

Primljen / Received: 11.7.2019.

Ispravljen / Corrected: 10.9.2019.

Prihvaćen / Accepted: 15.9.2019.

Dostupno online / Available online: 10.10.2019.

Trendovi u nerazornom ispitivanju stijenskih sidara

Autori:



Doc.dr.sc. **Mario Bačić**, mag.ing.aedif
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za geotehniku
mbacic@grad.hr



Prof.dr.sc. **Kenneth Gavin**, dipl.ing.građ.
TU Delft, Niozemska
Fakultet građevinarstva i geoznanosti
K.G.Gavin@tudelft.nl



Prof.dr.sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za geotehniku
mksk@grad.hr

Pregledni rad

Mario Bačić, Kenneth Gavin, Meho Saša Kovačević

Trendovi u nerazornom ispitivanju stijenskih sidara

Stijenska sidra predstavljaju ključni element u brojnim projektima stabilizacije stijenske mase, izgradnje tunela i podzemnih građevina. Stoga je ocjena njihovog stanja od vitalnog značenja za dokazivanje njihove funkcionalnosti tijekom životnog ciklusa građevine. Brojne su metode koje se primjenjuju, ili su u razvoju, za kvantificiranje stanja stijenskih sidara. One uključuju akustične metode i metode zasnovane na analizi vibracija, te kao takve koriste brojne prednosti različitih vrsta senzora i alata za obradu signala. Ovaj rad daje pregled dostupnih metoda nerazornog ispitivanja sidara, uzimajući u obzir trenutačnu praksu i najsuvremenije pristupe.

Ključne riječi:

stijensko sidro, nerazorno ispitivanje, senzori, mjerenje sile, kvaliteta injektiranja

Subject review

Mario Bačić, Kenneth Gavin, Meho Saša Kovačević

Trends in non-destructive testing of rock bolts

Rock bolts represent a critical element for many rock mass stabilization, tunnel construction, and underground work projects. Therefore, the evaluation of their condition is vital for proving their functionality over the entire life-cycle of structures. A number of techniques for quantifying condition of rock bolts are presently applied or are being developed. These include acoustic-based and vibration-based methods, which take advantage of various types of sensors and signal-processing tools. This paper provides an overview of available non-destructive test methods for rock bolts, considering both current practice and state of the art approaches.

Key words:

rock bolts, non-destructive test, sensors, force monitoring, grouting quality

Übersichtsarbeit

Mario Bačić, Kenneth Gavin, Meho Saša Kovačević

Trends in der zerstörungsfreien Prüfung von Felsankern

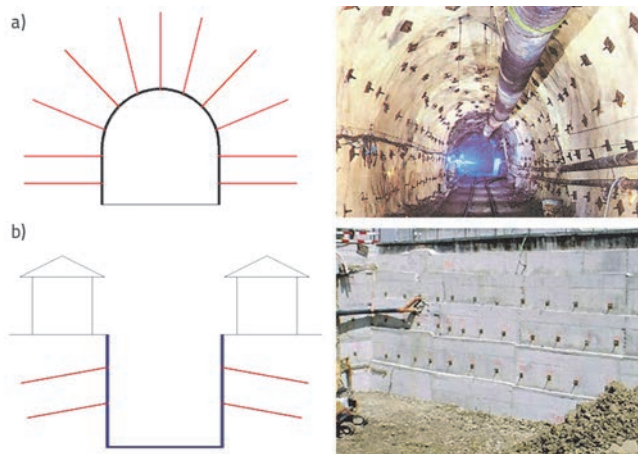
Felsanker sind ein Schlüsselement in zahlreichen Projekten zur Stabilisierung von Felsmassen, im Tunnelbau und in unterirdischen Bauwerken. Daher ist eine Beurteilung ihres Zustands von entscheidender Bedeutung, um ihre Funktionalität über den Lebenszyklus eines Bauwerks nachzuweisen. Es gibt zahlreiche Methoden, die angewendet oder entwickelt werden, um den Zustand von Felsankern zu quantifizieren. Sie umfassen akustische und Methoden basierend auf der Vibrationsanalyse und nutzen als solche die zahlreichen Vorteile verschiedener Arten von Sensoren und Signalverarbeitungswerkzeugen. Diese Arbeit bietet einen Überblick über die verfügbaren zerstörungsfreien Ankerprüfmethoden unter Berücksichtigung der aktuellen Praxis und der modernsten Ansätze.

Schlüsselwörter:

Felsanker, zerstörungsfreie Prüfung, Sensoren, Kraftmessung, Einspritzqualität

1. Uvod

Tijekom građevinske povijesti razvijene su mnoge mjere stabilizacije stijenske mase, ali najznačajniji napredak na ovom području postignut je razvojem stijenskih sidara, koja se danas najčešće koriste u tunelima i građevnim jamama (slika 1.) kao i na stijenskim usjecima, u rudnicima itd. Sa stotinama milijuna ugrađenih elemenata širom svijeta godišnje, trend primjene sidara zasigurno će dalje rasti i njihovo tržište je vrlo stabilno. Nova vrsta sidra i nova tehnologija ugradnje pojavljuju se na tržištu svakih 5 do 10 godina [1].



Slika 1. Neki primjeri primjene stijenskih sidara: a) tuneli; b) građevne jame [2]

Stabilizacija stijenskih pokosa, tunela i podzemnih građevina predstavlja izazov, jer svaka nestabilnost izazvana neprimjerenim podgradnim sustavom može imati negativne posljedice s aspekta vremena, troškova i, što je najvažnije, sigurnosti. Određivanje nosivosti stijenskog sidra, kao i monitoring njegova stanja, uključujući razinu sile i kvalitetu injektiranja, imaju važnu ulogu u provjeri sigurnosti takvih projekata. Uobičajeno se ispitivanje sidara provodi radi provjere projektnog rješenja i kontrole kvalitete izvedbe, no može se izvoditi i prije samog projektiranja radi dobivanja potrebnih informacija o njihovom ponašanju u određenim uvjetima, posebno u slučajevima kada su znanja o takvom ponašanju siromašna. Mjerodavni projektantski kôd EN 1997-1 [3] i norma za izvedbu stijenskih sidara EN 1537: 2008 [4] usredotočeni su na razorne postupke ispitivanja za određivanje nosivosti sidara. Takozvani "test prikladnosti" i "test prihvatljivosti" provode se primjenom razorne metode čupanja (eng. *pull-out*) sidra. Jedine nerazorne metode ispitivanja dane u navedenim dokumentima su one povezane s električnim ispitivanjem za ocjenu stanja zaštite od korozije samog elementa sidra, te ne postoje preporuke vezano za potrebu mjerenja sile u sidru ili za utvrđivanje kvalitete njegovog injektiranja. S obzirom na to da se sila u sidru s vremenom može mijenjati zbog olabavljenosti, puzanja u okolnoj stijenskoj masi, degradacije samog elementa

sidra, itd., izražena je potreba za ocjenom stanja sidra tijekom vremena. Posljednjih godina je nekoliko istraživača razmatralo nerazorne metode ispitivanja koje su se pokazale vrlo učinkovitim alatima za praćenje vremenski promjenjivog stanja stijenskih sidara. No, unatoč dobroj teoretskog pozadini, kod primjene tih metoda u praksi pojavljuje se određena zabrinutost, najvjerojatnije zbog manjka znanja o rukovanju opremom i o interpretaciji podataka. Andersson [5] sumnja da bi razlozi za zabrinutost mogli biti posljedica loših iskustava u prošlosti, povezanih s primjenom zastarjelih ispitnih uređaja. Ipak, jasno je da postoji stalna potreba za kontinuiranim razvojem i provjerom nerazornih metoda ispitivanja, a to će s vremenom zasigurno povećati samopouzdanje praktičara.

