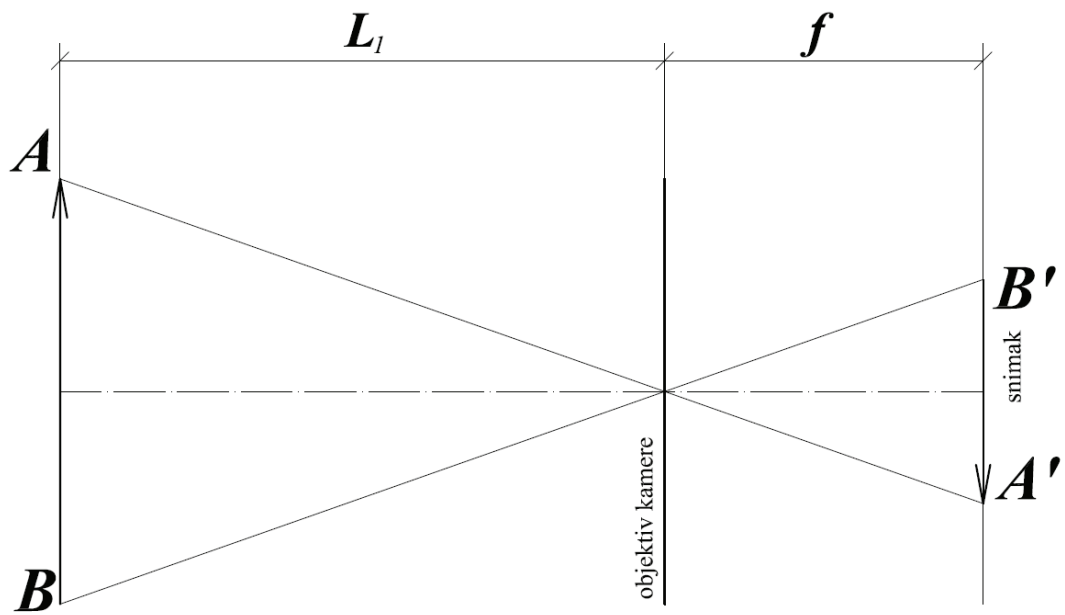
$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{L}{f}, \quad (5.7)$$

odakle je

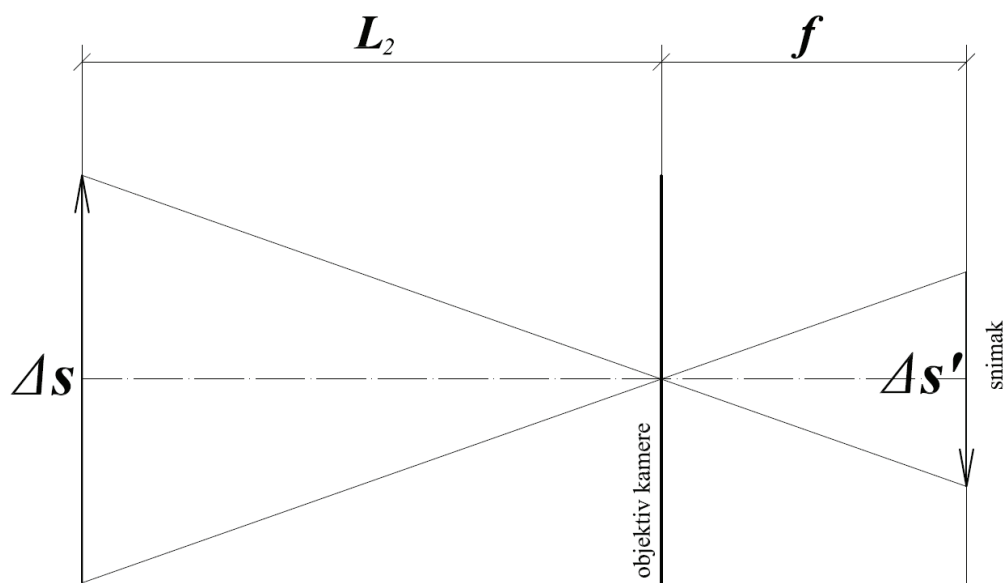
$$f = L \frac{A'B'}{AB}. \quad (5.8)$$

Sa druge strane, kako je pseudo-žižna daljina ista, ukoliko je na snimku izmeren pređeni put razletelog komada  $\Delta s'$  koji potiče iz bušotine na rastojanju  $L_2$  (Slika 5.10) od objektiva kamere onda je komad na terenu prevalio put

$$\Delta s = \Delta s' \cdot \frac{L_2}{f} = \Delta s' \cdot \frac{L_2}{L_1 \frac{A'B'}{AB}} = \Delta s' \cdot \frac{L_2}{L_1} \frac{AB}{A'B'} \quad (5.9)$$



Slika 5.9 – Osnovni princip fotografije i određivanje pseudo-žižne daljine



Slika 5.10 – Određivanje pređenog puta razletelog komada



S obzirom na to da je za poznato rastojanje  $AB$  pri obradi snimaka korišćeno rastojanje posmatrane bušotine od neke od susednih bušotina onda su rastojanja  $L_1$  i  $L_2$  ista pa se može pisati

$$\Delta s = \Delta s' \frac{AB}{A'B'} = \Delta s' \cdot C_R, \quad (5.10)$$

gde je  $C_R$  faktor razmere.

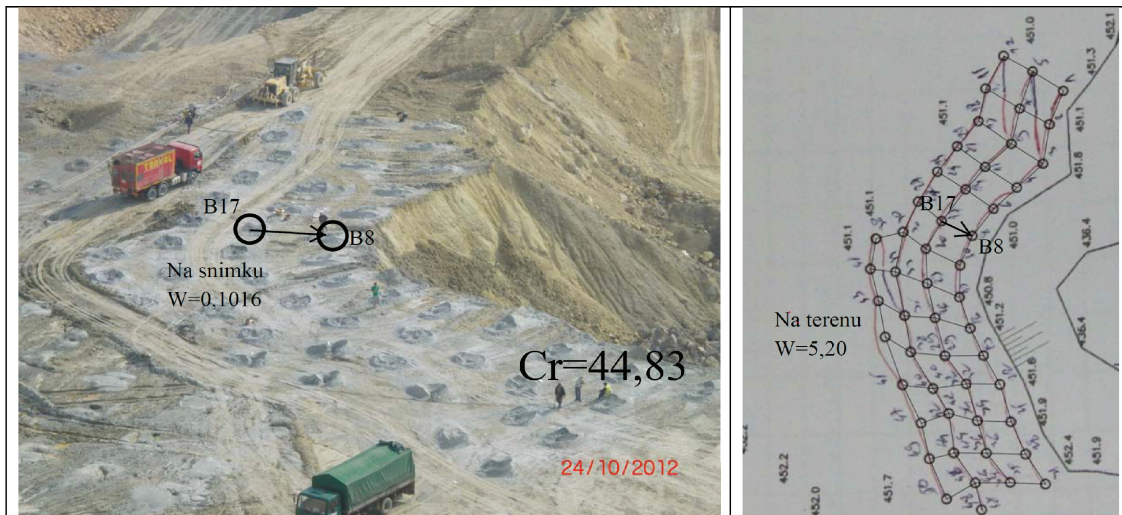
Na ovaj način utvrđeni su principi određivanja pređenih puteva razletelih komada odnosno razmera snimka. Pri obradi snimaka razmera je definisana za svaku posmatranu bušotinu ponaosob čime je eliminisan problem perspektive.

### 5.3.2.1 Obrada snimaka i rezultati obrade

#### 5.3.2.1.1 Obrada snimaka

Video snimke miniranja bilo je neophodno obraditi kako bi se na osnovu njih, ili sa njih, mogli dobiti podaci o početnim brzinama i uglovima razletanja. Obrada snimaka je podrazumevala pre svega izvlačenje pojedinačnih slika, to jest frejmova, iz video snimka i obradu tako dobijenih slika u CAD software-u. Izvlačenje pojedinačnih slika vršeno je primenom standardnog softverskog video plejera koji ima opciju „frame extract“ (The KM Player). Rezultat ekstrakcije su slike \*JPEG ili \*BMP formatu. Naravno, nije bilo potrebno sačuvati sve slike koje su dobijene ekstrakcijom već samo one na kojima je vidljivo razletanje iz posmatrane bušotine i one koje neposredno prethode razletanju.

Ovako dobijene slike uvučene su u AutoCAD u formi rasterske slike. Prva slika koja je uvučena u CAD bila je slika minske serije neposredno pre pojave razletanja iz posmatrane bušotine. Ova slika je neophodna kako bi se identifikovala bušotina koja je rezultovala razletanjem i kako bi se odredile referentne dimenzije, to jest rastojanja posmatrane bušotine od susednih bušotina. Na osnovu ovih referentnih rastojanja je određen faktor razmere za posmatranu bušotinu (Slika 5.11).



*Slika 5.11 – Određivanje faktora razmere*

Prilikom razletanja, u ranoj fazi, se razleteli materijal vidi kao „perjanica“ sastavljena od gasovitih produkata detonacije, sitnozrnog materijala i krupnijih komada. U početnim trenucima razletanja nije moguće jasno definisati pojedinačne razletele komade. Oni su jasno uočljivi u kasnijoj fazi međutim, preliminarne analize su ukazale na to da razleteli komadi, bez obzira na njihovu veličinu, u početnoj fazi razletanja imaju istu početnu brzinu. Uz to, komadi koji su se ranije razleteli imaju veću početnu brzinu od komada koji se od masiva odvajaju kasnije. Ovo ukazuje na to da je glavni propelant pritisak gasova eksplozije (bušotinski pritisak) i sa njegovim opadanjem opada i početna brzina razletelih komada. Do diferencijacije po brzinama kod komada različitih dimenzija dolazi kasnije, u toku leta, usled razlika u otporu vazduha i momentu kretanja.

Prethodno rečeno je navelo na zaključak da je, za potrebe dalje analize, dovoljno odrediti brzinu formiranja „perjanice“ u prvih par desetina milisekundi, to jest u prvih desetak frejmova, jer ova brzina odgovara maksimalnoj početnoj brzini razletelih komada.

Po određivanju faktora razmere u CAD su, jedan po jedan, ponovo kao rasterske slike, uvlačene slike na kojima je uočljivo razletanje. Da bi se dobile vrednosti pređenih puteva na svakoj slici je definisana veličina perjanice, to jest izmerena je njena visina. Na sukcesivnim slikama perjanica raste i razlika u dimenzijama predstavlja

pređeni put  $\Delta s$  (Slika 5.12). Kako je poznato vreme koje je proteklo između dve sukcesivne slike  $\Delta t = 4,7619$  ms onda je brzinu formiranja perjanice, a samim tim i maksimalnu početnu brzinu razletelih komada bilo moguće odrediti kao

$$v_0 = \frac{\Delta s}{\Delta t} . \quad (5.11)$$



**Slika 5.12** – Određivanje pređenog puta

Ugao razletanja takođe je određivan sa snimaka razletanja. Za vrednost ugla razletanja usvajana je vrednost ugla koji sa horizontalom sklapa linija povučena iz bušotine tako da tangira perjanicu razletelog materijala u trenutku kada je perjanica potpuno formirana i kada je moguće uočiti pojedinačne razletele komade.

Ono što treba naglasiti je greška merenja. Ranije je rečeno da je maksimalna rezolucija, odnosno kvalitet snimaka, iznosila 480 x 360 piksela. Sa uvećanjem slike dolazi do opadanja kvaliteta usled pikselacije. Drugim rečima, sa uvećanjem slike posmatrana tačka ili objekat gube oštrinu i na snimku se vide kao oblak piksela. Da bi se greška merenja svela na minimum pri merenju rastojanja između dve tačke, u slučajevima kada je bilo neophodno uvećavati sliku, merena su rastojanja između centara oblaka piksela. Čak i tako, greška merenja je prisutna i najveća je kod merenja najudaljenijih objekata. Najveća udaljenost posmatranih objekata (rastojanja između bušotina) od kamere iznosila je 500 m. Na ovoj udaljenosti je greška pri merenju dužine od 5 m iznosila 50 cm to jest 10 %. Na manjim rastojanjima je naravno greška bila

manja i minimalna greška je iznosila 0,5 %. Međutim, za grešku merenja je usvojena maksimalna vrednost od 10 %. Ova greška se naravno odražava i na sračunatu vrednost početnih brzina razletanja i takođe iznosi 10 %.

#### 5.3.2.1.2 Rezultati obrade snimaka

Rezultati obrade snimaka predstavljeni su sračunatim vrednostima početnih brzina. Vrednosti početnih brzina kreću se u rasponu od 8 do 428 m/s sa srednjom vrednošću od 74 m/s i standardnom devijacijom od 51 m/s.

Tri maksimalne vrednosti su iznosile 428, 416 i 319 m/s i ne predstavljaju grešku već realno izmerene vrednosti. Potvrda da su ove vrednosti stvarno izmerene je i vidljivi talas koji je nastao kao rezultat probijanja zvučnog zida (Slika 5.13). Međutim, kako su ovo bila tri ekstremna slučaja evidentirana pri samo jednom miniranju izuzeta su iz dalje analize jer je njihovo prisustvo rezultovalo velikom greškom. Uklanjanjem ova tri podatka vrednosti sračunatih početnih brzina su bile u opsegu od 8 do 237 m/s sa srednjom vrednošću od 73 m/s i standardnom devijacijom od 51 m/s.



*Slika 5.13 – Udarni talas kao posledica probijanja zvučnog zida, sukcesivni snimci*

## 5.4 Određivanje koeficijenta otpora vazduha

Otpor vazduha je još jedan parametar koji utiče na trajektoriju razletelog komada i njegov krajnji domet. S obzirom na to da je otpor vazduha proporcionalan kvadratu brzine razletelog komada ovaj parametar ima posebno izražen uticaj kod komada izbačenih većim početnim brzinama. Kako je intenzitet otpora vazduha definisan koeficijentom otpora vazduha bilo je neophodno definisati vrednost ovog koeficijenta za razletele komade.

Na početku istraživanja razleteli komadi stenske mase su aproksimirani sferama (*Stojadinović et al., 2011*). Koeficijent otpora vazduha za sferu je u rasponu od 0,07 do 0,5 međutim, usvojena je vrednost od 0,8 da bi se kompenzovala neregularnost oblika i hrapavost površine. S obzirom na to da razleteli komadi po svom obliku znatno odstupaju od sfere, da pri kretanju kroz vazduh često rotiraju oko jedne ili više osa, da je na njihovim oštrim ivicama moguća pojava vrtloga i slično, postavilo se pitanje ispravnosti ovakve odluke.

Prilikom analize i obrade video snimaka razletanja uočeni su komadi koji se na snimcima pojavljuju nakon znatnog vremena po razletanju poslednje bušotine u seriji i koji padaju na tlo (skoro) vertikalno. Vertikalni pad ukazao je na to da su posmatrani komadi pri razletanju izbačeni vertikalno naviše, dostigli maksimalnu visinu i krenuli vertikalno naniže. Dugo vreme leta je ukazalo na to da su komadi bili izbačeni na velike visine i da su pri padu mogli da dostignu terminalnu brzinu. Zbog toga se došlo na ideju o formiranju još jednog, dodatnog, numeričkog modela za određivanje koeficijenta otpora vazduha na bazi principa terminalne brzine.

### 5.4.1 Osnovni koncept određivanja koeficijenta otpora vazduha

Na komad stenske mase koji slobodno pada deluju dve sile, gravitacija koja ga vuče naniže i sila otpora vazduha koja se opire kretanju (Slika 5.14). U toku pada komad dobija na brzini usled gravitacionog ubrzanja, to jest kreće se ravnomerno

ubrzano. U određenom trenutku vremena sila otpora vazduha i gravitaciona sila se izjednačavaju pa je rezultujuća sila jednaka nuli, to jest i ubrzanje se izjednačava sa nulom i komad nastavlja pad konstantnom brzinom. Ova konstantna brzina pada, pri kojoj je sila otpora vazduha jednaka gravitacionoj sili je terminalna brzina a ovaj fenomen je osnova koncepta za određivanje koeficijenta otpora vazduha.



**Slika 5.14** – Sile koje deluju na slobodno padajući komad stenske mase

Polazeći od vektorske jednačine i rezultante sila koje deluju na komad stenske mase u slobodnom padu

$$\vec{F} = \vec{F}_G + \vec{F}_D, \quad (5.12)$$

ili skalarnog izraza iste jednačine u obliku

$$m\ddot{y} = mg - \frac{1}{2}\rho_A A_P C_D v^2, \quad (5.13)$$

koeficijent otpora vazduha ( $C_D$ ) se određuje iz uslova ravnoteže sila pri terminalnoj brzini  $v_T$

$$0 = mg - \frac{1}{2}\rho_A A_P C_D v_T^2. \quad (5.14)$$

Transformacijom jednačine 5.14 dobija se izraz za proračun koeficijenta otpora vazduha

$$mg = \frac{1}{2}\rho_A A_P C_D v_T^2, \quad (5.15)$$

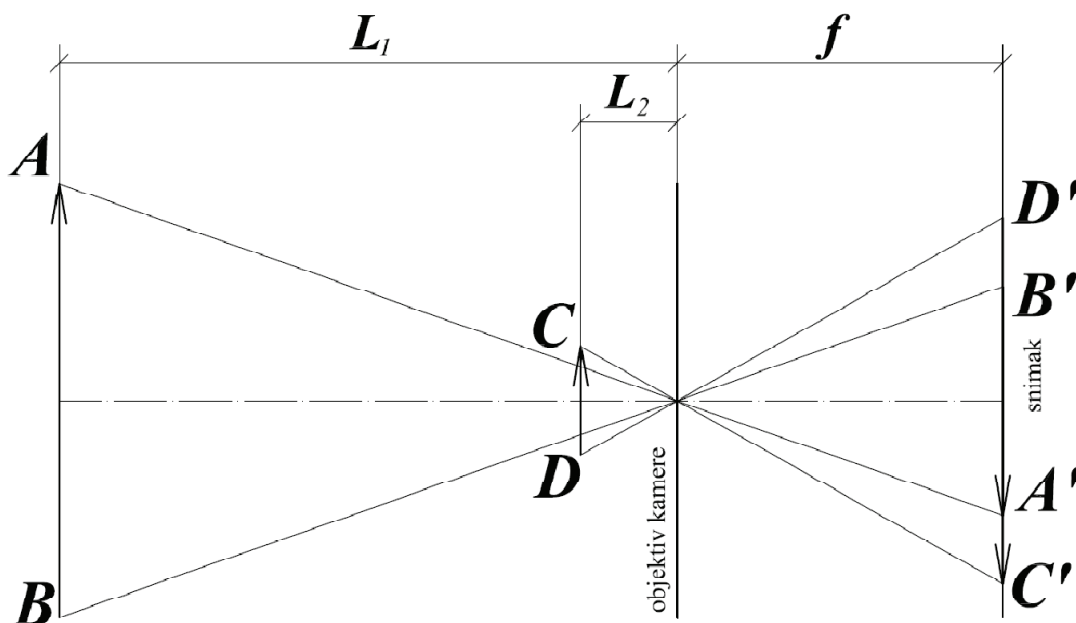
$$C_D = \frac{2mg}{\rho_A A_P v_T^2}. \quad (5.16)$$

## 5.4.2 Obrada podataka sa terena

Kao što je rečeno, na nekoliko snimaka su uočeni razleteli komadi stenske mase koji padaju na tlo (skoro) vertikalno, i koji se na snimcima pojavljuju nakon znatnog vremena od detonacije poslednje minske bušotine, čak 20 – 25 s kasnije. Snimci na kojima su identifikovani razleteli komadi koji su mogli dostići terminalnu brzinu su obrađeni na isti način na koji su obrađeni i snimci za određivanje početne brzine.

