



# Sadašnje spoznaje o ispitivanju vlačne čvrstoće stijena uporabom brazilskoga testa

Zlatko Briševac<sup>1</sup>, Trpimir Kujundžić<sup>1</sup>, Sandi Čajić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

<sup>2</sup> Črnomerečki potok 23, 10 000 Zagreb

## Sažetak

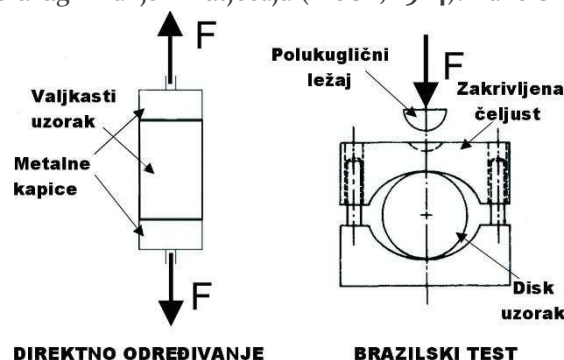
Vlačna čvrstoća u mehanici stijena svojstvo je koje se znatno češće određuje indirektno (neizravno) nego direktno (izravno). U ovome radu prikazan je povijesni pregled razvoja indirektna metode ispitivanja zvane brazilski test od njezina nastanka 1943. god. do današnjih dana. Upućuje se na neke aspekte koji su bitni za tumačenje rezultata brazilskoga testa zbog različitoga stanja naprežanja prilikom toga ispitivanja i direktnoga postupka za određivanje vlačne čvrstoće. Posebno je obrađena procjena direktne vlačne čvrstoće i utjecaj saturacije uzoraka na rezultate ispitivanja indirektna vlačne čvrstoće.

## Ključne riječi

vlačna čvrstoća, indirektna vlačna čvrstoća, brazilski test, mehanika stijena

## 1. Uvod

Vlačna čvrstoća stijenskoga materijala obično se definira kao najveće vlačno naprežanje koje taj materijal može izdržati. Stijenski materijal obično ima nisku vlačnu čvrstoću, a njezino određivanje može se provesti direktnim i indirektnim postupcima od kojih je najpoznatiji brazilski test. Direktni postupak ispitivanja provodi se na uzorcima za koje vrijede zahtjevni uvjeti obrade. Vlačno naprežanje prenosi se na krajeve uzorka pomoću metalnih kapica s kukama na sebi (slika 1). Najvažnije je da se os djelovanja vlačne sile podudara s osi uzorka bez savijanja ili torzije, odnosno drugih vanjskih utjecaja (Hoek, 1964). Kako bi se osiguralo da se uzorak slomi



na određenome dijelu, on se može izraditi u obliku utega ili u obliku kosti (engl. *dumbbell*, *dog-bone*).

Slika 1: Princip testiranja vlačne čvrstoće direktnom (izravnom) metodom i brazilskim testom

Iako su uočeni nedostaci zbog koncentracije naprezanja na krajevima uzorka te su zbog toga osmišljavani razni drugi načini nanošenja naprezanja poput dvoosnoga produženja (Brace, 1964) i pretvornika vlačnoga u tlačno opterećenje (Gorski, 1993; Klanphumeesri, 2010), Međunarodno društvo za mehaniku stijena nije promijenilo svoje preporuke. One uključuju nanošenje vlačnih naprezanja putem zalijepljenih kapica na valjkasti uzorak. Kapice ne smiju biti manje, a niti veće od 2 mm u odnosu na promjer uzorka te moraju biti zalijepljene prikladnim ljepilom. Uzorci moraju imati omjer promjera i visine od 2,5 do 3, a plašt mora biti ravan i gladak bez hrapavosti veće od 0,3 mm. Baze moraju biti poravnane bez nepravilnosti većih od 0,02 mm te ne smiju odstupati od okomitosti u odnosu na os uzorka više od 0,001 radijan, to je približno 0,05 mm za promjer uzorka od 50 mm. Vlačno se naprezanje nanosi kontinuirano s konstantnim prirastom tako da se lom dogodi otprilike unutar 5 min ili s prirastom između 0,5 i 1 MPa/s. Direktna vlačna čvrstoća dobije se dijeljenjem najveće ostvarene vlačne sile prilikom loma s početnom površinom poprečnoga presjeka uzorka (ISRM, 1978). Zbog zahtjevnosti direktne metode, posebno u pripremi uzorka i nanošenja opterećenja, puno se češće u inženjerskoj praksi primjenjuje brazilski test (slika 1) kojim se indirektno određuje vlačna čvrstoća. Opravdanost ovoga postupka temelji se na činjenici utvrđenoj eksperimentom da se većina stijena koje se nalaze u stanju dvoosnoga naprezanja najčešće lomi uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće, u uvjetima kada je jedno glavno naprezanje vlačno, a drugo tlačno, s veličinom koja po iznosu ne prelazi trostruku vrijednost vlačnoga naprezanja (Briševac, 2012).

## 2. Povijesni pregled razvoja brazilskoga testa

Brazilski test popularna je metoda indirektnoga određivanja vlačne čvrstoće intaktnoga stijenskoga materijala koja je kroz povijest prošla mnoga istraživanja i mnoge debate o svojoj točnosti i ispravnoj uporabi. U protekle 72 godine ova metoda privlačila je brojne istraživače te njezin razvoj možemo podijeliti u tri etape. Prva etapa počinje 1943. godine Carneirovim predlaganjem ispitne metode za dobivanje vlačne čvrstoće betona (Carneiro, 1943) i traje sve do 1978. godine, kada Međunarodno društvo za mehaniku stijena izdaje preporuku za njezino određivanje na stijenama (ISRM, 1978). Nakon toga, od 1979. do 1991. godine, proteže se druga etapa koju karakterizira standardizirana metoda brazilskoga testa, dok posljednja etapa počinje 1991. godine te traje još i danas, a karakterizira ju intencija nadogradnje izvorne metode ispitivanja (Wong i Jong, 2013). Istu troetapnu podjelu Wong detaljnije razrađuje s Lijem (Li i Wong, 2013) te je takva podjela zadržana i u ovome radu. Kronološki gledano idejni je začetnik indirektna metode Carneiro (1943) koji je predložio ispitnu metodu kako bi dobio vrijednosti vlačne čvrstoće betona te je izveo jednadžbu (1) za računanje vlačne čvrstoće uzorka u obliku diska koji se dvoosno opterećuje tlačno pločama širine 0,1 promjera uzorka.

$$\sigma_{BTS} = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (1)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$F$  – sila sloma uzorka (kN)

$D$  – promjer uzorka (mm)

$t$  – debljina uzorka (mm).

Carneiro je za dva mjeseca pretekao japanskoga istraživača Akazawu (1943) koji je predstavio vrlo sličnu metodu, a zbog rata nije bilo kontakata između njih dvojice. Prvu primjenu ove metode na intaktnome stijenskom materijalu proveli su Berrenbaum i Brodie (1959). Pretpostavljajući da je materijal homogen, linearno elastičan i izotropan, Hondros (1959) izvodi kompletno rješenje naprezanja u slučaju kada je opterećenje distribuirano preko krajnjih lukova dijametralnom kompresijom, kako za disk, tako i za cilindar.

