

# Procjena veličina i oblika blokova u stijenskoj masi pojednostavljenim metodama

---

Papić, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:322294>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

PROCJENA VELIČINA I OBLIKA BLOKOVA U STIJENSKOJ MASI  
POJEDNOSTAVLJENIM METODAMA

Diplomski rad

Mateo Papić

R 121

Zagreb, 2017.

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

PROCJENA VELIČINA I OBLIKA BLOKOVA U STIJENSKOJ MASI  
POJEDNOSTAVLJENIM METODAMA

Mateo Papić

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Distribucija veličina i oblik blokova važna je karakteristika stijenske mase kojom se na temelju geometrijskih značajki diskontinuiteta opisuju očekivane veličine i oblici blokova, što je važno prilikom izvođenja bilo kojeg inženjerskog zahvata u stijenskim masama. Procjena distribucije veličina i oblika blokova u ovom radu napravljena je pomoću pojednostavljenih metoda uzimajući u obzir skupove diskontinuiteta koji su utvrđeni na kamenolomu "Ivanec" nedaleko Zagreba.

Ključne riječi: stijenska masa, distribucija oblika blokova in situ, distribucija veličina blokova in situ

Diplomski rad sadrži: 58 stranica, 15 slika, 20 tablica, 6 priloga te 29 referenci;

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Petar Hrženjak, izvanredni profesor, RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Petar Hrženjak, izvanredni profesor, RGNF  
Dr. sc. Zlatko Briševac, docent, RGNF  
Dr. sc. Anja Vrbaški, docent, RGNF

Datum obrane: 23.02. 2017.

ASSESSMENT OF BLOCK SIZE AND SHAPE IN ROCK MASS BY SIMPLIFIED  
METHODS

Mateo Papić

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Distribution of sizes and shapes of blocks is an important characteristic of the rock mass which, based on the geometric features of discontinuities, describe the expected sizes and shapes of blocks, which is important during the construction of any engineering structures in the rocks. Assessment of the block sizes and shapes in these thesis is made by simplified methods which is based on measured discontinuities in a „Ivanec“ quarry near Zagreb.

Key words: rock mass, *in situ* block shape distribution, *in situ* block size distribution

Thesis contains: 58 pages, 15 figures, 20 tables, 6 attachments, 29 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Petar Hrženjak, Associate Professor

Reviewers: PhD Petar Hrženjak, Associate Professor  
PhD Zlatko Briševac, Assistant Professor  
PhD Anja Vrbaški, Assistant Professor

Date of defense: February 23, 2017.

## *Zahvala*

*Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Petru Hrženjaku na predloženoj temi i stručnoj pomoći kroz proces izrade ovog završnog rada.*

*Moja najveća potpora su bili i ostali moji mama Beti, tata Ante, brat Dorian te grupa mojih prijatelja iz Rijeke „Prljavi Sančo“ (Ana, Lea, Vuke, Lovro, Luka).*

*Također se zahvaljujem široj obitelji (nono Slavko, baka Anka, ujak Dražen, ujna Zvezdana), mojim prijateljima Šeco, Soldo, Grizelj, Irena, Leo, Ana Marija, Iva i Ivona na podršci i razumijevanju kroz ovih uspješnih pet godina studiranja.*

*Zahvaljujem se tvrtki Studio Ars na pomoći pri izradi posljednjeg koraka proračuna.*

## Sadržaj:

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS FORMULA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS PRILOGA.....	VII
1. UVOD .....	1
2. BLOKOVITE ZNAČAJKE DISKONTINUIRANIH STIJENSKIH MASA .....	3
2.1. Osnovni pojmovi i definicije u mehanici stijena.....	3
2.2. Strukture i njihovi elementi.....	3
2.3. Diskontinuiteti.....	4
2.4. Kvantitativni opis diskontinuiteta u stijenskim masama .....	7
2.4.1. Orijentacija diskontinuiteta .....	8
2.4.2. Razmak diskontinuiteta .....	12
2.4.3. Postojanost diskontinuiteta.....	14
2.4.4. Veličina bloka .....	16
3. RAZVOJ METODA ZA PROCJENU DISTRIBUCIJE VELIČINE I OBLIKA BLOKOVA ...	17
3.1. Pregled dosadašnjeg razvoja metoda za procjenu distribucije veličina i oblika blokova <i>in situ</i> .....	17
3.2. Teorija blokova .....	21
3.2.1. Pretpostavke teorije blokova .....	22
3.2.2. Vektorska analiza u teoriji blokova.....	22
3.3. Procjena prosječnog volumena bloka prema Palmstromu .....	26
3.4. Ostale metode za procjenu distribucija veličina i oblika blokova stijenske mase.....	28
3.5. Razvoj nove metode proračuna za formiranje stijenskog bloka.....	29
3.5.1. Proračun ravnine određene kutevima orijentacije diskontinuiteta $\alpha$ i $\beta$ .....	29
3.5.2. Dobivanje točaka bloka jednadžbom sjecišta triju različitih ravnina .....	30
3.5.3. Eliminacija točaka koje ne pripadaju bloku .....	30
3.5.4. Proračun volumena bloka.....	30
4. PROCJENA VELIČINA I OBLIKA BLOKOVA NA KAMENOLOMU „IVANEC“ .....	32
4.1. Opće, geološke i geotehničke karakteristike kamenoloma „Ivanec“ .....	32
4.2. Proračun ravnine određene kutevima orijentacije diskontinuiteta $\alpha$ i $\beta$ .....	34
4.3. Proračun volumena bloka.....	37

4.3.1. Unos koordinata točaka i konačan izgled bloka .....	37
4.3.2. Proračun volumena bloka računanim programom AutoCAD .....	40
4.4. Analiza i usporedba dobivenih rezultata .....	43
5. ZAKLJUČAK .....	47
6. LITERATURA.....	49
PRILOZI .....	52
Prilog 1. Popis koordinata pripadajućih točaka za blok „d“ .....	53
Prilog 2. Izgled bloka „d“ u računalom programu AutoCAD .....	54
Prilog 3. Popis koordinata pripadajućih točaka za blok „d+σ“ .....	55
Prilog 4. Izgled bloka „d+σ“ u računalom programu AutoCAD.....	56
Prilog 5. Popis koordinata pripadajućih točaka za blok „d-σ“ .....	57
Prilog 6. Izgled bloka „d-σ“ u računalom programu AutoCAD .....	58

## POPIS SLIKA

Popis slika	Opis slike	Stranica
2-1	Diskontinuiteti osnovnog tektonskog sklopa i promjena karaktera diskontinuiteta uslijed promjene regionalnog naprezanja	5
2-2	Načini prikazivanja diskontinuiteta	9
2-3	Trodimenzionalan prikaz projekcije elemenata diskontinuiteta	10
2-4	Razmak diskontinuiteta	12
2-5	Postojanost diskontinuiteta	15
4-1	Fotografija južne strane kamenoloma „Ivanec“	32
4-2	Fotografija sjeverne strane kamenoloma „Ivanec“	33
4-3	Postavljanje sloja (layera)	37
4-4	Unos koordinata točaka	37
4-5	Izgled bloka „d“ u programu AutoCAD	38
4-6	Izgled bloka „d+σ“ u programu AutoCAD	39
4-7	Izgled bloka „d-σ“ u programu AutoCAD	40
4-8	Proračun volumena bloka „d“: slika bloka „d“ s rezultatima volumena	41
4-9	Proračun volumena bloka „d+σ“: slika bloka „d+σ“ s rezultatima volumena	42
4-10	Proračun volumena bloka „d-σ“: slika bloka „d-σ“ s rezultatima volumena	43



## POPIS TABLICA

Popis tablica	Naslov	Stranica
2-1	Razmak diskontinuiteta	13
2-2	Postojanost diskontinuiteta	15
2-3	Veličina bloka i karakteristike	16
2-4	Volumni broj pukotina	16
3-1	Indeks omjera volumena bloka i volumena kugle	20
3-2	Prosječni volumen bloka	26
3-3	Vrijednosti faktora oblika bloka $\beta$ za različite oblike blokova	27
3-4	Stupanj razlomljenosti stijenske mase	27
4-1	Geometrijski parametri kamenoloma „Ivanec“	34
4-2	Podaci potrebni za proračun diplomskog rada	34
4-3	Ulazni podaci za proračun bloka „d“	35
4-4	Ulazni podaci potrebni za proračun bloka „d+ $\sigma$ “	35
4-5	Ulazni podaci potrebni za proračun bloka „d- $\sigma$ “	35
4-6	Ulazni podaci i rezultati vrijednosti jediničnih vektora pada ravnina aplikacijom BlockEx	36
4-7	Ulazni podaci i rezultati vrijednosti jediničnih vektora normala ravnina aplikacijom BlockEx	36
4-8	Ulazni podaci i rezultati vrijednosti jediničnih vektora normala komplementarnih ravnina aplikacijom BlockEx	36
4-9	Popis pripadajućih koordinata bloka „d“	38
4-10	Popis pripadajućih koordinata bloka „d+ $\sigma$ “	39
4-11	Popis pripadajućih koordinata bloka „d- $\sigma$ “	40
4-12	Rezultati usporedbe pojednostavljene metode i metode po Palmstromu	45

## POPIS FORMULA

Popis formula	Opis izraza	Stranica
2-1	Prava vrijednost razmaka	12
2-2	Srednja vrijednost izmjerenih razmaka	13
2-3	Stvarni razmak diskontinuiteta	14
2-4	Srednja vrijednost razmaka diskontinuiteta	14
3-1	Vektorska jednadžba pravca	23
3-2	Parametarski oblik jednadžbe vektora	23
3-3	Kanonski oblik jednadžbe vektora	23
3-4	Vektorski oblika jednadžbe ravnine	23
3-5	Skalarni oblik jednadžbe ravnine	23
3-6	Kanonski oblik jednadžbe ravnine kojoj je zadan vektor normale i jedna točka	23
3-7	Kut između dva vektora	24
3-8	Jednadžba pripadnosti točke donjem poluprostoru	24
3-9	Jednadžba ako ravnina sadrži ishodište – donji poluprostor	24
3-10	Jednadžba ravnine ako pripada gornjem poluprostoru	25
3-11	Jednadžba ako ravnina sadrži ishodište – gornji poluprostor	25
3-12	Određivanje koordinate bilo kojeg vrha sustavom od tri linearne jednadžbe s tri nepoznanice	25
3-13	Matrični zapis sustava s tri nepoznanice	25
3-14	Vektorski produkt za proračun bridova bloka	25
3-15	Izraz za izračun površine trokuta u koordinatnom obliku	26
3-16	Izračun volumena tetraedra u koordinatnom obliku	26
3-17	Faktor oblika	26
3-18	Volumetrijski broj pukotina	27
3-19	Prosječna veličina bloka	27
3-20	Koeficijenti normale ravnine	30
3-21	Svojstva determinante	30

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
$S_2$	m	Prava vrijednost razmaka
d	m	Razmak diskontinuiteta
$\alpha$	°	Orijentacija diskontinuiteta
$f_{sa}$	m	Srednja vrijednost izmjereneih razmaka
L	-	Duljina mjerne trake
N	-	Broj pukotina
$\theta$	°	Kut distorzije
$f_s$	m	Stvarni razmak diskontinuiteta
$S_1$	m	Srednja vrijednost razmaka diskontinuiteta u skupu
$d_1$	m	Razmak na mjernoj traci između susjednih ploha diskontinuiteta
$\alpha_1$	°	Kut između mjerne trake i pružanja diskontinuiteta u ravnini mjerne trake
$I_b$	-	Indeks veličine bloka
$J_v$	puk/m <sup>3</sup>	Volumni broj pukotina
$I_f$	-	Indeks razmaka pukotina
$\lambda$	-	Indeks oblika bloka za opis oblika fragmenata rude
$\beta$	-	Faktor oblika
O	-	Ishodište koordinatnog sustava
T	-	Točka u Kartezijevom koordinatnom sustavu
p	-	Pravac u Kartezijevom koordinatnom sustava
$\Sigma$	-	Ravnina u Kartezijevom koordinatnom sustavu
$\varepsilon$	-	Prostor u Kartezijevom koordinatnom sustavu
c	-	Vektor smjera
r	-	Radij vektor neke točke pravca
$r_1$	-	Radij vektor točke T <sub>1</sub>
D	-	Ortogonalna udaljenost ravnine od ishodišta, koeficijent
n	-	Vektor normale
A,B,C	-	Skalarne komponente vektora normale
$\delta$	°	Kut između dva vektora
U	-	Gornja poluravnina
L	-	Donja poluravnina
$I_{ij}$	-	Presječnica i-te i j-te ravnine
$n_i$	-	Jedinična normala i-te ravnine
$n_j$	-	Jedinična normala j-te ravnine
V	m <sup>3</sup>	Volumen
$V_b$	m <sup>3</sup>	Prosječni volumen bloka
$a_1$	m	Najkraća dimenzija bloka
$a_3$	m	Najduža dimenzija bloka
$S_n$	m	Prosječni razmaci svakog utvrđenog diskontinuiteta
a,b	-	Parovi vektora za izračun $\beta$ faktora oblika
$\alpha,\beta$	°	Kutevi orijentacije diskontinuiteta

## POPIS PRILOGA

Br. priloga	Naslov priloga	Stranica
1.	Popis koordinata pripadajućih točaka za blok „d“	53
2.	Izgled bloka „d“ u računalnom programu AutoCAD	54
3.	Popis koordinata pripadajućih točaka za blok „d+σ“	55
4.	Izgled bloka „d+σ“ u računalnom programu AutoCAD	56
5.	Popis koordinata pripadajućih točaka za blok „d-σ“	57
6.	Izgled bloka „d-σ“ u računalnom programu AutoCAD	58

## 1. UVOD

Svaki inženjerski projekt sa zahvatom u stijenama predstavlja poseban izazov za projektanta. Razlog leži u građi stijenske mase. Stijenska masa je kompleksna cjelina koju čine blokovi i prirodni prekidi kao što su diskontinuiteti, pukotine i rasjedi. Ne možemo utjecati na značajke stijenske mase, možemo im se optimalno prilagoditi. Neposredno prije procesa projektiranja nužno je temeljito upoznavanje svih relevantnih značajki stijenske mase, ovim upoznavanjem stvaramo kvalitetnu osnovu za daljnji rad. U području mehanike stijena ponekad može biti vrlo teško prikupiti točno određene informacije o nekoj stijeni što proizlazi iz prirodnih uvjeta ili financijske mogućnosti istraživanja.

Približan prikaz realne stijenske mase matematičkim modelom otvorio nam je mogućnost brojnih proračuna. Zahvaljujući tome, u ovom radu stijenska masa se promatra kao diskontinuum, odnosno kao trodimenzionalno tijelo ispresijecano plohama diskontinuiteta. Sustav blokova formiran je prekidom kontinuuma uzrokovanog djelovanjem diskontinuiteta. Diskontinuitetima zovemo sve moguće vrste prekida u stijenskoj masi. U ovom radu temeljito razmatramo tri geometrijske značajke diskontinuiteta: orijentaciju, razmak i postojanost. Spomenute značajke u najvećoj mjeri određuju geometriju skupova diskontinuiteta koji u konačnici formiraju traženi sustav blokova. Geometrija sustava blokova izražava se kroz distribuciju veličina i oblika blokova sadržanih u volumenu kojeg promatramo. Veličina blokova ovisi o razmaku diskontinuiteta u skupovima, oblik ovisi o orijentaciji, dok postojanost određuje da li će blokovi biti formirani u potpunosti ili djelomično, gledajući kroz volumen promatranja.

Zadatak diplomskog rada je bio prikazati osnovni princip i primjenu, nove pojednostavljene metode proračuna kojom se može izračunati volumen bloka u stijenskoj masi. Da bi se došlo do vrijednosti volumena određenog bloka potrebno je izračunati mnoge veličine primjenjujući različite matematičke metode proračuna. Tako je na primjer potrebno primijeniti od jednostavnijih metoda, kao što je izračun vektora normala i koordinata sjecišta ravnina, pa do vrlo složenih metoda za eliminaciju vanjskih točaka koje ne pripadaju određenom bloku. Za izračun ovih vrijednosti korišten je program Microsoft Excel, dok za konačni prikaz te obračun samog volumena aplikacija Civil3D programa AutoCAD.

Rad se sastoji od nekoliko poglavlja. U drugom poglavlju dan je prikaz osnovnih pojmova i definicija u mehanici stijena vezanim za blokovite značajke diskontinuiranih stijenskih masa. Treće poglavlje se sastoji od opisa i razvoja metoda za procjenu distribucije veličine i oblika blokova. Četvrto poglavlje predstavlja praktični dio diplomskog rada. Koje se sastoji od kratkog opisa nove metode te samog proračuna prosječnog volumena blokova na obrađivanom primjeru stijenske mase.

## **2. BLOKOVITE ZNAČAJKE DISKONTINUIRANIH STIJENSKIH MASA**

### **2.1. Osnovni pojmovi i definicije u mehanici stijena**

U mehanici stijena uvedene su definicije osnovnih pojmova za intaktan materijal, monolit, diskontinuitet i stijensku masu. Prema općim definicijama mineralogije i petrologije, pod stijenom se smatra nakupina jednog ili više minerala. Za razliku, kamen predstavlja odlomljeni dio stijene. Prema definicijama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (International Society for Rock Mechanics, ISRM) monolit je dio stijene koji je sa svih strana omeđen plohama diskontinuiteta. Diskontinuitet je općeniti izraz kojim se obuhvaćaju svi prekidi, lomovi u stijenskoj masi na kojima je došlo do potpunog prekida međumolekularnih sila. Intaktan materijal predstavlja zapravo uzorak materijala koji je izvađen iz monolita u veličini laboratorijskih uzoraka. Pod pojmom stijenska masa zajednički se obuhvaćaju značajke intaktnog materijala, monolita te diskontinuiteta koji su sadržani u masi na određenom prostoru. Monolit kao i intaktni materijal može u sebi sadržavati određene defekte poput mikropukotina ili strukturnih obilježja, ali ne i ploha diskontinuiteta. Pod strukturnim obilježjem intaktnog materijala podrazumijevaju se sitna obilježja stijena, koja su posljedica promijenjenog sastava ili teksture gledano u malom mjerilu.