Sa izmerenim pređenim putevima bilo je moguće sračunati brzinu slobodno-padajućeg komada. S obzirom na to da je brzina snimanja 210 fps vreme proteklo između dva susedna frejma iznosi  $\Delta t = 4.761904$  ms. Prema tome, odnos puta  $\Delta s$  koji komad pređe između dva susedna frejma i vremena proteklog između frejmova predstavlja brzinu komada (Formula 5.11). Ukoliko bi proračun pokazao da je brzina (približno) konstantna komad je dostigao terminalnu brzinu i snimak i izmerene ili sračunate vrednosti su mogli biti iskorišćeni za određivanje koeficijenta otpora vazduha.

I u ovom slučaju se javio problem razmere, to jest određivanje veličine posmatranih komada. Veličina posmatranog razletelog komada određivana je po istim optičkim principima koji su korišćeni za određivanje faktora razmere pri određivanju početnih brzina. S obzirom na to da video snimci nisu snimani sa ciljem definisanja koeficijenta otpora vazduha i da su posmatrani razleteli komadi bili locirani van minskih serija minska serija nije mogla biti korišćena kao reper. Iz tog razloga su pri definisanju razmere korišćeni objekti vidljivi na snimku, a čije su dimenzije i rastojanje od sočiva kamere bili poznati.. Princip određivanja dimenzija posmatranih komada prikazan je naslici 5.15.



*Slika 5.15– Osnovni koncept određivanja razmere*

Predmet poznatih dimenzija  $AB$  nalazi se na rastojanju  $L_1$  od sočiva kamere. Istovremeno, dimenzija tog predmeta na snimku je  $A'B'$ . Sa poznavanjem ovih veličina može se izračunati (pseudo) žižna daljina  $f$  primenom proporcije

$$AB : A'B' = L_1 : f, \quad (5.17)$$



$$f = \frac{A'B' \cdot L_1}{AB} . \quad (5.18)$$

Ukoliko se posmatra predmet nepoznatih dimenzija  $CD$ , na rastojanju  $L_2$ , i sa poznatom veličinom na snimku  $C'D'$  dimenzija  $CD$  može biti sračunata iz proporcije

$$CD : C'D' = L_2 : f , \quad (5.19)$$

$$CD = \frac{C'D' \cdot L_2}{f} . \quad (5.20)$$

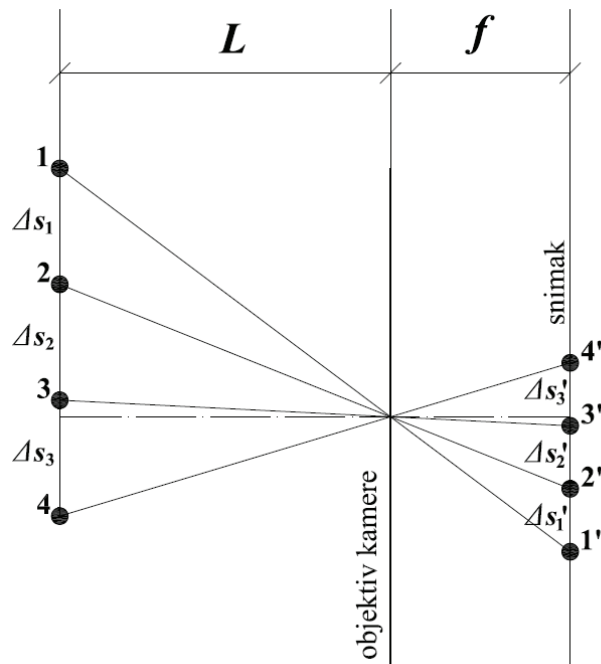
Na primer, prilikom analize snimka od 21.04.2011. godine uočen je odgovarajući razleteli komad stenske mase. Komad je pao ispred dela opreme (srednji stroj bagera, slika 5.16). Prečnik ozubljenog prstena srednjeg stroja (poz.1, Sl. 4.9) iznosi 3,5 m ( $AB$ ) i nalazi se na rastojanju od 150 m ( $L_1$ ) od kamere. Posmatrani razleteli komad je pao na rastojanju 15 m kraćem, to jest na udaljenosti od 135 m ( $L_2$ ). Veličina prstena na snimku je 0,0847 m ( $A'B'$ ) a prečnik posmatranog komada je 0,0069 m ( $C'D'$ ). Sve ovo daje žižnu daljinu od  $f = 3.63$  m i prečnik posmatranog komada od  $d = 0,256$  m ( $CD$ ).



*Slika 5.16 – Primer određivanja razmere*

Put koji komad pređe između dva frejma određuje se primenom identične procedure (Slika 5.17).

$$\Delta s_i = \frac{\Delta s_i' l}{f} \quad (5.21)$$



Slika 5.17 – Proračun pređenih puteva

Analizirajući jednačinu 5.16, da bi se odredio koeficijent otpora vazduha neophodno je poznavati masu razletelog komada i površinu njegovog poprečnog preseka. S obzirom na to da je na gomili odminiranog materijala nemoguće pronaći upravo posmatrani komad masa komada i površina poprečnog preseka mogu se, uz određenu grešku aproksimacije komada sferom, proračunati kao

$$m = \frac{4}{3} \left( \frac{d}{2} \right)^3 \pi \gamma_s \quad (5.22)$$

$$A_p = \frac{d^2 \pi}{4} \quad (5.23)$$

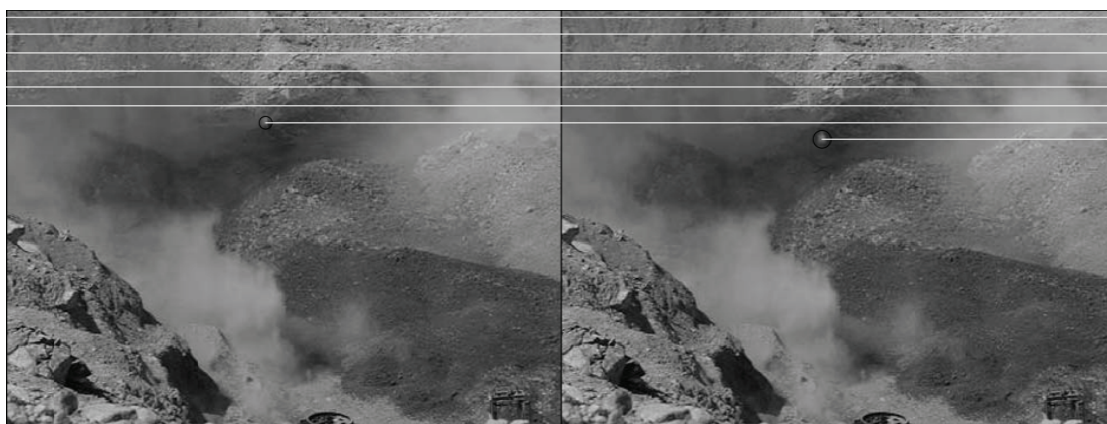
gde su:

$d$  - srednji prečnik komada

$\gamma_s$  - zapreminska masa stene.

### 5.4.3 Rezultati obrade podataka i diskusija

Kao što je opisano, snimci razletanja komada su analizirani i pojedinačni frejmovi, u formatu \*BMP slika su izvučeni iz video snimaka. Slike su zatim importovane u CAD program kako bi se mogle izmeriti dimenzije komada i pređeni putevi između frejmova (Slika 5.18). Zbog relativno loše rezolucije slike i posmatrani objekti su podložni pikselaciji pri uvećanju. Kako je neophodno uvećati sliku kako bi se posmatrao razleteli komad, posmatrani komad se vidi kao oblak piksela. Zbog toga je pri merenjima referentna tačka uvek centar oblaka, sve u cilju minimiziranja greške.



*Slika 5.18 – Određivanje pređenih puteva u CAD programu*

Da bi se objasnio koncept određivanja koeficijenta otpora vazduha daje se primer proračuna za razleteli komad uočen na snimku od 21.04.2011. godine. Posmatrani razleteli komad pao je na rastojanju od 25 m od kamere i vidljiv je na snimku tokom 24 frejma. Podaci o dimenzijama komada i pređenim putevima kao i podaci za proračun dati su u tabeli 5.7.

Posmatrajući podatke o pređenim putevima iz tabele 5.7 može se uočiti da vrednost nije konstantna, pa prema tome komad nije dostigao terminalnu brzinu. Međutim, da komad nije dostigao terminalnu brzinu veličina pređenih puteva bi bila u stalnom porastu jer komad u slobodnom padu dobija na brzini usled gravitacionog ubrzanja sa porastom od 9,81 m/s/s. Pređeni putevi iz tabele 4.1 nisu konstantni ali i ne pokazuju trend rasta pa se zaključuje da su razlike u vrednostima pređenih puteva posledica pikselacije pri uvećanju i greške merenja.

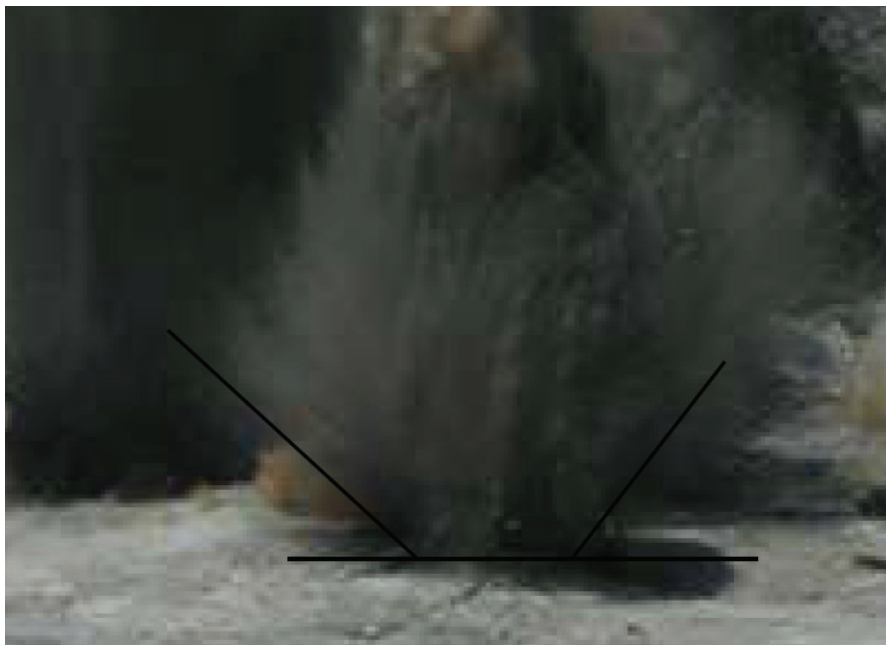
Tabela 5.7 – Podaci za proračun koeficijenta otpora vazduha

Referentni predmet			Razleteli komad					
Dimenzije	Dimenzije na slici	Rastojanje	Žižna daljina	Dimenzije na slici	Rastojanje	Dimenzije		
AB (m)	A'B' (m)	L <sub>1</sub> (m)	F (m)	C'D' (m)	L <sub>2</sub> (m)	CD (m)		
3,5	0,0847	150	3,63	0,0233	25	0,16		
Pređeni putevi								
Frejm	Δs'	Δs	Frejm	Δs'	Δs	Frejm	Δs'	Δs
1	0,0303	0,2087	9	0,0306	0,2107	17	0,0328	0,2256
2	0,0339	0,2334	10	0,0321	0,2211	18	0,0324	0,2231
3	0,0327	0,2252	11	0,0305	0,2100	19	0,0314	0,2162
4	0,0288	0,1983	12	0,0312	0,2148	20	0,0322	0,2217
5	0,0339	0,2334	13	0,0328	0,2259	21	0,0310	0,2135
6	0,0306	0,2107	14	0,0302	0,2080	22	0,0309	0,2128
7	0,0298	0,2052	15	0,0307	0,2114	23	0,0314	0,2162
8	0,0313	0,2155	16	0,0310	0,2134			
Pređeni put sr. vrednost		$\Delta s = 0,2163 \text{ m}$		Terminalna brzina		$v_T = 45,423 \text{ m/s}$		
Masa komada		$m = 5,18 \text{ kg}$		Površina poprečnog preseka		$A_P = 0,0202 \text{ m}^2$		
Koeficijent otpora vazduha $C_D = 2.025$								

Očekivanje je bilo da će koeficijenti otpora vazduha za posmatrane komade imati ujednačene vrednosti međutim to nije bio slučaj. Analiza je obuhvatila više razletelih komada i dobijene vrednosti koeficijenta otpora vazduha su varirale u rasponu od 2,025 do 4,72. Razlog za ove razlike u vrednostima je neregularnost oblika razletelih komada i njihovo kretanje. Posmatrani razleteli komadi znatno odstupaju od sfernog oblika, imaju ravne površine i oštre ivice, neujednačene dimenzije po ortogonalnim osama i najčešće rotiraju oko neke ose prilikom leta. Sve ovo povećava otpor vazduha pa je prema tome i koeficijent otpora vazduha veći. Sve ovo ukazuje na to da pri prognozi dometa i razletelih komada i definisanju sigurnih rastojanja ne treba koristiti jednu jedinstvenu vrednost za koeficijent otpora vazduha već radije treba primeniti opseg različitih vrednosti.

## 5.5 Ugao izletanja razletelih komada

Ugao razletanja takođe je određivan sa snimaka razletanja. Za vrednost ugla razletanja usvajana je vrednost ugla koji sa horizontalom sklapa linija povučena iz bušotine tako da tangira perjanicu razletelog materijala (Slika 5.19) u trenutku kada je perjanica potpuno formirana i kada je moguće uočiti pojedinačne razletele komade. Naravno, ova vrednost ugla predstavlja najmanju vrednost ugla razletanja komada jer prilikom razletanja komadi iz iste bušotine bivaju izbačeni pod različitim uglovima do maksimalnog od  $90^\circ$ . Analizom snimaka miniranja utvrđene su vrednosti (minimalnih) uglova izletanja komada u rasponu od 40 do 90 stepeni. Preporuka je da se, pri određivanju dometa razletelih komada za vrednost ugla izletanja koristi vrednost od  $35^\circ$  za koju će posmatrani komad ostvariti maksimalni domet. Naravno, uvek postoji mogućnost variranja ugla izletanja u rasponu od 35 – 45 stepeni čime se definiše moguća zona ugrožavanja.



*Slika 5.19 – Određivanje uglova razletanja*

## **6. KREIRANJE I OBUKA ADAPTIVNIH SISTEMA**

U okviru poglavlja 4.3.2.1 već je rečeno da je za potrebe obuke mreže formiran skup setova ulazno-izlaznih podataka. Set ulaznih podataka sadržao je 17 osnovnih parametara preuzetih iz dnevnika miniranja i tehničke dokumentacije rudnika.

Prva zamisao je bila formiranje adaptivnog sistema sa sedamnaest ulaznih parametara i dva izlazna parametra. Prvi izlazni parametar bio bi odgovor na pitanje hoće li, u konkretnim uslovima, doći do razletanja ili ne dok bi drugi izlazni parametar bila vrednost početne brzine. Međutim, pokazalo se da ovakvo rešenje nije adekvatno jer se od mreže zahtevalo da, praktično u jednom koraku, reši dva različita problema. Odgovor na pitanje hoće li do razletanja doći ili ne je generalno problem klasifikacije dok je određivanje početne brzine razletelog komada problem predikcije. Iz tog razloga se došlo na ideju o kreiranju dve odvojene mreže, klasifikatora i prediktora. Pri tome, ukoliko bi za konkretni set podataka klasifikator pozitivno identifikovao razletanje isti set podataka bi bio prosleđen prediktoru u cilju definisanja vrednosti početne brzine razletelih komada.

### **6.1 Definisanje dozvoljene greške**

Svaki adaptivni sistem pravi određenu grešku u smislu razlike u vrednostima izlaznog podatka adaptivnog sistema i željene vrednosti tog podatka. Kako bi se mogle oceniti performanse obučene neuronske mreže bilo je neophodno definisati dozvoljenu grešku. Drugim rečima neuronska mreža bi bila prihvatljiva ukoliko bi greška izlaza bila manja od neke predefinisane vrednosti.

Imajući u vidu grešku merenja rastojanja od 10 % opisanu u okviru tačke 5.3.2.1.1 logično se zaključuje da i greška pri proračunu vrednosti početnih brzina

iznosi 10 %. S obzirom na to, bilo bi besmisleno zahtevati od neuronske mreže da definiše izlazni podatak sa greškom manjom od 10 %.

Kako su u osnovi kreirane dve neuronske mreže, klasifikator i prediktor, trebalo je definisati prihvatljive greške oba sistema.

Kreirani klasifikator je imao zadatak da setove podataka iz skupa ulaznih podataka klasifikuje u dve grupe, one koji će rezultovati razletanjem i one koji neće. Kako ovde nema egzaktne vrednosti izlaznog podatka (forma izlaza je da ili ne) greška je definisana kao broj pogrešno klasifikovanih podataka. Pri tome pogrešno klasifikovan podatak da će doći do razletanja ne predstavlja rizik dok pogrešno klasifikovan podatak da neće doći do razletanja može rezultovati hazardnom situacijom na terenu. Greška klasifikatora se prikazuje u formi matrice zabune (*confusion matrix*, Slika 6.1) gde se broj pogrešno klasifikovanih podataka daje kao procenat. S obzirom na to da je broj bušotina koje će rezultovati razletanjem mali u odnosu na ukupan broj bušotina u minskoj seriji, dozvoljena greška od 20 % pogrešno klasifikovanih podataka je relativno mala u odnosu na ukupan broj bušotina.