Hobbs (1964, 1965 i 1967) se u više navrata bavio vlačnom čvrstoćom te ju je računao pomoću radijalnoga naprezanja diska s rupom u središtu, tako dobivene rezultate uspoređivao je s rezultatima brazilskoga testa. Proučavao je i utjecaj laminiranosti stijenskoga materijala na vlačnu čvrstoću te zaključio kako se varijacije čvrstoće približno podudaraju s varijacijama koje predviđa Griffithov kriterij loma. Pokazao je postojanje odnosa između vlačne i tlačne čvrstoće stijena te drugih alternativnih mjerenja u mehanici stijena.

Fairhurst (1964) je generalizirajući Griffithov kriterij loma proučavao lom uzorka brazilskoga testa. Zaključuje da se lom može dogoditi dalje od središta diska za male kutove nanošenja naprezanja na disk kod materijala

koji imaju nizak odnos tlačnoga i vlačnoga naprezanja. Uočio je da je vrijednost vlačnoga naprezanja dobivena brazilskim testom nešto niža od stvarne.

Analizirajući naprezanje na nepravilnim uzorcima koji su izloženi paru koncentriranih opterećenja kod trodimenzionalnih fotoelektričnih eksperimenata te provodeći matematičku analizu rezultata, Hiramatsu i Oka (1966) prezentirali su novu metodu izračuna vlačne čvrstoće za nepravilne uzorke. Utvrđeno je da bi se vlačna čvrstoća stijene mogla približno odrediti kao 0,9-i dio kritičnoga opterećenja pod kojim je ispitni uzorak slomljen, podijeljeno s kvadratom udaljenosti između točaka opterećenja. Međutim, nedostatak je te metode u tome što stanje naprezanja na takvim uzorcima nije jednostavno i univerzalno, već je ovisno o obliku samoga uzorka.

Colback (1966) je primijetio kako je razlog maloga broja ispitivanja direktne vlačne čvrstoće u poteškoćama kod pripreme uzoraka te nepravilno pripremljeni valjkasti uzorci pucaju izvan srednjega dijela i tako čine ispitivanja nevaljanima. Držao je brazilski test prihvatljivijim rješenjem za povećanje broja ispitivanja. Kako bi predvidio pojavu loma na uzorku brazilskoga diska, primjenjivao je izmijenjenu Griffithovu teoriju loma. Tvrdio je da lom mora započeti u središtu diska kako bi test bio valjan. Pod određenim uvjetima lom bi se počeo pojavljivati kod inicijalnih točaka opterećenja, a to bi ispitivanje činilo nevaljanim. Preporučio je pregled uzoraka poslije svakoga ispitivanja kako bi se utvrdila ispravnost sloma.

Jaeger je zajedno s Hoskinsom (1966) te samostalno (1967) sudjelovao u usporedbi teorijskih i eksperimentalnih vrijednosti za osmišljene tri različite metode mjerenja vlačne čvrstoće uz primjenu tlačnih naprezanja. Otkrio je kako je izračunana vrijednost maksimalnoga vlačnog naprezanja ovisna o vrijednosti jednoosne vlačne čvrstoće materijala. Zbog velike varijabilnosti vlačne čvrstoće uzoraka, koji su čak i od iste vrste stijene, preporučuje ispitivanje većega broja uzoraka.

Hudson (1969) je uspoređujući dvije indirektno metode, brazilski test i prstenasto ispitivanje, zaključio kako je tako utvrđena vlačna čvrstoća eksperimentalna značajka, a ne značajka materijala.

Mellor i Hawkes (1971) mjerili su vlačnu čvrstoću radijalnom kompresijom brazilskoga diska za tri vrste stijena, dvije plastike, stakla i leda, a eksperimentalni rezultati uspoređeni su s teorijskim očekivanjima. Kako bi smanjili naprezanje na mjestu inicijalnih točki, osmislili su izvijenu čeljust za nanošenje naprezanja na uzorak. Svojim istraživanjima istaknuli su kako je brazilski test pogodno ispitivanje za određivanje vrijednosti jednoosne vlačne čvrstoće.

Hudson i suradnici (1972) uočili su da se lom brazilskoga diska pojavljuje direktno ispod točaka inicijalnoga opterećenja samo ako se koriste ravne čelične ploče pri ispitivanju sa servoupravljivim ispitnim uređajima. Ovi autori ne preporučuju ni brazilski test niti prstenasto ispitivanje (engl. *ring test*) za određivanje vlačne čvrstoće kao svojstva materijala.

Barla i Innaurato (1973) eksperimentalno su i numerički ispitivali prikladnost indirektnih metoda mjerenja vlačne čvrstoće na anizotropnim stijenskim uzorcima. Koristili su se dvama tipovima uzoraka pod različitim orijentacijama duž osi anizotropije. Dokazali su da se eksperimentalni rezultati mogu prikladno objasniti metodom konačnih elemenata.

Wijk (1978) je proučavajući primjenu trodimenzionalne raspodjele naprezanja na probleme kod naprezanja i deformacija u ravnini dokazao da se i na uzorcima brazilskoga testa treba upotrebljavati trodimenzionalna korekcija za dvodimenzionalna teorijska rješenja i kod vrlo tankih uzoraka. Te teorijske primjedbe pokazuju da je tumačenje indirektnih ispitivanja vlačne čvrstoće stijenskih materijala teže nego što se prije mislilo.

Tim znanstvenika predvođenih Yanagidanim (1978), koristeći se elektrootpornim trakama za detekciju pukotine, uočio je da inicijalna pukotina ne potječe od točke inicijacije naprezanja, već iz zone vlačnoga naprezanja. Njegovi rezultati imali su izravnu važnost za validaciju brazilskoga testa.

Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM 1978) usvojilo je standardiziranu metodu brazilskoga testa za indirektno mjerenje vlačne čvrstoće prema izrazu (2). Međutim, postupak direktnoga mjerenja vlačne čvrstoće i dalje ostaje kao metoda za određivanje vlačne čvrstoće stijena.

$$\sigma_{BTS} = 0,636 \frac{F}{D \cdot t} \quad (2)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$F$  – sila sloma uzorka (kN)

$D$  – promjer uzorka (mm)

$t$  – debljina uzorka (mm).

Lajtai (1980) zaključuje da je vlačna čvrstoća dobivena pomoću ispitivanja indeksa čvrstoće niža od vrijednosti vlačne čvrstoće dobivene brazilskim testom te da je brazilski test preciznije ispitivanje kod različitih smjerova nanošenja sile na uzorak.

Sundaram i Corrales (1980) istaknuli su da se pretpostavljanjem istih elastičnih značajki pri vlačnome i tlačnome naprezanju može precijeniti vrijednosti vlačne čvrstoće stijena dobivenih brazilskim testom te su naglasili važnost razmatranja odvojenih elastičnih značajki uzorka pod vlačnim i tlačnim naprezanjem.

Pandey i Singh (1986) raspravljaju o karakteristikama deformacija kod vlačnoga naprezanja te otkrivaju da je vlačna čvrstoća dobivena brazilskim testom gotovo dvostruko veća od vrijednosti dobivene direktnom metodom. Na osnovi toga tvrde kako je vlačna čvrstoća zapravo eksperimentalno svojstvo, a ne svojstvo materijala.