### **2.2. Strukture i njihovi elementi**

Pod strukturom stijene podrazumijevaju se makro obilježja stijenskih masa koja su u većini slučajeva vidljiva na izdanku, a rjeđe na uzorku i preparatu (Mihalić 2000). Postoje tri grupe osnovnih struktura: geološki kontakti, primarne strukture i sekundarne strukture (Davis i Reynolds 1996). Geološki kontakti su granice, plohe dodira između stijena različitog tipa. Oni mogu biti: normalni taložni kontakti, diskordantni kontakti, intruzivni kontakti, rasjedi i zone smicanja. Primarne strukture predstavljaju strukture koje nastaju u stijeni tijekom njezina nastanka.

Tipični primjeri primarnih struktura su strukture koje nastaju kod sedimentnih stijena prilikom njezina taloženja ili deformacijskim procesima prije litifikacije, a kod magmatskih stijena, strukture koje nastaju prilikom tečenja magme te kasnije u fazi zgušnjavanja magme.

Sekundarne strukture čine strukture koje nastaju kod sedimentinih i magmatskih stijena u procesima nakon njihove litifikacije, a kod metamorfnih stijena za vrijeme i poslije njihova nastanka. Dakle, sekundarne strukture vezane su uz postgenetske procese koji se uglavnom odnose na tektonske procese ili metamorfoze. Posljedica tektonskih procesa je nastajanje niza različitih prslina, pukotina, rasjeda, bora i sl. dok se posljedica metamorfoze najčešće očituje kao posljedica prekrystalizacije koja uzrokuje stvaranje strukture folijacije, a najčešće je to škriljavost. Prsline predstavljaju manje pukotine. Ako su prsline nastale kao posljedica velikih tektonskih poremećaja, čime nastaje sustav bliskih i gustih paralelnih pukotina, npr. u sedimentnim stijenama, tada ih zovemo klivažem. Pukotine predstavljaju lomove, prekide geološkog kontinuiteta, duž čijih ploha nije vidljiv pomak ili se može zanemariti. Pukotine mogu biti zatvorene, otvorene ili ispunjene. Prema tipu naprezanja koje je prouzročilo slom, pukotine mogu biti tlačne, vlačne i pukotine smicanja. Tlačne pukotine su pukotine koje nastaju okomito na pravac djelovanja kompresije, na čijim stijenama dolazi do otapanja pod pritiskom i općenito smanjenjem volumena stijenskog materijala čime nastaju stilolitske pukotine ili ako pukotine nastaju nakon djelovanja kompresije tada ih zovemo relaksacijskim pukotinama. Vlačne pukotine nastaju okomito na smjer najmanjeg glavnog naprezanja kod kojih je značajno okomito kretanje. Ove su pukotine najčešće otvorene ili ispunjene mineralnom tvari. Pukotine smicanja nastaju simetrično u odnosu na pravac glavnih naprezanja, javljaju se kao konjugirani parovi pukotina, na čijim stijenama se očituju tragovi paralelnih kretanja. Rasjed je lom ili zona loma duž koje je vidljiv pomak koji se dogodio.

### **2.3. Diskontinuiteti**

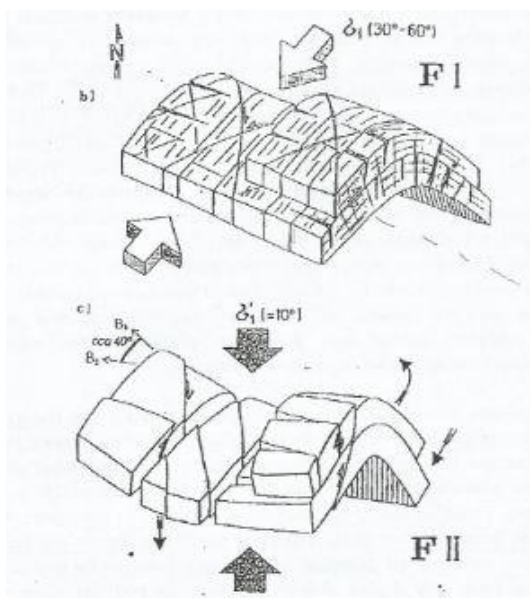
Diskontinuitet je najbolji općeniti izraz kojim se obuhvaćaju svi prekidi, lomovi u stijenskoj masi na kojima je došlo do potpunog prekida međumolekularnih sila (ISRM 1978).

Diskontinuitetima se dakle smatraju sve pukotine, slojevitost, geološki kontakti, rasjedi, zone smicanja, folijacije i sl. Diskontinuiteti koji su međusobno paralelni, istog vremena nastanka, kinematike i porijekla čine skup ili familiju diskontinuiteta.

Sve familije koje se međusobno presijecaju na promatranom području čine pukotinski sustav, pukotinski sklop ili tektonski sklop.



Orijentacija diskontinuiteta u prostoru nije slučajna nego ovisi o orijentaciji elipsoida deformacije određene tektonske faze odnosno tektonskih osi. Čitav makrotektonski sklop kod toga mora odgovarati regionalno tektonskoj slici i regionalnim morfotektonskim karakteristikama širih područja, slika (2-1).



Slika 2-1. Diskontinuiteti osnovnog tektonskog sklopa i promjena karaktera diskontinuiteta uslijed promjene regionalnog naprezanja (Mihalić 2002).

U jednoj tektonskoj fazi mogu se teoretski stvoriti sljedeće familije diskontinuiteta:

- Međuslojni klivaž, odnosno diskontinuiteti koji su paralelni slojevitosti,
- Diskontinuiteti paralelni klivažu aksijalne ravnine borane strukture,
- Pukotine okomite na lokalnu ili regionalnu strukturnu os "b",
- Reversni ili gravitacijski rasjedi,
- Smični (transkurentni) rasjedi,
- "peraste" tenzijske pukotine uz rasjede,
- Tenzijske pukotine okomite na smjer maksimalne tenzije i
- Relaksacijske pukotine okomite na smjer maksimalne kompresije.

Međuslojni i intraslojni klizni diskontinuiteti nastaju tijekom boranja, kada između pojedinih slojeva ili unutar pojedinih slojeva dolazi do diferencijalnog međuslojnog kretanja.

Slojevitost i međuslojni diskontinuiteti su osnovni za definiranje svih ostalih elemenata tektonskog sklopa.

Obično im je hrapavost definirana postojanjem određenih sedimentoloških tekstura ("ripple marks", tragovi tečenja, utiskivanja, vučenja i dr.) (Mihalić 2002).

U krilima bora s normalnom sukcesijom slojeva po starosti, međuslojni diskontinuiteti imaju odlike reversnog kliznog klivaža, čijim nastajanjem se mogu uništiti elementi primarne sedimentne hrapavosti na površinama slojeva tako da diskontinuiteti koji im odgovaraju postaju zaglađeni.

Diskontinuiteti paralelni klivažu aksijalne ravnine borane strukture nastaju za vrijeme maksimalnih deformacija, a njihova presječnica sa slojevitosti određuje smjer lokalne ili regionalne strukturne osi "b" plikativne strukture. Diskontinuiteti paralelni klivažu aksijalne ravnine su klizni i reversni, obično ravni i glatki. Ukoliko u mlađim tektonskim fazama mijenjaju karakteristike zbog promjena smjera regionalnog stresa, mijenja im se i morfologija.

Duljina diskontinuiteta ovog sistema je vrlo varijabilna, ali najčešće sijeku cijele pakete naslaga, a u pojedinim slučajevima mogu biti i dominantni diskontinuiteti u stijenskim masama. Općenito, pojave znatno veće izraženosti diskontinuiteta paralelnih aksijalnoj ravnini u odnosu na slojevitost, poznata je kod masivnih stijena.

Diskontinuiteti okomiti na lokalnu strukturnu os "b" su tenzijski, po morfologiji najčešće hrapavi, duljina im je ograničena na jedan do nekoliko slojeva, a njihov međusobni razmak je obično jednak ili nešto veći od razmaka između diskontinuiteta paralelnih aksijalnoj ravnini.

Kod promjene regionalnog stresa vrlo često prelaze u smične (transkurentne) rasjede kada im se bitno mijenja i geotehnički značaj i morfologija, slika 2-1.

Slojevitost, diskontinuiteti paralelni klivažu aksijalne ravnine i pukotine okomite na regionalnu (ili lokalnu) strukturnu os "b" čine diskontinuitete osnovnog tektonskog sklopa stijenske mase.

Reversni rasjedi i smični (transkurentni) rasjedi sa subhorzontalnim kretanjima tektonskih blokova nastaju u fazi sloma regionalne borane strukture ili kada osi regionalnog naprezanja u nekoj od mlađih tektonskih faza mijenjaju položaj i orijentaciju, slika 2-1.

Kod toga treba napomenuti da smični rasjedi često imaju znatno manju učestalost, ali često veće geotehničko značenje od diskontinuiteta osnovnog tektonskog sklopa, perzistencija im je veća, a ispunu često čini zdrobljeni stijenski materijal pomiješan s glinom (tektonske zone).

U svim tektonskim fazama, ne moraju se stvoriti svi nabrojani diskontinuiteti. Česta je pojava, da se diskontinuiteti nastali u starijim fazama, u mladim reaktiviraju s promjenom njihovog karaktera, kao posljedice promjene smjera regionalnog stresa, ili dolazi do rotacije pojedinih tektonskih elemenata ili tektonskog sklopa u cjelini, naročito uz veće transkurentne rasjede. Promjena smjera regionalnog ili lokalnog naprezanja moguće je pratiti detaljnim strukturno – geološkim snimanjima. Ono što je za postojeći tektonski sklop bitno, to je da su geneza i morfološka obilježja diskontinuiteta međusobno povezani te da se diskontinuiteti u njemu raspoređuju pravilno, sukladno regionalnom (ili lokalnom) naprezanju koje je u prostoru bio aktivno ili je još uvijek aktivno. Karakteristike tektonskog sklopa i njegova analiza moraju biti usklađeni s preporukama ISRM-a vezanim za kvantitativni opis diskontinuiteta.

#### **2.4. Kvantitativni opis diskontinuiteta u stijenskim masama**

Prema danim preporukama za kvantitativni opis diskontinuiteta u stijenskim masama (ISRM 1978) potrebno je dati opis sljedećih veličina:

- Orijentacija: prostorni položaj diskontinuiteta koji se definira azimutom horizontalne projekcije vektora pada i kutom pada.
- Razmak: okomita udaljenost između susjednih ploha diskontinuiteta koji pripadaju istom skupu diskontinuiteta.
- Postojanost: duljina prostiranja diskontinuiteta kao ravnine.
- Hrapavost stijenki: sve neravnine u odnosu na srednju ravninu diskontinuiteta.
- Čvrstoća stijenki: tlačna čvrstoća površinskog materijala na stijenki diskontinuiteta.
- Zijev: okomiti razmak između stijenki diskontinuiteta pri čemu međuprostor može biti ispunjen zrakom, vodom ili ispunom.
- Ispuna: materijal koji se nalazi između susjednih stijenki diskontinuiteta.
- Procjeđivanje: pojavljuje se kao rezultat tečenja po diskontinuitetima
- Broj familija: broj skupova diskontinuiteta istih ili sličnih morfoloških značajki.

- Veličina blokova: određena brojem skupova, razmakom diskontinuiteta i postojanošću diskontinuiteta.

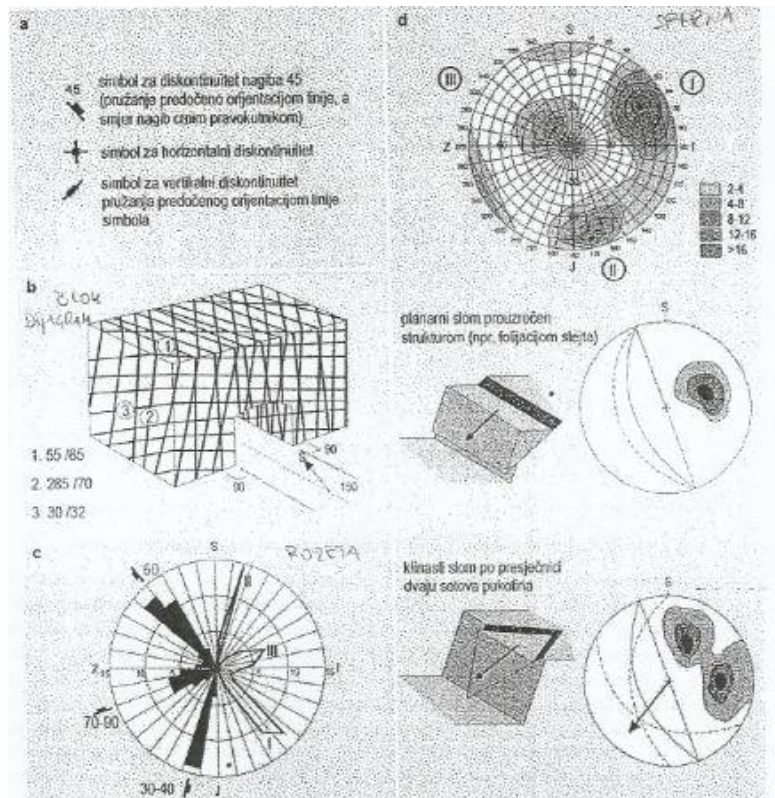
Hrapavost, čvrstoća stijenci, zijev i ispuna uglavnom definiraju posmičnu čvrstoću diskontinuiteta dok ostale veličine predstavljaju u biti geometrijske značajke. Ovim radom se detaljnije obrađuju samo geometrijske značajke kao što su orijentacija, razmak i postojanost diskontinuiteta.

#### **2.4.1. Orijehtacija diskontinuiteta**

Orijehtacija predstavlja prostorni položaj diskontinuiteta koji se definiira azimutom horizontalne projekcije vektora pada, mjenim u smjeru kazaljke na satu od stvarnog sjevera  $\alpha$  i kutom pada  $\beta$ , tj. maksimalnim padom srednje ravnine diskontinuiteta mjereno od horizontalne ravnine. Orijehtacija se mjeri geološkim kompasom.

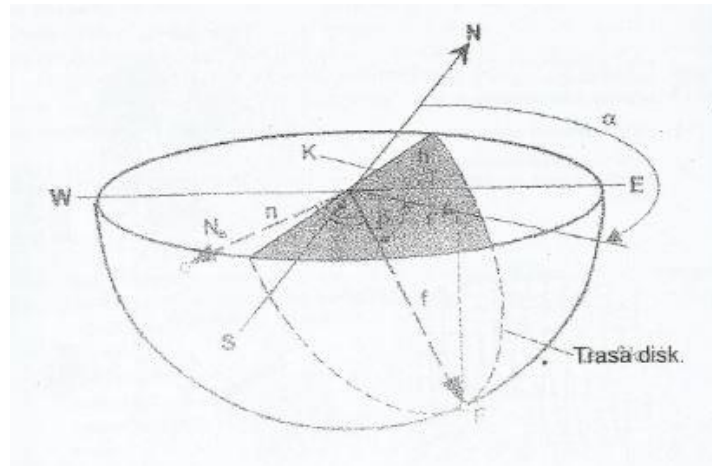
Osim mjerenja pomoću geološkog kompasa postoji mogućnost snimanja fototeodolitom i obrade na temelju snimljenog stereopara pomoću stereoskopa.

Podaci o orijentaciji diskontinuiteta mogu biti prikazani pomoću stereografske projekcije, rozeta pukotina ili trodimenzionalno preko blok dijagrama (slika 2-2). Kako je trodimenzionalni prikaz položaja diskontinuiteta neprikladan, pogotovo kada je potrebno obraditi veliki broj mjerenih podataka, koristi se dvodimenzionalni prikaz pomoću stereografske projekcije. Zbog toga se stereografska projekcija najviše razvila, tako da postoji nekoliko načina u prikazivanju i obradi strukturnih podataka.



Slika 2-2. Načini prikazivanja diskontinuiteta: b) blok dijagram, c) rozete pukotina, d) sferna projekcija (Mihalić 2002).

Osnovu sferne projekcije čini projekcija ravnine i njezinih elemenata s kuglom, odnosno polukuglom. Pravac pružanja diskontinuiteta je presječna ravnine diskontinuiteta s horizontalnom ravninom. Presječna ravnine diskontinuiteta s polukuglom određuje tzv. „veliki krug“ koji se u inženjerskoj geologiji i mehanici stijena zove trasom diskontinuiteta. Presjecište okomice povučene iz središta polukugle na ravninu diskontinuiteta s plaštem polukugle, određuje „pol normale“ diskontinuiteta. Na slici su prikazani i drugi vektori i presjecišta s donjom polukuglom, koji se također koriste u obradi podataka mjerenih diskontinuiteta. U inženjerskoj geologiji, geotehnici i rudarstvu, prema međunarodnim preporukama, koristi se projekcija na donju polukuglu (slika 2-3).



Slika 2-3. Trodimenzionalan prikaz projekcije elemenata diskontinuiteta (Mihalić 2002).

