

Razvoj teorije blokova u stijenskom inženjerstvu

Rossi, Nicola; Mance, Marko; Kovačević, Meho-Saša

Source / Izvornik: **Common Foundations 2018 - uniSTem: 6th Congress of Young Researchers in the Field of Civil Engineering and Related Sciences, 2018, 208 - 214**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.31534/CO/ZT.2018.29>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:784875>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Razvoj teorije blokova u stijenskom inženjerstvu

Nicola Rossi¹, Marko Mance¹, Meho-Saša Kovačević¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska, {rossi; msk}@grad.hr

Sažetak

Klasična teorija blokova, službeno objavljena 1985. godine s objavom knjige „Block Theory and Its Application to Rock Engineering“ [1], sadrži niz pojednostavljujućih pretpostavki. Takve pretpostavke omogućile su stvaranje jednostavne metode koja uz prihvatljiva ograničenja daje zadovoljavajuće rezultate za inženjerske potrebe. Usprkos tome, tijekom godina se nastojalo unaprijediti klasičnu teoriju, kako bi se mogla akomodirati složenijim problemima, i/ili povećala pouzdanost proračuna realnijim opisivanjem stanja u stijenskoj masi. Cilj ovoga članka je napraviti pregled istraživanja provedenih u cilju unaprjeđenja određenih ograničenja klasične teorije blokova. Na temelju pregleda pretpostavki i ograničenja klasične teorije te dosadašnjih istraživanja, mogu se lakše identificirati područja za daljnji razvoj teorije blokova.

Ključne riječi: teorija blokova, razvoj, daljnja istraživanja, stijensko inženjerstvo

The development of block theory in rock engineering

Abstract

Classic block theory, officially established in 1985 with the publishing of the book “Block Theory and Its Application to Rock Engineering” [1], takes a lot of simplifying and restricting assumptions. Such assumptions allowed for a simple method which with acceptable restrictions gave satisfying results for engineering practice. Despite that, there have been many improvements throughout the years which try to accommodate for more complex problems and/or increase the overall reliability of the method. The scope of this paper is to give an overview of said improvements over the classic block theory. Based on the overview of assumptions of the classic theory and on the researches to date, it's possible to more easily identify areas of further research and improvement.

Keywords: block theory, improvement, further research, rock engineering

1. Uvod

Klasična teorija blokova nastala je kao relativno jednostavno rješenje za analizu kompleksnog problema ispadanja stijenskih blokova proizvoljnih oblika, pri površinskim ili podzemnim iskopima. Razvijena je kao alternativno rješenje kompleksnim i skupim fizičkim modelima te numeričkim analizama. U odnosu na njih, teorija blokova uvodi pojednostavljujuće pretpostavke koje omogućuju jednostavan opis i rješavanje zadanog problema uz zadovoljavajuću točnost za inženjerske svrhe. Metoda se uglavnom temelji na geometrijskim parametrima diskontinuiteta za formiranje blokova te analizu njihove stabilnosti, uz dodatak mehaničkih karakteristika diskontinuiteta u smislu kuta unutarnjeg trenja. Spomenuti geometrijski parametri odnose se na nagib (eng. *dip*), smjer nagiba (eng. *dip direction*), smjer pružanja diskontinuiteta (eng. *strike*), razmak diskontinuiteta (eng. *spacing*) te duljine njihovih tragova (eng. *trace length*). Presijecanjem diskontinuiteta različitog porijekla, veličina i karakteristika, nastaju različiti tipovi blokova u stijenskoj masi. Blokovi se kategoriziraju u 5 kategorija ovisno o njihovoj geometriji te položaju u stijenskoj masi [1]. Za svaki blok provjeravaju se uvjeti konačnosti i odstranjivosti na temelju kojih se razlikuju potencijalno kritični blokovi od stabilnih blokova. Potencijalno kritičnim blokovima pripadaju oni koji su ujedno konačni i odstranjivi te kojima se daljnjom analizom određuje stabilnost. Nestabilni blokovi na kojima je potrebno primijeniti mjere sanacije su pravi kritični blokovi. Budući da se blokovi stvaraju i unutar stijenske mase, a ne samo na kontaktu s površinom iskopa, ideja na kojoj se zasniva teorija blokova je da se osiguranjem stabilnosti prvog, kritičnog bloka, odnosno sprječavanjem njegovih pomaka, stabiliziraju i svi blokovi u stijenskoj masi iza njega. Odnosno, izmicanje kritičnoga bloka bi prouzrokovalo regresivan slom. Cilj je stoga odrediti sve kritične blokove na površini nekog iskopa te ih po potrebi stabilizirati.