	Flyrock_YES	Flyrock_NO
Flyrock_YES	87.5%	12.5%
Flyrock_NO	0.3%	99.7%

**Slika 6.1** – Izgled matrice zabune (*confusion matrix*)

Sa druge strane prediktor daje egzaktnu numeričku vrednost početne brzine i za prihvatljivu grešku se uzima vrednost od 10 % u skladu sa greškom merenja. Kako prediktor ocenu performansi mreže daje u formi intervala poverenja od 95 % definisanog tako da izlazna vrednost početne brzine  $\pm\delta$  obuhvati 95 % željenih vrednosti. Vrednost  $\delta$  je predefinisana i u ovom slučaju je usvojeno da ona iznosi najviše 15 % od srednje vrednosti početnih brzina izmerenih na terenu. Kako je srednja



vrednost početnih brzina izmerenih na terenu iznosila 73 m/s vrednost  $\delta$  je iznosila 11m/s. Na taj način je definisan interval poverenja od 95 % za mrežu prihvatljivih performansi kao  $v_0 \pm 11\text{m/s}$ .

## 6.2 Arhitektura neuronskih mreža i rezultati obuke mreže

### 6.2.1 Prethodna obrada setova ulazno-izlaznih podataka

Za potrebe kreiranja mreže korišćen je software-ski alat *Peltarion Synapse*. Pri definisanju arhitekture neuronskih mreža korišćeni su wizard-i samog programa, to jest za kreiranje klasifikatora korišćen je wizard *Classifier*, dok je za kreiranje prediktora korišćen wizard *Function modeling*. Razlog za ovu odluku leži u činjenici da sam program u sebi ima implementiranu fuzzy logiku kojom optimizuje arhitekturu mreže u smislu potrebnog broja skrivenih slojeva i neurona u njima kao i tipove sinaptičkih veza između neurona na osnovu broja podataka, obima uzorka i kompleksnosti problema koji treba modelirati. U oba slučaja *Synapse* je predložio *multy layer perceptron* sa jednim ulaznim, dva skrivena i jednim izlaznim slojem.

Pri kreiranju neuronskih mreža za njihovu obuku je korišćen skup setova od 17 ulaznih podataka i jednog izlaznog podatka u formi da/ne u slučaju klasifikatora ili u formi eksplicitne, numeričke vrednosti početne brzine u slučaju prediktora. S obzirom na to da neuronska mreža može da funkcioniše samo sa eksplicitnim vrednostima primenjeni softver je prilagodio izlazne podatke klasifikatora na taj način što je definisao dva izlazna podatka, *razletanje\_da* i *razletanje\_ne* pri čemu ovim vrednostima mogu biti dodeljene vrednosti 0 ili 1. Tako, ukoliko je izlazni podatak bio pozitivno razletanje onda bi izlazu *razletanje\_da* bila dodeljena vrednost 1 a izlaznom podatku *razletanje\_ne* bi bila dodeljena vrednost 0 i obrnuto (Slika 6.2).

	Razletanje_da	Razletanje_ne
Razletanje_da	1	0
Razletanje_ne	0	1

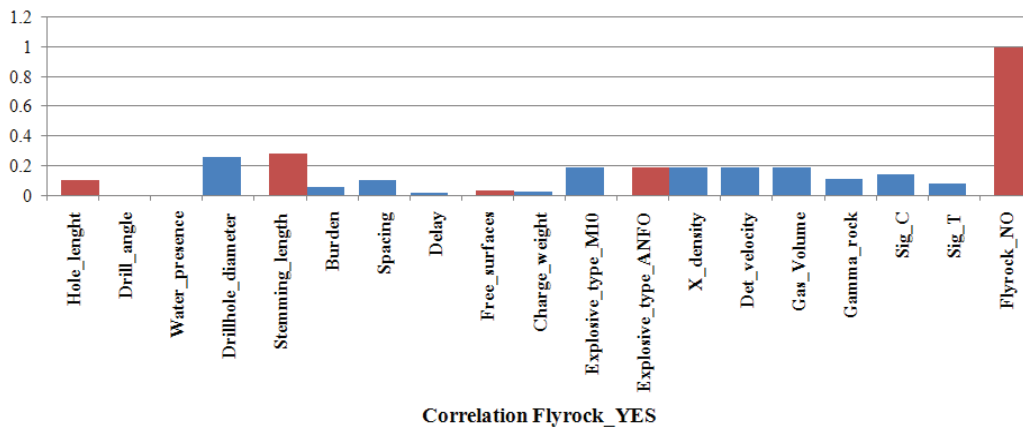
**Slika 6.2** – Transformacija tekstualnih podataka o razletanju u numeričke

Na isti način je prilagođen i ulazni parametar tip eksploziva. Kako su vrednosti za ovaj parametar M10 i ANFO software je prilagodio podatke u formu tip\_eksploziva\_M10 i tip\_eksploziva\_ANFO (Slika 6.3).

	Tip_eksploziva_M10	Tip_eksploziva_ANFO
Tip_eksploziva_M10	1	0
Tip_eksploziva_ANFO	0	1

**Slika 6.3** – Transformacija tekstualnih podataka o tipu eksploziva u numeričke

U toku prethodne analize ulaznih podataka ustanovljeno je da podatak o nagibu bušotine i prisustvu vode u bušotini nema značajnu korelativnu vezu sa izlaznim podacima (Slika 6.4) pa su, da bi se smanjilo procesorsko vreme, ova dva podatka eliminisana.



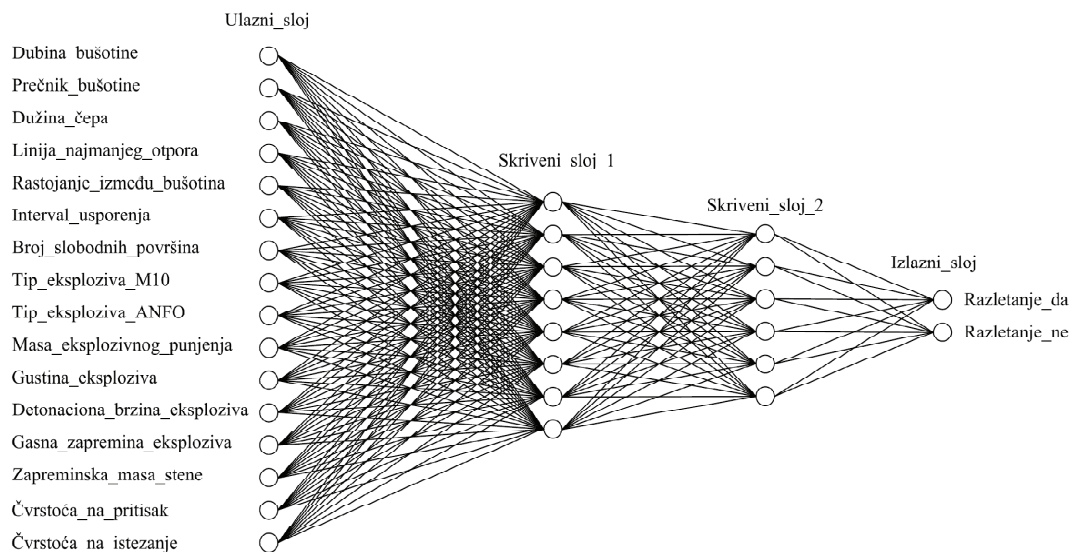
*Slika 6.4 – Histogram intenziteta korelativne veze ulaznih i izlaznih parametara*

Prilikom obuke mreže bilo je neophodno definisati broj *epoch*-a to jest iteracija kroz koje će obuka teći. Broj epoch-a praktično znači da će mreža, u toku obuke, toliko puta proći kroz čitav skup setova podataka podešavajući i adaptirajući svoje parametre. Broj epoch-a praktično može biti u rasponu od 1 do  $\infty$  stim što se sa povećanjem broja epocha povećava tačnost mreže. Međutim, sa povećanjem broja iteracija može doći i do preterane obuke mreže (*overtraining*). To znači da bi mreža unutar posmatranog uzorka za izlazni podatak imala 100 % tačne rezultate ali bi van uzorka bila neupotrebljiva. Pored broja epoch-a definisan je i *batch size* to jest veličina paketa ulaznih podataka koji će istovremeno biti poslani kroz mrežu. Veličina paketa predstavlja broj setova podataka i može se kretati u rasponu od 1 do  $n$  gde je  $n$  ukupan broj setova podataka. Ukoliko se za veličinu paketa izabere 1 proces obuke bi bio najprecizniji ali bi proces obuke trajao dugo. Uz to, usled čestih promena u sinaptičkim vezama mreža bi postala nestabilna što bi za rezultat imalo opadanje tačnosti.

Pri obuci mreže izabrana je opcija obuka i validacija (training and validation). Sa ovom opcijom validacija mreže se odvija u toku treninga to jest mreža prolazi kroz validacioni epoch periodično, nakon određenog broja epoch-a obuke. Ova opcija sprečava mogućnost preterane obuke mreže jer je vezana sa opcijom *load best system*. Drugim rečima, po završetku obuke mreže software učitava onaj validacioni epoch pri kojem je greška bila najmanja.

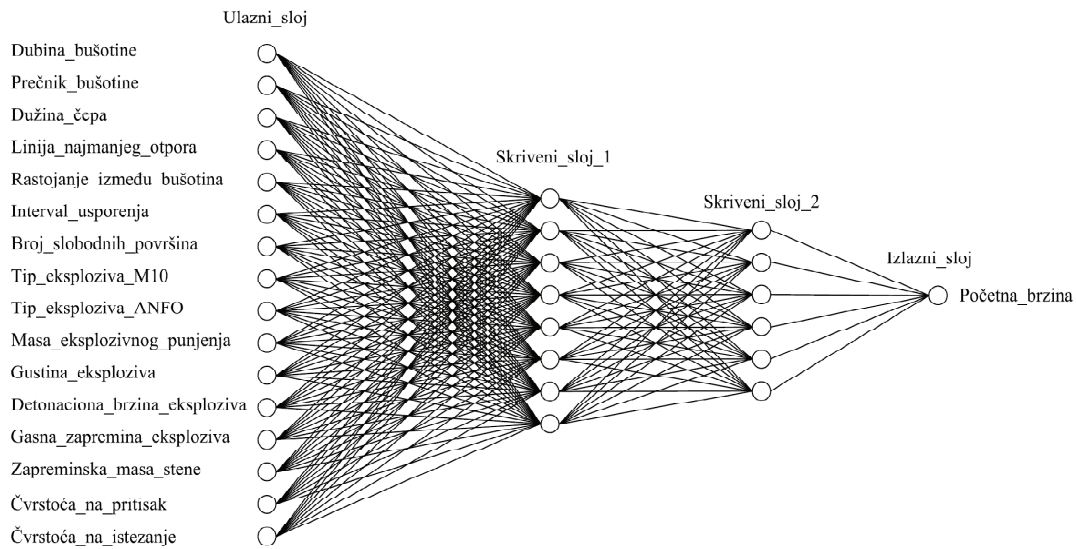
## 6.2.2 Arhitektura mreže sa osnovnim setom ulaznih podataka

Za dati skup ulazno-izlaznih podataka *Synapse* je, za klasifikator, predložio arhitekturu mreže 16-8-6-2 odnosno 16 neurona u ulaznom sloju, 8 neurona u prvom i 6 neurona u drugom skrivenom sloju i dva neurona u izlaznom sloju (Slika 6.5). Za obuku mreže korišćeni su svi raspoloživi setovi podataka.



**Slika 6.5** – Arhitektura klasifikatora sa osnovnim setom ulaznih podataka

Preporuka za arhitekturu mreže prediktora je bila 16-8-6-1 (Slika 6.6). Za potrebe obuke mreže korišćeni su samo setovi podataka koji odgovaraju bušotinama koje su rezultovale razletanjem. Setovi podataka koji odgovaraju bušotinama kod kojih nije evidentirano razletanje nisu bili obrađivani. Razlog za to je činjenica da bi bušotinama koje nisu rezultovale razletanjem morale biti dodeljene vrednosti početnih brzina jednake nuli. Veliki broj nultih vrednosti imao bi za posledicu nepouzdanu mrežu a imajući u vidu to da je funkcija klasifikatora izolovanje samo onih bušotina koje će eventualno rezultovati razletanjem ovakva odluka smatra ispravnom.



**Slika 6.6** – Arhitektura prediktora sa osnovnim setom ulaznih podataka

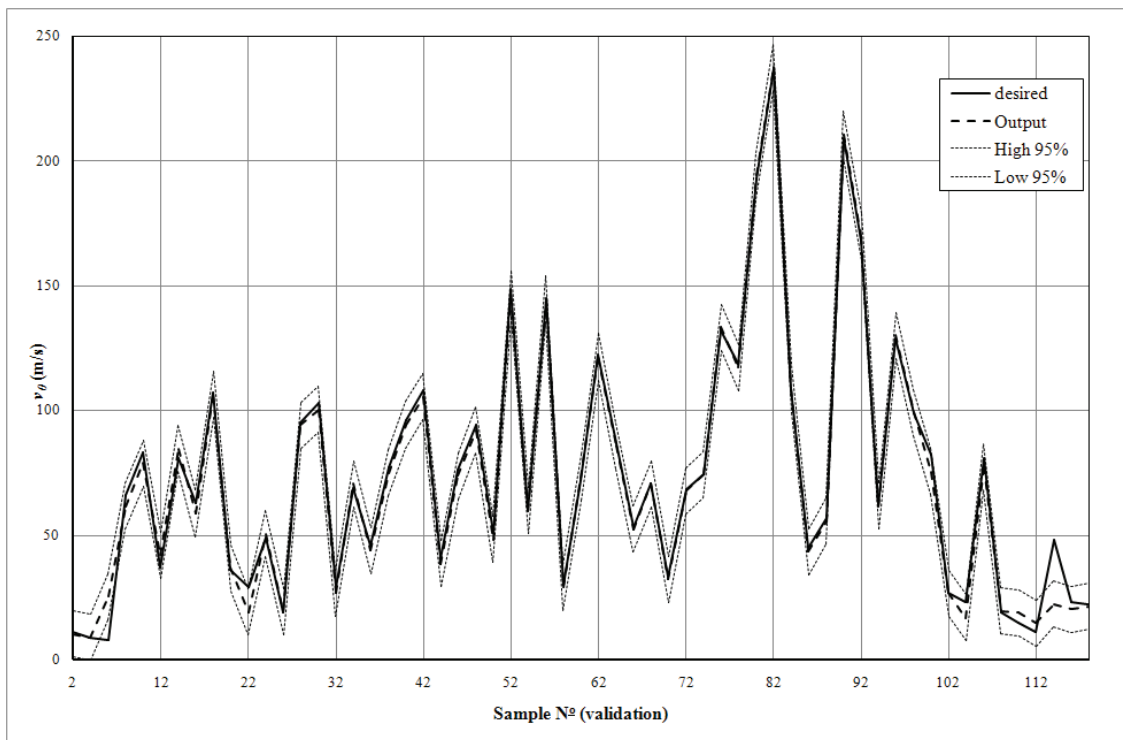
U oba slučaja (klasifikator/prediktor) obuka mreže sa prikazanom arhitekturomvršena je u više varijanti kako bi se dobio prihvatljiv obučeni adaptivni sistem. Varijante su podrazumevale različiti broj iteracija i različitu veličinu paketa podatakadok je učestalost validacionih iteracija kod svih varijanti bila konstantna, nakon svakih 5 iteracija obuke. Broj iteracija je bio 2000 i 5000, a veličina paketa podataka je bila 25, 50 i 75.

Rezultati obuke mreža prikazani su u tabeli 6.1.

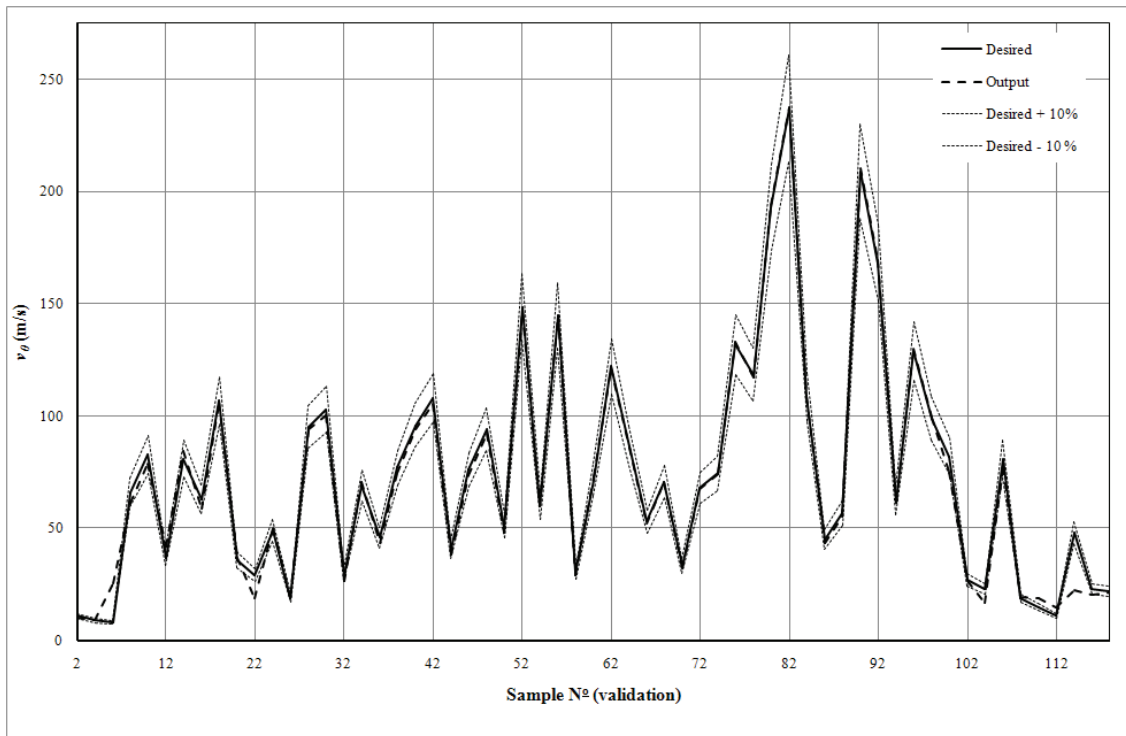
**Tabela 6.1** – Performanse klasifikatora i prediktora sa osnovnim setom ulaznih podataka

Varijanta	Broj iteracija	Veličina paketa	Prediktor	Klasifikator	
			Širina intervala poverenja $\pm\delta$ (m/s)	Pogrešno klasifikovani podaci (%)	
				Razletanje_da	Razletanje_ne
1	2000	25	69,29	75,74	3,20
2	2000	50	14,91	48,06	1,13
3	2000	75	20,33	41,86	0,32
4	5000	25	10,09	27,94	1,05
5	5000	50	9,24	61,76	0,75
6	5000	75	9,41	41,86	0,32

Kao što se iz rezultata obuke i validacije klasifikatora i prediktora može videti nijedna varijanta klasifikatora sa osnovnim podacima nije dala zadovoljavajuće, to jest rezultate koji bi bili prihvatljivi u smislu dozvoljene greške. Sadruga strane, prediktor sa osnovnim ulaznim podacima u varijanti 5 (5000 iteracija i veličina paketa od 50 setova podataka) je dala vrednost  $\delta = \pm 9,24$  m/s što iznosi 12,65 % od srednje vrednosti početnih brzina. Grafički prikaz performansi obučenog prediktora u vidu intervala poverenja i odstupanja od željene vrednosti prikazani su na slikama 6.7 i 6.8.