Na temelju proučavanja međuovisnosti između BP indeksa (engl. *Block Punch Strength Index*) i indirektno vlačne čvrstoće utvrđene brazilskim testom na uzorcima od breče, kalkarenita, kalklutita, dunita, gnajsa, vapnenaca, mramora, muljnjaka i pješčenjaka utvrđena je jednadžba (3) za izračunavanje indirektno vlačne čvrstoće uz pomoć BP indeksa (Van der Schrier, 1988).

$$\sigma_{BTS} = 0,4BPI - 0,4 \quad (3)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – indirektna vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$BPI$  – BP indeks (MPa).

Newman i Bennett (1990) statističkom studijom potvrđuju da odnos dužine i promjera uzorka, kao i prirast naprezanja, imaju znatan utjecaj na indirektnu vlačnu čvrstoću pješčenjaka.

Andreev (1991a i b) je proveo svojevrsnu reviziju određivanja vlačne čvrstoće pomoću brazilskoga testa koncentrirajući se na jednadžbu i uvjete kontakta na uzorku. Utvrđuje kako se lom u kontaktnome području uzorka ne događa ako se njegov modul elastičnosti znatno razlikuje od modula elastičnosti naprave za nanošenje naprezanja. Suprotno dotadašnjemu mišljenju zaključuje kako brazilski test daje dobre vrijednosti za materijale koji se krto lome te predlaže jednadžbu (4) prema kojoj bi se računala indirektna vlačna čvrstoća kod takvih materijala.

$$\sigma_{BTS} = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot t} \cdot \left( n + \frac{3}{n} \right) \quad (4)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$F$  – sila sloma uzorka (kN)

$D$  – promjer uzorka (mm)

$t$  – debljina uzorka (mm)

$n$  – omjer između tlačne i vlačne čvrstoće.

Razvoj informatičke tehnologije omogućio je zahtjevnija istraživanja te je postalo moguće izrađivanje simulacija procesa loma uz pomoć računalnih programa. Načinjena je dvodimenzionalna numerička simulacija na temelju istraživanja inicijacije i širenja pukotine uz primjenu Mohr-Coulombova kriterija sloma (Malan et al. 1994).

Informatičko doba također je olakšalo izračunavanje matematički kompleksnih problema, ali i kompleksnija laboratorijska mjerenja te su Chen i suradnici (1998) nakon provedenoga ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće anizotropne vrste stijena (4 vrste pješčenjaka) zaključili kako se metode temeljene na pretpostavkama o elastičnoj izotropnosti ne bi smjele koristiti u analizi ispitivanja anizotropnih stijena. Dokazuju da indirektna vlačna čvrstoća anizotropnih stijena nije konstantna, već ovisi o kutu između ravnine anizotropije i osi nanošenja opterećenja na uzorak. Na temelju brazilskoga testa razvijaju metodu mjerenja konstanti elastičnosti

koja uključuje mjerenje pomaka pomoću elektrootpornih traka koje se lijepe pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na os nanošenja opterećenja.

Exadaktylos i Kaklis (2001) predstavili su eksplicitne izraze naprezanja i deformacija u bilo kojoj točki radijalno opterećenoga anizotropnoga kružnog diska te pokazali da se predložena analitička rješenja mogu učinkovito koristiti u povratnim analizama te kao alat za određivanje elastičnosti i čvrstoće stijena. To je prikazano i u slučaju prije objavljenih eksperimentalnih rezultata na škriljalcima i gnajsevima i u slučaju njihovih ispitivanja na mramoru.

Sulukcu i Ulusay (2001) na temelju ispitivanja uzoraka od 23 vrste stijena objavili su jednadžbu (5) za izračun indirektno vlačne čvrstoće preko korigiranoga BP indeksa, a za izračun preko indeksa čvrstoće jednadžbu (6).

$$\sigma_{BTS} = 0,86 \cdot BPI_c \quad (5)$$

$$\sigma_{BTS} = 2,3 \cdot I_{S(50)} \quad (6)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$BPI_c$  – korigirani BP indeks (MPa)

$I_{S(50)}$  – indeks čvrstoće (MPa).

Lavrov i Vervoort (2002) analizirali su utjecaj sile trenja primijenjene na dva suprotna luka raspodjele naprezanja u brazilskome testu. Zaključili su da je distribucija naprezanja unutar uzorka samo neznatno izmijenjena utjecajem trenja na njegovim granicama.

Nakon opažanja akustičkih efekata prilikom ispitivanja prezentirana je analiza Kaiserova efekta degradacije uslijed povećanja odstupanja od glavnoga naprezanja između točaka nanošenja opterećenja kod brazilskoga testa. Korištena je diskontinuirana analiza pomaka za objašnjenje eksperimentalnih rezultata (Lavrov et al., 2002).

Nehomogenost materijala ima znatan utjecaj na raspodjelu vlačnih naprezanja uzduž osi nanošenja opterećenja. Za prikaz te spoznaje iskorištena je metoda konačnih elemenata za dvodimenzionalnu analizu geomaterijala. Metodom su modelirane nehomogenosti i mikrostrukture (Yue et al., 2003).

Kinesko-švedski istraživači osmislili su metodu koja primjenjuje tanki disk, a kojom bi se jednim ispitivanjem odredili modul elastičnosti, vlačna čvrstoća (7) i lomna žilavost kod stijena koje se krto lome. Kako bi se zajamčila inicijacija pukotina u središtu uzorka, koja se smatra presudnom za valjanost ispitivanja, kut nanošenja opterećenja mora biti veći od  $20^\circ$  (Wang et al., 2004).

$$\sigma_{BTS} = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot t} \cdot k_w \quad (7)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$F$  – sila sloma uzorka (kN)

$D$  – promjer uzorka (mm)

$t$  – debljina uzorka (mm)

$k_w$  – koeficijent koji je u bliskoj vezi s kutom nanošenja  $2\alpha$ , za  $2\alpha = 20^\circ$   $k = 0,9644$ ;  $2\alpha = 30^\circ$   $k = 0,9205$ .

Kako bi odredili mjesto nastanka pukotine, južnoafrički su znanstvenici provodili ispitivanja na diskovima u kojima su bušili rupe različitoga promjera i mijenjali mjesto rupe na uzorku. Nakon eksperimentiranja i simuliranja loma pretpostavljaju da se pukotina na uzorku brazilskoga testa počinje širiti u blizini jednoga od izvora pritiska na disk (Van De Steen et al., 2005).

Talijanski znanstvenici koji su eksperimentirali s raznim alternativnim načinima određivanja vrijednosti vlačne čvrstoće zaključili su da je njezina vrijednost strogo zavisna od odabrane metode ispitivanja. Iznijeli su kritične procjene nekih široko upotrebljivanih laboratorijskih tehnika na temelju eksperimentalnih podataka dobivenih iz literature ili na temelju vlastitih te zaključili kako od laboratorijskih metoda jedino brazilski test daje

rezultate slične onima koji se dobivaju direktnim određivanjem vlačne čvrstoće mekih stijena (Coviello et al., 2005).

Aydin i Basu (2006) uočili su da trošenje uslijed tropske klime oslabljuje mikrostrukture magmatskih stijena pa ponašanje stijene tijekom vlačnoga ispitivanja može biti pokazatelj stanja mikrostrukture i trošenja stijene. Zbog toga su izradili indikator koji se sastojao od 2 cm duge elektrootporne trake smještene na horizontalnu os uzorka. Na taj su način mjerili veličinu koju su nazvali brazilski deformacijski indeks BDI (engl. *Brazilian deformational index*) na osnovi koje se mogu detektirati i minimalne varijacije nastale trošenjem.