Sferna projekcija predstavlja projekciju kugle na neku od ravnina pri čemu projicirane zrake polaze iz jednog središta, a nisu paralelne kao kod ortogonalne projekcije. Radi lakšeg snalaženja, na kugli se nalaze paralele i meridijani koji u projekciji predstavljaju sferni koordinatni sustav. Projekcijom takve kugle na horizontalnu ravninu dobije se polarna mreža, a projekcijom na vertikalnu ekvatorijalna mreža. Ekvatorijalna mreža koristi se za prikazivanje trasa i polova dok se polarna koristi samo za prikazivanje polova. Na temelju tipa projekcije razlikuju se i konstrukcije mreža sferne projekcije. Najčešće se koriste Lambertova projekcija (Schmidtova mreža) ili projekcija jednakih površina te stereografska projekcija (Wulfova mreža) ili projekcija jednakih kutova. Svaka od ovih projekcija ima svoje prednosti i nedostatke. Schmidtova mreža najčešće se koristi pri obradi strukturnih podataka u geologiji, upravo zbog svojstva jednakih površina, dok je Wulfova mreža pogodnija u grafičkom prikazivanju i kasnijim analizama kao na primjer stabilnosti. Da bi se ucrtao pol na polarnoj mreži, probodište normale ravnine s donjom polovicom kugle nanosi se za kut  $\alpha + 180^\circ$  od sjevera u smjeru kazaljke na satu i za nagib  $\beta$  idući od centra prema periferiji.

Da bi se konstruirao trag ili trasa ravnine (veliki krug) u ekvatorijalnoj mreži, pružanje  $\alpha + 90^\circ$  računa se od sjevera u smjeru kazaljke na satu na periferiji s padom  $\beta$  koji je pod pravim kutom mjereći od periferije prema centru. Pol ravnine se u ekvatorijalnoj mreži također prikazuje za kut  $\alpha + 180^\circ$  od sjevera u smjeru kazaljke na satu i za nagib  $\beta$  idući od centra prema periferiji.

Ukoliko postoji mnogo snimljenih podataka, a što i je potreba da se dobiju statistički položaji, ravnine se prvo prikazuju samo polovima, zatim se provodi pobrojavanje na brojačkoj mreži, određivanja klasa te konačno izvlačenje kontura klasa ili izolinija.

Brojanje polova provodi se pomoću površine od 1 % od ukupne površine projekcija, koja se sa središtem redom postavlja po kvadratnoj mreži (polarna mreža po 10°). Postoji i modificirani način prema prijedlogu Dimitrijevića (1995) s gotovom mrežom elipsi i poluelipsi.

Broj izolinija jednake gustoće u konturnom polarnom dijagramu ovisi o maksimalnoj gustoći podataka u jednoj jediničnoj površini (1 % površine kruga dijagrama) i točnosti koja se želi postići. U praktičnim inženjerskogeološkim zadacima dovoljno je iscrtavanje 3 do 4 izolinije gustoće. Kod toga treba napomenuti da kod konturnih strukturnih dijagrama točan podatak o gustoći polova gubi svoju važnost, a osnovni značaj dobivaju klase gustoće (na primjer: 1-5 %, 5-10 %, 10-15 % i > 15 %).

Nakon izvlačenja klasa, određuje se statistički položaj diskontinuiteta koji se tada prikazuje trasama i polovima na ekvatorijalnoj mreži. Prikazivanje položaja diskontinuiteta trasama ima velike prednosti kada se ne radi o velikom broju diskontinuiteta i kada se različitim bojama i debljinama linija mogu označiti diskontinuiteti različite geneze (različiti sistemi ili familije diskontinuiteta). Jednako tako prikazivanje diskontinuiteta trasama ravnina nema alternative kada se iz dijagrama žele očitati i neki drugi podaci koji su relevantni u analizama tektonskog (strukturnog) sklopa, na primjer oblik i veličina stijenskog bloka koji je ograničen diskontinuitetima ili orijentacije presječne između dva diskontinuiteta pomoću trasa njihovih ravnina. Iz istog dijagrama se može očitati i prostorni kut koji zatvaraju ta dva diskontinuiteta, koji je jednak kutu između njihovih polova normala na velikom krugu u kojem se nalaze polovi. Osnovna karakteristika opisanog načina je da se grupiranje provodi samo na temelju orijentacija diskontinuiteta i često postoji velika mogućnost subjektivne procjene broja familija. Posljednjih su godina upućene velike kritike klasičnim postupcima, upravo zbog ovih nedostataka, te su predložene složenije i znatno moćnije metode u razlučivanju grupa (Hammah i Curran 1998).

Ove metode spadaju u skupinu metoda za grupiranje podataka čiji se postupci razlučivanja temelje na primjeni neizravne logike (Fuzzy Cluster Algorithm).

Velike mogućnosti ovih metoda prvo su uočene u primjeni na drugim područjima znanosti, kao što je medicina, a jedan od prvih autora koji je metode primijenio pri grupiranju diskontinuiteta bio je Harrison (1992). Značajnu prilagodbu metode podacima diskontinuiteta ostvarili su Hammah i Curran (1998).

#### 2.4.2. Razmak diskontinuiteta

Razmak diskontinuiteta je okomita udaljenost između susjednih ploha diskontinuiteta koji pripadaju istoj familiji diskontinuiteta. Razmak, osim što definira veličinu blokova, definira i oblik sloma koji se može pojaviti. Ravninski ili klinasti slom po jednoj odnosno dvije plohe diskontinuiteta mogu prijeći u kružni slom ako su razmaci diskontinuiteta vrlo mali. Prilikom mjerenja razmaka diskontinuiteta potrebno je u obzir uzeti odnos orijentacije čela kosine i samih diskontinuiteta kako bi dobili pravu vrijednost razmaka. Svi diskontinuiteti koji se ne nalaze pod pravim kutem u odnosu na kosinu imati će prividnu, odnosno veću vrijednost razmaka.

Razmak se mjeri u okomitom smjeru (slika 2-4) u odnosu na pružanje diskontinuiteta, a prava se vrijednost dobije iz izraza:

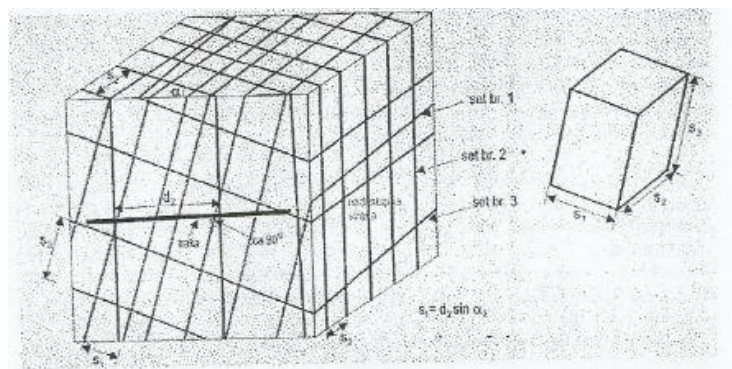
$$S_2 = d_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (2-1)$$

gdje je:

$S_2$  – prava vrijednost razmaka [m]

$d$  – razmak diskontinuiteta [m]

$\alpha$  – orijentacija diskontinuiteta [°]



Slika 2-4. Razmak diskontinuiteta (Mihalić 2002).



Usvojena je točno propisana tehnologija (tablica 2-1) za opis međusobnog razmaka diskontinuiteta, a iznimno može biti izražen inverzno kao npr. broj diskontinuiteta po metru, što se naziva frekvencijom.

Tablica 2-1. Razmak diskontinuiteta.

Opis razmaka	Razmak (mm)
Ekstremno mali razmak	< 20
Vrlo mali razmak	20 – 60
Mali razmak	60 – 200
Srednji razmak	200 – 600
Veliki razmak	600 – 2000
Vrlo veliki razmak	2000 – 6000
Ekstremno veliki razmak	> 6000

Međusobni razmak susjednih diskontinuiteta kontrolira veličinu individualnih blokova, monolita stijene. Nekoliko familija diskontinuiteta na malom međusobnom razmaku stvaraju uvjete male kohezije mase, a suprotno tome, u slučaju velikog razmaka nastaju uvjeti za međusobno uklještenje stijenskih blokova.

Na terenu je potrebno izmjeriti minimalne, srednje i maksimalne razmake svih skupova, kako bi se odredila njihova prosječna vrijednost.

Mjerenja se vrše pomoću mjerne trake koja se postavlja u što je moguće okomitijem položaju na pružanje diskontinuiteta, ovisno koliko dozvoljava pristup izdanku na terenu.

Bilježimo sve diskontinuitete koji presjecaju mjernu traku i računamo njihovu srednju vrijednost ( $f_{sa}$ ):

$$f_{sa} = L / N \quad (2-2)$$

gdje su:

$f_{sa}$  – srednja vrijednost izmjerenih razmaka [m]

$L$  – duljina mjerne trake [m]

$N$  – broj pukotina [-]

Za određivanje stvarnog razmaka dobivene podatke potrebno je korigirati za kut distorzije  $\theta$  prema izrazu:

$$f_s = f_{sa} * \cos\theta \quad (2-3)$$

gdje su:

$f_s$  – stvarni razmak diskontinuiteta [m]

$\theta$  – kut između mjerne trake i normale na ravninu diskontinuiteta [°]

Prema preporukama ISRM (1978) izraz za računanje srednje vrijednosti razmaka diskontinuiteta predstavljen je formulom:

$$S_1 = d_1 \cdot \sin\alpha_1 \quad (2-4)$$

gdje su:

$S_1$  – srednja vrijednost razmaka diskontinuiteta u skupu 1 [m]

$d_1$  – razmak na mjernoj traci između susjednih ploha diskontinuiteta u skupu 1 [m]

$\alpha_1$  – kut između mjerne trake i pružanja diskontinuiteta u ravnini mjerne trake [°]

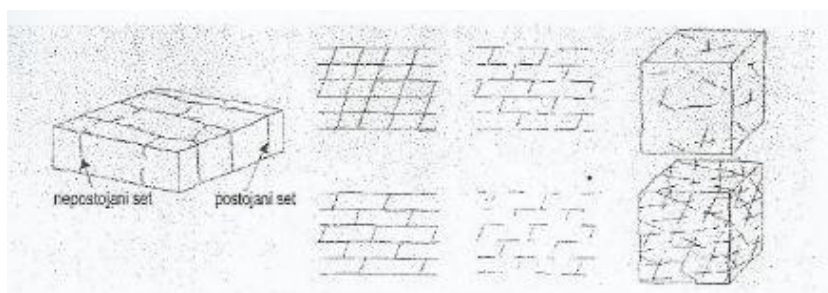
Koristeći ovu formulu prema preporukama ISRM (1978) može se izračunati razmak između susjednih ploha istog skupa diskontinuiteta, za razliku od prethodne formule gdje se u obzir uzima srednja vrijednost razmaka između svih ploha istog skupa diskontinuiteta. Obrada podataka ovisit će o odabiru odgovarajuće formule, koja je uvjetovana svrhom za koju se mjerenja izvode. Usvojena terminologija za opis međusobnog razmaka prema ISRM (1978) prikazana je u gore navedenoj tablici.

### **2.4.3. Postojanost diskontinuiteta**

Postojanost, kontinualnost ili perzistencija diskontinuiteta predstavlja prostiranje diskontinuiteta kao ravnine. Postojanost je parametar koji je najteže prikupiti. Razlog toga je u činjenici da je samo mali dio diskontinuiteta vidljiv na površini, a nije ga moguće odrediti niti iz bušotina.

Iz tog razloga razvijeni su različiti postupci za približan izračun srednje vrijednosti postojanosti skupova diskontinuiteta mjerenjem dužine izloženog traga diskontinuiteta na zadanoj površini čela kosine. Vrlo je značajna veličina kod nepovoljno orijentiranih diskontinuiteta za stabilnost promatranih objekata.

Ona se može grubo kvantificirati ukoliko se promatra i određuje kao dužina diskontinuiteta koja se može pratiti na površini. Problem kod ovih mjerenja je određivanje stvarne duljine diskontinuiteta jer je duljina različita u različitim smjerovima. Promatrana duljina je samo dio stvarne duljine diskontinuiteta zbog nepotpunog pojavljivanja na izdancima. Stijensku masu treba prvo opisati prema relativnoj postojanosti različitih familija diskontinuiteta. Tako se može familija diskontinuiteta opisati kao postojana, srednjepostojana i nepostojana (slika 2-5).



Slika 2-5. Postojanost diskontinuiteta (Mihalić 2002).

Postojanost diskontinuiteta se mjeri u smjeru pada i u pravcu pružanja. Prema srednjim izmjerenim dužinama za svaki set ili familiju diskontinuiteta daje se opis prema sljedećoj tablici (2-2).

Tablica 2-2. Postojanost diskontinuiteta.

Opis postojanosti	Postojanost (m)
Vrlo mala postojanost	< 1
Mala postojanost	1 – 3
Srednja postojanost	3 – 10
Velika postojanost	10 – 20
Vrlo velika postojanost	> 20

#### 2.4.4. Veličina bloka

Veličina bloka je vrlo važan pokazatelj ponašanja stijenske mase, ovisi o diskontinuitetima.

Dimenzije blokova određene su razmakom diskontinuiteta, brojem familija i postojanošću diskontinuiteta. Broj familija i njihova orijentacija određuje oblik bloka. Indeks veličine bloka  $I_b$  određuje se mjerenjem dimenzija blokova tipičnih veličina. Da bi se dobio osjećaj veličine i oblik bloka stijenska masa se opisuje na način koji je dan u sljedećoj tablici (2-3).

Tablica 2-3. Veličina bloka i karakteristike.

Kategorija	Karakteristika	Opis
I	Masivna	Malo pukotina s vrlo širokim razmakom
II	Blokovita	Približno ekvidimenzionalni
III	Pločasta	Jedna dimenzija značajno manja od druge dvije
IV	Stupićasta	Jedna dimenzija značajno veća od druge dvije
V	Nepravilna	Velika varijacija veličina i oblika blokova
VI	Zdrobljena	Jako raspucala

Osim navedenog uz opis je potrebno dati i volumni broj pukotina  $J_v$ .

Volumni broj pukotina predstavlja ukupan broj pukotina po metru kubičnom. Na taj način veličina bloka može se izraziti preko  $J_v$  na način koji je dan u sljedećoj tablici (2-4).

Tablica 2-4. Volumni broj pukotina.

Opis	$J_v$ (pukotina/m <sup>3</sup> )
Vrlo veliki blokovi	< 1
Veliki blokovi	1 – 3
Srednje veliki blokovi	3 – 10
Mali blokovi	10 – 30
Vrlo mali blokovi	> 30

### 3. RAZVOJ METODA ZA PROCJENU DISTRIBUCIJE VELIČINE I OBLIKA BLOKOVA

#### 3.1. Pregled dosadašnjeg razvoja metoda za procjenu distribucije veličina i oblika blokova *in situ*

Detaljan pregled dosadašnjeg rada metoda dan je u radu Berlančić (2013), a za potrebe ovog rada izrađena je kraća verzija. Današnjim metodama procjena distribucije veličine i oblika blokova *in situ* izvediva je na mnoge načine, ti načini bili su nezamislivi prije pojave odgovarajuće računalne podrške. Uslijed složenosti geometrije često je rađena gruba pogreška generaliziranja, u proračune se ulazilo s prosječnim vrijednostima, sve se to odražavalo na realnost rezultata. Računala su idealna za iterativne postupke, nakon kvalitetno provedene faze prikupljanja i obrade podataka o geometrijskim značajkama diskontinuiteta, jer mogu proračunati na tisuće blokova i na temelju toga izvesti distribucije veličina i oblika blokova promatrane stijenske mase. Uvjet za sve to je da postoje prikladni algoritmi. U sljedeća dva odlomka dat će se kratki pregled razvoja u procjeni distribucije veličine blokova *in situ* kojeg su opisali Lu i Latham (1999).

Najraniji kvantitativni opis veličina blokova *in situ* datira iz druge polovice prošlog stoljeća. Izražen je kroz modificirani postotak bušotinske jezgre ili RQD, što predstavlja udio komada jezgre dužih od 0,1 m u ukupnoj dužini jezgre (Deere 1964).

Priest i Hudson (1976) primijenili su RQD na podatke prikupljene linearnim snimanjem na izdancima stijena i predložili analitičku vezu između RQD i frekvencije diskontinuiteta (Hudson i Priest 1979). S obzirom da je vrijednost RQD, dobivena na temelju bušotine ili linearnog snimanja podložna promjenama ovisno o smjeru mjerenja, Kazi i Sen (1985) predložili su korištenje volumetrijskog RQD, tzv. V.RQD. Ovdje uočavamo sličnost s prosječnim volumenom bloka i na temelju toga mogu se donijeti određeni zaključci o udjelu vrlo malih, odnosno vrlo velikih blokova te distribuciji volumena blokova u promatranoj stijenskoj masi. Indeks razmaka pukotina  $I_f$  predložio je Franklin (1970). Radi se o parametru koji predstavlja promjer prosječnog bloka, procijenjen vizualno, odabirom nekoliko najfrekventnijih veličina komada jezgre ili stijenskih blokova te snimanjem njihovih prosječnih dimenzija.

ISRM (1978) predlaže uvođenje indeksa bloka  $I_b$ , sličan indeksu razmaka pukotina s tim da je ovaj indeks procijenjen vizualnim odabirom nekoliko najfrekventnijih veličina blokova i snimanjem njihovih prosječnih dimenzija.

Treba napomenuti da su ova dva spomenuta indeksa polukvantitativne mjere i imaju ograničenu upotrebu u praksi. Također, predložen je volumetrijski broj diskontinuiteta  $J_v$ , koji predstavlja sumu broja diskontinuiteta po metru kubnom za svaki prisutni set diskontinuiteta. Empirijske jednadžbe koje povezuje  $J_v$ , RQD i linearnu frekvenciju pukotina predložio je Palmstrom (1985). Također, iznio je i korelaciju između *in situ* veličina blokova i volumetrijskog broja diskontinuiteta  $J_v$ .

Ovo je jedna od metoda pomoću koje se može grubo procijeniti raspon veličine blokova. Sen i Eissa (1992) izveli su analitičke izraze i dijagrame za razvrstavanje blokova po obliku, uzimajući u obzir  $J_v$ , RQD i volumene blokova. Informacije o veličini blokova dane su u obliku prosječnog volumena bloka.