Song i dr. [6] primjećuju da se ispitivanje stijenskih sidara sve više oslanja na instrumentaciju senzorima, gdje odabir vrste senzora i položaja njegove ugradnje u velikoj mjeri ovisi o tome što se mjeri. Budući da sve metode nerazornog ispitivanja, u nekoj mjeri, ovisi o varijacijama u stijenskoj masi, injekcijskoj smjesi, čeličnoj šipci, te o karakteristikama sidrene glave, kao i cjelokupnom okruženju u kojem se ispitivanje izvodi, potrebno je nerazorne metode analizirati s oprezom. Ovo uključuje jasno poznavanje prednosti, ali i ograničenja svake metode.

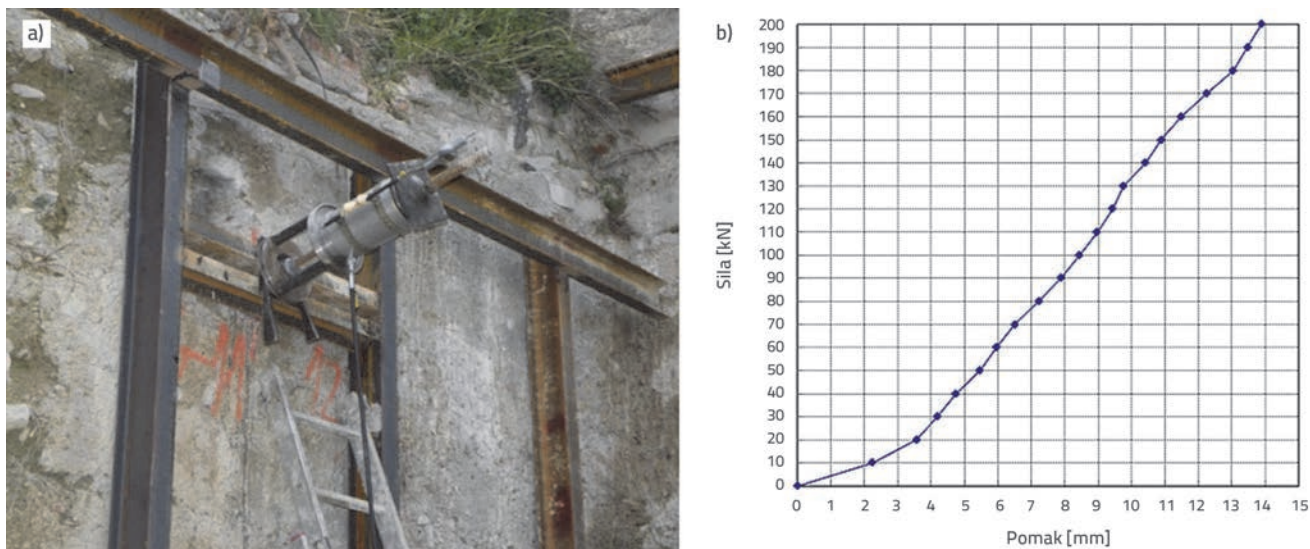
2. Određivanje nosivosti stijenskog sidra

Iako se većina nerazornih metoda usredotočuje na mjerenje razine sile u sidru ili određivanje kvalitete injektiranja, neka ispitivanja su usmjerena prema postupcima nerazornog određivanja nosivosti sidra. Iako bi se intuitivno moglo smatrati da određivanje nosivosti podrazumijeva primjenu razornih metoda ispitivanja, ovdje je sažeto obećavajuće istraživanje o mogućnostima primjene metode akustične emisije.

2.1. Stanje područja: test čupanja sidra

Za određivanje nosivosti ugrađenih pasivnih stijenskih sidara, kao i aktivnih geotehničkih sidara, u praksi se naširoko primjenjuje razorna metoda poznata kao test čupanja sidra [7]. Dvije su vrste ispitivanja čupanjem. Prva vrsta služi za provjeru stvarne nosivosti sidra gdje će tijekom ispitivanja doći do sloma čeličnog dijela ili izvlačenja sidra iz okolne stijene, a druga vrsta služi za povjeru može li sidro preuzeti nametnutu radnu silu kako je predviđeno projektom, tzv. "proof load test" [8]. Metoda čupanja sidra sastoji se od postupnog nametanja vlačne sile na izloženi kraj ugrađenog elementa, uz pomoć hidraulične pumpe, te od određivanja odnosa sila - pomak, slika 2. Tijekom faze ispitivanja, mjeri se veličina nametnute sile pomoću ugrađenih mjernih čelija, a mjeraci pomaka mjere vrijednosti ostvarenog pomaka.

Detaljne upute instrumentacije i provođenja ispitivanja su dane ISRM normom [7] koja preporučuje ispitivanje bar 5% ugrađenih sidara na projektnoj lokaciji. Svrha ispitivanja čupanjem je



Slika 2. Ispitivanje: a) čupanje sidra u tijeku; b) rezultatni dijagram sila – pomak, tzv. proof load testa (lokacija ispitivanja: građevna jama u Splitu, Hrvatska [8])

određivanje odnosa sila čupanja – pomak, a u slučaju da se sidro ne ponaša kako je predviđeno, samo ispitivanje ne pruža izravnu informaciju uzroka (npr. nekvalitetno injektiranje, nesigurnost u parametrima stijenske mase, manjkavosti u projektu, itd.).