Analiza naprezanja bazirana na trodimenzionalnoj metodi konačnih elemenata 3D FEM (engl. *Finite Element Method*) pokazala je važnost veličine i oblika brazilskoga diska. Nametnuo se zaključak kako je jednažba koja je u prošlosti korištena za indirektno izračunavanje vlačne čvrstoće netočna te da treba biti korigirana prema izrazu (8) u odnosu na odnos debljina/promjer, pogotovo kada se radi o uzorcima povećane debljine (Yu et al., 2006).

$$\sigma_{BTS} = (0,2621 \cdot k_R + 1) \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (8)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$F$  – sila sloma uzorka (kN)

$D$  – promjer uzorka (mm)

$t$  – debljina uzorka (mm)

$k_R$  – omjer između debljine i promjera uzorka.

Tim kineskih znanstvenika osmislio je eksperimentalnu metodu za dobivanje vlačnoga modula elastičnosti. U metodi se upotrebljavaju elektrootporne trake zalijepljene na uzorke prilikom izvođenja brazilskoga testa, a analitička jednažba vlačnoga modula elastičnosti prikazana je izrazom (9). Utvrdili su da odnos vlačnoga modula elastičnosti prema tlačnomu modulu elastičnosti iznosi od 60 do 90 % za mramor, pješčenjak i vapnenac (Ye et al., 2009).

$$E_{BTS} = A_T \cdot E_S \quad (9)$$

gdje je:

$E_{BTS}$  – vlačni modul elastičnosti (MPa)

$A_T$  – korekcijski faktor prema izrazu (10)

$E_S$  – elastični modul cijepanja (engl. *splitting elastic modulus*) koji se dobije izrazom (11).

$$A_T = \left( 1 - \frac{D}{t} \cdot \arctan \frac{2t}{D} \right) \cdot (1 - \nu) + \frac{2D^2 \cdot (1 + \nu)}{4t^2 \cdot D^2} \quad (10)$$

$$E_S = \frac{0,5\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (11)$$

gdje je:

$D$  – promjer uzorka (mm)

$t$  – debljina uzorka (mm)

$\nu$  – Poissonov koeficijent

$\sigma_t$  – najveće naprezanje u testu (MPa)

$\varepsilon_t$  – deformacija kod  $\sigma_t/2$  koja se određuje iz dijagrama naprezanja i deformacija.

Razmatranje utjecaja inicijalnih pukotina na distribuciju naprezanja dovelo je do modeliranja BEM metodom (engl. *Boundary Element Method*), odnosno simulacije procesa nastanka i širenja pukotina na uzorku koji je izložen indirektnomu vlačnom naprezanju. Analize modela pokazuju da je raspodjela naprezanja samo neznatno pod utjecajem trenja između čeljusti i uzorka. S druge strane, pojava i širenje pukotina koje proizvodi

polje naprezanja vrlo je različito od onoga kada je stijenski materijal kontinuiran, homogen, izotropan i elastičan. Smatra se kako analiza deformacije duž promjera uzorka koji je okomit na pravac nanošenja opterećenja omogućava određivanje izravne vlačne čvrstoće tako da se ona detektira kao mjesto gdje je krivulja naprezanja i deformacija okomita na smjer nanošenja naprezanja (Lanaro et al., 2009).

Analiza naprezanja metodom 3D FEM, uz pretpostavku da su ispitni materijali kontinuirana, izotropna i homogena elastična tijela, omogućila je izradu modificirane verzije brazilskoga testa. U njemu su postavljena dva specijalna držača razmaka na točkama inicijalnoga opterećenja kako bi se smanjilo koncentriranje naprezanja. Ta je modifikacija napravljena jer se smatralo kako originalna verzija brazilskoga testa znatno podcjenjuje vlačnu čvrstoću ispitnoga materijala. Yu i suradnici (2009) predložili su da se indirektna vlačna čvrstoća računa po izrazu (12) za krte stijene.

$$\sigma_{BTS} = \frac{2k_s \cdot F}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (12)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$F$  – sila sloma uzorka (kN)

$D$  – promjer uzorka (mm)

$t$  – debljina uzorka (mm)

$k_s$  – koeficijent koji se odnosi na stanje naprezanja u točki inicijacije, a njegova je najbolja vrijednost 1,11.

Tavallali i Vervoort (2010a,b) prezentirali su važnost orijentacije slojeva, tj. anizotropije na vlačnu čvrstoću, ali i razvoj pukotina. Uočili su tri različita tipa pukotina kod specifično uslojenoga pješčenjaka s juga Belgije te ih nazvali aktivacija slojeva, središnje frakture i izvansredišnje frakture. Zatim su opisali kako veličina i oblik zrna te mineralni sastav imaju utjecaj na vlačnu čvrstoću utvrđenu brazilskim testom.

Grčki znanstvenici u dva su navrata objavili radove u kojima prikazuju kompletno objašnjenje naprezanja i pomaka u brazilskome disku pod ravnomjerno distribuiranim radijalnim opterećenjem. Međutim, rješenje je izneseno pod pretpostavkom kako je materijal uzorka homogen, izotropan i linearno elastičan. Proučavali su utjecaj ravnomjerno raspodijeljenoga smičnog naprezanja na mjestima nanošenja opterećenja. Uočili su kako će lom prije započeti na rubu kontakta inicijalnih točaka nego u samoj sredini uzorka (Markides et al., 2010 i 2011).

Australski znanstvenici predstavili su eksperimentalne rezultate istraživanja odnosa naprezanja i deformacija uzoraka tufa Brisbane koji su bili podvrgavani dvama načinima nanošenja opterećenja. Prvi je sinusoidalno povećanje tlaka, a drugi je prosječno povećavanje razine opterećenja. Otkrili su da je kod takvih uvjeta izvođenja brazilskoga testa indirektno mjerena vlačna čvrstoća reducirana 33 – 37 % (Erarslan i Williams, 2012). Na uzorcima tufa Brisbane uspoređivan je utjecaj nanošenja opterećenja pomoću standardnih čeljusti i nanošenja opterećenja na određenome dijelu luka samoga uzorka. Uz eksperimentalna ispitivanja rađene su i numeričke simulacije koje su pokazale kako je najbolja geometrija nanošenja opterećenja  $2\alpha = 20^\circ - 30^\circ$  duž luka uzorka (Erarslan et al., 2012).

Markides i Kourkoulis (2012) bavili su se analizom komponenti naprezanja u uzorcima brazilskoga diska koji su se ispitivali pod četirima različitim tipovima nanošenja opterećenja: nanošenje opterećenja u jednoj točki, jednoliko distribuiran radijalni tlak, sinusoidalno nanošenje tlaka, parabolično nanošenje tlaka. Parabolično nanošenje ocijenjeno je kao najbolje, a nedostatak je njihove analize u tome što je izrađena pod pretpostavkom linearne elastičnosti i uz ignoriranje utjecaja smicanja.