Zahvaljujući napretku računalne tehnologije moguća je procjena cijele *in situ* distribucije veličine blokova.

S jedne strane ovaj napredak omogućuje bolje razumijevanje *in situ* distribucije veličine blokova stijenskih masa i unaprijedio je i samu njegovu procjenu, ali s druge strane šira upotreba ostala je ekskluzivna s obzirom na komercijalnu prirodu posebnih računalnih programa. Pristup izvođenju procjene putem računalne podrške temelji se na simulaciji diskretnih mreža pukotina ili diskontinuiteta.

Analizom terenskih podataka pomoću stereograma i računalnog programa za grupiranje diskontinuiteta na temelju sličnosti njihovih značajki određuje se broj skupova diskontinuiteta potreban za simulaciju DFN mreže (eng. *discrete fracture network*). Kako bi dobili najdetaljniji izvještaj uz mjerene podatke za razmak, postojanost i distribuciju, razmatraju se statistički teoretski modeli distribucija koji najbolje pristaju uz njih, to se radi za svaki skup pojedinačno. Konačan cilj je dobiti optimalan odabir skupova i statističkih distribucija za generiranje realne DFN mreže, imajući na umu da model mora biti postavljen u statistički homogenom području stijenske mase. Temeljem generiranja DFN mreže iz teoretskih distribucija geometrijskih značajki setova diskontinuiteta izvodi se simulacija stijenske mase presijecanjem setova diskontinuiteta, njihova geometrija je izražena serijom ravnih diskova.

Aler i suradnici navode da su središta diskova generirana iz uniformne razdiobe, dok je njihova veličina u trodimenzionalnom prostoru procijenjena iz teoretskog modela distribucije prilagođene podacima dužine tragova diskontinuiteta izmjerenim na relevantnom izdanku stijene. Orijentacija diskova generirana je iz sferne normalne distribucije koja je prilagođena mjerenim podacima azimuta i nagiba. Kako bi se izrazila kvaliteta pristajanja teoretskih distribucija stvarnom stanju provode se Kolmogorov – Smirnov statistički testovi (Aler i dr. 1996).

Međusobna presijecanja izračunavaju se već nakon jedne računalne simulacije serije diskova u 3D prostoru, zatim se odbacuju i dijelovi ravnina koji ne formiraju kompletne blokove, odnosno formiraju blokove koji nisu konačni. Tada se pomoću računalnog algoritma izračunavaju distribucije veličina svih kompletno formiranih blokova. Kao glavni kriterij za procjenu stupnja pouzdanosti na ovaj način generiranih rezultata je fizička sličnost simulirane geometrije sa stvarnom stijenskom masom. Spomenuo bih i računalni program tog tipa, FracMan, originalno dizajniran za modeliranje procjeđivanja. Ovaj program izričito definira geometriju svakog loma, nudi brojne alate za analizu karakteristika podataka, geološkog modeliranja, prostorne analize itd.

Prvi korak u rezultatima procjene IBSD-a izražava se kumulativnom krivuljom distribucije volumena. Drugi korak jest kvantifikacija i razvrstavanje oblika blokova pomoću trokutnog dijagrama. Taj drugi korak predložili su Diedrichs i dr. (2006), koji također daju kratak pregled razvoja metoda procjene distribucije oblika blokova *in situ*.

Kvantitativni omjer tri dimenzije bloka, pritom koristeći terminologiju kubičnog, pločastog i stupičastog bloka opisuju Franklin i Dusseault (1989).

Kao primjer uzet ćemo blok s omjerom 1:5:7, on bi bio pločastog oblika, iz razloga jer mu je jedna dimenzija znatno manja od ostale dvije. Sen i Eissa (1992) povezuju  $J_v$ , RQD i volumen blokova s idealiziranim olicima blokova, a to su opet kubični, pločasti i stupičasti. Prikaz veličine i oblika bloka na stereogramu naglašavajući pritom odnos kuta između stranica i razmaka parova stranica bloka koje su formirane ponavljajućim ravninama istog skupa diskontinuiteta razmotrio je Smith (2004). Palmstrom (2001) je predložio da se blokovi razvrstavaju na temelju omjera duljina bridova za ortogonalni heksaedarski blok. Oblik bloka isto se može opisati terminologijom reda oblika, imajući u vidu da je red definiran brojem stranica bloka.

Tako se razlikuju tetraedri (blokovi 4. reda), pentaedri (blokovi 5. reda), heksaedri (blokovi 6. reda), heptaedri (blokovi 7. reda), oktaedri (blokovi 8. reda) itd. Red blokova može se primijeniti prilikom procjene stabilnosti za blokovski slom, budući da su blokovi višeg reda općenito manje pokretni zato što je vjerojatnost njihovog potpunog formiranja manja, a ako se formiraju, onda je vjerojatnost njihove stabilnosti znatno veća, s obzirom da stabilnosti pridonosi pojava neparalelne translacije po plohama posmika i manja nekonveksnost. Wang (2003) je razvio 3D indeks oblika bloka  $\lambda$  za opis oblika fragmenata rude.

Navedeni indeks definiramo kao omjer volumena bloka i volumena kugle čiji je promjer jednak maksimalnoj izračunatoj udaljenosti između parova vrhova predmetnog bloka. Wang (2003) tom prilikom razvrstava oblike blokova u pet kategorija prema vrijednosti indeksa  $\lambda$  (tablica 3-1).

Tablica 3-1. Indeks omjera volumena bloka i volumena kugle (Wang 2003).

<b>Oblik blokova</b>	<b>Vrijednost indeksa <math>\lambda</math></b>
Stupičasti	$< 0,001$
Pločasti	$0,001 - 0,077$
Prijelazni	$0,077 - 0,22$
Kubični	$0,22 - 0,37$
Sferični	$0,37 - 1$

Prijelazni oblik poprimaju blokovi čija je geometrija kombinacija idealiziranih krajnjih oblika, primjerice stupičasto – kubični ili pločasto – kubični. Faktor oblika  $\beta$  s pripadajućim jednadžbama koji se koristi za određivanje ekvivalentnog volumena bloka u stijenskoj masi s brojem skupova diskontinuiteta koji je nedostatan da se formira diskretni sustav blokova uveo je Palmstrom (1995). Za opis oblika čestica u mehanici tla koriste se duljine tri ortogonalne osi, a to su duga  $L$ , srednje duga  $I$  i kratka  $S$ . 2D indeksi za opis oblika čestica mogu se definirati pomoću različitih numeričkih kombinacija.

Kada se parovi indeksa grafički prikažu na 2D dijagramu, u distribuciji podataka na dijagramu mogu se prepoznati grupe sličnih oblika. Zahvaljujući ovom principu razvijeni su i dijagrami za grafički prikaz podataka o obliku stijenskih blokova.

Dokazano je da podaci nisu efektivno distribuirani ako smo za prikaz podataka koristili Kartezijev koordinatni sustav. Uslijed ovoga uvedeni su trokutni dijagrami.



Na trokutnom dijagramu podaci se prikazuju grafički na kontinuumu između tri krajnja oblika, a to su kubični ili ekvidimenzionalni te pločasti i stupičasti, smješteni u tri vrha trokutnog dijagrama. Osim navedenih krajnjih oblika na spomenutom dijagramu definirana su i područja prijelaznih oblika. Temeljem podataka o gustoći u krajnjem ili prijelaznom području trokutnog dijagrama dolazi se do zaključka o dominantnom obliku blokova u promatranoj stijenskoj masi.

### **3.2. Teorija blokova**

Kada se govori o teoriji blokova ujedno se govori i o tri problema, a to su konačnost, pokretljivost i mehanička stabilnost blokova.

Osim spomenutih problema, teorija blokova dovodi u interakciju dvije geometrije, geometriju stijenske mase i geometriju inženjerskog objekta. Tu je potrebno istaknuti da se sve plohe diskontinuiteta i plohe objekta aproksimiraju ravninama. Zbog svega navedenog blokovi su formirani presijecanjem skupova diskontinuiteta, međusobno, i s ravninama slobodnih površina, čime je formiran sustav blokova.

U tom sustavu razlikuju se dvije osnovne kategorije blokova, blokovi koji imaju dodir sa slobodnom površinom i blokovi formirani isključivo diskontinuitetima iza slobodne površine, njih Goodman i Shi (1985) nazivaju pukotinski blokovi. Kategorizacija skupa blokova koji su u dodiru sa slobodnom površinom prema kritičnosti uzima u obzir njihov položaj, veličinu i oblik u odnosu na slobodni prostor. Teorija blokova prema prethodno spomenutim autorima upravo i ima za cilj generirati listu ključnih, odnosno kritičnih blokova nad kojima se provode daljnje analize stabilnosti. Za taj postupak prvi korak je ispitivanje konačnosti, s obzirom da samo konačan blok može biti i pokretljiv, zatim pokretljivosti, i naposljetku se skup pokretljivih blokova ispituje s obzirom na stabilnost i svakom se bloku pridružuje faktor stabilnosti. Pogodan slučaj za teoriju blokova je diskontinuirana stijenska masa s izraženom prirodnom geometrijom, koja svoju primjenu nalazi tijekom izvedbe podzemnih i površinskih rudarskih i geotehničkih objekata.

Pomoću stereografske projekcije i vektorske analize dobivaju se elementi proračuna blokova, na temelju kojih se provodi ispitivanje konačnosti itd.

Stereografska projekcija predstavlja grafički vid teorije blokova i u pravilu se većina koncepata teorije blokova grafički izražava u stereografskoj projekciji.

Elementi proračuna mogu se provoditi paralelno vektorskom analizom i korištenjem stereografske projekcije, zbog toga se proračun može okarakterizirati kao grafo – analitički. Vektorska analiza naročito je pogodna kada se koristi računalo, u najvećem broju slučajeva to je i nezaobilazno i upravo u tome leži glavna snaga teorije blokova.

Danas, vektorska analiza je parcijalno ili potpuno implementirana u brojne računalne programe s mogućnošću generiranja blokova, modeliranja i simulacije stijenske mase, te krajnjeg proračuna distribucije veličina i oblika blokova.

### **3.2.1. Pretpostavke teorije blokova**

Pretpostavke teorije blokova prema Goodmanu i Shiu (1985) su sljedeće:

- 1) Plohe diskontinuiteta i plohe slobodnih površina su ravnine.
- 2) Diskontinuiteti su postojani kroz volumen promatranja.
- 3) Sustav blokova preodređen je diskontinuitetima i ima svojstvo krutosti.
- 4) Ulazni podaci teorije blokova su geometrijske značajke skupova diskontinuiteta i orijentacije ravnina slobodnih površina.

Prva pretpostavka uvedena je kako bi se morfologija bloka mogla opisati linearnim jednadžbama (Goodman i Shi 1985). Druga pretpostavka poslužila je kao definicija sustava blokova predodređenih diskontinuitetima, to ujedno znači da se ne uzima u obzir mogućnost formiranja novih pukotina u analizi pomaka sustava. Također, ova pretpostavka ograničava sustav na konveksnu geometriju blokova. U većim volumenima promatranja postojanost se na neki način mora uzeti u obzir (Goodman i Shi 1985).

### **3.2.2. Vektorska analiza u teoriji blokova**

Vektorska analiza se koristi kako bi se opisala morfologija bloka, to podrazumijeva izračun koordinata vrhova, vektora bridova, površina stranica i volumena. Upotrebom vektora omogućena je statička i kinematička analiza kritičnih blokova pod djelovanjem sila vlastite težine, trenja, inercije, tlaka vode i kohezije (Goodman i Shi 1985).

Morfologija poliedarskog bloka opisuje se jednadžbama pravaca i ravnina, odnosno ispitivanjem interakcija između ovih dvaju geometrijskih objekata prema definicijama iz linearne i vektorske algebre.

Kako bi se naglasilo da se ovdje radi o matematički definiranim geometrijskim objektima koriste se neke općenite oznake kao što su  $O(0, 0, 0)$  za ishodište Kartezijevog koordinatnog sustava,  $T$  za točku,  $p$  za pravac,  $\Sigma$  za ravninu i  $\varepsilon$  za prostor.

Pravac  $p$  određen je nekom svojom točkom  $T_1$  i vektorom smjera  $c$ . Pišemo  $p = (T_1, c)$ . Ako je  $r$  radij vektor neke točke pravca, a  $r_1$  radij vektor točke  $T_1$ , tada vektorska jednadžba pravca glasi:

$$r = r_1 + tc, \quad t \in R \quad (3-1)$$

Ako je  $T_1 = T_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $r = (x, y, z)$ ,  $c = (e, f, g)$ , tada izjednačavanjem koeficijenata uz vektore možemo jednadžbu pravca napisati i u parametarskom obliku:

$$p \equiv \begin{cases} x = x_1 + et \\ y = y_1 + ft \\ z = z_1 + gt \end{cases} \quad t \in R \quad (3-2)$$

ili, eliminacijom parametra  $t$ , u kanonskom obliku:

$$\frac{x-x_1}{e} = \frac{y-y_1}{f} = \frac{z-z_1}{g} \quad (3-3)$$

Ako pravac  $p$  prolazi kroz ishodište  $O(0,0,0)$  norma radijus vektora  $|r_1|=0$ , zbog čega se navedene jednadžbe reduciraju (Berlančić 2013).

Ravnina  $\pi$  potpuno je određena jednom svojom točkom  $T_1(x_1, y_1, z_1)$  i vektorom normale na ravninu  $\pi$ ,  $\vec{n} = A\vec{i} + B\vec{j} + C\vec{k}$ . Pišemo  $\pi = (T_1, \vec{n})$ . Njena jednadžba glasi, u vektorskom obliku:

$$\vec{n} \cdot (r - r_1) = 0 \quad (3-4)$$

Tu je  $r$  radij vektor neke točke  $T(x, y, z)$  u ravnini  $\pi$ , a  $r_1$  radij vektor točke  $T_1$ . Skalarni oblik ove jednadžbe je:

$$A(x - x_1) + B(y - y_1) + C(z - z_1) = 0 \quad (3-5)$$

To je jednadžba ravnine kojoj je zadan vektor normale i jedna točka. Sređivanjem te jednadžbe dobiva se opći oblik koji glasi:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3-6)$$

Značenje koeficijenta  $D$  koji se pojavljuje u općoj jednadžbi ravnine jest ortogonalna udaljenost ravnine od ishodišta  $O(0,0,0)$ , odnosno  $D = 0$  kad ravnina prolazi kroz ishodište  $O(0,0,0)$ . Koeficijenti  $A$ ,  $B$  i  $C$  su skalarne komponente vektora normale  $n$ .

Došli smo i do prostornih kutova. Ovi odnosi nastaju u interakciji geometrijskih objekata.

Slijedeći elementi proračuna odnose se na prostorne kutove, odnosno kut između dviju ravnina, pravca i ravnine ili dvaju pravaca. Pomoću skalarnog produkta pronalazi se kut između dva pravca, tj. on se pronalazi kao kut između njihovih vektora smjera  $v_1$  i  $v_2$ .

$$\cos \delta = \frac{v_1 \cdot v_2}{|v_1| \cdot |v_2|} = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)(x_2^2 + y_2^2 + z_2^2)}} \quad (3-7)$$

Kut između pravca i ravnine računa se tako da se prvo izračuna kut između vektora normale ravnine i vektora smjera pravca. Tada je kut između pravca i ravnine komplementaran kutu izračunatom u prvom koraku. Ako se traži kut između dviju ravnina, on je jednak kutu između normala tih ravnina.

Poluprostor se definira kao generalizacija poluravnine u tri dimenzije. Zadan je linearnom nejednadžbom. Ako se promatra neka ravnina  $\Sigma$  i u njoj pravac  $p$ ,  $p$  dijeli ravninu na dvije poluravnine koje se može definirati kao gornja  $U$  i donja  $L$ .

Ako se ravnina  $\Sigma$  promatra u prostoru  $\varepsilon$ , ona definira gornji poluprostor  $U$  iznad ravnine  $\Sigma$  i donji poluprostor  $L$  ispod ravnine  $\Sigma$ . U slučaju vertikalne ravnine  $\Sigma$ ,  $U$  i  $L$  određeni su definicijom orijentacije ravnine. Vektor normale vertikalne ravnine  $\Sigma$  leži u horizontalnoj  $xy$  ravnini u smjeru gornjeg poluprostora  $U$ . Položaj vektora normale ovisi o azimutu  $\beta$  ravnine  $\Sigma$ .

Proširivanjem jednadžbe ravnine znakovima nejednakosti, poluprostor se može izraziti na sljedeći način. Točka  $T(x,y,z)$  pripada donjem poluprostoru  $L$  ravnine  $\Sigma$  ako je zadovoljen uvjet:

$$Ax + By + Cz \leq D \quad (3-8)$$

Ako ravnina  $\Sigma$  sadrži ishodište  $O(0,0,0)$  koordinatnog sustava,  $D = 0$  i zato je:

$$Ax + By + Cz \leq 0 \quad (3-9)$$

Točka  $T(x,y,z)$  pripada gornjem poluprostoru  $U$  ravnine  $\Sigma$  ako je zadovoljen uvjet:

$$Ax + By + Cz \geq D \quad (3-10)$$

Ako ravnina  $\Sigma$  sadrži ishodište  $O(0,0,0)$  koordinatnog sustava,  $D = 0$  i zato je:

$$Ax + By + Cz \geq 0 \quad (3-11)$$

Kad ravnina  $\Sigma$  sadrži ishodište  $O(0,0,0)$  poluprostori  $U$  i  $L$  mogu se prikazati u stereografskoj projekciji pomoću tzv. Velikog kruga, njega će se opisati u nastavku.