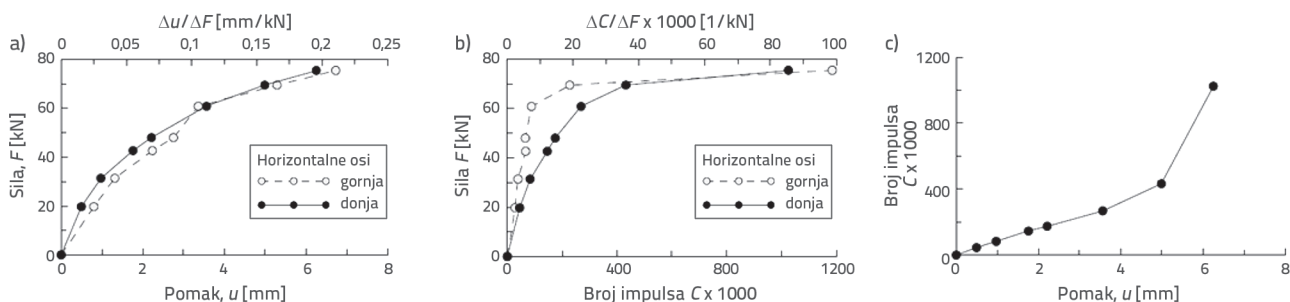
2.2. Budući trend: akustična emisija

Istraživanje koje su proveli Arbanas i dr. [9] usredotočeno je na pronalaženje alternativne metode razornom čupanju sidra. S obzirom na prirodne varijabilnosti i učinke kontrola kvalitete terenskih ispitivanja, istraživanje je provedeno u kontroliranim laboratorijskim uvjetima te još uvijek čeka na provjeru u terenskim uvjetima. Postupak ispitivanja sličan je testu čupanja, gdje se hidraulična pumpa koristi za povećanje vlačne sile, koja se kontinuirano mjeri. Kako se opterećenje povećava, nastaju mikropukotine u injekcijskog smjesi i na sučelju šipka - injekcijska smjesa. Broj pukotina raste s povećanjem nametnute sile, a stvaranje pukotina inducira emisiju valne energije koja se pretvara u električne signale pomoću piezoelektričnog senzora ugrađenog na glavi samog sidra. Nagli porast broja vršnih vrijednosti primljenih valova sugerira da se sila u sidru približava

nosivosti sidra, te se ispitivanje može prekinuti bez izvlačenja šipke.

Radi validacije predložene metode, formirano je i ispitano 48 laboratorijskih modela štapnih sidara s različitim sastavom injekcijske smjese. Rezultati ispitivanja jednog laboratorijskog modela su prikazani na slici 3., gdje slika 3.a prikazuje tipičnu vezu između nametnute sile i pomaka kao i vezu između sile i omjera "inkrement pomaka / inkrement sile". Zadnja registrirana vrijednost sile se smatra nosivošću sidra, jer je već sljedeći inkrement sile uzrokovao slom izvlačenjem. Dijagram na slici 3.b pokazuje vezu između nametnute sile i broja impulsa, kao i vezu između sile i omjera "inkrement impulsa / inkrement sile". Na istom dijagramu se vidi bilinearni trend broja inkremenata impulsa. Dodatno, ubrzani porast broja impulsa se događa odmah nakon što je dosegnuta vrijednost nosivosti sidra. Slična pojava se može vidjeti i na slici 3.c. Autori predlažu analitički postupak za određivanje sile pri kojoj ispitivanje treba biti obustavljeno. Ta sila, temeljeno na srednjoj vrijednosti za sve ispitane modele, iznosi oko 95 % vrijednosti sile nosivosti.

Stoga, za razliku od razorne metode čupanja sidara, mjerenjem broja impulsa akustične emisije, ispitivanje sidra se može zaustaviti prije negoli je dostignuta nosivost. U ovom slučaju



Slika 3. Rezultati ispitivanja sidra primjenom metode akustične emisije [9]

ispitano sidro može ostati kao funkcionalan dio podgradnog sustava, što za posljedicu ima značajnu financijsku uštedu. Međutim, kako je već spomenuto, metoda mora biti provjerena u terenskim uvjetima gdje veći broj faktora, većinom okolišnih, može utjecati na rezultate ispitivanja.

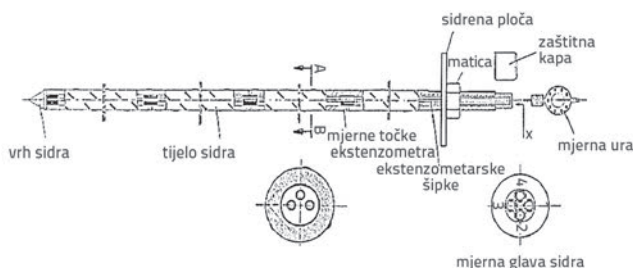
3. Mjerenje sile u sidru

Budući da se sila u sidru mijenja tijekom vremena, Benmokrane i dr. [10] navode da je monitoring sidra važan dio provjere njegovog dugoročnog integriteta. Značajne varijacije sile u sidru mogu biti indikator olabavljenja sidra ili njegove preopterećenosti, što može potencijalno imati ozbiljne posljedice za samu građevinu.

3.1. Stanje područja: mjerne ćelije i mjerno sidro

Mjerna ćelija se često koristi u praksi za mjerenje sile ugrađenog stijenskog sidra. Sastoji se od čeličnog cilindra koji je opremljen mjeracima deformacije [11]. Deformacije čeličnog cilindra se pretvaraju u električne signale koji se zatim kalibriraju i kao izlazni podatak se dobije vrijednost sile u sidru. Međutim, zbog troškova materijala i ugradnje, nisu sva ugrađena sidra opremljena mjernim ćelijama.

Alternativno se koriste mjerna sidra koja su kombinacija stijenskih sidara i ekstenzometara. Mjerna sidra se naširoko primjenjuju u geotehničkom inženjerstvu [12]. Njihova ugradnja se ne razlikuje od ugradnje konvencionalnih stijenskih sidara (slika 4.) pri čemu su mjeraci deformacije (mjerne točke ekstenzometra) ugrađeni duž sidra na unaprijed određenom razmaku. Raspodjela deformacija, kao i uzdužna sila, mjeri se prijenosnim uređajem za očitavanje. Često korišteni mjeraci deformacije, bazirani na električnoj otpornosti, dugoročno nisu učinkoviti zbog sklonosti oštećenju tijekom ugradnje i tijekom uporabe, pod utjecajem grubih uvjeta okruženja u kojem se nalaze. Da bi se prevladao taj nedostatak, Benmokrane i dr. [10] razvili su mjerace deformacije bazirane na principu vibrirajuće žice, koji se oslanja na promjenu vlasite frekvencije vibriranja ovisno o razini napetosti žice. Ti mjeraci su robustniji za primjenu u dugoročnom monitoringu.



Slika 4. Elementi mjernog sidra, modificirano iz [12]

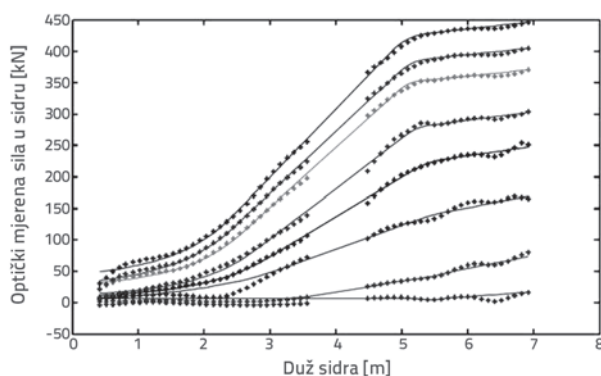
Trenutačno postoje aktivnosti usmjerene prema razvoju poboljšanih verzija mjernih sidara, kao što je Smart Rockbolt sustav [13]. Prototip koristi tehnologiju interneta stvari, (eng.

Internet of Things, IoT) te je opremljen mjeracem deformacije, akcelometrom, modulom za obradu podataka i bežičnim komunikacijskim modulom. Prototip bi trebao omogućiti kontinuirani monitoring deformacije i sile.