Indijski znanstvenici u nastojanju poboljšanja mogućnosti BP testa objavili su jednadžbu (13) za proračun indirektno vlačne čvrstoće za granit, škriljavac i pješčenjak. Po njihovim istraživanjima međuovisnost indirektno vlačne čvrstoće utvrđene brazilskim testom veća je s korigiranim BP indeksom nego s indeksom čvrstoće koji je utvrđen opterećenjem u točki (Mishra i Basu, 2012).

$$\sigma_{BTS} = 0,35 \cdot BPI_c + 3,69 \quad (13)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – indirektna vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$BPI_c$  – korigirani BP indeks (MPa).

Kazareni (2013) je predstavio model temeljen na diskontinuumu kojim je simulirao vlačni i tlačni slom pješčenjaka. Model vjernije reproducira stijenski materijal koji je gust skup nepravilnih i izobličenih čestica koje imaju interakciju na svojim granicama. Zaključuje kako se takav način modeliranja može koristiti za opisivanje odnosa između mikrostrukturnih i makrosvojstava materijala.

Li i Wong (2013) iznijeli su pregled dosadašnjih istraživanja vezanih uz brazilski test te proveli numeričku analizu izrađujući elastični model u 3D FLAC programu. Koncentrirajući se na točku inicijacije pukotine, zaključuju kako se inicijacijska točka može nalaziti u blizini točaka nanošenja opterećenja u trenutku kada vlačna deformacija zadovoljava kritični kriterij deformacije, a također može biti smještena u središtu kada vlačno naprezanje zadovoljava kriterij maksimalne vlačne čvrstoće.

Tehnika snimanja pomoću brzih kamera primijenjena je kod ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće pod statičkim i dinamičkim opterećenjem granitnih uzoraka u svrhu istraživanja za građevine u podzemlju. Primijećena su četiri načina loma uzoraka: dijametralno vlačni lom, središnji lom s malim klinovima kod točaka nanošenja opterećenja, središnji lom sa zdrobljenom zonom i lom s inicijacijom iz smično oštećenih rubnih zona. Na osnovi toga autori preporučuju da se kod analize ispravnosti loma uzoraka koristi kamera velike brzine snimanja jer uobičajena optička analiza može zavarati (Zhou et al., 2014).

Turski su znanstvenici napravili evaluaciju indirektno vlačne čvrstoće kod ispitivanja s različitim vrstama čeljusti za nanošenje tlačnoga opterećenja na uzorak. Njihov rad pokazuje kako različiti materijali različito reagiraju na nanošenje opterećenja pa se za sve vrste materijala ne može primjenjivati isti tip čeljusti (Komurlu i Kesimal, 2015). Njihovu radu može se prigovoriti malen broj ispitivanja po pojedinome materijalu i vrsti čeljusti koji nekada iznosi i 4 komada, što je svakako nedovoljno.

Nedavno je tim kineskih znanstvenika iznio prijedlog promjene jednadžbe izračuna indirektno vlačne čvrstoće. Pri tome im je Poissonov koeficijent bio najvažniji čimbenik, zatim kut nanošenja opterećenja i omjer debljine i polumjera. Otkrili su da povećanje Poissonova koeficijenta te manji kut nanošenja smanjuju pojavu središnje inicijacije pukotine. Prema Griffithovu kriteriju modificirali su jednadžbu u skladu s preporučenim područjem vrijednosti. Jednadžba (14) usklađena je s prijašnjim studijama, brojčano i eksperimentalno (Lin et al., 2015).

$$\sigma_{BTS} = -(1,027 + 0,108\nu - 0,014\alpha) \cdot \frac{F}{\pi \cdot r \cdot t} \quad (14)$$

gdje je:

$\sigma_{BTS}$  – indirektna vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$\nu$  – Poissonov koeficijent

$\alpha$  – polovina kuta nanošenja opterećenja

$F$  – sila sloma uzorka (kN)

$r$  – polumjer diska (mm)

$t$  – debljina diska (mm).

Prema dostupnoj literaturi ispitivanja vlačne čvrstoće brazilskim testom na materijalima s područja Hrvatske vezana su uz razna istraživanja provedena u svrhu izvođenja geotehničkih građevina, pogotovo cestovne infrastrukture (Šestanović et al., 1993, Pollak, 2002) te uz ispitivanja u svrhu dimenzioniranja podzemnih prostorija prilikom podzemne eksploatacije arhitektonsko-građevnoga kamena (Hrženjak et al., 2008). Indirektna vlačna čvrstoća ispitivana je kod djelovanja sile u smjeru okomitome na slojne plohe i u slučaju djelovanja sile u smjeru paralelnome sa slojnim ploham za krovinske slojeve „A”, „E” i „F” ležišta arhitektonsko-građevnoga kamena „Korenići” u Istri (Dobrilović et al., 2010). Također istraživana je utjecaj saturacije na indirektnu vlačnu čvrstoću gipsa (Macenić, 2011) i vapnenca (Čajić, 2015).

Važno je naglasiti da postoje razlike između rezultata direktnoga i indirektnoga mjerenja vlačne čvrstoće pomoću brazilskoga testa, a to se može vidjeti u tablici 1, gdje su prikupljeni podatci iz relevantne literature te izračunan odnos  $\sigma_{BTS}/\sigma_{UTS}$ . Zanimljivo je što se kod nekih materijala, npr. vapnenca, parcijalno pokazuje obrnuti trend odnosa  $\sigma_{BTS}/\sigma_{UTS}$  od onoga kada su podatci objedinjeni. Vapnenci tipa Indijana i Saraburi pokazuju kako brazilski test precjenjuje njihovu čvrstoću, dok vapnenci skupno pokazuju da im taj test umanjuje čvrstoću.



Tablica 1: Odnos vlačne čvrstoće određene direktnim postupkom i indirektno vlačne čvrstoće određene pomoću brazilskoga testa

Tip stijene	$\sigma_{UTS}$	$\sigma_{BTS}$	$\sigma_{BTS}/\sigma_{UTS}$	Izvor
trahit Bowral	13,72	12,00	0,87	Jaeger (1967)
trahit	13,7	7,7	0,56	Perras i Diederichs (2014)
sijenit Vitosha	20,50	21,05	1,03	Andreev (1991a)
granit Barre	13,45	14,34	1,07	Mellor i Hawkes (1971)
granit	6,3	10,3	1,63	Perras i Diederichs (2014)
mramor Carrara	6,90	8,72	1,27	Jaeger (1967)
mramor Ufalei	5,90 ± 2,66	6,90 ± 1,24	1,17	Efimov (2009)
mramor Saraburi	6,33 ± 0,62	8,02 ± 0,25	1,27	Fuenkajorn i Klanphumeesri (2011)
mramor	7,5	10,1	1,35	Perras i Diederichs (2014)
gnajs	8,2	9,8	1,2	Perras i Diederichs (2014)
kvarcit	16,3	13,0	0,8	Perras i Diederichs (2014)
škrljavac	13,3	11,8	0,89	Perras i Diederichs (2014)
šejl	5,6	5,9	1,05	Perras i Diederichs (2014)
sivi gips	1,75	1,99	1,14	Andreev (1991a)
bijeli gips	1,42	1,29	0,91	Andreev (1991a)
pješčenjak Godsford	3,59	3,72	1,04	Jaeger (1967)
pješčenjak Phu Phan	6,49 ± 0,22	10,68 ± 0,70	1,65	Fuenkajorn i Klanphumeesri (2011)
pješčenjak	5,1	9,5	1,86	Perras i Diederichs (2014)
gravina kalkarenit	0,69 ± 0,03	0,64 ± 0,10	0,93	Coviello et al. (2005)
vapnenac Indiana	5,86	6,21	1,06	Mellor i Hawkes (1971)
vapnenac Saraburi	9,31 ± 0,65	10,90 ± 0,19	1,17	Fuenkajorn i Klanphumeesri (2011)
vapnenac	7,1	6,0	0,85	Perras i Diederichs (2014)
dolomit	5,7	8	1,4	Perras i Diederichs (2014)