U trodimenzionalnom prostoru vrhovi bloka su definirani svojim koordinatama koje je potrebno izračunati. Koordinate bilo kojeg vrha presjecište su  $i$ -te,  $j$ -te i  $k$ -te ravnine, odnosno rješenje su sustava od tri linearne jednačbe s tri nepoznanice:

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z = D_1 \\ A_2x + B_2y + C_2z = D_2 \\ A_3x + B_3y + C_3z = D_3 \end{cases} \quad (3-12)$$

Matrični zapis sustava, prilagođen tzv. numeričkim kalkulatorima kao što je primjerice Octave, je:

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

Bridovi bloka su presječnice između parova ravnina koje sudjeluju u formiranju bloka i izračunavaju se pomoću vektorskog produkta:

$$I_{ij} = \vec{n}_i \times \vec{n}_j = \begin{bmatrix} x & y & z \\ A_i & B_i & C_i \\ A_j & B_j & C_j \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

$I_{ij}$  označava presječnicu između  $i$ -te i  $j$ -te ravnine,  $\vec{n}_i$  je jedinična normala  $i$ -te, dok je  $\vec{n}_j$  jedinična normala  $j$ -te ravnine.

Stranice bloka definiraju se kao različiti poligoni: trokuti, četverokuti, peterokuti itd. U slučaju kada je stranica trokut tada se površina direktno izračunava, u suprotnom se triangulacijom stranica dijeli na trokute i izračunava se površina svakog trokuta, tako da suma površina tih trokuta predstavlja ukupnu površinu stranice.

Izraz za izračun površine trokuta u koordinatnom obliku je:

$$A = \frac{1}{2} \left\{ \left| \begin{matrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} z_2 - z_1 & x_2 - x_1 \\ z_3 - z_1 & x_3 - x_1 \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{matrix} \right|^2 \right\}^{1/2} \quad (3-15)$$

Kada se govori o blokovima, govori se zapravo o različitim poliedrima kao što su tetraedri, pentaedri, heksaedri itd. Ako se radi o tetraedru onda se volumen direktno izračunava, u suprotnom se triangulacijom taj blok dijeli na tetraedre i izračunava se volumen svakog tetraedra pojedinačno. Suma volumena tih tetraedara predstavlja ukupni volumen bloka. Izraz za izračun volumena tetraedra u koordinatnom obliku je:

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (3-16)$$

### 3.3. Procjena prosječnog volumena bloka prema Palmstromu

Palmstrom (1995) je predložio razvrstavanje blokova prema veličini u pet kategorija prikazanih u sljedećoj tablici (3-2):

Tablica 3-2. Prosječni volumen bloka (Palmstrom 1995)

Opis	Prosječni volumen bloka, V <sub>b</sub>
Jako mali blokovi	10 – 200 cm <sup>3</sup>
Mali blokovi	0,2 – 10 dm <sup>3</sup>
Umjereno mali blokovi	10 – 200 dm <sup>3</sup>
Veliki blokovi	0,2 – 10 m <sup>3</sup>
Jako veliki blokovi	> 10 m <sup>3</sup>

Prosječni volumen bloka može se procijeniti temeljem empirijskog izraza kojeg je predložio Palmstrom (1995). Spomenuti izraz dovodi u vezu faktor oblika bloka  $\beta$  i volumetrijski broj pukotina  $J_v$ .

Faktor oblika bloka  $\beta$  može se procijeniti prema izrazu,

$$\beta \approx 20 + 7 \cdot \frac{a_3}{a_1} \quad (3-17)$$

gdje je  $a_1$  najkraća, a  $a_3$  najduža dimenzija bloka, ili iz sljedeće tablice. Uobičajena vrijednost faktora  $\beta = 36$ . Vrijednosti faktora oblika bloka  $\beta$  prikazane su u tablici 3-3.

Tablica 3-3. Vrijednosti faktora oblika bloka  $\beta$  za različite oblike blokova (Palmstrom 1995)

Opis	B
Ekvidimenzionalni blokovi	27
Blago izduženi ili blago pločasti blokovi	28 – 32
Umjereno izduženi ili umjereno pločasti blokovi	33 – 59
Izduženi ili pločasti blokovi	60 – 200
Jako izduženi ili jako pločasti blokovi	> 200

Volumetrijski broj pukotina  $J_v$  iskazuje stupanj razlomljenosti stijenske mase, odnosno frekvenciju pukotina po  $1 \text{ m}^3$ .

Procjena stupnja razlomljenosti stijenske mase s obzirom na vrijednost  $J_v$  može se napraviti pomoću sljedeće tablice (3-4):

Tablica 3-4. Stupanj razlomljenosti stijenske mase (Palmstrom 1995).

Stupanj razlomljenosti stijenske mase	$J_v$
Jako nizak	<1
Nizak	1 – 3
Umjeren	3 – 10
Visok	10 – 30
Jako visok	30 – 60
Smrvljena	>60

$J_v$  se izračunava iz sljedećeg izraza,

$$J_v = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} + \dots + \frac{1}{s_n} \quad (3-18)$$

gdje su  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$  prosječni razmaci svakog utvrđenog diskontinuiteta.

Empirijski izraz prema Palmstromu (1995) za prosječnu veličinu bloka  $V_b$  koji dovodi u vezu faktor oblika bloka  $\beta$  i volumetrijski broj pukotina  $J_v$  glasi,

$$V_b = \beta \cdot J_v^{-3} \quad (3-19)$$

Budući da se prilikom izračuna  $J_v$  uzimaju prosječne vrijednosti razmaka za svaki skup, pomoću ovog izraza dobiva se samo prosječna veličina bloka, što je dobro kao orijentacijski podatak, ali ne sadrži nikakvu informaciju o distribuciji veličina koje se mogu očekivati u promatranoj stijenskoj masi.

### **3.4. Ostale metode za procjenu distribucija veličina i oblika blokova stijenske mase**

U ovom potpoglavlju iznešene su i ostale metode za procjenu distribucija veličina i oblika blokova.

Postoje dvije Wangove metode, metoda presijecanja i metoda jednadžbi, kako to opisuju Lu i Latham (1999). Metode zahtijevaju podatke o orijentaciji i geoprostorne podatke individualanih diskontinuiteta, ili samo geoprostorne podatke o diskontinuitetima koji su prikupljeni linearnim snimanjem ili snimanjem stijenki bušotina CCTV tehnikom, uz podatke o orijentaciji dominantnih setova diskontinuiteta.

Metoda presijecanja se računa tako da se IBSD procjenjuje na temelju sustava blokova koji je formiran presijecanjem diskontinuiteta unutar graničnog bloka definiranog sa šest postojećih ravnina. Algoritam proračuna uglavnom je zasnovan na teoriji blokova. Podaci koji su potrebni za pokretanje algoritma su prostorna orijentacija svih diskontinuiteta i odsječci koje čine na pravcu snimanja, što se može prikupiti detaljnim linearnim snimanjem.

Metoda jednadžbi sadrži skup empirijskih jednadžbi za procjenu IBSD. Taj skup empirijskih jednadžbi povezuje IBSD sa srednjim razmacima i srednjim orijentacijama tri dominantna seta diskontinuiteta. Jednadžbe su dobivene korištenjem rješenja iz metode presijecanja, prethodno opisane i izvedene su kalibracijom rezultata iterativnog postupka u kojem su testirani različiti ulazni srednji razmacij i distribucije razmaka.

Budući da se na procjenu distribucije veličina nastavlja procjena distribucije oblika blokova kako bi se zaokružila ukupna procjena geometrijskih značajki sustava blokova u nastavku je prikazana jedna od mogućih metoda procjene distribucije oblika prema Diederichsu i suradnicima (Diedrichs i dr. 2006).

Ona u obzir uzima kolinearnost najduljih udaljenosti između vrhova bloka i odnos između površine oplošja bloka, prosječne udaljenosti između vrhova i volumena.

Metode su detaljnije objašnjene u diplomskom radu Berlančića (2013).



### **3.5. Razvoj nove metode proračuna za formiranje stijenskog bloka**

Kako je ukratko izloženo u prethodnom dijelu rada, može se zaključiti da procjene distribucije veličina i oblika blokova nisu nimalo jednostavni zadaci, za čije su rješavanje razvijene različite metode i pristupi, koje prema tome daju bolja ili lošija rješenja u realnim uvjetima i značajkama stijenskih masa. Jednostavne metode daju često previše grube i loše rezultate, dok s druge strane kod složenih metoda potrebno je daleko veći broj ulaznih podataka ili su praktično zbog troškova njihove provedbe one neprihvatljive.

Proučavajući principe, prednosti i nedostatke postojećih metoda procjena, postavljen je osnovni koncept nove pojednostavljene metode proračuna za formiranje stijenskog bloka koja je ukratko izložena u nastavku. Osnovno polazište je bila teorija blokova sa svojim postavkama i metodom proračuna, ali s pojednostavljenjem u odnosu na geometriju zahvata. Naime, u klasičnoj teoriji ključnih blokova nužna je geometrija zahvata kako bi se mogla dati procjena o pokretljivosti ili nepokretljivosti bloka što i predstavlja glavni cilj ove teorije. Kako u našem slučaju glavni problem predstavlja procjena veličina i oblika blokova u stijenskoj masi tada nam nije važna geometrija samog zahvata.

Prema tome, osnovni princip metode sastoji se u postavljanju relativne geometrije bloka, a ne apsolutne.

#### **3.5.1. Proračun ravnine određene kutevima orijentacije diskontinuiteta $\alpha$ i $\beta$**

Poznato je da neka ravnina u prostoru može biti određena s tri točke. Analitički je ravninu najjednostavnije opisati pomoću jedne točke i jednog vektora koji je okomit na tu ravninu i naziva se normalom ravnine.

Prema tome potreban je proračun komponenti vektora normale na tu ravninu. Kako je snimanjem orijentacije zadan ustvari nagib vektora pada, potreban je vektor normale koji se dobije tako da se vrijednost vektora pada oduzme od  $90^\circ$ .

Iz jednadžbe pravca koji prolazi kroz dvije točke u prostoru dobiju se koeficijenti  $A$ ,  $B$ ,  $C$  koji ujedno predstavljaju koeficijente normale ravnine. Te točke predstavljaju ishodište i vrh jediničnog vektora normale.

Koeficijenti  $A$ ,  $B$ ,  $C$  dobivaju se sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned} A &= \sin \alpha \sin \beta \\ B &= \sin \alpha \cos \beta \\ C &= \cos \alpha \end{aligned} \quad (3-20)$$

### 3.5.2. Dobivanje točaka bloka jednadžbom sjecišta triju različitih ravnina

Vrhovi blokova dobivaju se kao sjecišta triju različitih ravnina. Radi se o linearnom sustavu s tri jednadžbe i tri nepoznanice koji se simbolički zapisuje u obliku  $AX = B$ , gdje je  $A$  matrica sustava,  $X$  stupčana matrica s nepoznanicama sustava  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , a  $B$  stupčana matrica sa slobodnim koeficijentima  $b_1, b_2, \dots, b_n$ . Osnovna ideja je riješiti sustav pomoću Cramerovog pravila, u kojem se koristi determinanta matrice. Determinanta je realna funkcija koja kvadratnoj matrici pridružuje realan broj (kojeg zovemo determinanta matrice), a osnovna svojstva koja zadovoljava jesu:

$$\det(AB) = \det A \cdot \det B = \det B \cdot \det A = \det(BA); \det I = 1 \quad (3-21)$$

Proračun točaka bloka dobiven je također pomoću aplikacije BlockEx.

### 3.5.3. Eliminacija točaka koje ne pripadaju bloku

Eliminacija točaka provodi se kako bi se ustanovilo koje točke ne pripadaju stvarnom bloku. S obzirom da se za slučaj kada postoje više od tri sustava pukotina proračunima dobiva daleko veći broj mogućih točaka presjecišta ravnina potrebno je nakon dobivenih točaka provjeriti matematičkim metodama koje od njih pripadaju stvarnom bloku, a koje ne.

Te metode temelje se zapravo na utvrđivanju udaljenosti točaka od realnih ravnina bloka. Pošto aplikacija BlockEx obavlja kompletan proračun, nakon izračuna točaka presjecišta provodi se provjera koje pripadaju od onih koje ne pripadaju.

### 3.5.4. Proračun volumena bloka

Nakon izračuna i eliminacije točaka koje ne pripadaju bloku za potrebe ovog rada prikaz konačnog izgleda bloka, kao i izračun volumena bloka proveo se pomoću AutoCAD Civil 3D aplikacije.

CAD – Computer Aided Design (konstruiranje pomoću računala) je programsko okruženje koje omogućuje projektantu da uz pomoć računala obradi projekt od prve zamišljene koncepcije do konačnog stanja.

CAD uključuje cijelu grupu aktivnosti, pa se može reći da CAD predstavlja integraciju metoda računalnih i inženjerskih znanja u na računalu baziran sustav, koji obuhvaća bazu podataka, programsku biblioteku i podsustav za komunikaciju. AutoCAD je jedan od najstarijih i najčešće upotrebljivanih CAD programa opće namjene za osobna računala. Vrlo je prilagodljiv i lagan za učenje i uporabu. Upotrebljavaju ga inženjeri i tehničari u strojarскоj, građevinskoj, arhitektonskoj, geodetskoj, elektro i drugim strukama. Posluživanje preko izbornika i traka sa simbolima alata odgovara u potpunosti Microsoftovom propisanom standardu. Dodatno desnom tipkom miša moguće je pozvati kontekst – izbornik, koji u pojedinim situacijama omogućava da mijenjamo objekt i vršimo druge operacije.

Osim ovog, preostaje nam i mogućnost da zadajemo naredbe preko tipkovnice tako što u naredbeni redak pri dnu ekrana upišemo naredbenu riječi (u našem slučaju najčešće upotrebljavana naredba bila je „point“, naredba za unos koordinata točaka). Tu se također javljaju i odzivi naredbi (promptovi), pogreške i druge važne informacije (Lučić 2007).

Autodeskova aplikacija AutoCAD Civil3D namijenjena je za projektiranje u niskogradnji i urbanizmu. AutoCAD Civil 3D softver omogućuje nam bržu isporuku visoko kvalitetne projektne dokumentacije u niskogradnji, geodeziji i urbanizmu.

Alati softvera podržavaju BIM (Building Information Modeling) procese i pomažu smanjiti vrijeme potrebno za projektiranje, analize i naknadne izmjene unutar projekta. Rezultat toga je da možete sagledati više „što-ako“ scenarija i optimizirati izradu projektne dokumentacije (Intelika).

Prvi korak je unijeti koordinate točaka te ih pospajati i dobiti logičan izgled našeg bloka. Zatim slijedi proračun volumena računalnim programom AutoCAD. Detaljniji opis proračuna volumena nalazi se u sljedećem poglavlju (4.4).

## 4. PROCJENA VELIČINA I OBLIKA BLOKOVA NA KAMENOLOMU „IVANEC“

### 4.1. Opće, geološke i geotehničke karakteristike kamenoloma „Ivanec“

Eksploatacijsko polje „Ivanec“ nalazi se na krajnjem jugozapadnom dijelu Medvednice, na području grada Zaprešića. Nalazi se 500 m od mjesta po kojem je dobio ime. Rad na kamenolomu započeo je 1972., a od 1974. godine koncesiju za eksploataciju na tom području drži dioničko društvo „Viadukt“. Otkopani i prerađeni tehničko-građevni kamen plasira se na tržište kamenih agregata Zagreba i okolice. Prema dostupnoj dokumentaciji prosječna godišnja eksploatacija iznosi 280 000 m<sup>3</sup> stijenske mase u sraslom stanju, ali to naravno ovisi o stanju na tržištu i činjenici da se kamenolom nalazi na teritoriju parka prirode „Medvednica“, što smanjuje mogućnosti daljnjeg širenja, zbog čega se recentna eksploatacija provodi u svrhu sanacije kamenoloma. Južna strana djelomično je već sanirana, što je prikazano i na slici 4-1.



Slika 4-1. Fotografija južne strane kamenoloma „Ivanec“ (Berlančić 2013).

Najveći dio stijenske mase na ovom području izgrađuju dobrouslojeni ranodijagenetski dolomiti gornjotrijaske starosti koji su u sjeverozapadnom dijelu prekriveni mlađim tercijarnim sedimentima (Ženko 1997).

Područje se može podijeliti na dvije litološke sredine (Đokić 2006). Prvu litološku cjelinu čine dobro slojeviti ciklički taloženi ranodijagenetski dolomiti loferskog tipa koji zahvaćaju sjevernu stranu kamenoloma. Drugu litološku cjelinu čine intenzivno tektonizirani i milonitizirani slojeviti ciklički taloženi ranodijagenetski dolomiti loferskog tipa koji izgrađuju središnji i jugoistočni dio kamenoloma.

Dolomiti su okarakterizirani kao svjetlosivi do bijeložućkasti, masivni, gromadasti, debelo pločasti, a dijelom i tanko pločasti.

U povećem prostoru kamenoloma dolomiti se obično drobe i lome u oštrobridno kršje, čestice romboedarskih i ostalih poliedarskih oblika. Kamenolom „Ivanec“ temeljno se dijeli na sjeverni i južni dio, to je preodređeno topografijom terena, odnosno dubokim jarkom koji se pruža od zapada u pravcu istoka. Geološki, ovaj jarak možemo objasniti na razne načine. S jedne strane jarka pojavljuju se prebačeni slojevi u odnosu na drugu stranu. To se može objasniti teorijom boranja ili rasjedanjem, ako se sjeverna i južna strana kamenoloma promatraju kao krila bore.

Pridobivanje mineralne sirovine ostvaruje se bušenjem i miniranjem. Odmirani materijal gravitacijski se transportira do utovarnih etaža gdje se dalje utovaruje u kamione te dalje transportira do oplemenjivačkog postrojenja za sitnjenje i klasiranje.