3.2. Budući trend: svjetlovodni senzor

Kao alternativa mjeracima deformacije baziranih na električnoj otpornosti i na vibrirajućoj žici, pojedini autori su razmatrali i primjenu svjetlovodnih senzora. Ta vrsta senzora je posebno korisna u područjima s elektromagnetskim smetnjama i / ili visokim temperaturama. Song i dr. [6] daju pregled istraživanja usredotočenih na primjenu svjetlovodnih senzora u stijenskim sidrima radi mjerenja deformacija i razine sile. Neki su od prvih pokušaja upotrebe svjetlovodnih senzora dali Frank i dr. [14], koji su istraživali mogućnost ugradnje takozvanih FBG (eng. Fiber Bragg Gratings) senzora u sidrima građenim od polimera ojačanih staklenim vlaknima, a koji su primijenjeni za dugoročni monitoring stijenskih sidara u švicarskim tunelima [15]. Ugrađeni senzori su podnijeli deformaciju od 1.5 %, što je značajno niže od moguće deformacije čeličnih stijenskih sidara koja iznosi i do 20 %. Schroeck i dr. [16] stoga su definirali posebno pozicioniranje FBG senzora duž stijenskih sidara, što je omogućilo mjerenje relativno visokih vrijednosti deformacija. Ho i dr. [17] su, kao alternativu mjerenju deformacija duž samog sidra, predložili upotrebu mjerne sidrene ploče opremljene FBG svjetlovodnim senzorom.

Tehnika distribuiranih svjetlovodnih senzora koju koriste Iten i dr. [18] prevladava kvazidistribuiranu prirodu FBG senzora, pa je kao takva pouzdanija u određivanju raspodjele naprezanja duž sidra. Na slici 5. je prikazana raspodjela mjerene sile primjenom tzv. Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) za različite razine sile u sidru.



Slika 5. Raspodjela sile duž sidra, mjerena primjenom "Brillouin optical time domain" analize [18]

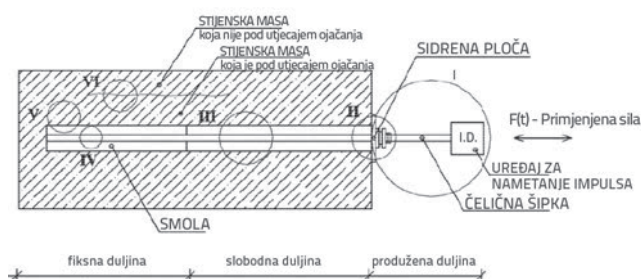
U nedavno provedenom istraživanju Vlachopoulos i dr. [19] implementirali su tehnologiju distribuiranih svjetlovodnih senzora (DOS) koja pruža visoku prostornu rezoluciju za registriranje deformacija duž sidra. DOS tehnologija koristi Rayleighov optički reflektometar u frekvencijskoj domeni

(ROFDR), pružajući uvid u različite mehanizme povezane s uzdužno opterećenim šipkama različitih dužina ugradnje, materijala injektiranja, uvjeta bušotine i promjera bušotine.

Iako metode temeljene na sensorima imaju perspektivu, instrumentiranje ugrađenih stijenskih sidara s različitim tipovima senzora (bilo da su mjeraci deformacija ili svjetlovodni senzori) još je uvijek relativno skupa opcija. Međutim, to bi se moglo promijeniti u bliskoj budućnosti, uzimajući u obzir sve jeftinije troškove elektronike kao i sve širi raspon različitih tipova senzora. Dodatno, razvoj komunikacijskih sustava s bežičnim tehnologijama će zasigurno pomoći učinkovitijoj upotrebi različitih senzora.

3.3. Budući trend: GRANIT sustav

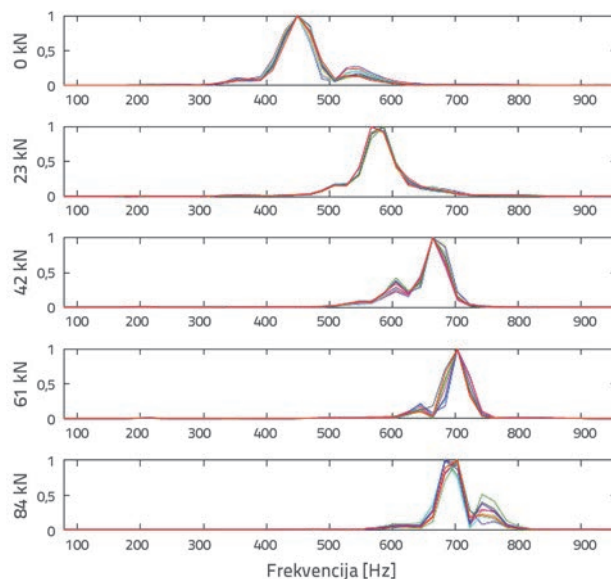
Alternativna metoda mjerenju sile u sidru, bez kvazidistribuiranog ili distribuiranog pozicioniranja senzora duž sidra je dana u obliku GRANIT sustava (The Ground Anchorage Integrity Testing), razvijenog na Sveučilištu u Aberdeenu [20]. Metoda podrazumijeva nerazorni postupak određivanja sile u ugrađenom sidru tijekom njegovog uporabnog vijeka, i to mjerenjem vibracija pomoću akcelerometra postavljenog na glavi sidra. Sustav, patentiran i licenciran za upotrebu, temeljen je na analizi vlastitih frekvencija sidra, koje daju informaciju o razini sile. Da bi se dobio frekvencijski spektar, mjernim uređajem sastavljenim od klipa i stezaljke [21] generira se kontrolirani impuls na glavi sidra. GRANIT sustav je podijeljen u šest podsustava (slika 6.) koji uključuju produženi dio slobodne dionice na koji se instalira uređaj za nanošenje impulsa (podsustav I), naglavni dio sidra (podsustav II), slobodnu dionicu koja nije u kontaktu sa stijenskom masom (podsustav III), sučelje čelične dionice i injekcijske smjese na dijelu sidrišne dionice (podsustav IV), sučelje injekcijske smjese i stijenske mase na dijelu sidrišne dionice (podsustav V) te granicu između sijenske mase koja je pod utjecajem ojačanja i one koja nije pod utjecajem ojačanja sidrima (podsustav VI).



Slika 6. Podjela GRANIT sustava u šest podsustava [20]

Kao prvi korak u validaciji sustava, autori su razvili jednodimenzionalni dinamički numerički model koji se sastoji od mase, prigušivača i krutosti svakog podsustava. Rezultati dinamičkog modela su uspoređeni s rezultatima laboratorijskih i terenskih ispitivanja. Karakteristike numeričkog modela su se uskladile s onima laboratorijskih i terenskih modela, a sve

analize su pokazale porast frekvencija i u laboratoriju [20] i na terenu [22], slika 7.