$\sigma_{UTS}$  – vlačna čvrstoća određena direktnim postupkom;  $\sigma_{BTS}$  – vlačna čvrstoća određena brazilskim testom

## 2. Procjenjivanje vlačne čvrstoće uz pomoć drugih značajki

Prema Hoeku (1966) uobičajeno se smatra kako vlačna čvrstoća iznosi jednu desetinu u odnosu na tlačnu čvrstoću te se može računati izrazom (15).

$$\sigma_{UTS} = -\frac{\sigma_{UCS}}{10} \quad (15)$$

gdje je:

$\sigma_{UTS}$  – direktna vlačna čvrstoća (MPa)

$\sigma_{UCS}$  – jednoosna tlačna čvrstoća (MPa).

Zhang (2005) predlaže da se tlačna čvrstoća za pojedini stijenski materijal može izračunati jednadžbom (16), a za proračun vlačne čvrstoće preko indeksa čvrstoće jednadžbom (17).

$$\sigma_{UTS} = -k_m \cdot \sigma_{UCS} \quad (16)$$

$$\sigma_{UTS} = -1,5 \cdot I_{S(50)} \quad (17)$$

gdje je:

$\sigma_{UTS}$  – direktna vlačna čvrstoća (MPa)

$\sigma_{UCS}$  – jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)

$k_m$  – koeficijent koji ima vrijednost od 0,03 do 0,24 ovisno o vrsti stijene

$I_{S(50)}$  – indeks čvrstoće (MPa).

Perras i Diederichs (2014) nakon pregleda relevantne literature zaključili su kako je najveća pogreška kod procjene preko jednoosne tlačne čvrstoće, a manja ako se za procjenu primjenjuje Hoek-Brownova konstanta „ $m_i$ ” prema izrazu (18).

$$\sigma_{UTS} = -\frac{\sigma_{UCS}}{m_i} \quad (18)$$

gdje je:

$\sigma_{UTS}$  – direktna vlačna čvrstoća (MPa)

$\sigma_{UCS}$  – jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)

$m_i$  – Hoek-Brownova konstanta materijala.

Uporaba mjerene veličine pod nazivom inicijacija pukotine (skr. CI, engl. *crack initiation*) za procjenu direktne vlačne čvrstoće prema izrazu (19) daje bolje rezultate od korelacije preko jednoosne tlačne čvrstoće, međutim takva procjena ovisna je i o vrsti stijene pa izraz (19) treba u budućnosti modificirati prema osobinama materijala (Perras and Diederichs, 2014).

$$\sigma_{UTS} = -\frac{CI}{k_\beta} \quad (19)$$

gdje je:

$\sigma_{UTS}$  – direktna vlačna čvrstoća (MPa)

CI – inicijacija pukotine (MPa)

$k_\beta$  – koeficijent koji iznosi 8 po originalnome Griffithovu kriteriju ili 12 nakon modifikacije originalnoga Griffithova kriterija.

Švicarski su znanstvenici na osnovi pregleda literature iz područja određivanja vlačne čvrstoće generalno zaključili kako je direktnu vlačnu čvrstoću teško procijeniti na osnovi drugih laboratorijskih ispitivanja. Zaključuju kako je procjena direktne čvrstoće preko indirektno vlačne čvrstoće određene brazilskim testom ovisna o vrsti stijene te preporučuju da se obavlja prema izrazu (20) kako bi se poboljšala procjena (Perras and Diederichs, 2014).

$$\sigma_{UTS} = \sigma_{BTS} \cdot k_T \quad (20)$$

gdje je:

$\sigma_{UTS}$  – direktna vlačna čvrstoća (MPa)

$\sigma_{BTS}$  – indirektna vlačna čvrstoća određena brazilskim testom (MPa)

$k_T$  – korekcijski faktor koji iznosi 0,9 za metamorfne, 0,8 za magmatske i 0,7 za sedimentne stijene.

### 3. Utjecaj saturacije uzoraka na njihovu vlačnu čvrstoću

Što se tiče utjecaja saturacije na vlačnu čvrstoću, stariji radovi samo se uopćeno bave tom problematikom. Dube i Singh (1972) istražuju utjecaj humidne klime na indirektnu vlačnu čvrstoću pješčenjaka koju su određivali brazilskim testom. Otkriveno je kako su šupljikavi pješčenjaci te oni koji su u svojem sastavu imali minerale glina najviše skloni smanjenju vlačne čvrstoće.

Opsežnije istraživanje provodi **Vutukuri (1974)** koji se bavio alternativnim metodama za određivanje vlačne čvrstoće. Koristio se prstenastim ispitivanjem za određivanje vlačne čvrstoće uzoraka vapnenca te je ispitivao ovisnost utjecaja raznih vrsta tekućina na vrijednosti vlačne čvrstoće vapnenaca. Saturaciju u trajanju od 20 sati provodio je vodom, glicerinom, etanolom, nitrobenzenom i s nekoliko tekućina organskoga sastava. Otkrio je da se kod porasta dielektrične konstante i površinske napetosti tekućine smanjuje vlačna čvrstoća vapnenaca.

**Ojo i Brook (1990)** ispitivali su jednoosnu tlačnu čvrstoću i direktnu vlačnu čvrstoću pješčenjaka koji je bio različitoga stupnja saturacije. Otkrivaju kako se obje čvrstoće smanjuju s povećanjem stupnja saturacije, a odnos jednoosne tlačne čvrstoće i direktne vlačne čvrstoće veći je u saturiranome (zasićenome) nego u suhome stanju. Tvrde da je smanjenje čvrstoće uslijed utjecaja saturacije više izraženo kod direktne vlačne čvrstoće nego kod jednoosne tlačne čvrstoće.

Od novijih radova valja istaknuti rad kineskih znanstvenika koji su istraživali učinak zasićenosti uzoraka vodom na indirektnu vlačnu čvrstoću gnajsa, mramora i pješčenjaka. Rezultati istraživanja pokazali su da sve navedene stijene imaju nižu vlačnu čvrstoću zasićene negoli suhe. Ispitivanja su obavljali brazilskim testom i prstenastim ispitivanjem te zaključili kako prstenasto ispitivanje pokazuje male razlike čvrstoće suhih i saturiranih uzoraka (**You et al., 2011**).

Singapurski znanstvenici proučavali su utjecaj saturacije na indirektnu vlačnu čvrstoću umjetnoga gipsa te su se pri tome koristili brzim kamerama. Rezultati pokazuju pad čvrstoće na pola vrijednosti čvrstoće u suhome stanju, nakon samo jednoga tjedna saturacije. Snimke brzim kamerama pokazuju kako se inicijalna pukotina kod većine uzoraka stvara u središtu, a postoji razlika između načina loma suhih i saturiranih uzoraka. Suhi uzorci pucaju nakon samo jedne inicijacije, a pukotina im se vrlo brzo širi, dok saturirani imaju više inicijalnih pukotina i mirniji razvoj primarne vlačne pukotine (**Wong and Jong, 2013**).