Konačni proizvod su standardne kamene frakcije  $>31,5$  mm, 31,5/16 mm, 16/8 mm, 8/4 mm, – 4 mm, kao i nestandardne 60/30 mm, 22/4 mm, 40/22 mm i – 30 mm.

Na sjevernoj strani (slika 4-2) pojavili su se problemi stabilnosti, ponajviše zbog izrazite slojevitosti, ali i ostalih diskontinuiteta koji su nepovoljno orijentirani u odnosu na slobodni prostor, a osim toga stalni problem predstavlja i topografija terena koja otežava razvijanje etažnog sustava. Ženko (1997) je proveo relativno detaljno snimanje strukturnog sklopa sjeverne strane kamenoloma pri čemu su izmjereni položaji 361 diskontinuiteta koji su podijeljeni u dvije osnovne grupe, tzv. „mikrosklop“ i „makrosklop“. Među diskontinuitete „mikrosklopa“ uvršteni su diskontinuiteti kraći od jednog metra, izdvojeni kao klivaž. Oni su ograničeni uglavnom unutar slojeva ili sustava drugih duljih diskontinuiteta. U diskontinuitete tzv. „makrosklopa“ spadaju oni koji su duži od jednog metra te se međusobno presijecaju. Oni su razvrstani u četiri podgrupe, a to su slojevitost, rasjedne zone, paraklaze i individualni diskontinuiteti.



Slika 4-2. Fotografija sjeverne strane kamenoloma „Ivanec“ (Berlančić 2013).

Gledajući topografiju terena „Ivanec“ svojim karakteristikama pripada visinskom tipu kamenoloma. Osnovni plato se nalazi na visini od 200 m n.m., s oznakom K200, od kojeg se dalje nastavlja sustav djelomično ili potpuno razvijenih etaža K225, K250, K275, K300 i K325. Geometrijski parametri etažnog sustava kamenoloma prikazani su u sljedećoj tablici (4-1).

Tablica 4-1. Geometrijski parametri kamenoloma „Ivanec“.

Visina etaže	$h = 25 \text{ m}$
Širina etažne ravnine	$B = 14 \text{ m}$
Širina etažne ravnine s transportom	$B = 25 \text{ m}$
Visinska razlika na sjevernoj strani kamenoloma	$H = 98 \text{ m}$
Visinska razlika na južnoj strani kamenoloma	$H = 138 \text{ m}$
Kut nagiba etažne kosine u radnom položaju	$\alpha_r = 70^\circ$
Kut nagiba etažne kosine u završnom položaju	$\alpha_z = 70^\circ$
Kut nagiba završne kosine na sjevernoj strani kamenoloma	$\alpha_z = 45^\circ$
Kut nagiba završne kosine na južnoj strani kamenoloma	$\alpha_z = 41^\circ$

#### 4.2. Proračun ravnine određene kutevima orijentacije diskontinuiteta $\alpha$ i $\beta$

Podaci o azimutu, nagibu, razmaku diskontinuiteta te iznosu standardne devijacije preuzeti su iz diplomskog rada „Statistička obrada geometrijskih značajki diskontinuiteta u stijenskim masama“ (Kljajić 2016). Preuzeti podaci vidljivi su u tablici 4-2.

Tablica 4-2. Podaci o položajima i razmacima skupova diskontinuiteta sa statističkim veličinama (Kljajić 2016)

Opis skupa	Azimut ( $^\circ$ )	Nagib ( $^\circ$ )	Standardna devijacija	Razmak (cm)
Slojevitost	154	46		83,24
			So	56,625
Skup 1	310	80		177,30
			So	105,577
Skup 2	69	83		140,28
			So	101,134
Skup 3	338	57		142,70
			So	72,436
Skup 4	62	80		126,35
			So	84,137

Tablica 4-3. Ulazni podaci za proračun bloka „d“ aplikacijom BlockEx.

<b>Diskontinuiteti</b>	<b>Azimut (°)</b>	<b>Nagib (°)</b>	<b>Razmak (cm)</b>
Slojevitost	154	46	83
Skup 1	310	80	177
Skup 2	69	83	140
Skup 3	338	57	143
Skup 4	62	80	126

Tablica 4-4. Ulazni podaci za proračun bloka „d+σ“ aplikacijom BlockEx.

<b>Diskontinuiteti</b>	<b>Azimut (°)</b>	<b>Nagib (°)</b>	<b>Razmak (cm)</b>
Slojevitost	154	46	140
Skup 1	310	80	283
Skup 2	69	83	241
Skup 3	338	57	215
Skup 4	62	80	210

Tablica 4-5. Ulazni podaci za proračun bloka „d-σ“ aplikacijom BlockEx.

<b>Diskontinuiteti</b>	<b>Azimut (°)</b>	<b>Nagib (°)</b>	<b>Razmak (cm)</b>
Slojevitost	154	46	27
Skup 1	310	80	72
Skup 2	69	83	39
Skup 3	338	57	70
Skup 4	62	80	42

Kao što se vidi iz priloženih tablica, razlikuju se jedino vrijednosti razmaka diskontinuiteta. U tablici 4-3 razmak je iste vrijednosti kao što je izračunao Kljajić (2016). Prilikom proračun bloka „d“ kreiraju se dvije paralelne ravnine kojima se razlikuje koeficijent D. Koeficijent D je ustvari vrijednost razmaka. Za jednu ravninu koeficijent D iznosi  $+d/2$ , odnosno ravnina je udaljena od ishodišta za iznos polovice srednjeg razmaka diskontinuiteta. Druga ravnina ima koeficijent D iznosa  $-d/2$ , odnosno ravnina je udaljena od ishodišta za negativan iznos polovice srednjeg razmaka diskontinuiteta, ta se ravnina zove komplementarna ravnina. U tablici 4-4 iznos razmaka diskontinuiteta rezultat je zbroja razmaka „d“ i vrijednosti standardne devijacije „σ“. U tablici 4-5 navedeni razmak je rezultat razlike srednjeg razmaka „d“ i vrijednosti standardne devijacije „σ“.

Nakon što smo unijeli podatke uslijedio je proračun vrijednosti jediničnih vektora pada ravnina (tablica 4-6), proračun vrijednosti jediničnih vektora normala ravnina (tablica 4-7) te proračun vrijednosti jediničnih vektora normala komplementarnih ravnina (tablica 4-8) za svaki blok pojedinačno. S obzirom da se radi o istom postupku za svaki od naša tri bloka, na sljedećim slikama (tablica 4-6, tablica 4-7, tablica 4-8) prikazani su samo rezultati proračuna ova tri parametra za blok „d“.

Tablica 4-6. Ulazni podaci i rezultati vrijednosti jediničnih vektora pada ravnina aplikacijom BlockEx.

	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	d (cm)	X	Y	Z
Slojevitost	154	46	83,24	0,30452	-0,62436	-0,71934
Skup 1	310	80	177,3	-0,13302	0,11162	-0,98481
Skup 2	69	83	140,28	0,11378	0,04367	-0,99255
Skup 3	338	57	142,7	-0,20403	0,50498	-0,83867
Skup 4	62	80	126,35	0,15332	0,08152	-0,98481

Tablica 4-7. Ulazni podaci i rezultati vrijednosti jediničnih vektora normala ravnina aplikacijom BlockEx.

	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	d/2 (m)	A	B	C	D
Slojevitost	154	44	0,4162	0,31534	-0,64654	0,69466	0,4162
Skup 1	310	10	0,8865	-0,75441	0,63302	0,17365	0,8865
Skup 2	69	7	0,7014	0,92662	0,35570	0,12187	0,7014
Skup 3	338	33	0,7135	-0,31417	0,77760	0,54464	0,7135
Skup 4	62	10	0,63175	0,869534	0,46234	0,17365	0,63175

Tablica 4-8. Ulazni podaci i rezultati vrijednosti jediničnih vektora normala komplementarnih ravnina aplikacijom BlockEx.

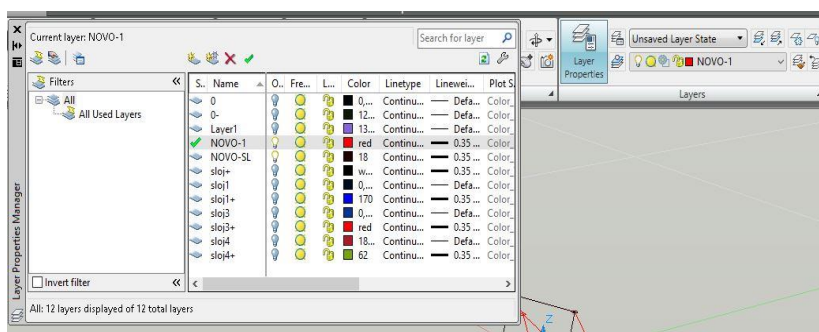
	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	d/2 (m)	A	B	C	D
Slojevitost	334	-44	0,4162	-0,31534	0,64654	-0,69466	0,4162
Skup 1	490	-10	0,8865	0,75441	-0,63302	-0,17365	0,8865
Skup 2	249	-7	0,7014	-0,92662	-0,35570	-0,12187	0,7014
Skup 3	518	-33	0,7135	0,31417	-0,77760	-0,54464	0,7135
Skup 4	242	-10	0,63175	-0,86953	-0,46234	-0,17365	0,63175



### 4.3. Proračun volumena bloka

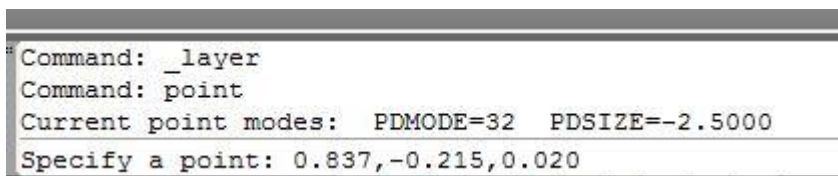
#### 4.3.1. Unos koordinata točkica i konačan izgled bloka

Najprije smo obavili postavljanje sloja (Layera). Na jednom sloju nalaze se objekti crtanja koji pripadaju istoj skupini koju smo kreirali na nama logičan način. Odabrali smo ukupno šest novih slojeva za prvi i treći blok te pet novih slojeva za drugi blok (slika 4-3).



Slika 4-3. Postavljanje sloja (layera).

Unosili smo točke bloka tako što smo u naredbenu traku upisali „point“ te unijeli koordinate točkica (X,Y,Z) (slika 4-4).



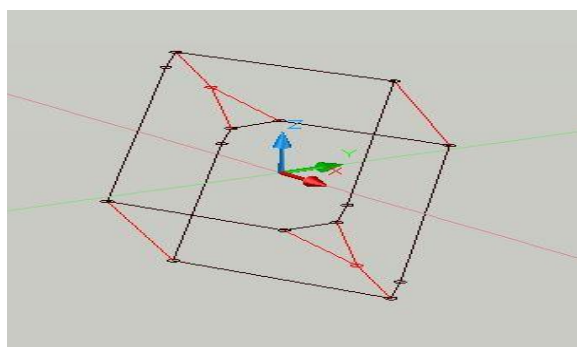
Slika 4-4. Unos koordinata točkica.

Aplikacijom BlockEx dobili smo podatke da bloku „d“ pripada 48 točkica, bloku „d+σ“ pripada 36 točkica, a bloku „d-σ“ 48 točkica. S obzirom da je podosta točkica iste vrijednosti (što možemo vidjeti u poglavlju Prilozi), u tablici 4-9 prilažem 16 različitih točkica bloka „d“, u tablici 4-10 12 različitih točkica bloka „d+σ“ te u tablici 4-11 možemo vidjeti 16 različitih točkica bloka „d-σ“.

Tablica 4-9. Popis pripadajućih koordinata bloka „d“.

Br.Točke	Koordinate		
	X	Y	Z
1	0,837	-0,215	0,020
2	0,890	-0,313	-0,097
3	0,319	0,441	0,865
4	-0,851	-0,070	0,920
5	0,715	-0,497	-0,188
6	-0,799	-0,166	0,807
7	-0,217	-0,904	-0,144
1'	-0,715	0,497	0,188
2'	-0,890	0,313	0,097
3'	0,799	0,166	-0,807
4'	0,851	0,070	-0,920
5'	0,217	0,904	0,144
6'	-0,837	0,215	-0,020
7'	-0,319	-0,441	-0,865
9	-0,898	0,186	0,526
10'	0,898	-0,186	-0,526

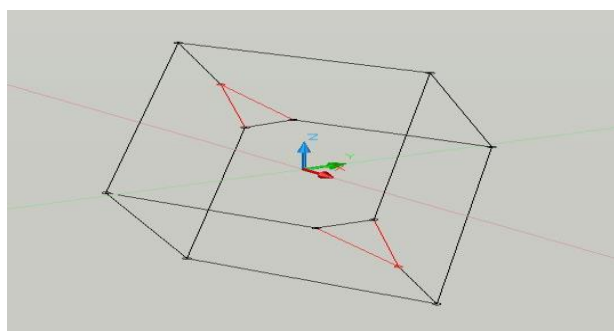
Spojili smo točke koje pripadaju istom skupu, koje čine diskontinuitet. Nakon unosa svih točaka, smisleno smo spojili sve u jedan blok (slika 4-5, slika 4-6, slika 4-7).



Slika 4-5. Izgled bloka „d“ u programu AutoCAD.

Tablica 4-10. Popis pripadajućih koordinata bloka „d+σ“.

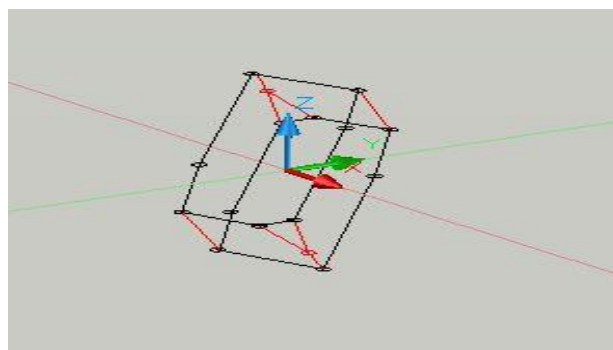
Br.Točke	Koordinate		
	X	Y	Z
1	0,584	0,666	1,361
2	-1,395	-0,199	1,455
3	1,471	-0,458	-0,087
4	1,203	-0,739	-0,227
5	-0,412	-1,444	-0,151
1'	-1,203	0,739	0,227
2'	-1,471	0,458	0,087
3'	0,412	1,444	0,151
4'	1,395	0,199	-1,455
5'	-0,584	-0,666	-1,361
7	-1,493	0,245	0,763
8'	1,493	-0,245	-0,763



Slika 4-6. Izgled bloka „d+σ“ u programu AutoCAD.

Tablica 4-11. Popis pripadajućih koordinata bloka „d-σ“.

Br.Točke	Koordinate		
	X	Y	Z
1	0,140	0,108	0,228
2	0,296	-0,183	-0,113
3	0,054	0,216	0,368
4	-0,287	0,067	0,384
5	0,226	-0,256	-0,149
6	-0,128	-0,230	0,036
7	-0,022	-0,364	-0,138
1'	-0,226	0,256	0,149
2'	-0,296	0,183	0,113
3'	0,128	0,230	-0,036
4'	0,287	-0,067	-0,384
5'	0,022	0,364	0,138
6'	-0,140	-0,108	-0,228
7'	-0,054	-0,216	-0,368
9	-0,299	0,132	0,284
10'	0,299	-0,132	-0,284



Slika 4-7. Izgled bloka „d-σ“ u programu AutoCAD.

#### 4.3.2. Proračun volumena bloka računalnim programom AutoCAD

Potrebno je sve točke bloka pospajati s plohami. Plohe se definiraju s tri točke. Kada se pospaja cijeli volumen s plohami onda se sljedećom procedurom može izračunati vrijednost volumena bloka. Najprije smo koristili osnovne naredbe programa kako bi smo stvorili optimalne uvjete za rad. Naredbe *osnap*, *endpoint*, *node* poslužile su nam za precizno vezivanje završnih točaka.

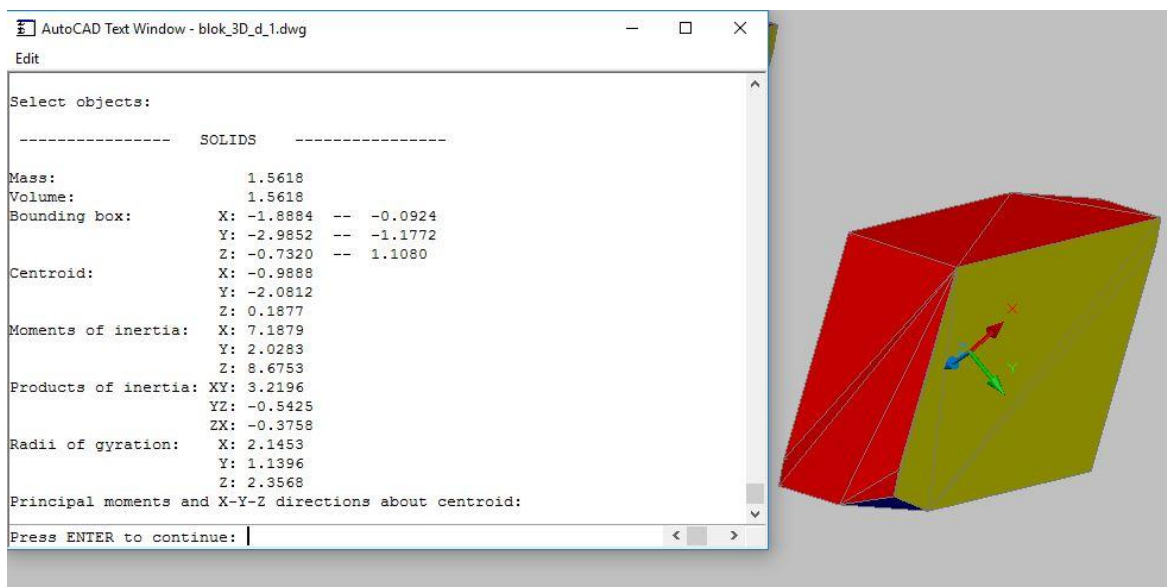
Koristili smo naredbu *Vports* kako bi smo podijelili monitor na onoliko dijelova koliko je potrebno kako bi smo imali lakši pregled onoga što radimo.