Zbog svoje jednostavnosti i zadovoljavajućih rezultata za inženjerske potrebe, teorija blokova ima široku primjenu u stijenskom inženjerstvu, pri rješavanju problema vezanih za temeljenje na stijeni, procjeni potrebne podgrade u tunelogradnji, procjeni minimalnog razmaka dviju tunelskih cijevi, ocjeni utjecaja dimenzija podzemnog iskopa na cijenu podgrade, određivanje duljina sidara za stabilizaciju blokova, predviđanju najpovoljnijih smjerova iskopa tunela i kosina, predviđanju najpovoljnijeg nagiba kosina, itd. [2]. Jednostavnost teorije blokova proizlazi iz niza pojednostavljujućih pretpostavki navedenih u nastavku. Kako je teorija blokova razvijena krajem prošlog stoljeća, u međuvremenu su do sada razvijena mnoga proširenja kako bi se što vjerodostojnije definirali stijenski blokovi te opisalo njihovo ponašanje u stijenskoj masi. Cilj ovoga rada je upravo navesti ograničenja te prikazati neka značajna unaprjeđenja klasične teorije blokova koja su se postigla od njenog razvoja do danas.

2. Pretpostavke i ograničenja

Ograničenja u definiranju i rješavanju problema teorijom blokova se mogu podijeliti na 2 uzroka: ograničenja koji se odnose na prikupljanje podataka (greške u procjeni, mjerenju i nepoznatim uvjetima u stijeni koji nisu vidljivi na površini stijenske mase) te ograničenja

zbog same metode i pretpostavki. U ovom je radu analizirana druga skupina ograničenja. Pretpostavke klasične teorije blokova fokusiraju se na pojednostavljenju stvarnih uvjeta u stijeni u cilju formiranja metode primjenjive u inženjerskoj praksi, koristeći odabrane, relativno lako (i točno) mjerljive parametre. Goodman i Shi [1] definiraju 4 takve pretpostavke:

- I. Diskontinuiteti leže u ravnim plohama (ravninama);
- II. Diskontinuiteti se u potpunosti pružaju kroz promatrani volumen stijenske mase;
- III. Blokovi su apsolutno kruti;
- IV. Parametri diskontinuiteta i ravnina iskopa su deterministički parametri.

Već su na temelju osnovnih pretpostavki vidljiva neka ograničenja teorije blokova. Prva pretpostavka ograničava pružanje diskontinuiteta samo na jednu ravninu, čime se olakšava formulacija metode, ali ujedno zanemaruje mogućnost pojave zakrivljenih pukotina, odnosno stranica bloka (npr. granice slojeva). Zanemarivanje krutosti blokova i okolne stijenske mase analizu olakšava utoliko što isključuje sve posljedice deformiranja stijenske mase uslijed pomaka bloka te potrebu za definiranjem mehaničkog ponašanja stijenske mase. Također uklanja i statičku neodređenost bloka. Time se analiza svodi na relativno jednostavnu analizu krutih blokova na temelju prethodno definiranih geometrijskih (za određivanje bloka) i mehaničkih (za proračun stabilnosti) parametara. Kombinacija teorije blokova s numeričkim metodama bi omogućila uzimanje u obzir deformabilnost stijenske mase i blokova.

Potrebni geometrijski parametri svakoga diskontinuiteta određuju se relativno jednostavnim tehnikama u sklopu geološkog kartiranja, a poteškoće se javljaju tek u daljnjoj analizi prikupljenih podataka. Kao ulazni podatak u analizi teorijom blokova prihvaća se samo jedna vrijednost određenog parametra koji opisuje neki diskontinuitet. Ako postoji varijacija u parametrima kartiranih diskontinuiteta, postavlja se pitanje koje vrijednosti koristiti u analizi da bi se dobio relevantan prikaz stanja na terenu. S obzirom na to te na pretpostavku pružanja diskontinuiteta cijelim volumenom stijene, ovom se metodom dobivaju podaci samo o maksimalnoj veličini bloka, dok su očekivana veličina i učestalost pojavljivanja nepoznate.