#### 4. Zaključak

Velik broj radova koji se bave problematikom vezanom uz brazilski test posljedica je njegove naravi. S jedne strane, jednostavna obrada uzoraka omogućava brzu eksperimentalnu provjeru numeričkih analiza i raznih simulacija. S druge strane, njegova osjetljivost zahtijeva pažljivo objašnjenje ponašanja materijala prilikom ispitivanja i pronalaženje rješenja za otklanjanje nepravilnosti.

Novija istraživanja pokazuju kako se pri proučavanju brazilskoga testa treba više posvetiti razlikama koje nastaju zbog različitih svojstava pojedinih vrsta ispitivanih materijala jer je pitanje anizotropije uglavnom riješeno. U bližoj budućnosti ne očekuje se standardizacija postupaka koji primjenjuju skuplju i kompliciraniju opremu, čime se može znatno poboljšati samo ispitivanje. Daljnja istraživanja indirektno vlačne čvrstoće treba usmjeriti na istraživanje utjecaja saturacije na različite vrste stijenskoga materijala jer bi to bilo od praktične koristi u inženjerstvu.

#### 5. Literatura

- Akazawa, T. (1943): New test method for evaluating internal stress due to compression of concrete: the splitting tension test. *J Japan Soc Civil Eng*, 29, 777–787.
- Andreev, G. E. (1991a): A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part I: calculation formula. *Min Sci Technol*, 13, 3, 445–456.
- Andreev, G. E. (1991b): A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part II: contact conditions. *Min Sci Technol*, 13, 3, 457–465.
- Aydin, A. and Basu, A. (2006): The use of Brazilian Test as a Quantitative Measure of Rock Weathering. *Rock Mech Rock Eng.*, 39, 1, 77–85.
- Barla, G. and Innaurato, N. (1973): Indirect tensile testing of anisotropic rocks. *Rock Mech*, 5, 4, 215–230.
- Berrenbaum, R. and Brodie, I. (1959): Measurement of the tensile strength of brittle materials. *Brit J Appl Phys*, 10, 281–286.
- Brace, W. F. (1964): Brittle fracture of rocks. In: Judd WR (ed.): *Proceedings of the International Conference on State of Stress in the Earth's Crust*. Elsevier, New York, 111–174.
- Briševac, Z. (2012): Model međuovisnosti fizikalno-mehaničkih značajki karbonatnih stijena (*Interdependence model of physico-mechanical properties of carbonate rocks*). Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 318 p. (in Croatian)
- Čajić, S. (2015): Fizikalno-mehanička svojstva vapnenca iz kamenoloma „Podberam” pokraj Pazina (*Physical and Mechanical Properties of Limestone from Quarry “Podberam” near Pazin*). Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 20 p. (in Croatian)

- Carneiro, F. L. L. B (1943): A new method to determine the tensile strength of concrete. In: Paper presented at the Proceedings of the 5<sup>th</sup> meeting of the Brazilian Association for Technical Rules (“Associação Brasileira de Normas Técnicas—ABNT”), 3d. Section
- Chen, C. S. and Pan, E. and Amadei, B. (1998): Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian tests. *Int J Rock Mech Min Sci*, 35, 1, 43–61.
- Colback, P. S. B. (1966): An analysis of brittle fracture initiation and propagation in the Brazilian test. In: Paper presented at the Proceedings of the First Congress International Society of Rock Mechanics, Lisbon, Portugal.
- Coviello, A., Lagioia, R. and Nova, R. (2005): On the measurement of the tensile strength of soft rocks. *Rock Mech Rock Eng*, 38, 4, 251–273.
- Dobrilović, I., Gulam, V. and Hrženjak, P. (2010): Primjena indeksnih metoda ispitivanja u određivanju mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala (*Application of index testing methods in determining mechanical properties of intact rock material*). *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 22, 63–71 (*in Croatian*)
- Dube A. K. and Singh, B. (1972): Effect of humidity on tensile strength of sandstone. *J Mines Metals Fuels*, 20, 1, 8–10.
- Efimov, V. P. (2009): The rock strength in different tension conditions. *J Min Sci*, 45, 6, 569–575.
- Eraslan N. and Williams D. J. (2012): Investigating the effect of cyclic loading on the indirect tensile strength of rocks. *Rock Mech Rock Eng.*, 45, 3, 327–340.
- Eraslan N., Liang Z. Z. and Williams D. J. (2012): Experimental and numerical studies on determination of indirect tensile strength of rocks. *Rock Mech Rock Eng.*, 45, 5, 739–751.
- Exadaktylos G. E. and Kaklis K. N. (2001): Applications of an explicit solution for the transversely isotropic circular disc compressed diametrically. *Int J Rock Mech Min Sci*, 38, 2, 227–243.
- Fairhurst, C. (1964): On the validity of the ‘Brazilian’ test for brittle materials. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1, 4, 535–546.
- Fuenkajorn, K. and Klanphumeesri, S. (2011): Laboratory determination of direct tensile strength and deformability of intact rocks. *Geotech Test J*, 34, 1, 1–6.
- Gorski, B. (1993): Tensile testing apparatus. United States Patent, 5193396
- Hiramatsu Y. and Oka Y. (1966): Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 3, 2, 89–90.
- Hobbs D. W. (1964): The tensile strength of rocks. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1, 3, 385–396.
- Hobbs D. W. (1965): An assessment of a technique for determining the tensile strength of rock. *Br J Appl Phys*, 16, 2, 259–268.
- Hobbs D. W. (1967): Rock tensile strength and its relationship to a number of alternative measures of rock strength. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 4, 1, 115–127.
- Hoek E. (1964): Fracture of anisotropic rock. *J S Afr Inst Min Metall*, 64, 10, 501–518.
- Hoek, E. (1966): *Rock Mechanics an introduction for the practical engineer* Parts I, II and III. Mining Magazine, London, 67 p.
- Hondros, G. (1959): The evaluation of Poisson’s ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete. *Aust J Appl Sci*, 10, 3, 243–268.
- Hrženjak, P., Cotman, I. and Briševac, Z. (2008): Geotechnical investigation for designing underground natural stone mines. 21th World Mining Congress & Expo 2008, Krakow, New Challenges and Visions for Mining. In: Sobczyk, E. J. and Kicki, J. (eds.). CRC Press/Balkema, London, 197–206.
- Hudson J. A., Brown E. T. and Rummel, F. (1972): The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.*, 9, 2, 241–248.
- Hudson, J. A. (1969): Tensile strength and the ring test. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 6, 1, 91–97.
- ISRM (1978): Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15, 3, 99–103.
- Jaeger J. C. and Hoskins E. R. (1966): Stresses and failure in rings of rock loaded in diametral tension or compression. *Br J Appl Phys*, 17, 5, 685–692.
- Jaeger J. C. (1967): Failure of rocks under tensile conditions. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 4, 2, 219–227.
- Kazareni, T. (2013): A discontinuum-based model to simulate compressive and tensile failure in sedimentary rock, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5, 378–388.
- Klanphumeesri S. (2010): Direct tension testing of rock specimens. Master of Engineering Thesis, Suranaree University of Technology
- Komurlu, E. and Kesimal, A. (2015): Evaluation of Indirect Tensile Strength of Rocks Using Different Types of Jaws, *Rock Mech Rock Eng*, 48, 1723–1730.
- Lajtai, E. Z. (1980): Tensile strength and its anisotropy measured by point and line-loading of sandstone. *Eng Geol*, 15(3–4), 163–171.
- Lanaro, F., Sato T. and Stephansson O. (2009): Microcrack modelling of Brazilian tensile tests with the boundary element method. *Int J Rock Mech Min Sci*, 46, 3, 450–461.
- Lashkaripour, G. R. and Ghafoori, M. (2002): The engineering geology of the Tabarak Abad Dam. *Engineering Geology*, 66, 233–239.