Za proračun volumena koristimo naredbe *3Dface*, čiji je zadatak spajanje trostranih ili četverostranih površina u 3D prostoru; zatim naredbu *Convtsurface*, ona je potrebna da označene objekte pretvara u površine; sljedeća naredba je *Union*, čiji je primarni zadatak spojiti odabrane plohe u jedan objekt; pretposljednja naredba je *Sculpt*, služi za selektiranje samo jedne plohe;

Vrijednost volumena dobivamo nakon unosa naredbe *massprop*.

#### 4.3.2.1. Volumen bloka „d“

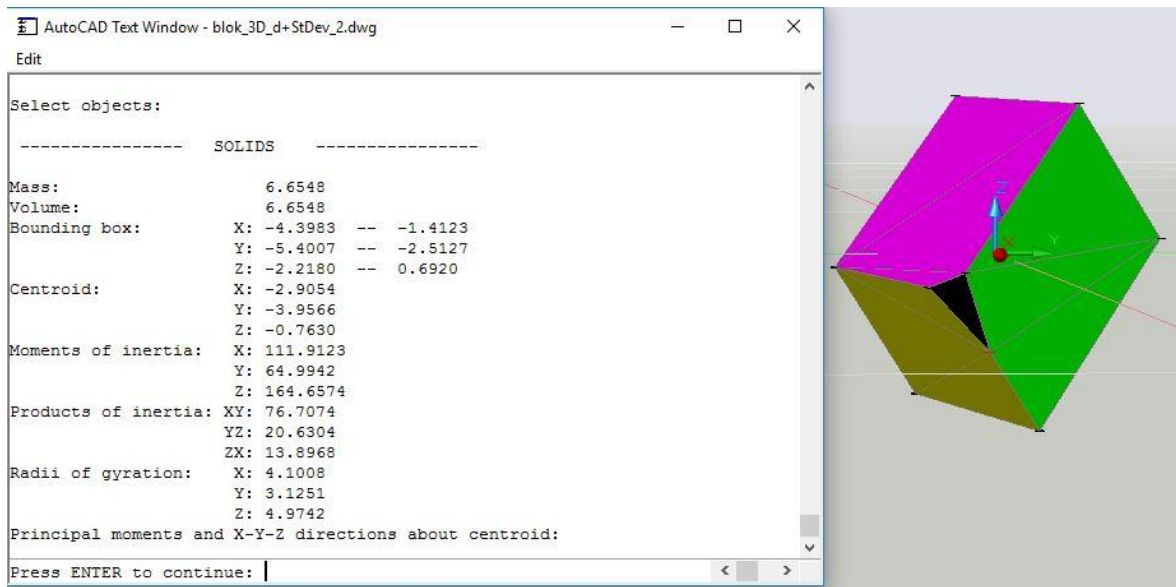
Volumen bloka „d“ iznosi  $1,5618 \text{ m}^3$ , to ga čini po volumenu i koordinatama srednjim po veličini blokom u ovom zadatku (slika 4-8). S obzirom na iznos volumena, ovaj blok pripada kategoriji velikih blokova prema klasifikaciji Palmstroma (1995).



Slika 4-8. Proračun volumena bloka „d“: slika bloka „d“ s rezultatima volumena.

#### 4.3.2.2. Volumen bloka „d+σ“

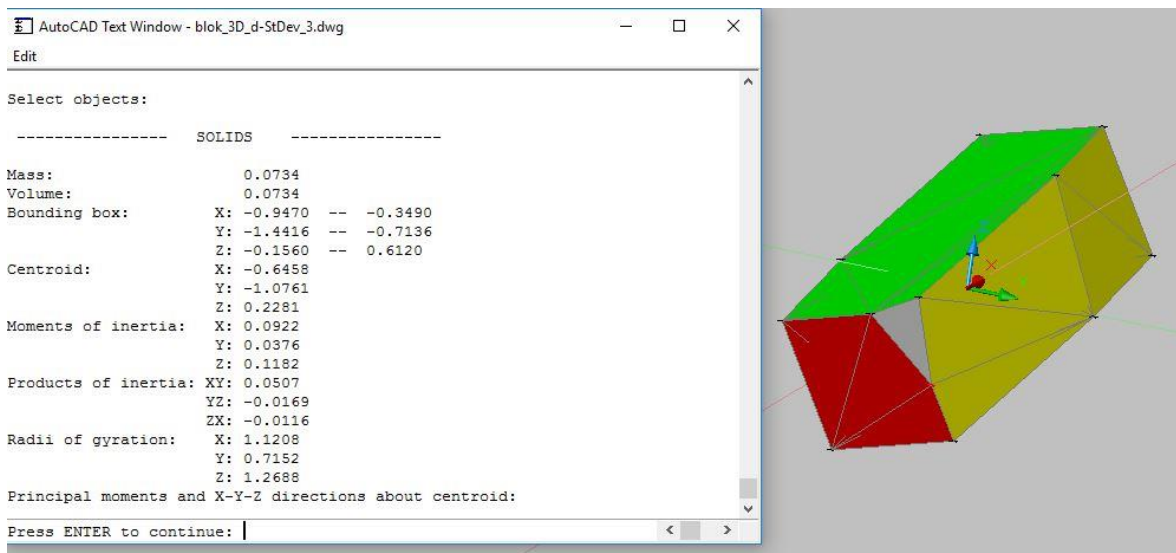
Volumen bloka „d+σ“ iznosi 6,6548 m<sup>3</sup>, to ga čini po volumenu i koordinatama najvećim po veličini blokom u ovom zadatku (slika 4-9). S obzirom na iznos volumena, ovaj blok pripada kategoriji velikih blokova prema klasifikaciji Palmstroma (1995).



Slika 4-9. Proračun volumena bloka „d+σ“: slika bloka „d+σ“ s rezultatima volumena.

#### 4.3.2.3. Volumen bloka „d-σ“

Volumen bloka „d-σ“ iznosi 0,0734 m<sup>3</sup>, to ga čini po volumenu i koordinatama najmanjim po veličini blokom ovog diplomskog rada (slika 4-10). S obzirom na iznos volumena, ovaj blok pripada kategoriji umjereno malih blokova prema klasifikaciji Palmstroma (1995).



Slika 4-10. Proračun volumena bloka „d- $\sigma$ “: slika bloka „d- $\sigma$ “ s rezultatima volumena.

#### 4.4. Analiza i usporedba dobivenih rezultata

Jednostavne metode daju često previše grube i loše rezultate, dok s druge strane kod složenih metoda potrebno je daleko veći broj ulaznih podataka ili su praktično zbog troškova njihove provedbe one neprihvatljive.

U slučaju koji je razmatran u ovom radu glavni problem je procjena veličina i oblika blokova u stijenskoj masi, nije nam važna geometrija samog zahvata. Osnovni princip nove metode je postavljanje relativne geometrije bloka, a ne apsolutne. U primijenjenoj metodi prilikom proračuna bloka „d“ korišteno je pet setova diskontinuiteta, jedan od setova je izražena slojevitost. Svaki diskontinuitet se sastoji od dvije međusobno paralelne plohe, što ujedno znači da smo imali ukupno deset ploha s obzirom na broj setova. Prilikom proračuna bloka „d+ $\sigma$ “ i blok „d- $\sigma$ “ imali smo također pet setova diskontinuiteta. Kod proračuna ova dva bloka, svaki diskontinuitet se sastojao od jedne plohe, dakle imali smo ukupno pet ploha po bloku stijenske mase. Razlog leži u tome što je kod bloka „d“ stvorena i komplementarna ravnina, pola razmaka smo nanijeli iznad ishodišta koordinatnog sustava (0,0,0), a polovicu razmaka ispod ishodišta. Razmak bloka „d+ $\sigma$ “ jednak je zbroju vrijednosti srednjeg razmaka i standardne devijacije, vrijednost je dakle znatno veća u odnosu na blok „d“. Razlika u vrijednosti vidljiva je po iznosu koordinata točaka bloka te po iznosu volumena koji ovaj blok čini najvećim pri proračunu naše metode.

Razmak bloka „ $d-\sigma$ “ jednak je vrijednosti razlike srednjeg razmaka i standardne devijacije, radi se o znatno manjoj vrijednosti u odnosu na ostala dva bloka. S obzirom na manje vrijednosti razmaka, koordinate točaka, a i volumen su manjeg iznosa od ostala dva bloka što ga čini i najmanjim blokom po volumenu u proračunu naše metode. Kod metode prema Palmstromu (1995) dobivamo prosječni volumen bloka zbog prosječne vrijednosti razmaka za svaki skup, to je dobro kao orijentacijski podatak ali ne sadrži nikakvu informaciju o distribuciji veličina koje se mogu očekivati u promatranoj stijenskoj masi. Za proračun prosječnog volumena prema Palmstromu potrebni su nam podaci o najkraćoj i najdužoj dimenziji bloka, faktor oblika te volumetrijski broj pukotina koji se dobiva na temelju prosječnih razmaka svakog utvrđenog diskontinuiteta.

Berlančić (2013) vrši procjenu distribucije veličina i oblika blokova *in situ* u *open source* programskoj okolini Octave, proračunu koji se u suštini svodi na manipuliranje vektorima, matricama i sustavima linearnih jednadžbi. Ovaj pristup srodan je s Wangovom metodom presijecanja. Početno se odabire reprezentativni volumen promatranja i formira se model.

Definiranim setovima diskontinuiteta presijeca se odabrani volumen, čime se dobiva simulirana stijenska masa koja se iterativnim postupcima rastavlja na sastavne dijelove, odnosno blokove, pri čemu se proračunava veličina i kvantificira oblik svakog dobivenog bloka. Osim što je presijecanje modela moguće provesti s ulaznim setovima diskontinuiteta, u proračun je moguće uvesti i individualne diskontinuitete, primjerice značajne nasumične pukotine, rasjede i ostale strukture. Povezanost ovih dviju metoda je u tome što je prosječni volumen bloka u prvom koraku izračunat na temelju empirijskog izraza po metodi prema Palmstromu (1995) koji dovodi u vezu faktor oblika i volumetrijski broj pukotina. Nova metoda je ustvari kombinacija prethodno spomenutih metoda. U ovom smo radu napravili usporedbu rezultata dobivenih našom, pojednostavljenom metodom i metodom po Palmstromu (1995). Dobiveni rezultati nalaze se u tablici 4-12.



Tablica 4-12. Rezultati usporedbe naše metode i metode po Palmstromu (1995).

Blok	Volumetrijski broj pukotina	Faktor oblika	Prosječni volumen bloka	Volumen našom metodom
	$J_v (-)$	$\beta$	$V_b (m^3)$	$V (m^3)$
d	3,98	33	0,5234	1,5618
		46	0,7296	
		59	0,9358	
d+ $\sigma$	2,42	33	2,3285	6,6548
		46	3,2457	
		59	4,1630	
d- $\sigma$	11,47	33	0,0219	0,0734
		46	0,0305	
		59	0,0391	

Pojedinačno smo izračunali volumetrijski broj pukotina za sva tri bloka po izrazu (3-18) sa srednjim vrijednostima razmaka za svaki set prema tablicama 4-3, 4-4, 4-5.

Najveći iznos je dobiven za blok „d- $\sigma$ “, što ga svrstava u visok stupanj razlomljenosti stijenske mase, a najmanji za blok „d+ $\sigma$ “, što ga svrstava u nizak stupanj razlomljenosti stijenske mase. Vrijednost volumetrijskog broja pukotina za blok „d“ iznos 3,98 i to ga svrstava u blokove s umjerenim stupnjem razlomljenosti stijenske mase.

Budući da je na sjevernoj strani kamenoloma izražena slojevitost dominantni oblici blokova bili bi prema tablici (3-3) umjereno izduženi i umjereno pločasti blokovi, za koje se faktor oblika kreće u rasponu od 33-59. Uzeta je minimalna, srednja i maksimalna vrijednost ovog intervala koja iznosi  $\beta = [33 \ 46 \ 59]$ . Prosječni volumen bloka  $V_b$  izračunat je prema izrazu (3-19), a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4-12.

Raspon vrijednosti volumena po metodi Palmstroma (1995) za blok „d“ iznosi od 0,52 m<sup>3</sup> do 0,93 m<sup>3</sup>, za blok „d+ $\sigma$ “ iznosi od 2,33 m<sup>3</sup> do 4,16 m<sup>3</sup> te za blok „d- $\sigma$ “ iznosi 0,02 m<sup>3</sup> do 0,04 m<sup>3</sup>. Raspon vrijednosti volumena po našoj metodi za blok „d“ ima iznos 1,56 m<sup>3</sup>, za blok „d+ $\sigma$ “ ima iznos 6,65 m<sup>3</sup>, a za blok „d- $\sigma$ “ iznosa je 0,07 m<sup>3</sup>.

Klasifikacijom po Palmstromu (1995) volumeni bloka „d“ kategorizirani su kao veliki blokovi (raspon 0,2 – 10 m<sup>3</sup>), volumeni bloka „d+ $\sigma$ “ također su kategorizirani kao veliki blokovi, dok su volumeni bloka „d- $\sigma$ “ kategorizirani kao umjereno mali blokovi (raspon 0,01 – 0,2 m<sup>3</sup>).

Usporedbom rezultata dolazimo do zaključka da se vrijednosti po obje metode nemalo razlikuju ali zato pripadaju u istu kategoriju veličine po navedenoj klasifikaciji.

## 5. ZAKLJUČAK

Rezultate distribucije veličina i oblika blokova promatrane stijenske mase nemoguće je ostvariti bez temeljito provedenog istraživanja te analize geometrijskih značajki diskontinuiteta. Prirodnu geometriju izraženu orijentacijom, razmakom i postojanošću diskontinuiteta potrebno je za svaki projekt nanovo utvrditi. Razlog utvrđivanja je što svaka stijenska masa predstavlja jedinstveni sustav.

Glavni zadatak ovog rada bio je provjeriti da li je moguće pojednostavljenom metodom odrediti točke bloka u stijenskoj masi te izračunati njegov volumen. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je proračun pojednostavljenom metodom moguć. Proračun parametara potrebnih za dobivanje volumena bloka proveden je pomoću osnovnih matematičkih izraza. Svi korišteni izrazi objedinjeni su u aplikaciju BlockEx, koja uvelike olakšava proračun. Ulazni podaci su podaci o azimutu, nagibu i razmaku diskontinuiteta. Izlazni podaci su pripadajuće točke bloka pomoću kojih u konačnici dobivamo željeni volumen bloka. Problematika proračuna volumena bloka može se riješiti na dva načina, matematičkim izrazima ili putem računalnog programa AutoCAD i njegove pripadajuće aplikacije Civil3D. Zbog jednostavnosti, odabran je Civil3D kako bi se dobio pravilan izgled bloka. Volumen bloka izračunat je naredbama *3Dface*, *convtosurface*, *union*, *sculpt* i *massprop*. U ovom radu su za primjer izračunati volumeni za tri bloka. Razlikovali su se ulazni parametri razmaka diskontinuiteta. Za prvi blok, odnosno blok „d“ za razmak diskontinuiteta uzeta je vrijednost srednjeg razmaka preuzetog iz prijašnjih diplomskih radova. Drugi blok, odnosno blok „d+σ“ dobiven je promjenom parametra razmaka diskontinuiteta. Vrijednost koja se koristila bila je vrijednost zbroja srednjeg razmaka „d“ i vrijednosti standardne devijacije „σ“, također preuzetog iz prijašnjih diplomskih radova. Treći blok, odnosno blok „d-σ“ pod parametrom razmak uzela se razlika srednjeg razmaka i standardne devijacije. Na temelju razlike vrijednosti razmaka diskontinuiteta dobivene su velike razlike vrijednosti volumena ali i oblika blokova. Blok „d+σ“ ima najveći volumen koji iznosi 6,6548 m<sup>3</sup>, dok blok „d-σ“ ima najmanji volumen iznosa 0,0734 m<sup>3</sup>. Iznos volumena bloka „d“ je 1,5618 m<sup>3</sup>. S obzirom na dobivenu srednju vrijednost volumena, blokovi „d+σ“ i „d“ kategorizacijom prema Palmstromu (1995) pripadaju kategoriji velikih blokova, a blok „d-σ“ umjereno malih blokova.

Primjenom pojednostavljene metode određivanja točaka bloka u stijenskoj masi te izračuna njegovog volumena ustanovili smo njenu vrlo visoku efikasnost u rješavanju postavljenog zadatka. Iz čega proizlazi da se prilikom izračuna volumena bloka, uz druge raspoložive i provjerene metode, možemo u potpunosti osloniti na pojednostavljenu metodu izračuna čime se ona pokazala barem jednako relevantna i rezultatski validna.

## 6. LITERATURA

Aler, J., du Mouza, J., Arnould, M. (1996): Measurement of the fragmentation efficiency of rock mass blasting and its mining applications. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* V. 33 No. 2, str. 125-139.

Berlančić, D. (2013): Procjena distribucije veličina i oblika blokova u stijenskoj masi. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Davis, G. H., Reynolds, S. J. (1996): *Structural geology of rocks and regions*. 2nd edition by J. Wiley, University of California, California.

Deere, D. U. (1964): Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering*. Vol.1, No.1, str. 16-22.

Dimitrijević, M.D. (1995) *Geologija Jugoslavije*. Geoinstitut, Beograd, str.205.

Đokić, Z. (2006): Elaborat o rezervama tehničko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju „Ivanec“. Zagreb: Viadukt d.d.