*Slika 6.7 – Grafički prikaz performansi prediktora sa osnovnim setom ulaznih podataka, interval poverenja od 95%*



*Slika 6.8 – Grafički prikaz performansi prediktora sa osnovnim setom ulaznih podataka, odstupanje od željene vrednosti +/- 10%*

S obzirom na to da klasifikator nije dao prihvatljiv rezultat i kako bi se poboljšale performanse neuronskih mreža došlo se na ideju da se setovi ulaznih podataka izmene u tom smislu da se pored osnovnih podataka iz tehničke dokumentacije rudnika uvedu i neke izvedene veličine a da se eliminišu neke postojeće.

### 6.2.3 Arhitektura mreže sa proširenim setom ulaznih podataka

Iako je u početku cilj bio jednostavnost mreže, bar u delu ulaznih podataka, uvođenje izvedenih veličina postalo je neophodno. Kako se za potrebe mreže osnovni podaci moraju pripremiti u vidu tekstualnog CSV fajla u MS Excel su implementirani makroi koji, iz osnovnih, preračunavaju izvedene veličine.

Prva izvedena veličina koja je dodata setu ulaznih podataka bila je zapremina materijala po bušotini definisana kao

$$V_{MB} = l_b \cdot W \cdot A, \quad (6.1)$$

gde su:

- $l_b$  - dužina bušotine,
- $W$  - linija najmanjeg otpora i
- $A$  - rastojanje između bušotina u redu.

Naredna veličina je bila specifična potrošnja eksploziva definisana kao

$$q = \frac{Q}{V_{MB}}, \quad (6.2)$$

gde je

- $Q$  - masa eksploziva po bušotini.

Još jedna veličina bila je faktor čepa definisan kao odnos dužine čepa prema dužini bušotine

$$f_{\check{c}} = \frac{l_{\check{c}}}{l_b}, \quad (6.3)$$

gde je

- $l_{\check{c}}$  - dužina čepa.

Pored faktora čepa definisano je i specifično začepljenje kao odnos dužine čepa i mase eksploziva po bušotini

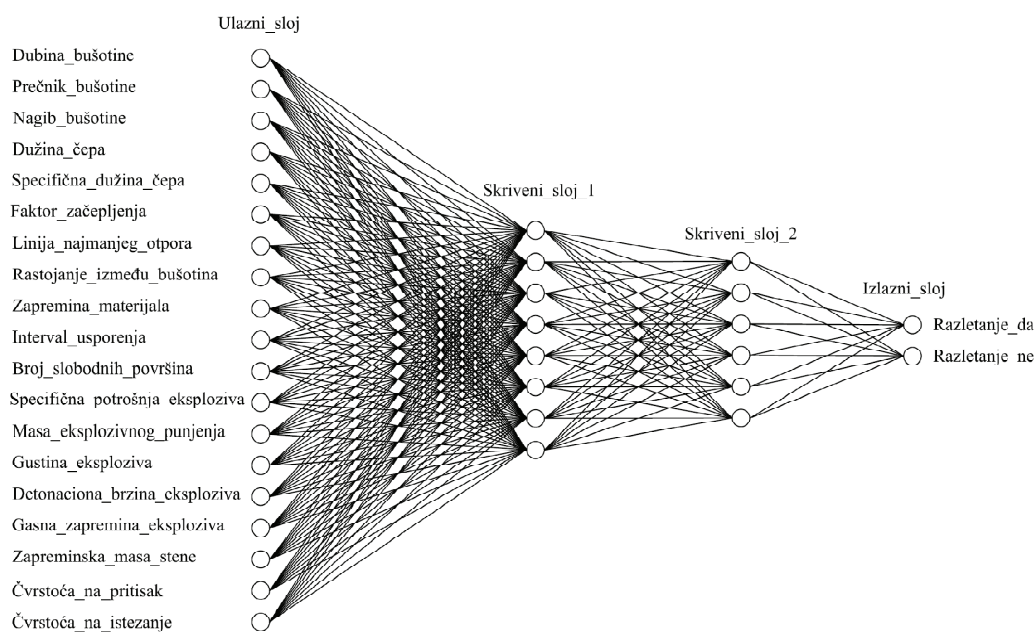
$$S_s = \frac{l_{\check{c}}}{Q}. \quad (6.4)$$

Osim ovih izvedenih veličina u set ulaznih podataka je, bez obzira na to što je analiza pokazala da ne postoji korelativna veza, vraćen podatak o nagibu bušotine. Takođe je iz seta ulaznih podataka izuzet tip eksploziva. Razlog za to je težnja da se adaptivni sistem učini opštim i svuda primenljivim. Stoga, za slučaj kopa sa bušotinama

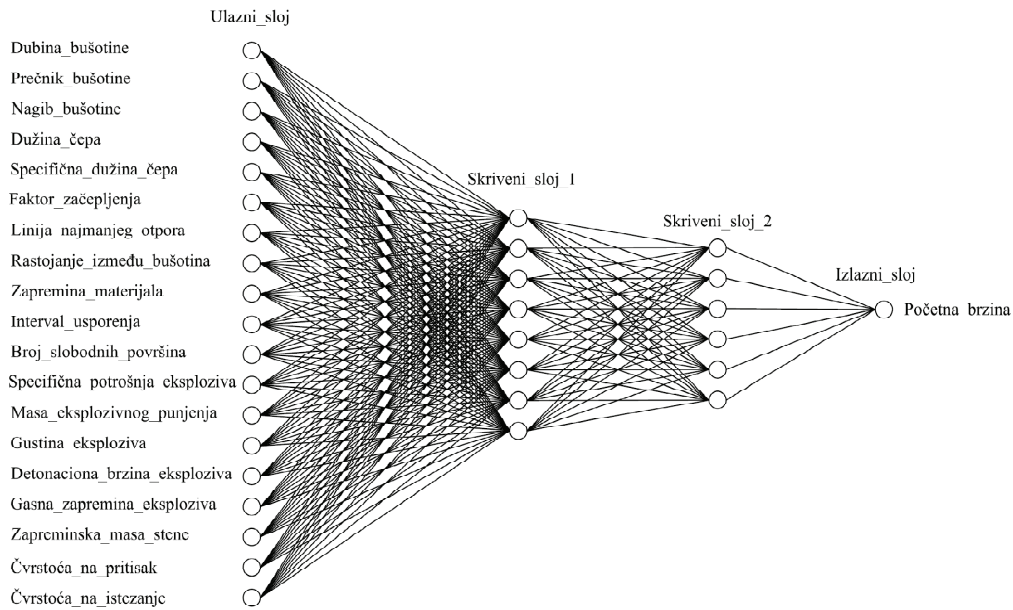


pod nagibom bilo bi poželjno uvrstiti i ovaj podatak. Takođe, ukoliko bi ovaj adaptivni sistem bio primenjen na kopu na kojem se primenjuje drugi tip eksploziva ulazni podatak koji podrazumeva samo dva tipa eksploziva bio bi besmislen.

Ovim izmenama dobijen je set ulaznih podataka sa 19 parametara i *Synapse* je ponovo predložio iste arhitekture za klasifikator i prediktor. Arhitektura klasifikatora je bila u formi 19-8-6-2 (Slika 6.9) dok je prediktor imao arhitekturu 19-8-6-1 (Slika 6.10). Obuka neuronskih mreža je ponovo sprovedena po varijantama sa istim vrednostima broja iteracija i veličine paketa ulaznih podataka. Rezultati obuke, to jest validacionog epoch-a najboljeg sistema prikazani su u tabeli 6.2.



**Slika 6.9** – Arhitektura klasifikatora sa proširenim setom podataka



**Slika 6.10** – Arhitektura prediktora sa proširenim setom podataka

**Tabela 6.2** – Performanse klasifikatora i prediktora sa proširenim setom ulaznih podataka po varijantama

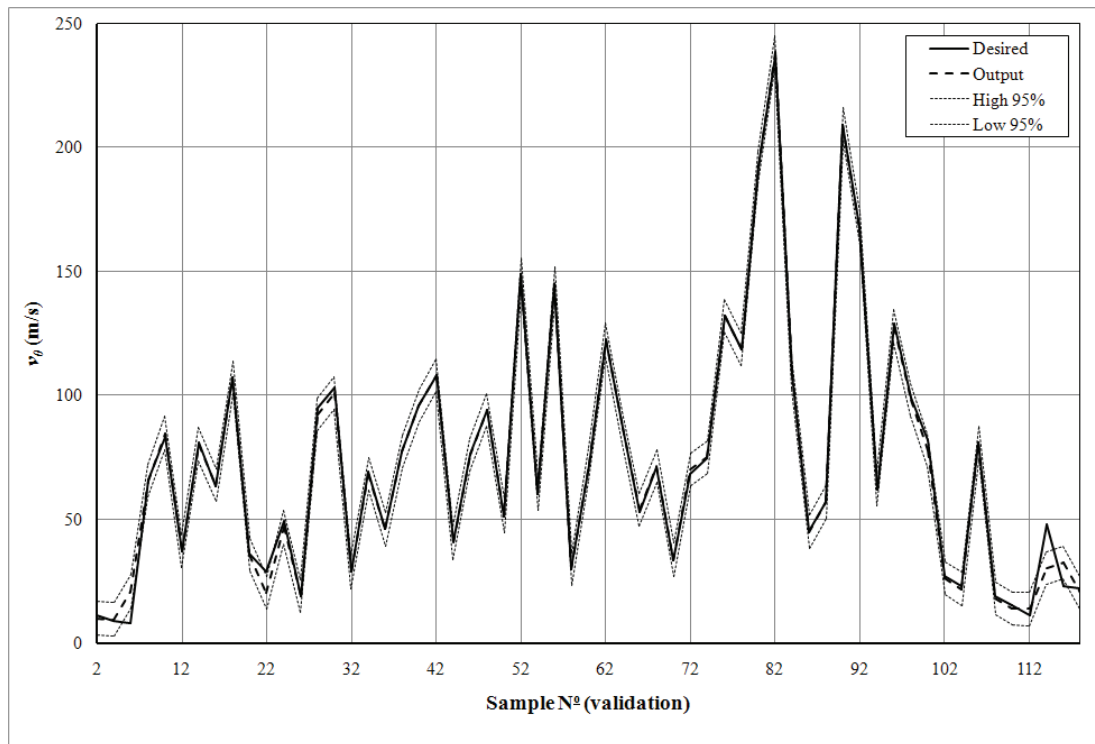
Varijanta	Broj iteracija	Veličina paketa	Prediktor		Klasifikator	
			Širina intervala poverenja $\pm\delta$ (m/s)	Pogrešno klasifikovani podaci (%)		
				Razletanje_da	Razletanje_ne	
<b>1</b>	2000	25	67,82	46,32	1,20	
<b>2</b>	2000	50	9,40	45,28	1,51	
<b>3</b>	2000	75	10,64	27,13	3,22	
<b>4</b>	5000	25	10,37	12,5	0,30	
<b>5</b>	5000	50	7,39	44,85	2,11	
<b>6</b>	5000	75	6,67	27,91	0,00	

Iz tabela se može videti da u ovom slučaju i klasifikator i prediktor imaju varijante sa prihvatljivim performansama. Klasifikator u varijanti 4 (5000 epoch-a i batch size od 25) je imao samo 12,5 % lažnih klasifikacija za razletanje\_da i samo 0,3 % lažnih klasifikacija za razletanje\_ne. Kod prediktora se pak, u varijanti 6 (5000 epoch-a i batch size od 75), 95 % željenih vrednosti početnih brzina nalazi unutar intervala  $v_0 \pm 6,67$  m/s što predstavlja samo 9,13 % od srednje vrednosti početnih brzina.

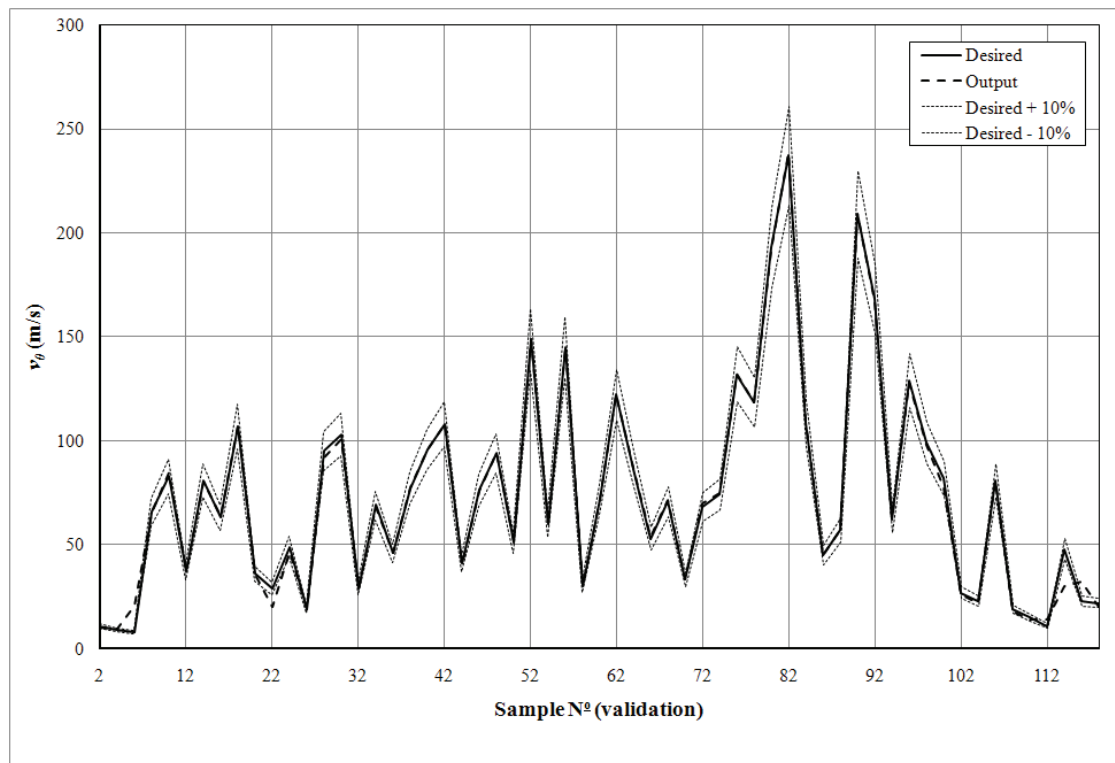
Uz to, upoređivanjem željenih (realnih) i prognoziranih vrednosti početne brzine razletelih komada u toku validacije ustanovljeno je da kod samo 6 % uzoraka razlika u vrednostima, to jest greška, prelazi 10 % od željene vrednosti. Grafički prikazi performansi klasifikatora u formi matrice zabune i prediktora u formi intervala poverenja i odstupanja od željene vrednosti dati su na slikama 6.11, 6.12 i 6.13.

	Flyrock_YES	Flyrock_NO
Flyrock_YES	87.5%	12.5%
Flyrock_NO	0.3%	99.7%

**Slika 6.11** – Performanse klasifikatora sa proširenim setom ulaznih podataka, matrica zabune



**Slika 6.12** – Grafički prikaz performansi prediktora sa proširenim setom ulaznih podataka, interval poverenja od 95%

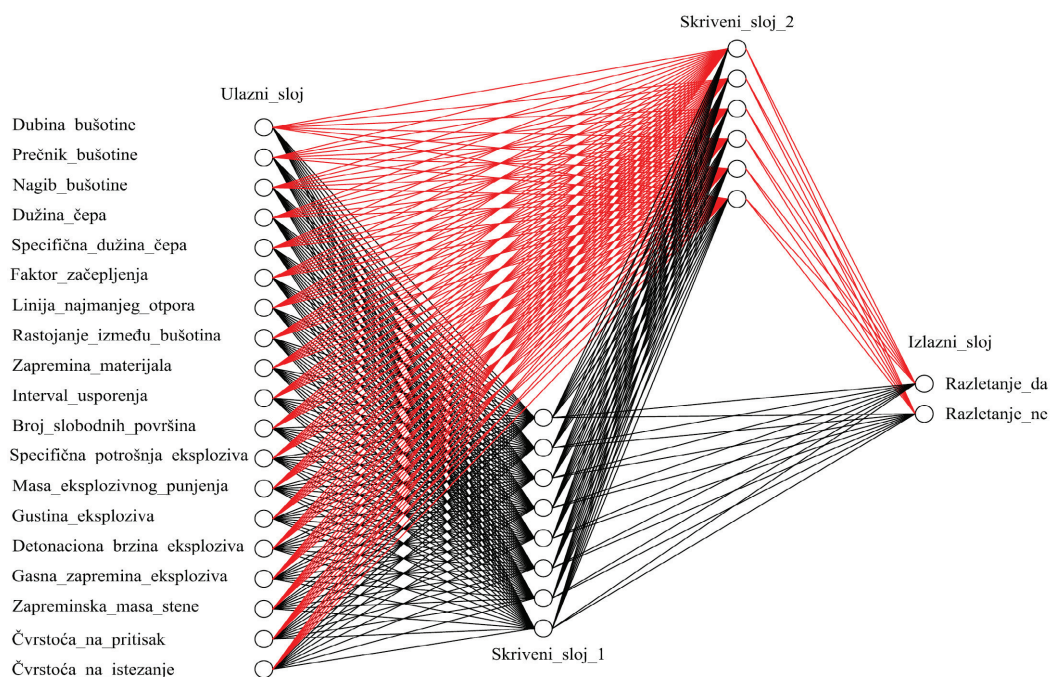


*Slika 6.13 – Grafički prikaz performansi prediktora sa proširenim setom ulaznih podataka, odstupanje od željene vrednosti +/- 10%*

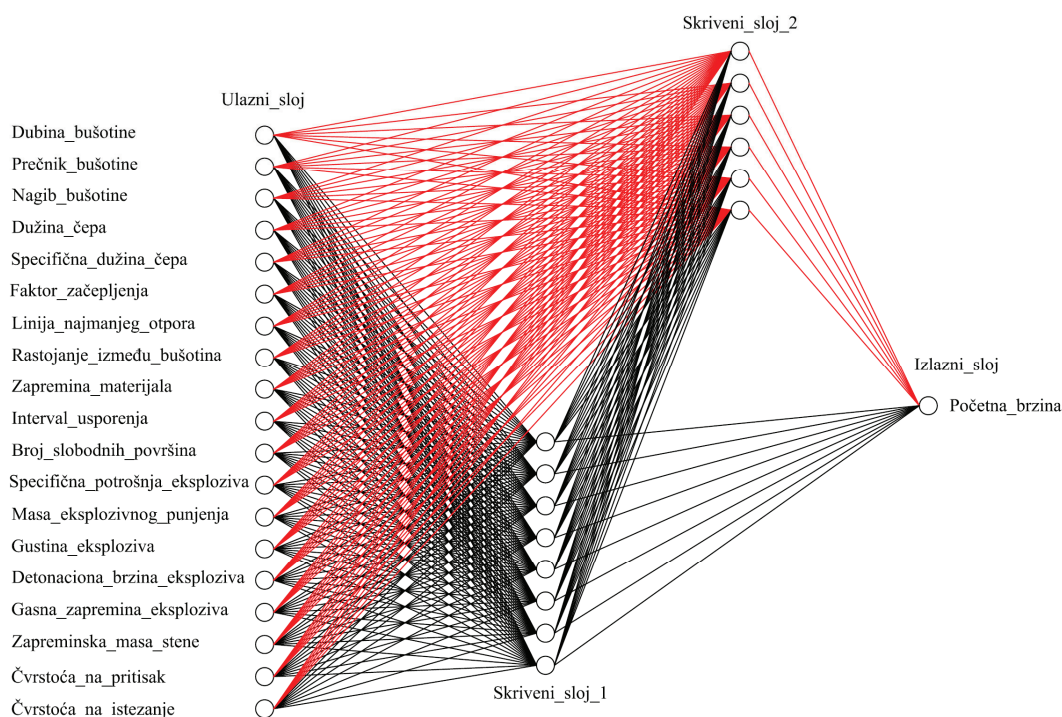
Ono što je jasno uočljivo na slikama je visoka tačnost prediktora pri vršnim vrednostima početnih brzina. Ovakav ishod obuke mreže je jako povoljan iz prostog razloga što upravo ekstremno visoke vrednosti početnih brzina doprinose velikim dometima razletelih komada. Stoga, visoka tačnost obučenog prediktora u vršnim tačkama umnogome povećava pouzdanost i preciznost celokupnog modela za predikciju dometa razletelih komada.