- Lavrov, A. and Vervoort A. (2002): Theoretical treatment of tangential loading effects on the Brazilian test stress distribution. *Int J Rock Mech Min Sci*, 39, 2, 275–283.
- Lavrov, A., Vervoort, A., Wevers, M. and Napier, J. A. L. (2002): Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation. *Int J Rock Mech Min Sci*, 39, 3, 287–302.
- Li, D. and Wong, L. N. Y. (2013): The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights. *Rock Mech. Rock Eng.*, 46, 2, 269–287.
- Lin, H. Xiong, W. and Yan, Q. (2015): Modified Formula for the Tensile Strength as Obtained by the Flattened Brazilian Disk Test, *Rock Mech Rock Eng* <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00603-015-0785-z.pdf>
- Macenić, M. (2011): Istraživanje mogućnosti površinske eksploatacije gipsa strojevima za kontinuirani iskop (*Exploration of possibility of exploitation by the use of machines for surface continuous exploitation*) Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 108 p. (*in Croatian*). Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 108 p. (*in Croatian*)
- Malan, D. F., Napier, J. A. L. and Watson, B. P. (1994): Propagation of fractures from an interface in a Brazilian test specimen. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 31, 6, 581–596.
- Markides C. F., Pazis, D. N. and Kourkoulis, S. K. (2010): Closed full-field solutions for stresses and displacements in the Brazilian disk under distributed radial load. *Int J Rock Mech Min Sci*, 47, 2, 227–237.
- Markides C. F., Pazis, D. N. and Kourkoulis, S. K. (2011): Influence of friction on the stress field of the Brazilian tensile test. *Rock Mech Rock Eng*, 44, 1, 113–119.
- Markides C. F. and Kourkoulis, S. K. (2012): The stress field in a standardized brazilian disc: the influence of the loading type acting on the actual contact length. *Rock Mech Rock Eng*, 45, 2, 145–158.
- Mellor, M. and Hawkes, I. (1971): Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli. *Eng Geol*, 5, 3, 173–225.
- Mishra, D. A. and Basu, A. (2012): Use of the block punch test to predict the compressive and tensile strengths of rocks. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech. Abstr*, 51, 119–127.
- Newman, D. A. and Bennett, D. G. (1990): The effect of specimen size and stress rate for the Brazilian test—a statistical analysis. *Rock Mech Rock Eng*, 23, 2, 123–134.
- Ojo, O. and Brook, N. (1990): The effect of moisture on some mechanical properties of rock. *Min Sci Technol*, 10, 2, 145–156.
- Pandey, P. and Singh, D. P. (1986): Deformation of a rock in different tensile tests. *Eng Geol*, 22, 3, 281–292.
- Perras, M. A. and Diederichs, M. S. (2014): A Review of the Tensile Strength of Rock. *Concepts and Testing, Geotechnical and geological engineering*, 32, 2, 525–546.
- Pollak, D. (2002): Ovisnost inženjerskogeoloških svojstava karbonatnih stijena o njihovim sedimentno-petrološkim značajkama (trasa Jadranske autoceste: “Tunel Sv. Rok-Maslenica”) (*Dependence of engineering-geological properties of carbonate rocks on their sedimentary-petrological characteristics (Adriatic highway section: "Tunnel Sv. Rok – Maslenica")*). Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 108 p. (*in Croatian*)
- Šestanović, S. Braun, K. and Barčot, D. (1993): Engineering Geo-logical Characteristics of the Road Solin – Klis (Dalmatia, Croatia). *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 5, 87–97.
- Sulukcu, S. and Ulusay, R. (2001): Evaluation of the block punch index test with particular reference to the size effect, failure mechanism and its effectiveness in predicting rock strength. *Int J Rock Mech Min Sci*, 38, 1091–1111.
- Sundaram, P. N. and Corrales, J. M. (1980): Brazilian tensile strength of rocks with different elastic properties in tension and compression. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 17, 2, 131–133.
- Tavallali, A. and Vervoort, A. (2010a): Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions. *Int J Rock Mech Min Sci*, 47, 2, 313–322.
- Tavallali, A. and Vervoort, A. (2010b): Failure of layered sandstone under Brazilian test conditions: effect of micro-scale parameters on macro-scale behaviour. *Rock Mech Rock Eng*, 43, 5, 641–653.
- Van De Steen, B., Vervoort, A. and Napier, J. A. L. (2005): Observed and simulated fracture pattern in diametrically loaded discs of rock material. *Int J Fract*, 131, 1, 35–52.
- Van der Schrier, J. S. (1988): The block punch index test. *Bull Int Assoc Eng Geol*, 38, 121–6.
- Vutukuri V. S. (1974): The effect of liquids on the tensile strength of limestone. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 11, 1, 27–29.
- Wang, Q. Z., Jia, X. M., Kou, S. Q., Zhang, Z. X. and Lindqvist P. A. (2004): The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. *Int J Rock Mech Min Sci*, 41, 2, 245–253.
- Wijk, G. (1978): Some new theoretical aspects of indirect measurements of the tensile strength of rocks. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15, 4, 149–160.
- Wong, L. N. Y. and Jong, M. C. (2013): Water Saturation Effects on the Brazilian Tensile Strength of Gypsum and Assessment of Cracking Processes Using High-Speed Video. *Rock Mech. Rock Eng.*, 46, 2, 269–287.
- Yanagidani T., Sano, O., Terada, M. and Ito, I. (1978): The observation of cracks propagating in diametrically-compressed rock discs. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15, 5, 225–235.
- Ye J, Wu FQ, Sun JZ (2009): Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads. *Int J Rock Mech Min Sci*, 46, 3, 568–576.

- You, M., Chen, X. and Su C. (2011): Brazilian splitting strengths of discs and rings of rocks in dry and saturated conditions. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao (Chin J Rock Mech Eng)*, 30, 3, 464–472.
- Yu, Y., Yin, J. and Zhong, Z. (2006): Shape effects in the Brazilian tensile strength test and a 3D FEM correction. *Int J Rock Mech Min Sci*, 43, 4, 623–627.
- Yu, Y., Zhang, J. and Zhang, J. (2009): A modified Brazilian disk tension test. *Int J Rock Mech Min Sci*, 46, 2, 421–425.
- Yue, Z. Q., Chen, S. and Tham, L. G. (2003): Finite element modeling of geomaterials using digital image processing. *Comput Geotech*, 30, 5, 375–397.
- Zhang, L. (2005): *Engineering Properties of Rocks*. Elsevier Publ., Amsterdam, 290 p.
- Zhou, Z., Li, X., Zou, Y., Jiang, Y. and Guonan, L. G. (2014): Dynamic Brazilian Tests of Granite Under Coupled Static and Dynamic Loads, *Rock Mech Rock Eng*, 47, 495–505.