Slika 7. Porast vlastitih frekvencija s porastom razine sile u sidru [21]

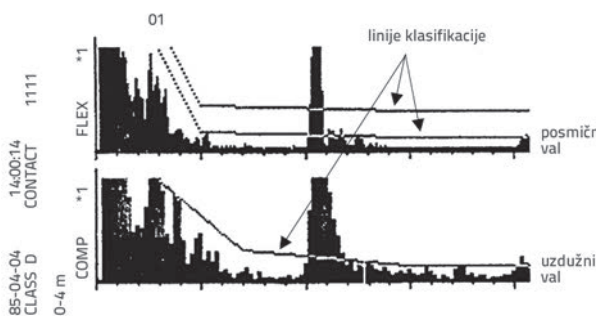
Signali ubrzanja su se intepretirali primjenom neuronskih mreža, treniranih na podacima terenskih sidara [22] ili na rezultatima dinamičkih numeričkih modela [23]. Analizirajući dinamički odgovor sidra pri različitim razinama nametnute sile, neuronska mreža je naučila složene nelinearne odnose između sile u sidru i vlastitih frekvencija sidra. Međutim, nužan je pažljiv odabir alata za obradu signala, kao i ulaznih podataka za neuronsku mrežu. S ciljem poboljšanja dijagnostičkih sposobnosti GRANIT sustava, Cheung i dr. [24] zaključuju da neuronska mreža mora biti trenirana na dovoljnom broju signala dobivenih za različite vrste stijenskih sidara, a Song i dr. [6] navode kako potreba za treniranjem neuronske mreže da prepozna trenutačno stanje znači i da se sustav ne može lako prilagoditi novim uvjetima stijenskih sidara koja nisu prethodno okarakterizirana. Ovo se ujedno smatra i glavnim nedostatkom GRANIT sustava. Ivanović i dr. [25] dodatno su istražili utjecaj geometrije i karakteristika materijala sidra na veličine frekvencija. U tom istraživanju je primijećeno da krutost injekcijske smjese ima najveći utjecaj na dinamički odgovor zato što je krutost stijenske mase smatrana beskonačnom.

4. Kvaliteta injektiranja

Da bi se osigurala nosivost stijenskog sidra, svakako bi bila poželjna validacija njegovog integriteta s aspekta kvalitete injektiranja. Navedeno je nužno jer transfer sile u sidru značajno ovisi o sučelju čelična šipka – injekcijska smjesa te o sučelju injekcijska smjesa – stijenska masa. Loša kvaliteta injektiranja rezultira manjom nosivošću sidra. Ovo poglavlje predstavlja nerazorne alternative razornim metodama određivanja kvalitete injektiranja, kao što je bušenje bušotine promjera većeg od promjera sidra (tzv. "overcoring" metoda).

4.1. Stanje područja: Boltometar

Nerazorna ispitivanja kvalitete injektiranja stijenskih sidara Boltometrom počela su 1983. godine razvojem prve verzije uređaja [26]. Boltometar koristi piezoelektrični senzor koji ujedno generira i registrira valove na glavi sidra. Generirani valovi putuju kroz ugrađeni element te se registriiraju nakon refleksije. Postupak ispitivanja je relativno jednostavan – ako je sidro dobro injektirano, povrat energije se može ostvariti jedino od kraja sidra. Međutim u slučaju loše kvalitete injektiranja te prisutnosti anomalija u injektiranom dijelu sidra, određena količina energije će se reflektirati od anomalije i kao takva će se registrirati na glavi sidra. Boltometar koristi i uzdužne (primarne, P) i posmične (sekundarne, S) valove, a piezoelektrični senzor je postavljen na način da razlikuje pojedinu vrstu vala. Slika 8. prikazuje tipičan rezultat ispitivanja boltometrom. Dok se P valovi koriste da bi se odredila efektivna duljina stijenskog sidra, analiza posmičnih valova je donekle revolucionarna kod akustičnih metoda. Posmični valovi se izravno koriste za određivanje kvalitete injektiranja radi svoje visoke osjetljivosti na prisutnost anomalija. Još jedna prednost posmičnih valova, u usporedbi s uzdužnim valovima, jest u činjenici da su manje prigušeni što pruža kvalitetnije rezultate ispitivanja. Temeljeno na razini povratne energije, boltometar klasificira sidra u četiri razreda, od A do D (pri čemu je A kontinuirano injektirano sidro s dobrom kvalitetom dobrom kvalitetom injektiranja, a D je sidro sa znatno reduciranom kvalitetom injektiranja). Da bi se ispitana sidra klasificirala u jedan od razreda, Boltometar koristi tzv. referentne klasifikacijske linije, koje služe za evaluaciju povratnog signala.



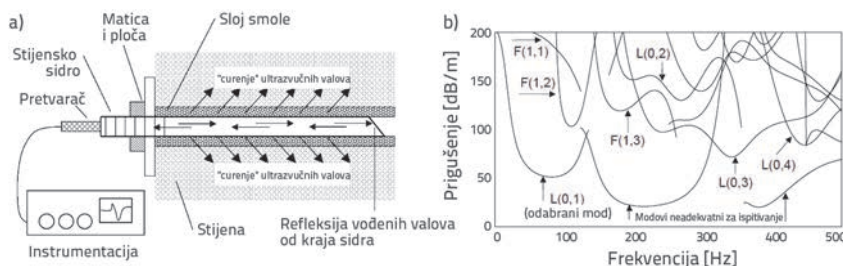
Slika 8. Tipičan rezultat ispitivanja Boltometrom [26]

Tvrtka koja razvija Boltometar (Geodynamik) završila je 1994. godine projekt *Rock bolt-reference bank*, koji je omogućio usporedbu mjerenih signala sa stvarnom kvalitetom injektiranja dobivenom razornom "overcoring" metodom. Nekoliko nedostataka Boltometra je pri tome identificirano, uključivo potrebu pripreme glave sidra za kvalitetno ispitivanje, ograničavanje