## 6.2.4 Kompleksna arhitektura mreže

Pored arhitektura mreže prikazanih u prethodnom izlaganju kreirani su i klasifikator i prediktor sa malo kompleksnijom arhitekturom, arhitekturom 2 (Slika 6.14, 6.15).



Slika 6.14 – Kompleksna arhitektura klasifikatora



Slika 6.15 – Kompleksna arhitektura prediktora

Ponovo je sprovedena obuka mreža po istim varijantama kao i ranije a rezultati obuke, to jest performanse kompleksnijeg klasifikatora i prediktora prikazani su u tabeli 6.3.

**Tabela 6.3** – Performanse klasifikatora i prediktora sa proširenim setom ulaznih podataka i sa složenom arhitekturom po varijantama

Varijanta	Broj iteracija	Veličina paketa	Prediktor	Klasifikator	
			Širina intervala poverenja $\pm\delta$ (m/s)	Pogrešno klasifikovani podaci (%)	
				Razletanje_da	Razletanje_ne
1	2000	25	47,83	50,74	1,81
2	2000	50	10,79	22,06	49,25
3	2000	75	9,62	20,93	0,64
4	5000	25	10,71	16,18	0,60
5	5000	50	11,96	58,09	1,96
6	5000	75	9,55	12,73	1,61

Iz tabela se može videti da i sa ovakvom, složenijom arhitekturom ima varijanti koje su dale zadovoljavajuće rezultate. Međutim, iako je očekivanje bilo da će kompleksnija arhitektura rezultovati manjom greškom ipak su rezultati bili lošiji od varijanti sa početnom arhitekturom.

### 6.2.5 Priprema sistema za dalje korišćenje

U skladu sa prikazanim performansama obeju arhitektura **Klasifikatora** i **Prediktora** za dalju primenu su usvojeni adaptivni sistemi sa proširenim setom ulaznih podataka sa prvobitnom arhitekturom u varijanti 4 za klasifikator i varijanti 6 za prediktor. Međutim, u ovakvoj formi, to jest formi Peltarion rešenja, obučeni adaptivni sistemi **Klasifikatora** i **Prediktora** mogu biti praktično primenjeni samo korišćenjem „Probe“ modula *Synapse*-a. Kako bi se omogućilo korišćenje **Klasifikatora** i **Prediktora** nezavisno od software-skog alata u kojem su nastali iskorišćena je mogućnost *Synapse*-a da dobijeno rešenje eksportuje u vidu \* **.dll** (dynamic link

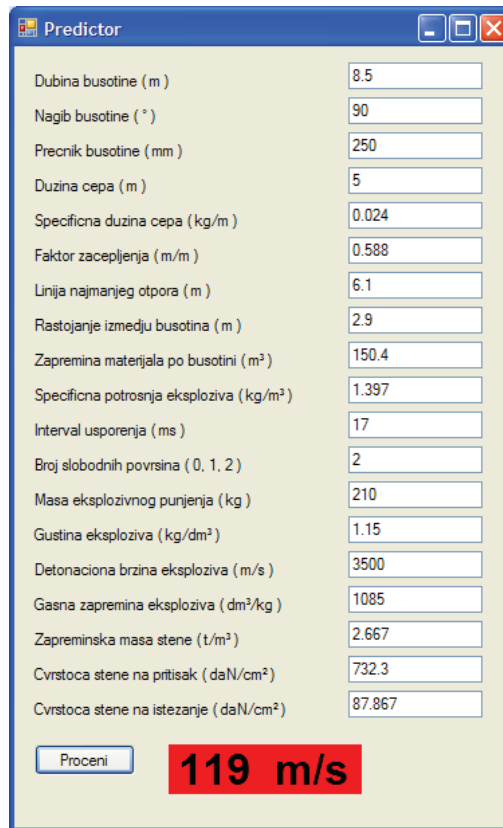
library) fajla. Eksportovani \*.dll fajl sadrži sve elemente koji su neophodni za rad mreže u smislu broja, tipa i formata ulaznih podataka kao i implementiranu izlaznu funkciju neuronske mreže. Sam \*.dll fajl ne može biti samostalno primenjen pa je neophodan korisnički interfejs (Graphical User Interface – GUI) koji će krajnjem korisniku omogućiti unos podataka kao i aplikacija odnosno programsko/software-sko rešenje koje će pročitati podatke iz \*.dll fajla, unete ulazne podatke učitati u izlaznu funkciju mreže i prikazati konačni rezultat.

Za potrebe *Klasifikatora* i *Prediktora* kreirani su GUI u formi Windows formulara i napisan kod u C# programskom jeziku. Kreirane aplikacije *Klasifikatora* i *Prediktora* zahtevaju .NET podršku tako da je za njihovu primenu neophodna instalacija Microsoft.Net framework u verziji 2.0 SP2 ili višoj.

I *Klasifikator* i *Prediktor* su testirani sa setovima podataka koji nisu korišćeni u postupku obuke i validacije neuronskih mreža (Slike 6.16 i 6.17).

Parameter	Left Window Value	Right Window Value
Dubina busotine (m)	9	8.5
Nagib busotine (°)	90	90
Precnik busotine (mm)	250	250
Duzina cepa (m)	5.5	5
Specifčna dužina cepa (m/kg)	0.026	0.024
Faktor zacepljenja (m/m)	0.611	0.588
Linija najmanjeg otpora (m)	4.4	6.1
Rastojanje između busotina (m)	4	2.9
Zapremina materijala po busotini (m³)	158	150.4
Specifična potrosnja eksploziva (kg/m³)	1.326	1.397
Interval usporenja (ms)	25	17
Broj slobodnih površina (0, 1, 2)	2	2
Masa eksplozivnog punjenja (kg)	210	210
Gustina eksploziva (kg/dm³)	1.15	1.15
Detonaciona brzina eksploziva (m/s)	3500	3500
Gasna zapremina eksploziva (dm³/kg)	1085	1085
Zapreminska masa stene (t/m³)	2.563	2.667
Cvrstoca stene na pritisak (daN/cm²)	890.017	732.3
Cvrstoca stene na istežanje (daN/cm²)	103.525	87.867
Rezultat	Razletanje NE	Razletanje DA

Slika 6.16 – Izgled grafičkog korisničkog interfejsa Klasifikatora sa prikazom rezultata



The image shows a software window titled "Predictor" with a list of input parameters and their values. At the bottom, there is a "Proceni" button and a red box displaying the result "119 m/s".

Parameter	Value
Dubina busotine (m)	8.5
Nagib busotine (°)	90
Precnik busotine (mm)	250
Duzina cepa (m)	5
Specifčna dužina cepa (kg/m)	0.024
Faktor zacepljenja (m/m)	0.588
Linija najmanjeg otpora (m)	6.1
Rastojanje između busotina (m)	2.9
Zapremina materijala po busotini (m <sup>3</sup> )	150.4
Specifična potrošnja eksploziva (kg/m <sup>3</sup> )	1.397
Interval usporenja (ms)	17
Broj slobodnih površina (0, 1, 2)	2
Masa eksplozivnog punjenja (kg)	210
Gustina eksploziva (kg/dm <sup>3</sup> )	1.15
Detonaciona brzina eksploziva (m/s)	3500
Gasna zapremina eksploziva (dm <sup>3</sup> /kg)	1085
Zapreminska masa stene (t/m <sup>3</sup> )	2.667
Cvrstoca stene na pritisak (daN/cm <sup>2</sup> )	732.3
Cvrstoca stene na istezanje (daN/cm <sup>2</sup> )	87.867

Proceni

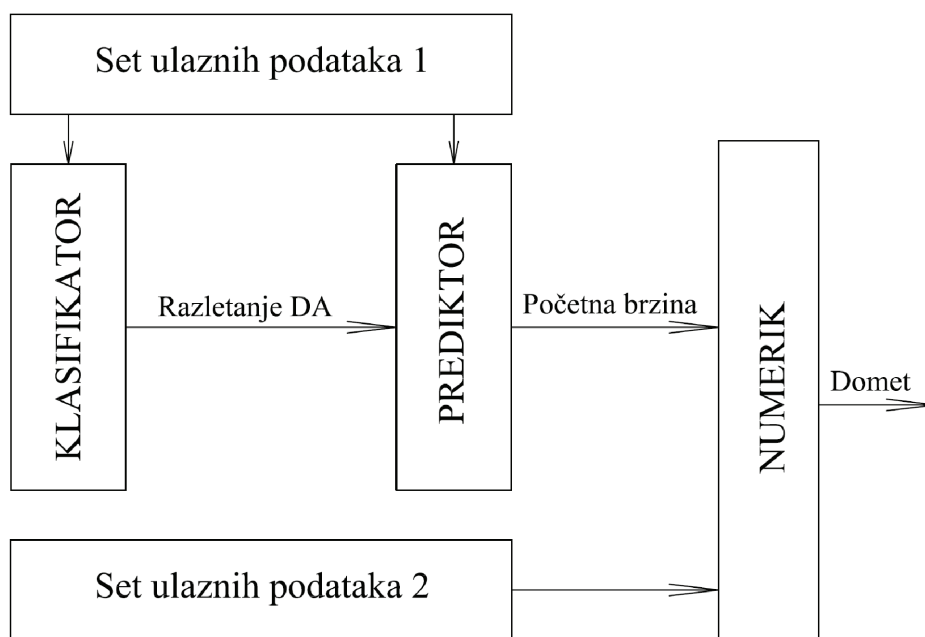
**119 m/s**

*Slika 6.17 – Izgled grafičkog korisničkog interfejsa Prediktora sa prikazom rezultata*



## 7. IMPLEMENTACIJA I VERIFIKACIJA SPREGE NEURONSKIH MREŽA I NUMERIČKIH MODELA

U cilju definisanja sigurnih rastojanja kod razletanja komada pri miniranju kreiran je sistem koji je sposoban da, za date ulazne parametre, odgovori na pitanje hoće li doći do razletanja i koliki će biti domet razletelih komada. Sistem u osnovi predstavlja spregu neuronskih mreža i numeričkih modela i čine ga tri osnovne celine, *Klasifikator*, *Prediktor* i *Numerik* (Slika 7.1).

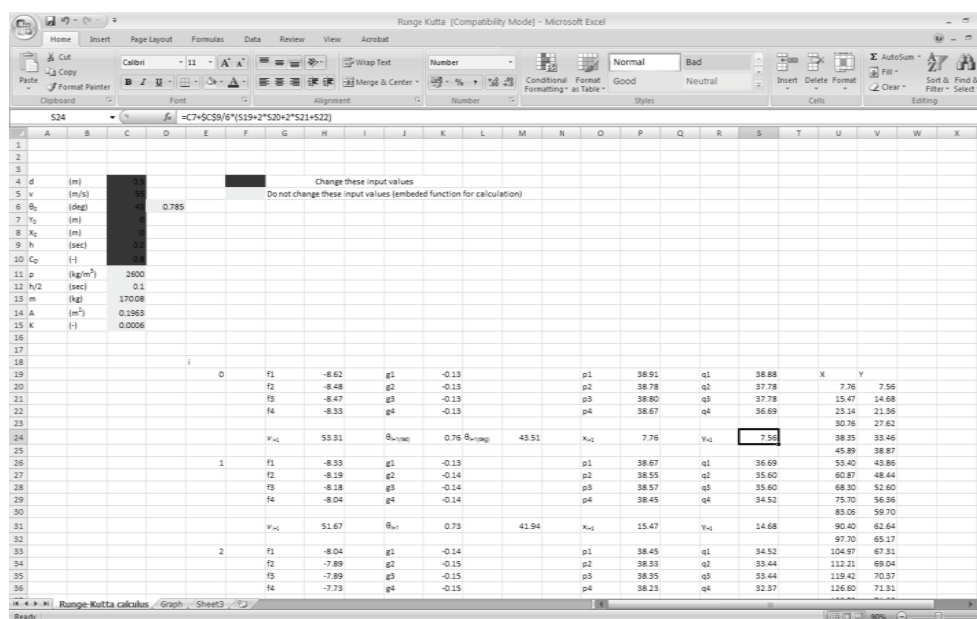


Slika 7.1 – Šematski prikaz neuro-numeričke sprege

U dosadašnjem izlaganju prezentovane su teorijske osnove neuronskih mreža kao i proces obuke adaptivnih sistema primenjenih za predikciju pojave razletanja komada i prognozu početne brzine. Rezultat obuke su obučeni adaptivni sistemi eksportovani u formi Peltarion rešenja ali i \*.dll fajlova (dynamic link library).

Kreiranjem računarskih kodova i odgovarajućih korisničkih interfejsa koji mogu da „pročitaju“ \*.dll fajlove dobijeni su potpuno samostalni **Klasifikator** i **Prediktor**.

Numerički deo sprege je pak samo teorijski obrađen u okviru tačke 4. U okviru teorijske obrade objašnjeni su principi formiranja diferencijalnih balističkih jednačina i dva postupka njihovog numeričkog rešavanja. Sam **Numerik** je u osnovi bili koje software-sko rešenje za rešavanje za diferencijalnih balističkih jednačina. Najjednostavnija forma **Numerika** je svakako MS Excel spreadsheet sa definisanim funkcijama i makroima za unos ulaznih parametara i postupak rešavanja diferencijalnih jednačina bilo po **RK-4** algoritmu (slika 7.2) bilo po numeričkom postupku opisanom u okviru tačke 4.2.2.1.



Slika 7.2 –Numerik razvijen u MS Excel-u

**Numerik** može biti razvijen i primenom nekih od matematičkih software-skih alata tipa MatLab, Mathematica, MathCAD i slično ili može biti razvijen kako nezavisni računarski kod. Takođe, **Numerik** može biti kreiran tako da kao izlazni podatak daje samo vrednost dometa razletelih komada ili se od njega može zahtevati da prikaže i

druge podatke od interesa ili da prikaže željene podatke u određenim trenucima vremena.

Za potrebe ovog rada i rešavanje diferencijalnih jednačina primenom **RK-4** algoritma kreiran je **Numerik** prikazan dalje u tekstu. Za date ulazne vrednosti veličine razletelog komada, početne brzine, ugla izletanja, koeficijenta otpora vazduha i početnih koordinata (Slika 7.3) numerik izračunava funkcije **RK-4** algoritma (Slika 7.4).

```
In[1]:= t = 0; dt = 0.2; v = 55;  $\theta = \frac{45 * \pi}{180}$ ; g = 9.81;  $\rho = 1.2044$ ; Cd = 2.025;
      mz = 170; d =  $\frac{500}{1000}$ ; A =  $\frac{d^2 * \pi}{4}$ ; c =  $\frac{\rho * A * Cd}{2 * mz}$ ; x = 0; y = 0; n = 0
Out[1]= 0
```

Slika 7.3 – Unos podataka u Numerik

```
In[2]:= Label[pocetak]; t += dt; kjb = dt * (-g * Sin[ $\theta$ ] - c * v^2);
      kdb = dt * (-g * Sin[ $\theta$ ] - c * (v +  $\frac{kjb}{2}$ )^2); ktb = dt * (-g * Sin[ $\theta$ ] - c * (v +  $\frac{kdb}{2}$ )^2);
      kcb = dt * (-g * Sin[ $\theta$ ] - c * (v + ktb)^2); dv =  $\frac{1}{6}$  (kjb + 2 * kdb + 2 * ktb + kcb);
      kk1 = dt * ( $\frac{-g * Cos[\theta]}{v}$ ); kk2 = dt * ( $\frac{-g * Cos[\theta + \frac{kk1}{2}] }{v}$ ); kk3 = dt * ( $\frac{-g * Cos[\theta + \frac{kk2}{2}] }{v}$ );
      kk4 = dt * ( $\frac{-g * Cos[\theta + kk3]}{v}$ ); d $\theta$  =  $\frac{1}{6}$  (kk1 + 2 * kk2 + 2 * kk3 + kk4);
       $\theta$  += d $\theta$ ; dx = dt * v * Cos[ $\theta$ ]; x += dx; dy = dt * v * Sin[ $\theta$ ]; y += dy;
      v += dv; n++; m[n] = {t, dv, v, d $\theta$ ,  $\frac{\theta * 180}{\pi}$ , dx, x, dy, y};
      If[y > 0.001, Goto[pocetak]]; h = Array[m, n]; MatrixForm[h]
```

Slika 7.4 – Proračun funkcija RK-4 algoritma

Rezultati priračuna za svaki korak, to jest za svaki posmatrani trenutak vremena upisuju se u rezultatsku matricu (Slika 7.5) kao i u odgovarajuće tabele (slika 7.6) odakle se kasnije mogu pozivati kako bi se vizuelizovali.