Pored navedenih ograničenja koja se mogu izravno iščitati iz osnovnih pretpostavki, postoje razne druge stavke koje ograničuju primjenu metode. Na primjer, analiza stabilnosti blokova definirana je isključivo za slučaj klizanja, bez rotacije. Pretpostavljeno je da se takvo klizanje odvija samo preko jedne ili dvije stranice bloka (ravnine diskontinuiteta) koje su u kontaktu s okolnom stijenom. Budući da nema kontakta između stijenske mase i ostalih stranica, to znači da se sva otpornost ostvaruje samo na stranicama koje sudjeluju u klizanju (jedna ili dvije), čime se može znatno podcijeniti stvarna otpornost. Nadalje mehanički parametar za određivanje otpornosti u analizama stabilnosti je isključivo kut unutarnjeg trenja, stoga bi implementacija drugih kriterija određivanja posmične čvrstoće pridonijela točnijoj procjeni stabilnosti. Ocjenu postojećih kriterija za određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta dali su Singh i Basu [3]. U nastavku je dan pregled metoda različitih autora u cilju rješavanja navedenih ograničenja te unaprjeđenja teorije blokova.

3. Razvoj metode

3.1. Statističke metode u teoriji blokova

Statističke metode kod teorije blokova mogu se odnositi na razne faze analize, od analize podataka o diskontinuitetima do analiza stabilnosti. Kako je spomenuto u prethodnom poglavlju, u klasičnoj teoriji blokova se koriste jedinstvene vrijednosti nagiba, smjerova nagiba, razmaka i duljina tragova diskontinuiteta. S obzirom na to da u stvarnosti postoji varijacija tih parametara među različitim diskontinuitetima, formiraju se setovi diskontinuiteta prema sličnim geometrijskim karakteristikama. U cilju raspoznavanja diskontinuiteta koji pripadaju istom skupu, primjenjuju se metode grupiranja (eng. *clustering*), koje su predložili različiti autori u periodu od kasnih 70-ih do danas [4]. Nadalje se statističkom analizom varijacije parametara unutar jednog seta pomoću njihovih distribucija vjerojatnosti, dobivaju srednje vrijednosti koje nabolje opisuju pojedini set. Iako se tako odabire najbolja jedinstvena vrijednost svakog parametra pojedinog seta, i dalje u proračune ulazi isključivo jedna usrednjena vrijednost. Prilikom grupacije je potrebno imati na umu podjelu diskontinuiteta na mikropukotine, pukotine, plohe folijacija, slojne plohe, smične plohe te rasjede, jer su, ovisno o postanku, neki od njih podložni za statističke analize, dok se drugi analiziraju zasebno [4].

Probabilističke metode za analizu blokova počele su se razvijati ubrzo nakon objave klasične teorije, kojima su se nastojale uzeti u obzir varijacije i nesigurnosti parametara diskontinuiteta zbog vrlo jasnog nedostatka u korištenju deterministički određenih vrijednosti. Metoda koju su predložili Tyler i dr. [5] sastoji se od definiranja distribucija vjerojatnosti svakog geometrijskog parametra diskontinuiteta te formiranja proizvoljno velikog uzorka metodom uzorkovanja „Latin Hypercube“, koji služi za daljnju analizu. Pomoću računalnog programa razvijenog za tu svrhu formiraju se blokovi od diskontinuiteta konačnih dimenzija, čija se geometrija zatim uspoređuje s geometrijom samih diskontinuiteta u cilju otkrivanja može li se takav blok formirati ili ne. Za blok s mogućnošću formiranja se geometrijski provjerava mogućnost njegovog ispadanja (geometrijska stabilnost). Postupak se ponavlja s ostatkom vrijednosti iz slučajnog uzorka. U konačnici se statistički obrađuju rezultati da bi se dobili podaci o očekivanim dimenzijama bloka te vjerojatnosti pojavljivanja određenog bloka [5]. Opisani postupak zanemaruje korelaciju među različitim parametrima koja bi, u slučaju da postoji, mogla znatno utjecati na rezultate. U navedenoj metodi analizira se geometrija bloka te se razlikuju stabilni od potencijalno nestabilnih blokova, bez proračuna razine stabilnosti svakoga od njih. U cilju određivanja vjerojatnosti sloma, Zhao i dr. [6] su predložili probabilističku analizu stabilnosti blokova koja, pored uobičajenih vjerojatnosti formiranja geometrijski potencijalno nestabilnog bloka i vjerojatnosti sloma uslijed mehaničkih karakteristika, uzima u obzir i vjerojatnost nastupanja jednog od 3 tipa sloma kako je definirano klasičnom teorijom blokova. Napredak za ovu metodu bila bi implementacija ostalih tipova sloma, opisanih kao proširenje klasičnoj teoriji blokova u poglavlju 3.2.