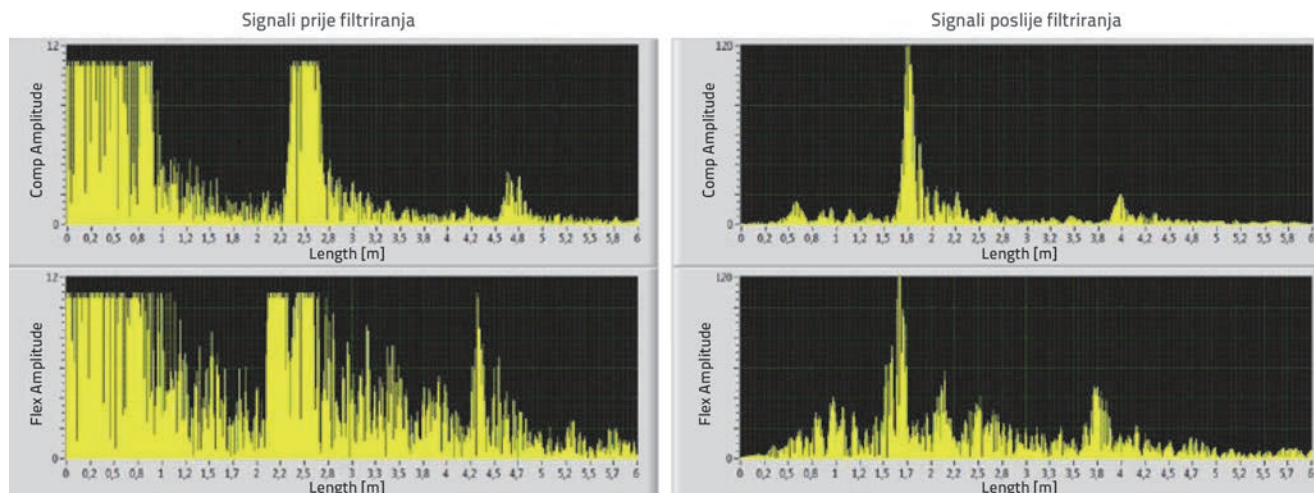
ispitivanja na šipke promjera 18-32 mm i na cementnu injekcijsku smjesu, itd. Dodatno, Agnew [27] navodi da Boltometar koristi injekcijsku smjesu kao medij kroz koji valovi prolaze, uzimajući u obzir pretpostavku da je brzina vala manja u injekcijskoj smjesi nego u čeličnoj dionici i u stijenskoj masi. Međutim, dok se ta pretpostavka može smatrati opravdanom u stijenskim masama visoke krutosti, formulacija je upitna u mekšim stijenskim masama [2] kao što je krš, gdje je pokazano [28] da krutost stijenske mase značajno varira. Agnew [27] je nastavio daljnja istraživanja kako bi prevladao navedene nedostatke, a Basson [29] navodi da se, prije pronalazjenja metode prikladnije od Boltometra, kvaliteta injektiranja stijenskih sidara može poboljšati jedino edukacijom osoba koje rade na njihovoj ugradnji.

4.2. Budući trend: Ultrazvučni vođeni valovi (Rock Bolt Tester)

Beard i dr. [30] istraživali su nerazorna ispitivanja sidara injektiranih smolama, primjenom principa ultrazvučnih vođenih valova proizvedenih generatorom kontroliranih frekvencija, slika 9.a. Na ovaj način se napredovanje vala kroz stijensko sidro može analizirati za pojedinu frekvenciju. Odgovarajuće frekvencije su identificirane koristeći numerički model te laboratorijska i terenska ispitivanja. Poznavanje oblika krivulje disperzije valne brzine omogućuje izračun položaja anomalije u injekcijskoj smjesi kao i ukupne duljine stijenskog sidra. Osnovna prednost u odnosu na Boltometar jest u činjenici da su određeni frekvencijski oblici manje podložni utjecaju razlike u impedanciji između injekcijske smjese i stijenske mase. Autori su koristili ispitivanje s dvije vrste frekvencija – niske frekvencije (30-70 kHz) i visoke frekvencije (2-5 MHz). Općenit zaključak istraživanja je taj da se nižim frekvencijama mogu detektirati potencijalne greške u injektiranju, a višim se frekvencijama može odrediti duljina stijenskog sidra. Prigušenje uslijed curenja (eng. leakage) jedna je od glavnih karakteristika ultrazvučnih vođenih valova, gdje ultrazvučna energija ima tendenciju "curenja" iz injekcijske smjese u stijensku masu. Identifikacija frekvencijskih oblika koji imaju relativno malo prigušenje najvažniji je faktor pri ispitivanju. Modeliranje vođenih valova je omogućilo bolji uvid u njihovo ponašanje traženjem modalnog rješenja i računanjem modalnih karakteristika. Na slici 9.b je prikazan rezultat u obliku frekvencija-prigušenje za različite modove, na kojoj se vidi da



Slika 9. Shema ispitivanja stijenskog sidra: a) primjenom tehnike ultrazvučnih vođenih valova; b) rezultati ispitivanja za različite modove ultrazvučnih vođenih valova [30]



Slika 10. Primjer ultrazvučnih ehosignala registriranih RBT uređajem [34]

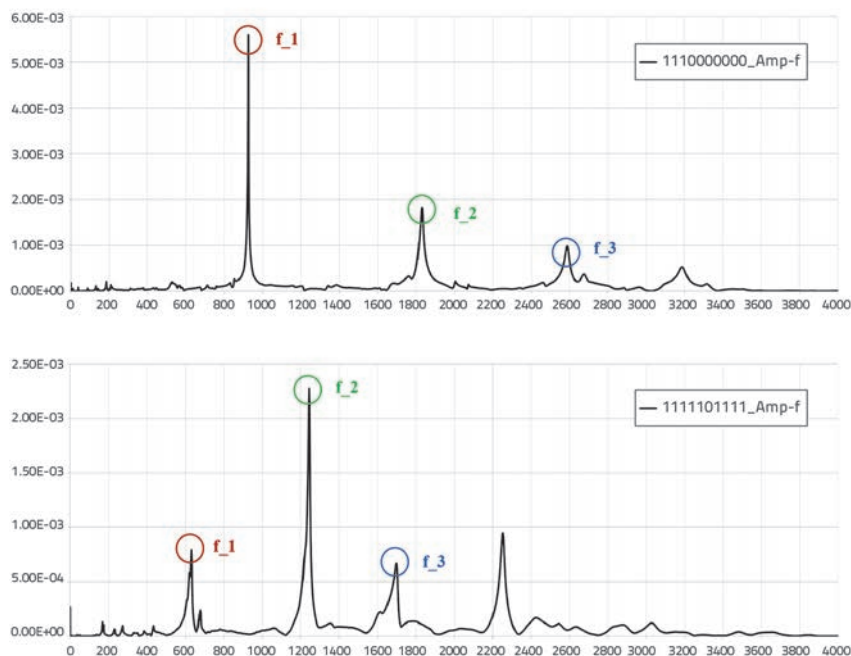
L(0,1) mod ima najmanje prigušenje i to pri frekvenciji od 70 kHz. Nekoliko naknadnih istraživanja [31-33] usmjerilo se na složeno 3D modeliranje ultrazvučnih valova.

Značajan iskorak u razvijanju suvremenije i poboljšane verzije boltometra je projekt koji je inicirala tvrtka Geosigma AB [34]. Projekt je motiviran potrebama tvrtki koje se bave ugradnjom sidara, kao i potrebama nadzornih tijela. Poboljšana metoda se temelji na istraživanju koje je proveo Beard i dr. [30], pod nazivom Rock Bolt Tester (RBT). RBT koristi vođene valove da bi proveo nerazorna ultrazvučna ispitivanja velikog raspona, sve radi određivanja integriteta sidra. Mjerna oprema uključuje suvremenu elektroniku i alate za obradu podataka. Stepinski i dr. [34] navode da se problem visokog prigušenja signala u injektiranom sidru može riješiti transmisijom impulsa širokog opsega i visoke energije. Rezultatni signal se zaprima osjetljivim piezoelektričnim senzorom i pojačava primjenom pojačala. Da bi se povećao odnos signal – smetnja (eng. *signal to noise ratio - S/N*), filteri su primijenjeni na zaprimljeni signal. Primjer ultrazvučnih ehosignala registriranih RBT uređajem prikazan je na slici 10. Uzdužne komponente signala su dane na gornjem dijelu slike, a poprečne komponente na donjem dijelu.