Osnovni cilj **Numerika** je proračun maksimalnog dometa razletelog komada kako bi se moglo definisati sigurno rastojanje. U tom smislu je neophodno prikazati trajektoriju razletelog komada odnosno dati grafik funkcije  $y=f(x)$  ili iz tabele očitati vrednost dometa ( $x$ ) u trenutku udara komada o tlo ( $y=0$ ) (Slika 7.6).

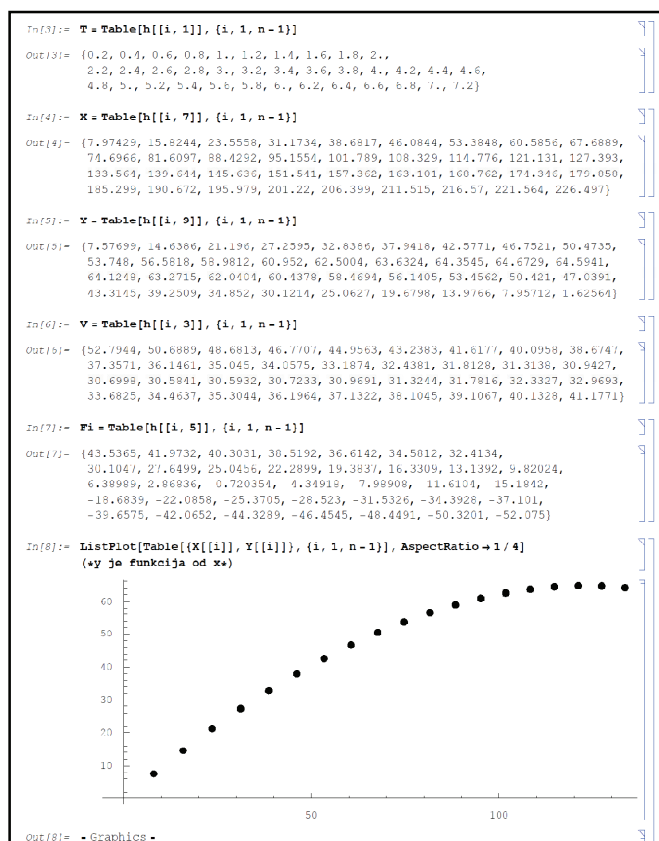
```

out[2]//MatrixForm=

```

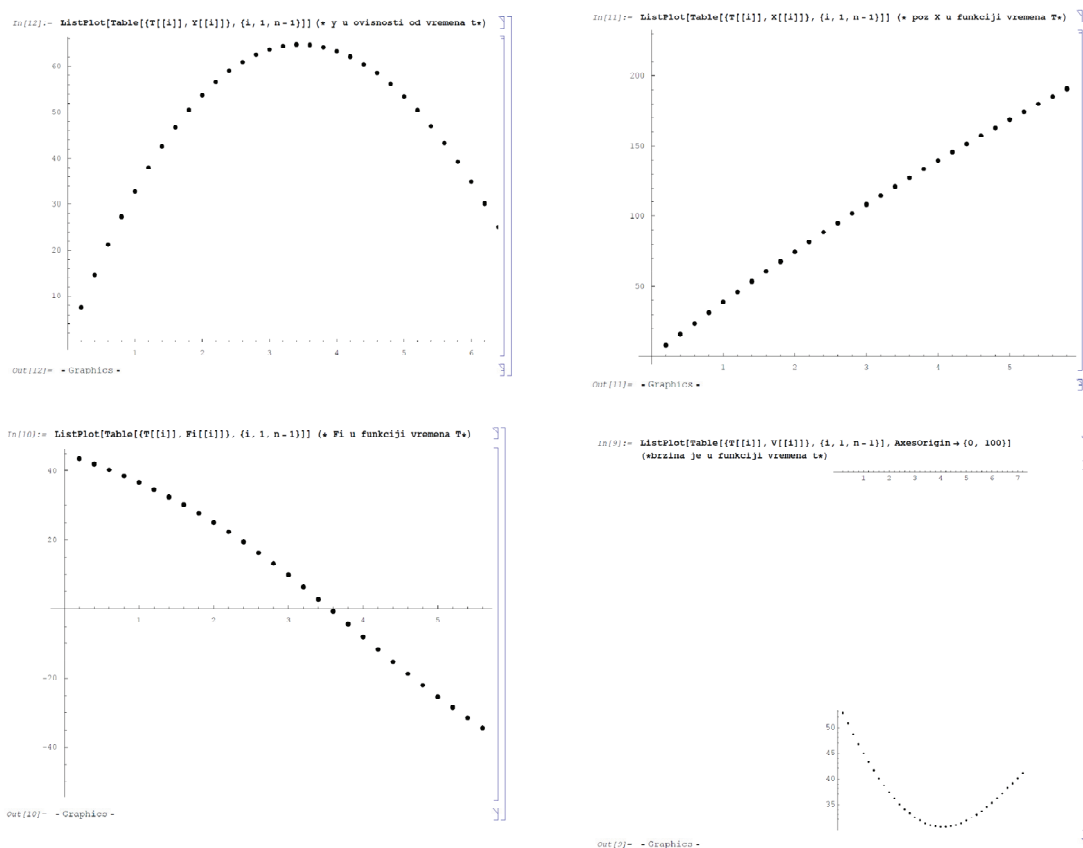
0.2	-2.20558	52.7944	-0.0255425	43.5365	7.97429	7.97429	7.57699	7.57699
0.4	-2.10556	50.6889	-0.0272852	41.9732	7.85008	15.8244	7.0616	14.1
0.6	-2.00751	48.6013	-0.0291404	40.3031	7.7314	23.5550	6.55743	21
0.8	-1.91069	46.7707	-0.0311355	38.5192	7.61765	31.1734	6.06352	27.
1.	-1.81439	44.9563	-0.0332476	36.6142	7.50827	38.6817	5.57903	32.
1.2	-1.71794	43.2383	-0.0354829	34.5812	7.4027	46.0844	5.1032	37.
1.4	-1.62065	41.6177	-0.0378357	32.4134	7.30038	53.3848	4.63536	42.
1.6	-1.52189	40.0958	-0.0402949	30.1047	7.20078	60.5856	4.17493	46.
1.8	-1.42105	38.6747	-0.042843	27.6499	7.10337	67.6889	3.72144	50.
2.	-1.3176	37.3571	-0.0454549	25.0456	7.00764	74.6966	3.2745	53
2.2	-1.21106	36.1461	-0.0480961	22.2899	6.91314	81.6097	2.83386	56.
2.4	-1.10108	35.043	-0.0507227	19.3837	6.81944	88.4292	2.39932	58.
2.6	-0.987447	34.0575	-0.0532804	16.3309	6.72621	95.1554	1.97082	60
2.8	-0.870122	33.1874	-0.0557056	13.1392	6.63319	101.789	1.54838	62.
3.	-0.749203	32.4301	-0.0579273	9.82024	6.54023	108.329	1.13207	63.
3.2	-0.625346	31.8128	-0.0598705	6.38989	6.44732	114.776	0.722031	64.
3.4	-0.498985	31.3138	-0.0614623	2.86836	6.35459	121.131	0.318391	64.
3.6	-0.371127	30.9427	-0.0626348	-0.720354	6.26227	127.393	-0.0787368	64.
3.8	-0.242923	30.6998	-0.0633349	-4.34918	6.17072	133.564	-0.469305	64.
4.	-0.1157	30.5841	-0.0635283	-7.98908	6.08036	139.644	-0.853357	63.
4.2	0.00911666	30.5932	-0.0632030	-11.6104	5.99165	145.636	-1.23104	62.
4.4	0.130089	30.7233	-0.0623754	-15.1842	5.90503	151.541	-1.60262	60.
4.6	0.245859	30.9691	-0.0610802	-18.6839	5.82083	157.362	-1.96842	58.
4.8	0.355231	31.3244	-0.0593747	-22.0858	5.73933	163.101	-2.32884	56.
5.	0.457233	31.7816	-0.0573292	-25.3705	5.66066	168.762	-2.68431	53.
5.2	0.551151	32.3327	-0.0550200	-28.523	5.59402	174.346	-3.03521	50.
5.4	0.636539	32.9693	-0.052527	-31.5326	5.51172	179.858	-3.38189	47.
5.6	0.713207	33.6825	-0.0499208	-34.3928	5.44115	185.299	-3.72463	43.
5.8	0.781185	34.4637	-0.0472669	-37.101	5.37285	190.672	-4.0636	39.
6.	0.840686	35.3044	-0.0446197	-39.6575	5.30653	195.979	-4.39892	34.
6.2	0.892064	36.1964	-0.0420225	-42.0652	5.24107	201.22	-4.73062	30.
6.4	0.935767	37.1322	-0.039508	-44.3289	5.17855	206.399	-5.05864	25.
6.6	0.972304	38.1045	-0.0370995	-46.4545	5.1163	211.515	-5.38289	19.
6.8	1.00222	39.1067	-0.0348121	-48.4491	5.05483	216.57	-5.70323	13.
7.	1.02605	40.1328	-0.0326545	-50.3201	4.99391	221.564	-6.01949	7.
7.2	1.04434	41.1771	-0.03063	-52.075	4.93335	226.497	-6.33148	1.
7.4	1.05761	42.2347	-0.0287382	-53.7216	4.87297	231.37	-6.639	-5.

Slika 7.5 – Matrica rezultata Numerik-a



Slika 7.6 – Tabelarni prikaz rezultata i grafički prikaz trajektorije posmatranog komada

Sa aspekta sprege ovo je konačni rezultat. Međutim, sa inženjerskog stanovišta ima smisla kreirati numerik tako da prikazuje i druge rezultate, pre svega podatke o brzini, visini i napadnom uglu razletelog komada u svakom trenutku vremena (Slika 7.7).



**Slika 7.7 – Grafički prikaz rezultata Numerik-a ( $y(t)$ ,  $x(t)$ ,  $\theta(t)$  i  $v(t)$ )**

Numerik razvijen za potrebe ovog rada je kreiran tako da omogući grafičku interpretaciju vrednosti koordinata ( $x$ ,  $y$ ), brzine i ugla u svakom trenutku leta razletelog komada.

Poznavanje vrednosti brzine kojim razleteli komad udara o tlo omogućava proračun energije udara jer, sa aspekta energije koju nose, mali komadi koji se kreću velikom brzinom podjednako ugrožavaju objekte i mehanizaciju kao i sporiji komadi većih prečnika.

Poznavanje vrednosti ugla pod kojim razleteli komad udara o tlo ukazuje na mogućnost rikošeta i odskakivanja komada na udaljenosti veće od prognoziranih. U slučaju malih upadnih uglova mogu se blagovremeno preduzeti mere za sprečavanje rikošeta ili povećati sigurno rastojanje.

Poznavanje maksimalne visine koju razleteli komad može postići ukazuje na potencijal komada da preleti grudobrane ili eventualno, sa nižih etaža ugrozi ljudstvo i mehanizaciju koji se nalaze na etažama iznad.

*Numerik* se može primeniti i za rešavanje problema nezavisno od sprege i klasifikatora i prediktora. U toku izrade ovog rada *Numerik* je korišćen i za rešavanje specijalnih slučajeva balističkih jednačina odnosno za slučajeve vertikalnog hica naviše i slobodnog pada. Operativne mogućnosti *Numerika* i njegova primena u ovim specijalnim slučajevima omogućili su proveru polaznih hipoteza pri određivanju koeficijenta otpora vazduha opisanom u okviru tačke 5.4. Primenom *Numerika* u slučaju vertikalnog hica naviše potvrđeno je da je vremenski interval od razletanja bušotine do pojave slobodno padajućeg komada u vidnom polju kamere dovoljno veliki da komad postigne terminalnu brzinu. Takođe je definisana i maksimalna visina koju je razleteli komad dostigao i računski potvrđena terminalna brzina određena na osnovu video snimka.

Iz svega izloženog može se zaključiti da *Numerik*, nezavisno od načina na koji rešava diferencijalne jednačine ili programskog rešenja/alata kojim je razvijen predstavlja nezamenljivi deo *Sprege* i osnovni alat za rešavanje različitih inženjerskih problema koji su vezani za problem razletanja komada pri miniranjima.

## **7.1 Verifikacija sprege**

Prilikom obuke adaptivnih sistema *Klasifikatora* i *Prediktora* korišćen je metod istovremene obuke i validacije. Drugim rečima, adaptivni sistemi su u toku obuke nakon svakih pet iteracija prolazili kroz proces validacije. Za potrebe validacije

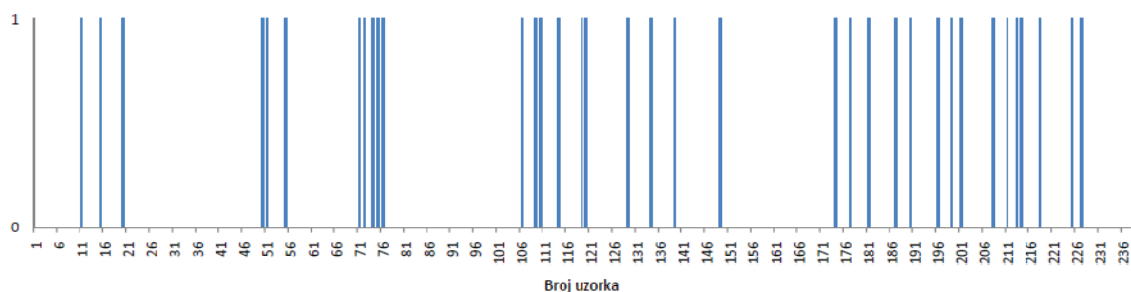
je iz skupa setova podataka izdvojen validacioni skup podataka koji je činilo 15 % nasumično odabranih setova podataka.

Postupkom validacije izvršena je ocena performansi adaptivnih sistema odnosno vrednost greške koju prave i na osnovu toga su izabrane najbolje varijante. Međutim, validacioni skup podataka izvučen je iz skupa podataka koji su korišćeni za obuku sistema i postavlja se pitanje performansi mreže sa podacima koji su nezavisni od podataka korišćenih u toku obuke i validacije. Kako bi se proverile performanse **Klasifikatora** i **Prediktora** i konačno same Sprege obezbeđen je nezavisni skup podataka. Nezavisni skup sadržao je 237 setova ulazno/izlaznih podataka koji odgovaraju bušotinama iz minske serije sa PK Veliki Krivelj. Podaci su unošeni u **Spregu** i rezultati su upoređivani sa realnim vrednostima sa terena. Pri tome se **Sprega** smatrala verifikovanom ukoliko su pojedinačne greške **Klasifikatora**, **Prediktora** i **Numerika** bile manje od prethodno definisanih.

Za graničnu, odnosno dozvoljenu grešku **Klasifikatora** i u ovom slučaju je usvojena vrednost od 20 % pogrešnih klasifikacija. Maksimalna dozvoljena greška **Prediktora** bila je 10 % odstupanja prognozirane od izmerene vrednosti. S obzirom na veliki broj mogućih varijacija ulaznih parametara **Numerika** u smislu početnih uglova izletanja i dimenzija razletelih komada, **Numerik** je smatran verifikovanim ukoliko je prognozirani domet komada dimenzija 25 cm sa početnim uglom od 43° veći od maksimalno zabeleženog dometa komada na terenu. Razlog za to je činjenica da se maksimalni domet razletelih komada ostvaruje za komade srednjih prečnika i uglove izletanja od 43° dok je na terenu verovatnija pojava većih početnih uglova i komada različitih dimenzija.

Od 237 bušotina koje je trebalo klasifikovati u one koje će rezultovati razletanjem i one koje neće **Klasifikator** je pogrešno klasifikovao 35 bušotina što iznosi 14,76 %. Grafička interpretacija verifikacije Klasifikatora predstavljena je na slici 7.8 gde su pogrešno klasifikovani uzorci predstavljeni histogramski. Pri tome su od 35 pogrešno klasifikovanih bušotina 34 klasifikovane kao **razletanje\_da** dok u stvari razletanja nije bilo. Samo jedna bušotina je klasifikovana kao **razletanje\_ne** a na terenu je zabeleženo razletanje. Sa aspekta sigurnosti ovakva pogrešna klasifikacija je

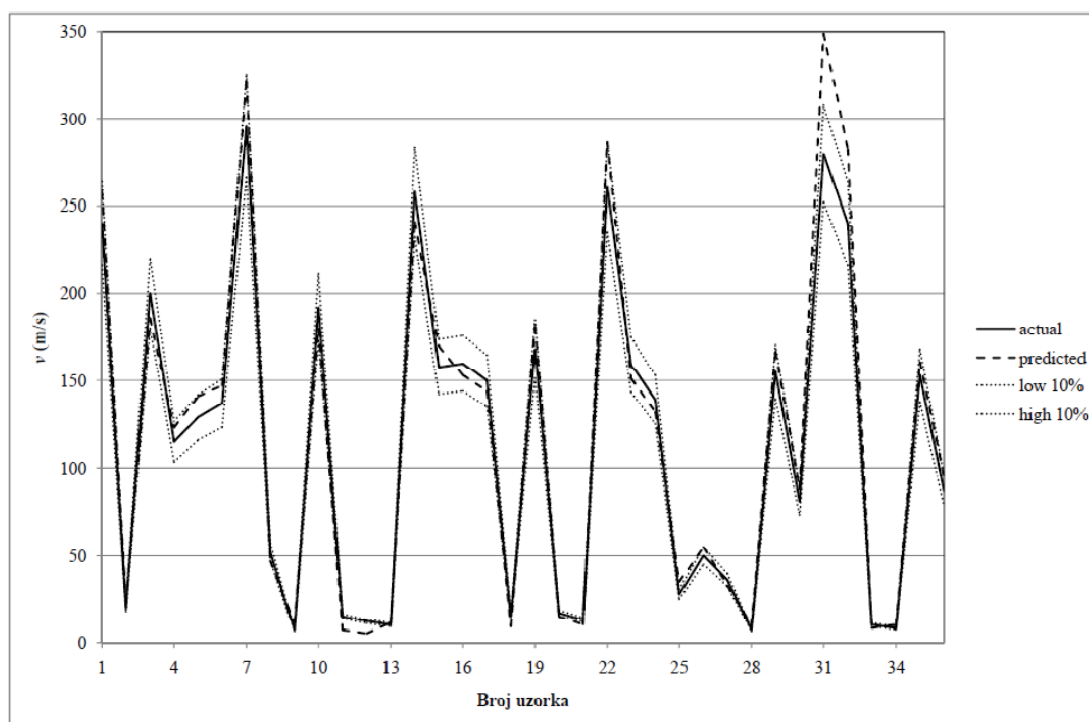
povoljnija. S obzirom na to da je ukupan broj pogrešnih klasifikacija bio manji od prethodno definisanih 20 % **Klasifikator** se smatra verifikovanim.