3.2. Rotacija bloka

U klasičnoj teoriji blokova definirana su samo tri načina pomicanja bloka: ispadanje ili izdizanje, klizanje po jednoj ravnini, klizanje po dvije ravnine. Zasebne formulacije rotacije te klizanja i rotacije prizmatičnih blokova i klinova su postojale i prije razvoja teorije blokova, ali su tek kasnije implementirane u nju. Mauldon [7] je dodatno proširio teoriju blokova rješenjima rotacije tetraedralnih blokova s tri seta pukotina [2]. Rotacija bloka generalno uključuje nekoliko različitih tipova rotacije, a može nastupiti kao čista rotacija ili kao rotacija s klizanjem. Prvi tip je rotacija oko presječne ravnine stranice bloka i površine kosine (eng. *toppling*). Na sličan se način blok može rotirati oko samo jednog kuta koji je u kontaktu s površinom kosine oko bilo koje osi koja kroz njega prolazi. Isto kao i kod čiste rotacije, dva su sloma koji se odnose na kombinaciju rotacije i klizanja. Prvi je rotacija s torzijskim klizanjem gdje blok rotira oko osi okomite na ravninu površine kosine koja prolazi kroz neki vrh bloka. Drugi se odnosi na rotaciju koja se događa uslijed klizanja prilikom ispadanja iz stijenske mase [2]. Rješenja su implementirana u metode teorije blokova, odnosno vektorsku metodu i stereografsku projekciju. Za neke od specifičnih slučajeva klizanja ostaje problem definiranja posmične čvrstoće, u analitičkim ili numeričkim metodama proračuna.

3.3. Stabilnost kritičnog bloka

Kako je već spomenuto, analiza stabilnosti klasičnom teorijom blokova dopušta klizanje po jednoj ili maksimalno dvije ravnine, a razlog tome je pretpostavka da blok gubi kontakt sa stijenom na ostalim plohama. U stvari, u stanju granične ravnoteže, prije nego što dođe do pomaka bloka, blok i dalje ima kontakt sa stijenom preko svih stranica. Stoga u slučajevima pojave klinova ili tetraedralnih blokova na kosinama, rješenja prema klasičnoj teoriji daju zadovoljavajuće rezultate, međutim u slučaju blokova oblika poliedra s više od dvije stranice, u kontaktu sa stijenom će klasična teorija blokova podcijeniti njihovu stabilnost. Jiang i Zhou [8] su iznijeli formulaciju metode proračuna stabilnosti kompleksnijih blokova uzimajući u obzir raspodjelu normalnih i posmičnih sila po svakoj stranici bloka koja je u kontaktu sa stijenom. Metoda podrazumijeva diskretizaciju bloka na proizvoljan broj stupaca na kojima se provode kontrole statičke ravnoteže jednadžbama ravnoteže sila i momenata. Zbog potrebe za diskretizacijom bloka na velik broj stupaca radi povećanja točnosti metode, takva je metoda primjerena za računalne analize. Pored toga što metoda omogućuje proračun stabilnosti kompleksnijih blokova, daje i informaciju o smjeru klizanja bloka, što je u klasičnoj teoriji blokova bilo potrebno zasebno provjeriti [8]. Metoda je razvijena i verificirana na blokovima površinskih iskopa, stoga bi daljnji razvoj bio primjena na podzemne iskope.