Eksperimentalna validacija RBT uređaja je provedena kroz 3,200 ispitivanja koja su dala obećavajuće rezultate. Andersson [35] navodi da je RBT sposoban detektirati sva sidra, bilo ona koja sadrže proizvodne pogreške ili ona koja se smatraju nezadovoljavajućima nakon ispitivanja Boltometrom. RBT metoda se nastavlja razvijati.

4.3. Budući trend: analiza frekvencija stijenskog sidra

Nekoliko istraživanja je provedeno s ciljem određivanja kvalitete injektiranja sidra temeljem analize frekvencijskog spektra kao izravnog rezultata dinamičkog odgovora sidra. Kovačević i dr. [36] analizirali su dominantnu frekvenciju iz spektra gustoće te su je pokušali povezati s postotkom injektiranosti sidra. Autori su proveli niz laboratorijskih i terenskih ispitivanja, gdje je zaključeno da se dominantna frekvencija povećava s povećanjem postotka injektiranosti. Međutim, izravna korelacija između dinamičkog



Slika 11. Dva frekvencijska spektra s vidljivim vršnim vrijednostima koje predstavljaju vlastite frekvencije: a) stijensko sidro s ukupno 30 % injektiranog dijela; b) stijensko sidro s ukupno 90 % injektiranog dijela [2]

odgovora i kvalitete injektiranja nije uspostavljena. Primjenom sofisticiranije opreme, Bačić [2] je nastavio istraživanje razmatrajući prve tri vlastite frekvencije i njihove povezanosti s kvalitetom injektiranja. Laboratorijsko ispitivanje je obuhvatilo 51 model sidara, s 94 različite kombinacije pogreški u injektiranju. Posebni sustav prikupljanja podataka primijenjen je za generiranje impulsa na glavi sidra. Primljeni signal je transformiran iz vremenske u frekvencijsku domenu i daljnje analize su rađene pomoću razvijenog programa. Kao alat za programiranje, korištena je LabVIEW platforma. Nakon uprosječivanja signala radi povećanja odnosa signal – smetnja, karakteristični vrhovi su vidljivi u frekvencijskom spektru (vertikalna os - magnituda, vodoravna os - vrijednost frekvencije). Ti vrhovi upućuju na vlastite frekvencije sidra, slika 11.

Primjenom statističke analize na prikupljenim vrijednostima prve, druge i treće prirodne frekvencije sidra, dokazana je snažna korelacija između vlastitih frekvencija i postotka injektiranosti, gdje se vrijednosti svih vlastitih frekvencija povećavaju sa smanjenjem postotka injektiranosti. Slika 11. prikazuje više vrijednosti vlastitih frekvencija za sidro koje je injektirano na 30 % svoje duljine (slika 11.a), u usporedbi sa sidrom koje je injektirano na 90 % svoje duljine (slika 11.b). Autor je nadalje proveo FEM analize radi usporedbe numeričkih i eksperimentalnih vrijednosti. Rezultati pokazuju potencijal nerazornog, vibracijskog, eksperimentalnog ispitivanja kvalitete injektiranja sidra. Međutim, primjenjivost metode mora biti potvrđena kroz sljedeću fazu istraživanja koja uključuje ispitivanje sidara u terenskim uvjetima.

Hartman i dr. [37] također su istraživali mogućnosti primjene frekvencijskog spektra za ispitivanje stanja sidara ugrađenih u rudnicima Australije. Takozvani MODSHOCK sustav koristi impuls generiran na glavi sidra da bi se dobio odgovor poznat kao "Mechanical Admittance" gdje se više frekvencije koriste za određivanje rezonantnih harmonika sidra, a niže frekvencije za određivanje krutosti glave sidra. Spomenuta istraživanja demonstriraju potencijal korištenja frekvencijskoga odgovora sidra za određivanje kvalitete injektiranja.

4.4. Ostali pristupi

Lee i dr. [38] te Cheung i dr. [24] dali su pregled nerazornih metoda ispitivanja stijenskih sidara i čavala za stabilizaciju

tla. Metode temeljene na električnoj otpornosti pokazuju mogućnost detektiranja većih nepravilnosti u čavlama, ali problem nastaje u razlikovanju anomalija nastalih kao posljedica kraćeg injektiranog dijela od anomalija nastalih kao posljedica kraćeg čeličnog dijela. Da bi se utvrdila vrsta anomalije, autori preporučuju primjenu druge metode za određivanje duljine čeličnog dijela. Razmatranje drugih električnih metoda, kao što su reflektometrija površinskih valova u vremenskoj domeni, pokazuje da rezultati ispitivanja značajno ovise o interpretaciji. Stoga su nužna poboljšanja tih metoda ako ih se želi koristiti za ispitivanje integriteta čavala. Kada je riječ o elektromagnetnim metodama, Kelly i dr. [39] napominju da postoji mogućnost primjene georadarske (GPR) metode za detekciju anomalija, ali da ispitivanje mora biti provedeno pažljivo. Međutim, usprkos primjenjivosti s teoretskog stajališta, georadarska metoda u praksi nije korištena za ispitivanje stijenskih sidara.

5. Zaključak

U radu je dan pregled nerazornih metoda ispitivanja stijenskih sidara. Mjerodavne europske norme za projektiranje i izvedbu sidara oslanjaju se samo na razorne metode. Međutim, za dugoročno određivanje razine sile u sidru, kao i njegove cjelovitosti s aspekta kvalitete injektiranja, nerazorne metode su učinkovitiji alat. Unatoč dobroj teoretskoj pozadini tih metoda, kod njihove primjene u praksi pojavljuje se određena zabrinutost, najvjerojatnije zbog manjka znanja o rukovanju opremom i o interpretaciji podataka te zbog loših iskustava povezanih s primjenom zastarjelih ispitnih instrumenata. Međutim, porast istraživanja u ovom području je zamjetan, gdje se ispitivanja stijenskih sidara okreću prema instrumentiranju senzorima. Mnoge akustične metode i metode bazirane na vibracijama, koriste brojne prednosti senzora kao što su piezoelektrični senzori, svjetlovodni senzori, itd. Dodatno, suvremeni alati za obradu signala te drugi napredni računalni sustavi kao što su neuronske mreže, otvaraju vrata kontinuiranom razvoju nerazornih metoda. Suvremeni, pouzdani i terenski provjereni postupci povećat će samopouzdanje praktičara u primjeni ovih inovativnih metoda ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Martin Blanco, L.: Theoretical and experimental study of fully grouted rock bolts and cable bolts under axial loads, Dissertation, Paris Institute of Technology, France, 2012.
- [2] Bačić, M: Quality control of rock bolt grouting using dynamic response analysis (In Croatian), Dissertation, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Croatia, 2015.
- [3] European Committee for Standardisation (CEN): EN 1997-1- Eurocode 7. Geotechnical design. General rules, 2004., URL: <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=13>
- [4] European Committee for Standardisation (CEN): EN 1537:1999 - Execution of special geotechnical works - Ground anchors, 1999.
- [5] Andersson, P.: Verifiering av instrument för icke-förstörande kontroll av bergbultars ingjutning (In Swedish), BeFo project 386, 2019., URL: svbergteknik.se
- [6] Song, G., Li, W., Wang, B., Ho, S.C.M.: A Review of Rock Bolt Monitoring Using Smart Sensors, Sensors (Basel), 17:4 (2017), 10.3390/s17040776