**Slika 7.8** – Grafička interpretacija verifikacije Klasifikatora

Od 202 ispravno klasifikovane bušotine trideset šest je rezultovalo razletanjem. Odgovarajući setovi podataka uneseni su u **Prediktor** kako bi se rezultati predikcije uporedili sa vrednostima početnih brzina izmerenim na terenu. Pri tome je odstupanje prognoziranih od stvarnih vrednosti iznosilo i maksimalnih 140 %. Međutim, ova ekstremna odstupanja javljala su se kod veoma niskih vrednosti početnih brzina razletanja reda veličine do 10 m/s. Pri ovim brzinama domet razletelih komada ne premašuje 30 m što je unutar zone minskog polja. Kod ostalih bušotina prognozirane vrednosti maksimalnih početnih brzina bile su unutar prihvatljive greške od  $\pm 10\%$ . Grafički prikaz verifikacije prediktora prikazan je na slici 7.9.





*Slika 7.9 – Grafička interpretacija verifikacije Prediktora*

Podaci o vrednostima prognoziranih početnih brzina razletelih komada dobijeni **Prediktorom** su uneseni u **Numerik**. Domet razletelih komada je utvrđivan za komad prečnika 250 mm i za ugao izletanja od  $40^\circ$  da bi se definisao maksimalni mogući domet razletelih komada. Dometi dobijeni **Numerikom** su se kretali u rasponu od 30 do 600 m dok su dometi razletelih komada zabeleženi na terenu iznosili maksimalnih 70 m. Razlog za ovako veliku razliku u dometima leži u činjenici da su na terenu razleteli komadi imali veće uglove izletanja. Najveće početne brzine zabeležene kod razletanja tipa izduvanje čepa kod kojeg je razletanje komada vertikalno pa su i dometi razletelih komada samo par metara. Numerik je pak i ove brzine tretirao kao razletanje pod „optimalnim“ uglom pa otud i veliki prognozirani dometi. Pri verifikaciji je postavljen uslov da je Numerik verifikovan ukoliko su prognozirani dometi veći od onih izmerenih na terenu pa je u tom smislu i **Numerik** verifikovan.

Naravno, da bi se izbeglo nepotrebno sklanjanje mehanizacije **Spregu** treba dalje razvijati u pravcu identifikovanja tipa razletanja kako bi se problem nerealno velikih dometa anulirao.

Imajući u vidu da su svi delovi **Sprege** nezavisno verifikovani i sama **Sprega** se može smatrati verifikovanom. Verifikacija je potvrdila da Sprega neuronskih mreža i numeričkih modela može, bez obzira na lokaciju primene ili specifične uslove koji na toj lokaciji vladaju, dati odgovor na oba pitanja postavljena na početku istraživanja. **Klasifikator** može, za date parametre minske serije i pojedinačnih bušotina, pouzdano odgovoriti na pitanje hoće li doći do pojave razletanja ili ne. Sa druge strane, **Numerik** u sprezi sa **Prediktorom** daje preciznu prognozu maksimalno mogućih dometa razletelih komada.

## 7.2 Definisanje sigurnog rastojanja

Rezultat definisane neuro-numeričke sprege je maksimalni domet razletelih komada za date ulazne parametre  $L_R$ . Međutim, da bi se definisalo sigurno rastojanje ovako određeni domet treba uvećati u skladu sa nekim faktorom sigurnosti pa se sigurno rastojanje može definisati kao

$$L_S = F_S \cdot L_R. \quad (7.1)$$

S obzirom na to da u zakonskoj regulativi, kako domaćoj tako i stranoj, nema precizno definisanih odrednica o faktoru sigurnosti pri razletanju komada pri miniranju faktor sigurnosti je morao biti definisan na drugi način.

Imajući u vidu grešku merenja početne brzine pri terenskim istraživanjima i dozvoljenu grešku **Prediktora** od 10 % logično je zaključeno da ona mora biti, na neki način, uključena u faktor sigurnosti. Pored toga, u faktor sigurnosti je morala biti uključena i činjenica da najveći domet ostvaruju razleteli komadi srednjih prečnika, u rasponu od 15 – 30 cm. S tim u vezi, donesena je odluka da se, primenom **Numerika** odrede dometi komada prečnika 15, 20, 25 i 30 cm za početne brzine u rasponu od 10 do 250 m/s, a da se zatim odrede dometi za brzine uvećane za 10 %. Pretpostavka je bila

da će razlika u dometima za  $v_0$  i  $I, I v_0$ , izražena u procentima, imati neku približno konstantnu vrednost.

Ulazni podaci koji su korišćeni u proračunu su bili početna brzina, početni ugao, masa komada, površina poprečnog preseka komada i koeficijent otpora vazduha. Masa komada i površina poprečnog preseka sračunati su iz uslova aproksimacije komada sferom po formulama 5.22 i 5.23 i prikazani su u tabeli 7.1.

$$m = \frac{4}{3} \left( \frac{d}{2} \right)^3 \pi \gamma_s, \quad (5.22)$$

$$A_p = \frac{d^2 \pi}{4}. \quad (5.23)$$

**Tabela 7.1**– Početni parametri razletelih komada

<b>Veličina komada (m)</b>	<b>Masa komada (kg)</b>	<b>Površina poprečnog preseka (m<sup>2</sup>)</b>
0,15	4,59	0,018
0,20	10,89	0,031
0,25	21,26	0,049
0,30	36,74	0,071

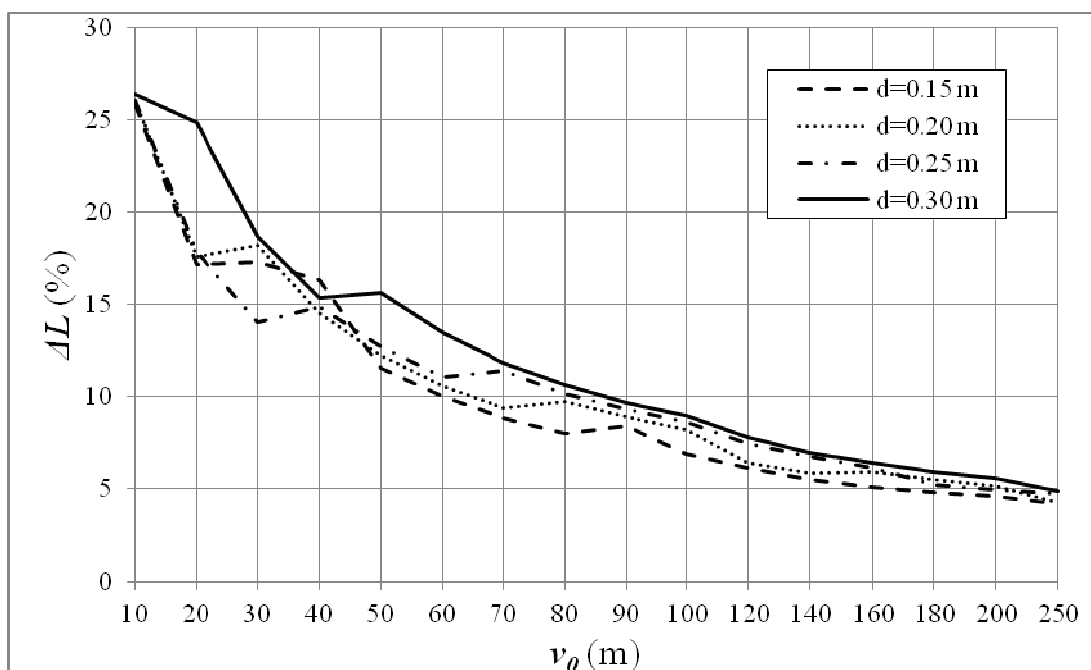
Za ugao izletanja komada usvojena je vrednost od 40° a vrednost koeficijenta otpora vazduha je usvojena u skladu sa rezultatima prikazanim u okviru tačke 5.4 i iznosila je 2,025.

Vrednost razlika u dometima za početne brzine i brzine uvećane za 10 % prikazane su tabelarno (Tab. 7.2) i grafički (Sl. 7.10).

Tabela 7.2 – Razlika u dometima razletelih komada pri uvećanju brzine od 10%

$v_0$	d=0.15			d=0.2			d=0.25			d=0.3		
	$L_R$	$L_X$	$\Delta L$	$L_R$	$L_X$	$\Delta L$	$L_R$	$L_X$	$\Delta L$	$L_R$	$L_X$	$\Delta L$
(m/s)	(m)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)
10	7,89	9,93	25,86	7,95	10,02	26,04	7,98	10,06	26,07	7,99	10,10	26,41
20	31,95	37,43	17,15	32,73	38,49	17,60	33,22	39,16	17,88	33,55	41,91	24,92
30	64,09	75,20	17,33	67,11	79,32	18,19	71,94	82,06	14,07	73,46	87,19	18,69
40	95,48	111,07	16,33	107,33	122,92	14,53	115,56	132,74	14,87	119,37	137,69	15,35
50	131,32	146,51	11,57	146,49	164,43	12,25	158,94	179,12	12,70	165,92	191,82	15,61
60	161,33	177,50	10,02	185,38	204,93	10,55	202,85	225,25	11,04	213,91	242,72	13,47
70	189,69	206,42	8,82	219,76	240,36	9,37	242,36	269,90	11,36	261,79	292,68	11,80
80	213,71	230,80	8,00	249,38	273,69	9,75	280,44	308,96	10,17	304,57	336,91	10,62
90	233,72	253,39	8,42	277,37	302,04	8,89	313,33	342,56	9,33	345,81	379,14	9,64
100	254,74	272,17	6,84	303,75	328,57	8,17	344,60	374,26	8,61	381,49	415,55	8,93
120	288,53	306,08	6,08	349,33	371,74	6,42	402,35	432,33	7,45	448,00	482,82	7,77
140	318,39	335,91	5,50	387,51	410,06	5,82	448,41	478,56	6,72	504,94	540,01	6,95
160	343,28	360,78	5,10	419,58	444,36	5,91	490,09	520,18	6,14	553,55	588,82	6,37
180	364,15	381,70	4,82	448,69	473,33	5,49	527,99	555,51	5,21	598,00	633,18	5,88
200	384,74	402,23	4,55	475,30	499,76	5,15	560,29	587,84	4,92	636,01	671,16	5,53
250	424,84	442,46	4,15	530,58	553,20	4,26	627,67	657,21	4,71	718,08	752,95	4,86

Sa grafika se može videti da, za razliku od očekivanog, procentualna razlika u dometima sa povećanjem početne brzine nije konstantna već pokazuje opadajući, eksponencijalni trend. Najveća razlika u dometima je pri najmanjim početnim brzinama (26 %), a sa povećanjem početne brzine opada i asimptotski se približava vrednosti od 4 %. Imajući u vidu da razlika u dometima ne prelazi 30% prva ideja je bila da se za veličinu faktora sigurnosti usvoji vrednost od 1,3. Međutim, posmatrajući podatke iz tabele 7.2 može se videti da već pri početnoj brzini od 20 m/s razlika u dometima pada ispod 20 % osim za komade prečnika 30 cm. Pri tome su dometi razletelih komada sa ovom početnom brzinom manji od 50 m i može se smatrati da su još uvek unutar zone minskog polja. Pri brzinama od 30 m/s razlika u dometima, za sve veličine razletelih komada, ne prelazi 20 %, a dometi su manji od 100 m što je generalno manje od rastojanja na koje se, pri miniranju, povlači lakša mehanizacija.



*Slika 7.10 – Zavisnost razlike u dometima od početne brzine*

Zbog svega ovoga je odlučeno da se za faktor sigurnosti za definisanje sigurnog rastojanja na koje treba povući lakšu mehanizaciju ili minimalnog sigurnog rastojanja minske serije od nekapitalnih rudničkih objekata usvoji vrednost od  $F_S=1,20$ . Težu mehanizaciju treba povući na maksimalno rastojanje koje dozvoljavaju njene tehničke karakteristike.

Imajući u vidu preporuke američke zakonske regulative (tačka 2.4.2) za faktor sigurnosti za ljudstvo i nastanjene objekte ili rudničke kapitalne objekte treba usvojiti vrednost od  $F_S=2$ .

Ovako definisani faktori sigurnosti ne uzimaju u obzir eventualni rikošet razletelih komada pri njihovom udaru o tlo. Razlog za to je činjenica da se veći dometi ostvaruju pri većim brzinama i pri uglovima razletanja u rasponu od 35 – 40 stepeni. Pri većim brzinama i ovom rasponu uglova upadni uglovi razletelih komada pri njihovom udaru u tlo su u rasponu od 55 – 70 stepeni pa bi, u idealnim uslovima i odskočni ugao bio isti. S obzirom na to da je udar razletelog komada o tlo plastičan razleteli komad nema dovoljno preostale energije da pri rikošetu ostvari veliki domet. Pored toga, pri prikupljanju podataka na terenu za podatak o početnoj brzini uzeta je maksimalna

zabeležena vrednost. Ova vrednost brzine odgovara najsitnijim frakcijama materijala koje pri razletanju bivaju izbačene prve. Krupniji komadi koji izleću kasnije izleću sa manjim početnim brzinama.

Zbog svega navedenog se smatra da je domet razletelog određen neuro-numeričkom spregom i uvećan za odgovarajući faktor sigurnosti veći od dometa koji će komad, čak i sa rikošetom, ostvariti na terenu.

## 8. ZAKLJUČAK

Problem razletanja komada stenske mase pri miniranju predstavlja ozbiljnu pretnju po sigurnost ljudstva, mehanizacije i objekata. Iako predstavlja pretnju problem razletanja se u novije vreme obrađuje sporadično, od strane malog broja istraživača i sa različitim pristupima. Ono što je uočeno u toku istraživanja problematike razletanja je činjenica da ne postoji jedan univerzalni metod određivanja dometa razletelih komada i definisanja sigurnih rastojanja već se svi mogu smatrati studijama slučaja za lokacije na kojima su razvijeni. Čak i opšte prihvaćeni prognozni modeli u velikom broju slučajeva daju rezultate koji znatno odstupaju od realne situacije na terenu.

Upravo to je bio *spiritus movens* prezentovanog istraživanja pa ovaj rad predstavlja koncept metode za definisanje sigurnih rastojanja koji ima potencijal da preraste u opšti, univerzalno primenljiv model. Razlog tome je, pre svega, primena numeričkih modela baziranih na dinamici leta komada odminirane mase i opštim principima fizike. Sile koje deluju na komad koji prati balističku putanju su svuda iste, nevezano za lokaciju, vreme ili uslove koji na toj lokaciji vladaju.

Sa druge strane nedovoljno su poznate međusobne interakcija radne sredine, dejstva primenjenog eksploziva, konstrukcija minskih serija i uslova koji dovode do pojave razletanja komada. To može dovesti do spekulacija i nagađanja i konačno rezultovati pogrešnom procenom situacije na terenu. Adaptivne sposobnosti inteligentnih sistema i njihove mogućnosti mapiranja skrivenih zavisnosti čine ih idealnim alatom za analizu uslova koji vladaju u minskoj seriji i predikciju pojave razletelih komada. Principi funkcionisanja neuronskih mreža i njihova prilagodljivost lokalnim uslovima takođe su univerzalni i opšte primenljivi.

Sagledavanjem mogućnosti ova dva, pojedinačno univerzalno primenljiva sistema, logični sled je bio njihova sprega u jedinstveni sistem za prognozu dometa

razletelih komada i definisanje sigurnih rastojanja. U skladu s tim, sveukupno istraživanje predstavljeno ovim radom, od prikupljanja i obrade podataka, preko definisanja dozvoljenih grešaka i postupaka za utvrđivanje vrednosti pojedinih parametara pa konačno do kreiranja, obuke i validacije adaptivnih sistema imalo je za cilj da dokaže da je moguće ostvariti praktičnu spregu neuronskih mreža i numeričkih modela. Ono što treba naglasiti je postupak verifikacije koji je bio potvrda da prezentovana neuro-numerička spregapouzdana i sa zadovoljavajućom preciznošću može predvideti pojavu razletanja i domet razletelih komada. Treba naglasiti i poseban numerički model, to jest specijalni slučaj balističkih jednačina, koji je razvijen za potrebe određivanja koeficijenta otpora vazduha. Otpor vazduha faktor od velikog uticaja na domet razletelih komada i dosad je predstavljao nepoznanicu i predmet aproksimacija a prikazani numerički model omogućava njegovo precizno izračunavanje.

Konačni rezultat istraživanja u vidu verifikovane neuro-numeričke sprege ne treba posmatrati kao alat samo za definisanje sigurnih rastojanja na koja treba povući ljudstvo i mehanizaciju pri miniranjima. Reversnim pristupom i korišćenjem sprege mogu se definisati parametri miniranja tako da se eventualno razletanje ograniči kako ne bi ugrozilo objekte u blizini. U forenzičkoj istrazi incidenta sa razletanjem komada pri miniranju sprega i reversni pristup takođe mogu pružiti podatke o uslovima koji su vladali u minskoj seriji i pomoći u utvrđivanju uzroka razletanja da bi se predupredili budući incidenti. Pojedinačni moduli sprege, pre svega Klasifikator i Numerik mogu biti korišćeni nezavisno od sprege. Klasifikator može dati početne parametre za procenu rizika od razletanja dok Numerik omogućuje ocenu mogućnosti pojave rikošeta, brzine i energije udara i drugih parametara od značaja. Imajući sve ovo u vidu neuro-numerička sprega se može smatrati univerzalnim alatom za brzo, efikasno, pouzdano i precizno rešavanje najrazličitijih problema vezanih za pojavu razletanja komada pri miniranjima.