3.4. Alati za provođenje analiza teorijom blokova

Analizu teorijom blokova moguće je provesti jednom od dvije postojeće metode: vektorska (analitička) metoda i stereografska projekcija (grafička metoda). Prednost grafičke metode je jednostavno i intuitivno provođenje analize te mogućnost vizualiziranja cijelog postupka i rezultata proračuna. Stereografska projekcija je metoda koja trodimenzionalni problem svodi na dvodimenzionalni, tako da se svi blokovi projiciraju na jednu ravninu, a zatim se za potrebe određenih analiza formiraju trodimenzionalni modeli blokova. U cilju stvaranja

intuitivnijeg prikaza analize teorijom blokova, Li i dr. [9] su razvili metodu za interaktivnu analizu teorijom blokova na 3D sferi. Metoda se bavi analizom blokova izravno u 3D prostoru, čime se izbjegava pretvaranje prvo u dvije pa nazad u tri dimenzije. Boljom vizualizacijom problema se postiže i bolje razumijevanje teorije blokova.

4. Zaključak

Primjena klasične teorije blokova ograničena je nizom pojednostavljujućih pretpostavki na kojima se temelji, a na čiji je račun od svoje objave do danas doživjela mnoga unaprjeđenja. S obzirom na to da se svako unaprjeđenje osvrće na specifičan problem unutar teorije blokova, za potrebe ovoga rada je kompletna analiza teorijom blokova podijeljena na 3 faze, za koje su u Tablici 1 rezimirani svi navedeni napreci te dani prijedlozi za daljnja istraživanja u svakom od tih područja. Mogućnost zadavanja zakrivljenih ploha diskontinuiteta te implementacija numeričkih metoda za uvažavanje deformabilnosti stijenske mase prilikom definiranja blokova, su područja koja nisu doživjela velik napredak, a čiji bi napredak utjecao na realnije otkrivanje potencijalno kritičnih blokova. Svaki napredak metode mora težiti održavanju jednostavnosti originalnog postupka uz dodatak točnijeg, preciznijeg i pouzdanijeg rješenja predmetnog problema te po mogućnosti implementiranju prethodnih napredaka.

Tablica 1. Objavljeni napreci i prijedlozi za daljnja istraživanja

Napreci		Prijedlozi za daljnja istraživanja
1) Prikupljanje i analiza geometrijskih i mehaničkih podataka o diskontinuitetima		
• Metode grupacije	• Statistička svojstva parametara diskontinuiteta	
2) Formiranje i analiza blokova		
• Statističke metode za formiranje blokova od različitih kombinacija diskontinuiteta, određivanje očekivanih dimenzija bloka te učestalosti njihovog pojavljivanja	• Mogućnost zadavanja zakrivljenih diskontinuiteta	
• Softveri za 3D analizu blokova		
3) Analiza geometrijske i mehaničke stabilnosti		
• Definirano više potencijalnih mehanizama sloma	• Definiranje posmične čvrstoće u specifičnim slučajevima sloma	
• Numeričke analize	• Unaprjeđenje metoda proračuna	
	• Uvažavanje karakteristika deformabilnosti stijenske mase	
	• Implementacija kompleksnijih modela posmične čvrstoće	

Literatura

- [1] Goodman, R. E., Shi, G.: Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 1985.
- [2] Goodman, R. E.: Block theory and its application, Géotechnique, 45(3), pp. 383-423, 1995, doi: 10.1680/geot.1995.45.3.383.
- [3] Singh, H. K., Basu, A.: Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities, Engineering Geology, 232, pp. 171-181, 2017, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.023.
- [4] Navratil, D.: Statistički model osnovnih geometrijskih značajki diskontinuiteta u mezozojskim karbonatnim stijinama, doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2011.

- [5] Tyler, D. B., Trueman, R., Pine, R. J.: A probabilistic method for predicting the formation of key blocks, *Mining Science and Technology*, 13, pp. 145-156, 1991, doi: 10.1016/0167-9031(91)91310-e.
- [6] Zhao H., Li, Z., Kong, C. S.: Probabilistic Method to Determine the Overall Rock Block Failure Based on Failure Mode, *Engineering Transactions*, 64(1), pp. 105-113, 2016.
- [7] Mauldon, M: Rotational failure modes in jointed rock: a generalization of block theory, PhD thesis, University of California, 1992 (prema Goodman [2]).
- [8] Jiang, Q., Zhou, C.: A rigorous solution for the stability of polyhedral rock blocks, *Computers and Geotechnics*, 90, pp. 190-201, 2017, doi: 10.1016/j.compgeo.2017.06.012.
- [9] Li, J., Xue, J., Xiao, J., Wang, Y.: Three Dimensional Sphere Analysis Method of Block Theory, 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010), Taiyuan, pp. V1-578-V1-582., doi: 10.1109/ICCASM.2010.5620625.