Franklin, J. A. (1970): Observations and tests for engineering description and mapping of rocks, *Proc. 2nd Int. Cong. Rock Mech.*, Belgrade, 1, str. 1-3.

Franklin, J. A., Dusseault, M. B. (1989): *Rock Engineering*. Edition by McGraw-Hill, limited edition. University of Michigan, Michigan.

Goodman, R. E., Shi, G. (1985): *Block Theory And Its Application To Rock Engineering*. New Jersey: Prentice – Hall.

Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Smith, A. G. (2004): *A Geologic Time Scale*. Published by Cambridge University Press, Cambridge.

Hammah, R.E., Curran, J.H. (1998) Fuzzy cluster algorithm for the automatic identification of joint sets. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 35 (1998), str. 889-905.

Hudson, J.A., Harrison, J.P. (1992): *Engineering Rock Mechanics*. Pergamon Press, Oxford.

Hudson, J. A., Priest, S. D. (1979): Discontinuities and rock mass geometry. *Int. J. Rock Mec. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol 16, 1979, str. 339-362.

ISRM (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 15 (6), str. 319-368.

- Kalenchuk, K. S., Diederichs, M. S., McKinnon, S. (2006): Characterizing block geometry in jointed rockmasses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43 (2006), str. 1212–1225.
- Kazi, A., Sen, Z. (1985): Volumetric RQD: An indeks of rock quality. *Proc. Of the Int. Symp. Fundam. Rock Joints*, Bjorkliden, Sweden, str. 95-102.
- Kljajić, P. (2016): Statistička obrada geometrijskih značajki diskontinuiteta u stijenskim masama. *Diplomski rad*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- Lu, P., Latham, J.-P. (1999): Developments in the assessment of in-situ block size distributions of rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32 (1), str. 29-49.
- Lučić, M. (2007): Priručnik za tehničko crtanje na računalu AutoCAD. Osijek: Mato Lučić.
- Mihalić, S. (2000): Prilagodba normi za inženjerskogeološko kartiranje u GIS-u. *Disertacija*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Mihalić, S. (2002). *Inženjerska geologija: osnove i primjena*. Udžbenik i skripta. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Palmstrom, A. (1985): Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. „*Proc. Int. Symp. Fundamentals of Rock Joints*“, Bjorkliden, Sweden, 1985, str. 103-110.
- Palmstrom, A. (1995): RMI – rock mass characterization system for rock engineering purposes. *Ph.D. Thesis*. Oslo University, Oslo.
- Palmstrom, A., Singh, R. (2001): The deformation modulus of rock masses – comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunneling and underground space technology*, vol.16, no. 3, str. 115-131, Norway.
- Palmstrom, A. (2005): Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunneling and Underground Space Technology*, 20 (2005), str. 362-377.
- Priest, S. D., Hudson, J. (1976): Discontinuity spacing in rock, *Int. J. Rock Mech. and Mining Science*, Vol. 13, str. 135-148
- Sen, Z., Essa, E. A. (1992): Rock Quality Charts for Log Normally Distributed Block Sizes, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Pergamon, Vol. 29, No. 1, str. 1-12.
- Wang, C.D., Tzeng, C.S., Pan, E. & Liao, J.J. (2003): Displacements and stresses due to a vertical point load in an inhomogeneous transversely isotropic half-space. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40(5): str 667-685.

Ženko, T., Matjašić, I. (1997): Ekspertiza inženjersko-geoloških obilježja stijene na sjevernoj strani kamenoloma „Ivanec“. Zagreb: Geokon d.o.o.

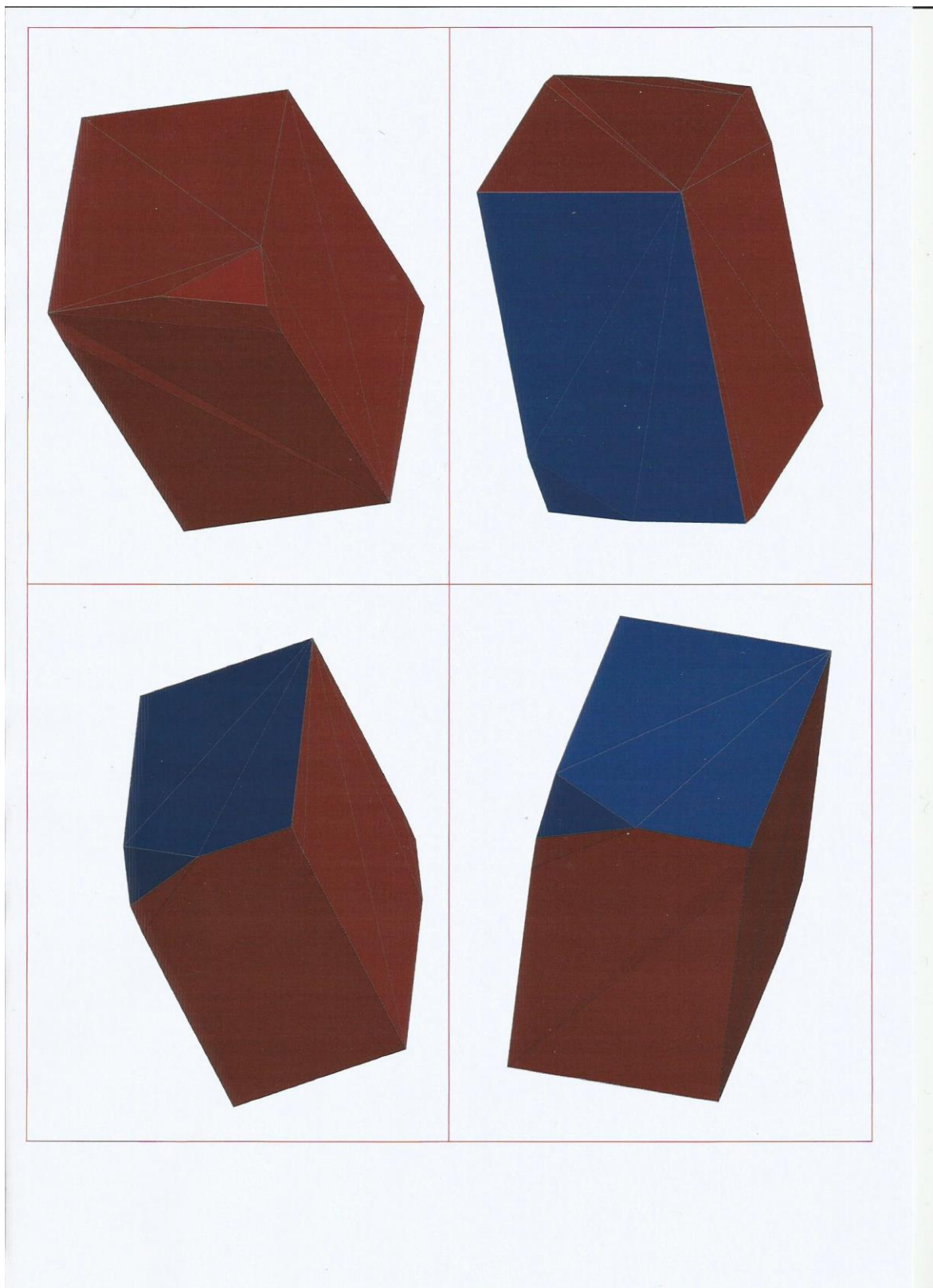
# **PRILOZI**



## Prilog 1. Popis koordinata pripadajućih točaka za blok „d“

Skup	Br.Točke	Koordinate		
		X	Y	Z
Sloj +	1	0,837	-0,215	0,020
	2	0,890	-0,313	-0,097
	3	0,319	0,441	0,865
	4	-0,851	-0,070	0,920
	5	0,715	-0,497	-0,188
	6	-0,799	-0,166	0,807
	7	-0,217	-0,904	-0,144
Sloj -	1'	-0,715	0,497	0,188
	2'	-0,890	0,313	0,097
	3'	0,799	0,166	-0,807
	4'	0,851	0,070	-0,920
	5'	0,217	0,904	0,144
	6'	-0,837	0,215	-0,020
	7'	-0,319	-0,441	-0,865
Skup 1+	8	-0,715	0,497	0,188
	9	-0,898	0,186	0,526
	10'	-0,890	0,313	0,097
Skup 1-	8'	0,890	-0,313	-0,097
	9'	0,715	-0,497	-0,188
	10'	0,898	-0,186	-0,526
Skup 2+	11	0,837	-0,215	0,020
	12	0,890	-0,313	-0,097
	13	0,799	0,166	-0,807
	14	0,851	0,070	-0,920
	15	0,898	-0,186	-0,526
Skup 2-	11'	-0,851	-0,070	0,920
	12'	-0,799	-0,166	0,807
	13'	-0,898	0,186	0,526
	14'	-0,890	0,313	0,097
	15'	-0,837	0,215	-0,020
Skup 3+	16	0,319	0,441	0,865
	17	-0,851	-0,070	0,920
	18	-0,715	0,497	0,188
	19	-0,898	0,186	0,526
	20	0,217	0,904	0,144
Skup 3-	16'	0,715	-0,497	-0,188
	17'	-0,217	-0,904	-0,144
	18'	0,851	0,070	-0,920
	19'	0,898	-0,186	-0,526
	20'	-0,319	-0,441	-0,865
Skup 4+	21	0,837	-0,215	0,020
	22	0,319	0,441	0,865
	23	0,799	0,166	-0,807
	24	0,217	0,904	0,144
Skup 4-	21'	-0,799	-0,166	0,807
	22'	-0,217	-0,904	-0,144
	23'	-0,837	0,215	-0,020
	24'	-0,319	-0,441	-0,865

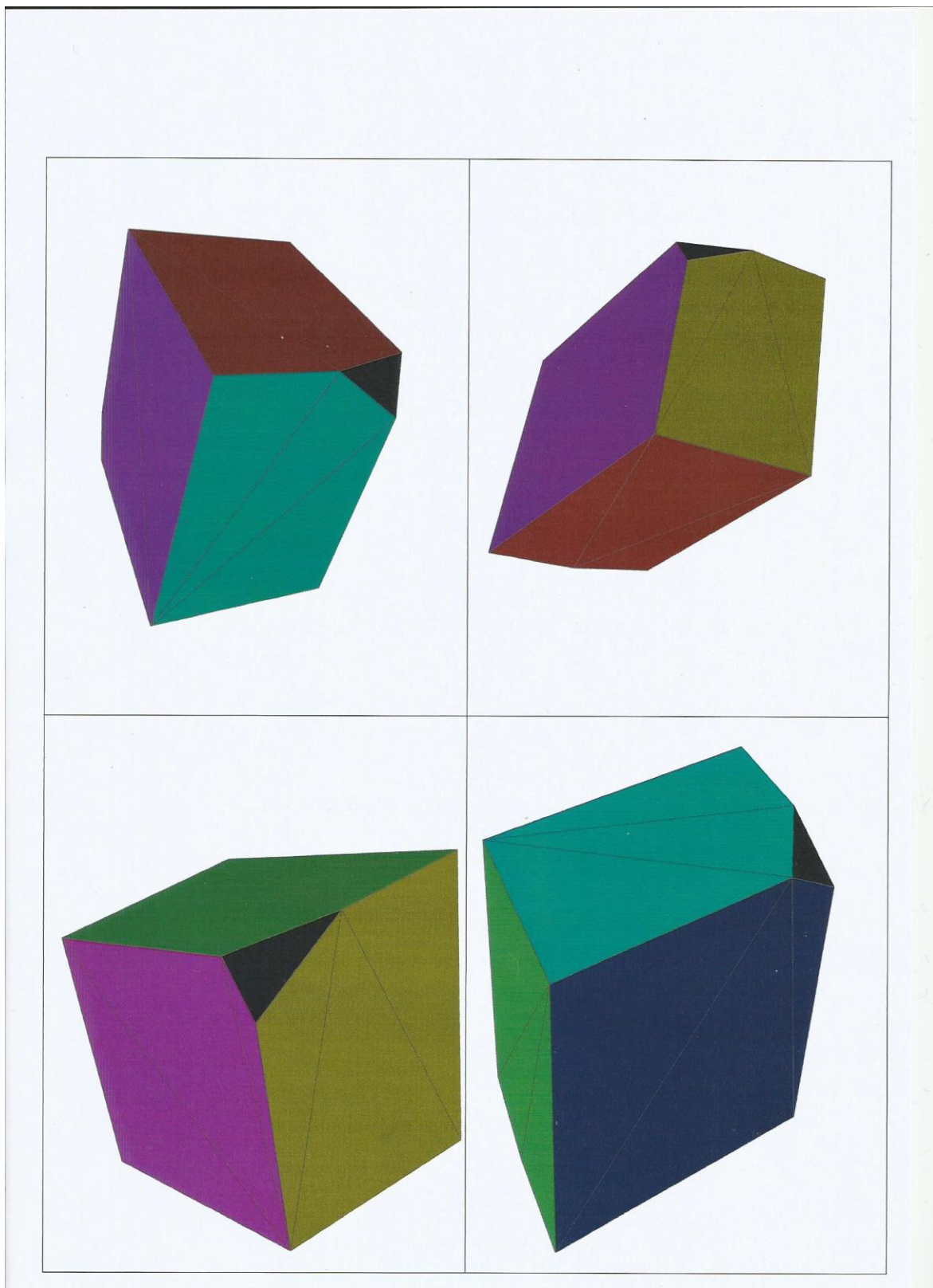
**Prilog 2. Izgled bloka „d“ u računalnom programu AutoCAD**



**Prilog 3. Popis koordinata pripadajućih točaka za blok „d+σ“**

Skup	Br.Točke	Koordinate		
		X	Y	Z
<b>Sloj +</b>	1	0,584	0,666	1,361
	2	-1,395	-0,199	1,455
	3	1,471	-0,458	-0,087
	4	1,203	-0,739	-0,227
	5	-0,412	-1,444	-0,151
<b>Sloj -</b>	1'	-1,203	0,739	0,227
	2'	-1,471	0,458	0,087
	3'	0,412	1,444	0,151
	4'	1,395	0,199	-1,455
	5'	-0,584	-0,666	-1,361
<b>Skup 1+</b>	6	-1,203	0,739	0,227
	7	-1,493	0,245	0,763
	8	-1,471	0,458	0,087
<b>Skup 1-</b>	6'	1,471	-0,458	-0,087
	7'	1,203	-0,739	-0,227
	8'	1,493	-0,245	-0,763
<b>Skup 3+</b>	9	0,584	0,666	1,361
	10	-1,395	-0,199	1,455
	11	-1,203	0,739	0,227
	12	-1,493	0,245	0,763
	13	0,412	1,444	0,151
<b>Skup 3-</b>	9'	1,203	-0,739	-0,227
	10'	-0,412	-1,444	-0,151
	11'	1,395	0,199	-1,455
	12'	1,493	-0,245	-0,763
	13'	-0,584	-0,666	-1,361
<b>Skup 4+</b>	14	0,584	0,666	1,361
	15	1,471	-0,458	-0,087
	16	0,412	1,444	0,151
	17	1,395	0,199	-1,455
	18	1,493	-0,245	-0,763
<b>Skup 4-</b>	14'	-1,395	-0,199	1,455
	15'	-0,412	-1,444	-0,151
	16'	-1,493	0,245	0,763
	17'	-1,471	0,458	0,087
	18'	-0,584	-0,666	-1,361

**Prilog 4. Izgled bloka „d+σ“ u računalnom programu AutoCAD**



## Prilog 5. Popis koordinata pripadajućih točaka za blok „d-σ“

Skup	Br.Točke	Koordinate		
		X	Y	Z
Sloj +	1	0,140	0,108	0,228
	2	0,296	-0,183	-0,113
	3	0,054	0,216	0,368
	4	-0,287	0,067	0,384
	5	0,226	-0,256	-0,149
	6	-0,128	-0,230	0,036
	7	-0,022	-0,364	-0,138
Sloj -	1'	-0,226	0,256	0,149
	2'	-0,296	0,183	0,113
	3'	0,128	0,230	-0,036
	4'	0,287	-0,067	-0,384
	5'	0,022	0,364	0,138
	6'	-0,140	-0,108	-0,228
	7'	-0,054	-0,216	-0,368
Skup 1+	8	-0,226	0,256	0,149
	9	-0,299	0,132	0,284
	10	-0,296	0,183	0,113
Skup 1-	8'	0,296	-0,183	-0,113
	9'	0,226	-0,256	-0,149
	10'	0,299	-0,132	-0,284
Skup 2+	11	0,140	0,108	0,228
	12	0,296	-0,183	-0,113
	13	0,128	0,230	-0,036
	14	0,287	-0,067	-0,384
	15	0,299	-0,132	-0,284
Skup 2-	11'	-0,287	0,067	0,384
	12'	-0,128	-0,230	0,036
	13'	-0,299	0,132	0,284
	14'	-0,296	0,183	0,113
	15'	-0,140	-0,108	-0,228
Skup 3+	16	0,054	0,216	0,368
	17	-0,287	0,067	0,384
	18	-0,226	0,256	0,149
	19	-0,299	0,132	0,284
	20	0,022	0,364	0,138
Skup 3-	16'	0,226	-0,256	-0,149
	17'	-0,022	-0,364	-0,138
	18'	0,287	-0,067	-0,384
	19'	0,299	-0,132	-0,284
	20'	-0,054	-0,216	-0,368
Skup 4+	21	0,140	0,108	0,228
	22	0,054	0,216	0,368
	23	0,128	0,230	-0,036
	24	0,022	0,364	0,138
Skup 4-	21'	-0,128	-0,230	0,036
	22'	-0,022	-0,364	-0,138
	23'	-0,140	-0,108	-0,228
	24'	-0,054	-0,216	-0,368

**Prilog 6. Izgled bloka „d-σ“ u računalnom programu AutoCAD**