Iako rezultati istraživanja i sam rad daju potvrdu mogućnosti primene neuro-numeričke sprege sa tačnošću koja je i veća od zahtevane, još uvek ih treba smatrati konceptom a ne opšte primenljivim modelom. Razlog za to je relativno mali domen podataka koji je korišćen pri obuci adaptivnih sistema. Podaci jesu potekli sa tri različita kopa i iz različitih radnih sredina ali su karakteristike sredina, konstruktivne



karakteristike površinskih kopova, tehnički detalji bušačko-minerskih radova i parametri primenjenih eksploziva dovoljno bliski da se prezentovana sprege može smatrati studijom slučaja, što se u stvari želelo izbeći. Međutim, ovo ne treba smatrati nedostatkom prezentovanog koncepta već otvaranjem mogućnosti za njegovo dalje unapređenje. Prikupljanje podataka sa drugih lokacija, gde vladaju drugačiji uslovi i gde se primenjuju drugačija tehnička rešenja minskih serija i njihova implementacija u postojeće neuronske mreže Klasifikatora i Prediktora povećaće obim i domen podataka pa samim time i preciznost predikcije na drugim lokacijama.

U toku samog istraživanja uvidele su se mogućnosti daljeg unapređenja sistema pre svega u smislu smanjenja greške pri definisanju ulaznih vrednosti. Primena kvalitetnijih ultra-brzih kamera (bržih i veće rezolucije) smanjiće grešku merenja početnih brzina razletelih komada na terenu. Povećanje broja i kvaliteta ulaznih parametara u smislu karakteristika radne sredine omogućiće kvalitetnije mapiranje međusobnih interakcija uticajnih faktora i unaprediti performanse primenjenih neuronskih mreža. Dalje unapređenje koncepta terminalne brzine za određivanje koeficijenta otpora vazduha i načina definisanja mase i površine poprečnog preseka posmatranih komada rezultovaće povećanjem preciznosti numeričkog dela sprege.

Konačno, imesto zaključka, konstatacija da predloženi koncept sprege ima potencijal da, uz pomenuta unapređenja, preraste u opšti model za definisanje sigurnih rastojanja i univerzalni alat za rešavanje problema razletanja komada pri miniranjima.

## LITERATURA:

Adhikari G R. Studies on Flyrock at Limestone Quarries. *Rock Mech. Rock Engng.* 1999; 32 (4), 291 – 301

Amini H, Gholami R, Monjezi M, Torabi S R, Zadhesh J. Evaluation of flyrock phenomenon due to blasting operation by support vector machine, *Neural Comput&Applic* , 2010; DOI 10.1007/s00521-011-0631-5

Bajpayee T S, H C Verakis, T E Lobb. *An Analysis and Prevention of Flyrock Accidents in Surface Blasting Operations.*

URL: <http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/apfasbo.pdf>(26.01.2012)

Banchoff T, Chern S S, Pohl W. *Differential Geometry of Curves and Surfaces.* New York: Springer, 2003

Bauer A, Burchell S L, Crosby W A. *Use of High Speed Photography in Open Pit Blasting.* Mining Resource Engineering Ltd, Kingston, Ontario, Canada, 1982.

Butcher J C. *Numerical Differential Equation Methods.*In: *Numerical methods for ordinary differential equations.* 2<sup>nd</sup> ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008, pp 51-136.

Casio Digital camera EX-FH20 User Guide

URL:<https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/G/01/00/00/03/35/79/22/335792250.pdf>(23.01.2013)

Coriolis effect. URL:

[http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/coriolis\\_effect.html](http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/coriolis_effect.html)(23.01.2013)

Cumin J, Grizelj B, Scitovski R. Numerical solving of ballistic flight equations for big bore air rifle. *Technical gazette* 2009; 16[1]: 41-46.

Čabarkapa S, Kojić N, Radosavljević V, Reljin B, Jedna implementacija SVM u CBIR sistemu, In: *Zbornik radova, 16. Telekomunikacioni forum TELFOR 2008, Beograd, 25. – 27, Novembar, Srbija, 2008.* 613 – 6

Davies, P. Risk-based approach to setting of flyrock ‘danger zones’ for blast sites, Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Mining Technology 1995; 104: A96 – A100.

Dietz D, Iseri H. Calculus and Diferential Geometry: An Introduction to Curvature. Department of Mathematics and Computer Information Science, Mansfield University. URL: <http://faculty.mansfield.edu/hiseri/book-cdg.pdf>(23.01.2013)

Gershenson C. Artificial Neural Networks for Beginners, URL: <http://arxiv.org/ftp/cs/papers/0308/0308031.pdf> (23.01.2013)

Girish K J. Artificial neural networks and its Applications, URL:[http://www.iasri.res.in/ebook/EBADAT/5-Modeling%20and%20Forecasting%20Techniques%20in%20Agriculture/5-ANN\\_GKJHA\\_2007.pdf](http://www.iasri.res.in/ebook/EBADAT/5-Modeling%20and%20Forecasting%20Techniques%20in%20Agriculture/5-ANN_GKJHA_2007.pdf) (23.01.2013)

Guidance note. Safe distances when using explosives.WorkSafe Victoria 2011. URL: [https://www.oricaminingservices.com/uploads/Blasting%20Courses/BlastCourse\\_web.pdf](https://www.oricaminingservices.com/uploads/Blasting%20Courses/BlastCourse_web.pdf) (23.01.2013)

Gurney R W. The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells, and Grenades, BRL-405. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen, Maryland, 1943.

Health and safety at quarries. Quarries regulations 1999, approved code of practice, health and safety commission, HSE Books, Scotland, Part V explosives, 1999.

Kamali M, Ataei M. Prediction of blast induced ground vibrations in Karoun III power plant and dam: a neural network, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 2010; 110: 481 – 90

Kecojevic V, Radomsky M. Flyrock phenomena and area security in blasting-related accidents. Safety Science 2005; 43. 739 – 50

Khandelwal M. Evaluation and prediction of blast-induced ground vibration using support vector machine, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2010; 47: 509 – 16

Kriesel D. A Brief Introduction to Neural Networks

URL: [http://www.dkriesel.com/en/science/neural\\_networks\(23.01.2013\)](http://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks(23.01.2013))

Ladegaard-Pedersen, Persson P A. Flyrock in Blasting II, Experimental Investigation, Swedish Detonic Research Foundation, Report DS 1973: 13, Stockholm, 1973.

Little TN. Flyrock Risk. In: Proceedings EXPLO 2007, Wollongong: AusIMM, 2007. 35 – 43.

Lundborg N. The probability of flyrock - Report DS.1981:5. Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm, 1981.

Madić M, Radovanović M. Optimal Selection of ANN Training and Architectural Parameters Using Taguchi Method: A Case Study, FME Transactions, 2011, 39 (2), 79 – 86.

Mathews J H, Fink K K. Solution of Differential Equations, Runge Kutta Methods. In: Numerical Methods Using Matlab. 4<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 2004. 489 – 96.

Monjezi M, Ahmadi M, Sheikhan M, Bahrami A, Salimi A R. Predicting blast-induced ground vibration using various types of neural networks, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2010a; 30: 1233 – 6

Monjezi M, Amini H K, Varjani A Y. Prediction of flyrock and back break in open pit blasting operation: a neuro-genetic approach. Arab J Geosci.2012; 5: 441–8

Monjezi M, Bahrami A, Varjani A Y, Sayadi A R. Prediction and controlling of flyrock in blasting operation using artificial neural network. Arab J Geosci. 2010b, DOI 10.1007/s12517-009-0091-8

Monjezi M, Ghafurikalajahi M, Bahrami A. Prediction of blast-induced groundvibration using artificial neural networks, Tunnelling and Underground Space Technology 2011; 26: 46–50

Moore A J, Richards A B. Golden pike cut-back flyrock control and calibration of a predictive model, prepared for Kalgoorlie consolidated gold mines, 2005

NASA. Shape effect on drag. URL: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/shaped.html>, (23.01.2013)

Pantovic R, Zikic M, Stojadinovic S. A study on flyrock causes during blasting on Kamenica quarry. Investigation report, Bor: Technical faculty in Bor, 2007 (Original title in Serbian- Studija o uzrocima razletanja kamenih komada pri miniranju na PK Kamenica)

Person P A, Holmberg R, Lee J. Flyrock. In: Rock Blasting and Explosives Engineering. Boca Raton: CRC Press, 1994, 319 – 35.

Pravilnik o tehničkim normativima pri rukovanju eksplozivnim sredstvima i miniranju u rudarstvu. Sl. List SFRJ, 26/88, 1988

Raina A K, Chakraborty A K, More R, Choudhury P B. Design of Factor of Safety based Criterion for Control of Flyrock / Throw and Optimum Fragmentation. IE (I) Journal 2007; MN-87: 13 – 7

Raina A K, Chakraborty A K, Choudhury P B, Siha A. Flyrock danger zone demarcation in opencast mines: a risk based approach. Bull Eng Geol Environ 2011; 70: 163 – 172

Richards A B, Moore A J. Flyrock Control – By Chance or Design in: Proceedings, *30th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, (The International Society of Explosives Engineers: New Orleans, Louisiana, USA),2002

Roth J. A model for determination of flyrock range as a function of shot conditions. Prepared for US Dept. Of Interior, Bureau of Mines, Contract No. JO387242, Los Altos, California, 1979.

Saunderson H S. Equations of motion and ballistic paths of volcanic ejecta. Computers & Geosciences 2008; 34[7]: 802 – 14.

St George J D, Gibson M F L. Estimation of flyrock travel distances: A probabilistic approach, in Proceedings EXPLOR 2001, Melbourne: AusIMM, 2001. 245 – 8.

Stojadinović S, Pantović R, Žikić M. Prediction of flyrock trajectories for forensic applications using ballistic flight equations. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2011; 48 (7): 1086 – 94

Tehnička dokumentacija rudnika: Dopunski rudarski projekat otkopavanja i prerade rude bakra u ležištu "VelikiKrivelj" za kapacitet  $10,6 \times 10^6$  tona vlažne rude godišnje, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor, mart 2011.

Tehnička dokumentacija rudnika: Glavni rudarski projekat otkopavanja i prerade rude iz ležišta "Cerovovo – Cementacija 2" za kapacitet od  $2,5 \times 10^6$  t vlažne rude godišnje, knjiga I, Institut za bakarBor, Bor, Decembar 1996.

Tehnička dokumentacija rudnika: Glavni rudarski projekat otkopavanja tehničkog građevinskog kamena u kamenolomu "Krivelj" kod bora, knjiga i, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor, jul 2011.

US Code of federal regulations.

URL:[http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_id=9755&p\\_table=STANDARDS,\(23.01.2013\)](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_id=9755&p_table=STANDARDS,(23.01.2013)

USGS (2009). 2009 Minerals Yearbook: Copper (advance release in July 2011),

URL:[http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2011-coppe.pdf.\(23.01.2013\)](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2011-coppe.pdf.(23.01.2013)

USGS (2011). Mineral Commodity Summary of Copper,

URL:[http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2011-coppe.pdf.\(23.01.2013\)](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2011-coppe.pdf.(23.01.2013)

Workman J L, Calder P N. Flyrock prediction and control in surface mine blasting. In: Proceedings 20th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Austin: The International Society of Explosives Engineers; 1994. 59 – 74.

---

**Mr SAŠA STOJADINOVIĆ, dipl.inž.rud**

### **Biografija**

Mr Saša Stojadinović je rođen 31. 07. 1976. godine u Aleksincu gde je završio osnovnu školu (1991) i Gimnaziju (1995). Studije rudarstva, smer za ELMS na Tehničkom Fakultetu u Boru upisuje 1995. godine a diplomira septembra 2001. godine uspešnom odbranom diplomskog rada pod naslovom **Izmena tehnologije odlaganja otkrivke u otkopani prostor površinskog kopa Bor**. Studije završava sa prosečnom ocenom 8,63 i ocenom 10 na diplomskom radu.

Novembra 2001. godine biva angažovan na izvođenju dela vežbi na predmetima Tehnologija površinske eksploatacije i Mašine i uređaji u ELMS, a decembra iste godine zasniva stalni radni odnos na Tehničkom fakultetu u Boru i biva izabran u zvanje asistent-pripravnik.

Juna 2006. godine polaže stručni ispit iz oblasti rudarstva (uverenje broj 4647/R)

Jula 2009. godine uspešno brani magistarsku tezu pod naslovom **Seizmički efekti miniranja na površinskim kopovima i zaštita objekata od njihovog dejstva**. Odlukom Izbornog veća Tehničkog fakulteta u Boru novembra 2009. godine biva izabran u zvanje Asistenta.

U toku rada na Fakultetu aktivno učestvuje u naučno istraživačkim projektima Rudarskog odseka i Katedre za površinsku ELMS kao i u izradi i tehničkoj kontroli projekata za potrebe privrede.

Autor je ili koautor većeg broja naučnih radova objavljenih u međunarodnim i nacionalnim časopisima ili saopštenih na nacionalnim i međunarodnim skupovima.

Rešenjem ministra broj 740-05-02228/2010-3 od 07.07.2011. imenovan za sudskog veštaka za oblast rudarstvo i geologija.

Govori engleski jezik i služi se francuskim.

---

---

## LISTA KORIŠĆENIH SIMBOLA I OZNAKA

$v_0$	- početna brzina šrapnela/razletelog komada (m/s)
$\sqrt{2U}$	- Gurney konstanta koja predstavlja karakteristiku primenjenog eksploziva
$m_x$ i $m_m$	- mase (po jedinici dužine ili površine) eksploziva i potisnutog materijala (kg)
$Q$	- masa eksplozivnog punjenja (kg)
$l_b$	- dubina bušotine (m)
$\gamma_s$	- zapreminska masa stene ( $t/m^3$ )
$W$	- linija najmanjeg otpora (m)
$\alpha$	- izbojni ugao ( $^\circ$ )
$E_s$	- seizmička energija po jedinici mase eksploziva
$E_c$	- energija drobljenja jedinice mase stene
$E_r$	- energija apsorbirana pri izbijanju jedinice mase stene
$k1, k2, k3$	- koeficijenti proporcionalnosti.
$\theta_0$	- početni ugao izletanja ( $^\circ$ )
$g$	- gravitaciono ubrzanje ( $m/s^2$ )
$L_{Rmax}$	- maksimalni domet razletelih komada (m)
$R$	- rastojanje (m)
$R_r$	- redukovano rastojanje ( $m/kg^{1/3}$ )
$d_e$	- prečnik eksplozivnog punjenja (m)
$d_b$	- prečnik bušotine (m)
$d$	- prečnik letećeg komada (m)
$q$	- specifična potrošnja eksploziva ( $kg/m^3$ )
$m_p$	- masa eksploziva po $m^3$ eksplozivnog punjenja ( $kg/m^3$ )
$W_r$	- redukovana linija najmanjeg otpora ( $m/kg^{1/2}$ )
$k_L$	- koeficijent koji zavisi od lokacije
$\beta$	- ugao nagiba bušotine ( $^\circ$ )
$l_{\check{c}}$	- dužina čepa (m)
$k_p$	- koeficijent proporcionalnosti
$\rho_E$	- gustina eksploziva ( $kg/dm^3$ )
$\Delta T$	- trajanje inicijalnog impulsa
$I$	- frekvencija pogodaka mete (udar/god);
$N$	- ukupan broj miniranja godišnje;
$\Phi$	- frekvencija pojavljivanja razletanja komada van ekskluzione zone;
$p_d$	- verovatnoća da razleteli komad dosegne udaljenost mete;
$p_p$	- verovatnoća da se razleteli komad nađe na putanji udara;
$p_e$	- verovatnoća izloženosti mete.
$P_f$	- verovatnoća povrede ljudstva sa smrtnim ishodom
$p_c$	- verovatnoća razletanja iz kratera
$p_d$	- verovatnoća da razleteli komad dosegne zonu mete;
$p_t$	- verovatnoća da razleteli komad uleti u sektor mete
$p_r$	- verovatnoća da razleteli komad pogodi zonu mete unutar sektora

---



---

$p_e$	- verovatnoća da ljudstvo bude izloženo
$p_v$	- verovatnoća povrede
$F_G$	- gravitaciona sila (N)
$F_D$	- sila otpora vazduha (N)
$F_L$	- sila potiska (N)
$a$	- ubrzanje sistema ( $m/s^2$ )
$m$	- masa komada odminirane mase (kg)
$g$	- gravitaciono ubrzanje ( $m/s^2$ )
$\rho_A$	- gustina vazduha ( $kg/m^3$ )
$A_P$	- površina poprečnog preseka letećeg komada ( $m^2$ )
$C_D$	- koeficijent otpora vazduha
$v$	- brzina letećeg komada (m/s)
$C_L$	- koeficijent potiska
$v_f$	- brzina slobodnog toka (m/s)
$\ddot{x}$	- horizontalna komponenta ubrzanja sistema ( $m/s^2$ )
$\ddot{y}$	- vertikalna komponenta ubrzanja sistema ( $m/s^2$ )
$\theta$	- ugao između vektora brzine i horizontalne ose ( $^\circ$ )
$t$	- vreme (s)
$\Delta t$	- vremenski korak (s)
$a_\tau$	- tangencijalno ubrzanje ( $m/s^2$ )
$a_n$	- normalno ubrzanje ( $m/s^2$ )
$s$	- putanja
$R_c$	- radijus krivine (m)
$\kappa$	- krivina
$v$	- brzina (m/s)
$h$	- vremenski korak (s)
$\Theta_j$	- prag aktivacije
$net_j$	- ukupni mrežni ulaz neurona
$\varepsilon_j$	- aktivaciono stanje neurona
$w_{ij}$	- težinska sinapsa
$o_j$	- izlazni signal neurona
$\delta$	- širina intervala poverenja
$A$	- rastojanje između bušotina (m)
$\tau$	- interval usporenja (ms)
$N_{sp}$	- broj slobodnih površina
$X_i$	- tip eksploziva
$D$	- detonaciona brzina (m/s)
$V_g$	- gasna zapremina eksploziva ( $dm^3/kg$ )
$\sigma_p$	- čvrstoća na pritisak ( $daN/cm^2$ )
$\sigma_i$	- čvrstoća na istezanje ( $daN/cm^2$ )
$Q_X$	- toplota eksplozije (kJ/kg)
$f$	- pseudo-žižna daljina (m)

---

---

$L$	- rastojanja od objektiva (m)
$\Delta s$	- pređeni put (m)
$C_R$	- faktor razmere
$v_T$	- terminalna brzina (m/s)
$V_{MB}$	- zapremina materijala po bušotini (m <sup>3</sup> )
$f_{\check{c}}$	- faktor čepa (m/m)
$S_S$	- specifična dužina čepa (m/kg)
$L_S$	- sigurno rastojanje (m)
$F_S$	- faktor sigurnosti
$L_X$	- domet komada pri početnoj brzini uvećanoj za 10 % (m)
$\Delta L$	- razlika u dometima pti povećanju početne brzine za 10 % (m)

---