- [7] ISRM Commission on standardization of laboratory and field test: Pull-Out Test for Rock Bolts, 1974.
- [8] Marčić, D., Kovačević, M.S., Bačić, M.: Investigation of rock bolts in karst, Proceedings of 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Minnesota, USA, pp. 1978-1986, 2014.
- [9] Arbanas, Ž., Kovačević, M.S., Szavits-Nossan, V.: Kontrola kvalitete štapnih sidara (In Croatian), Građevinar, 57 (2005) 11, pp. 859–867
- [10] Benmokrane, B., Chekired, M., Xu, H.: Monitoring Behavior of Grouted Anchors Using Vibrating-Wire Gauges. Journal of Geotechnical Engineering, 121 (1995) 6, pp. 466–475
- [11] Mihalinec, Z., Bačić, M., Kovačević, M.S.: Risk identification in landslide monitoring, Građevinar, 65 (2013) 6, pp. 523-536
- [12] Kovačević, M.S.: The Observational Method and the use of geotechnical measurements, Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds, ed. Vaniček, I. Prag : Czech Geotechnical Society CICE, 2003., pp. 575-58
- [13] Delsing, J., Eliasson, J., Pereira, P.P., Gebart, J.: The IoT rockbolt, Proceedings of the 5th International Conference on Internet of Things, Seoul, South Korea, 2015.
- [14] Frank, A., Nellen, P.M., Broennimann, R., Sennhauser, U.J.: Fiber optic bragg grating sensors embedded in GFRP rockbolts, Proceedings of the 1999 Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, USA, 1999, pp. 497–504.
- [15] Nellen, P.M., Frank, A., Broennimann, R., Sennhauser, U.J.: Optical fiber bragg gratings for tunnel surveillance, Proceedings of the SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport, USA, 2000, pp. 263–270.
- [16] Schroeck, M., Ecke, W., Graupner, A.: Strain monitoring in steel rock bolts using FBG sensor arrays, Proceedings of SPIE 4074, Applications of Optical Fiber Sensors, 2000, pp. 298-304, <https://doi.org/10.1117/12.397895>
- [17] Ho, S.C.M., Li, W., Wang, B., Song, G.: A load measuring anchor plate for rock bolt using fiber optic sensor, Smart Materials and Structures, 26 (2017) 5
- [18] Iten, M., Puzrin, A.M.: Monitoring of stress distribution along a ground anchor using BOTDA, Proceeding of SPIE 7647, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, 2010, pp. 7647 2J, <https://doi.org/10.1117/12.847499>
- [19] Vlachopoulos, N., Cruz, D., ForBes, B.: Utilizing a novel fiber optic technology to capture the axial responses of fully grouted rock bolts, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10 (2018) 2, pp. 222-235, <https://doi.org/10.1016/j.jrmege.2017.11.007>
- [20] Ivanović, A., Starkey, A., Neilson, R.D., Rodger, A.A.: The influence of load on the frequency response of rock bolt anchorage, Advances in Engineering Software, 34 (2003) 11-12, pp. 697–705, [10.1016/S0965-9978\(03\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(03)00099-1)
- [21] Neilson, R.D., Ivanović, A., Starkey, A.J., Rodger, A.A.: Design and dynamic analysis of a pneumatic impulse generating device for the non-destructive testing of ground anchorages, Mechanical Systems and Signal Processing, 21 (2007) 6, pp. 2523–2545, [10.1016/j.ymsp.2006.11.011](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2006.11.011)
- [22] Starkey, A., Ivanovic, A., Neilson, R.D., Rodger, A.A.: Use of neural networks in the condition monitoring of ground anchorages, Advances in Engineering Software, 34 (2003) 11-12, pp. 753–761, [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(03\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(03)00103-0)
- [23] Starkey, A., Ivanovic, A., Neilson, R.D., Rodger, A.A.: Using a Lumped Parameter Dynamic Model of a Rock Bolt to Produce Training Data for a Neural Network for Diagnosis of Real Data, Meccanica, 38 (2003) 1, pp. 133–144., DOI <https://doi.org/10.1023/A:1022031720855>
- [24] Cheung, W.M., Lo, D.O.K.: Interim Report on non-destructive tests for checking the integrity of cement grout sleeve of installed soil nails non-destructive tests for checking the integrity of cement, Report No 176. Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 2005.
- [25] Ivanović, A., Neilson, R.D.: Influence of geometry and material properties on the axial vibration of a rock bolt, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45 (2008) 6, pp. 941–951, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.10.003>
- [26] Geodynamik AB: Boltometer Users Manual, 1988.
- [27] Agnew, G.D.: An Investigation of Methods for Producing a Non-destructive Grouted Tendon Tester. Consultancy report produced for COMRO, Department of Electrical Engineering, University of Witwatersrand, Johannesburg, 1990.
- [28] Jurić Kačunić, D., Arapov, I., Kovačević, M.S.: New approach to the determination of stiffness of carbonate rocks in Croatian karst. Građevinar, 63 (2011) 2, pp. 177-185
- [29] Basson, D.: Final Assessment of Feasibility of the Use of the CTFM Method for the Determination of the Grouted Quality of Roof-Bolts. Consultancy report produced for COMRO. Sensor Systems Department, Division of Material Sciences and Technology, CSIR, Pretoria, 1991.
- [30] Beard, M.D., Lowe, M.J.S.: Non-destructive testing of rock bolts using guided ultrasonic waves, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40 (2003) 4, pp. 527–536, [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00027-3](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00027-3)
- [31] Buys, B. J.: Rock Bolt Condition Monitoring using Ultrasonic Guided Waves. Dissertation. University of Pretoria, South Africa, 2008.
- [32] Cerniglia, D., Pantano, A., Montinaro, N.: 3D simulations and experiments of guided wave propagation in adhesively bonded multi-layered structures, NDT and E International, 43 (2010) 6, pp. 527–535, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.05.009>
- [33] Yan, Z., Cai, H., Wang, Q., Cao, X., Zhang, L.: Finite difference numerical simulation of guided wave propagation in the full grouted rock bolt. Science China Technological Sciences, 54 (2011) 5, pp. 1292–1299, [10.1007/s11431-010-4251-6](https://doi.org/10.1007/s11431-010-4251-6)
- [34] Stepinski, T., Matsson, K.J.: Rock bolt inspection by means of RBT instrument, Proceedings of the 19th World Conference on Non-Destructive Testing, Munich, Germany, 7 pg., 2016.
- [35] Andersson, P.: Verification of a new tool for non-destructive testing of rock bolt grouting, In Nova FoU Annual Report 2017, ed. Laaksoharju, M., Oscarsson, C., Open Research and Technical Development Platform, Nova FoU (Nova R&D), 2017.
- [36] Kovačević, M.S., Vrkljan, I., Szavits-Nossan, A.: Non-destructive procedure for testing grouting quality of rockbolt anchor, 9th International on Congress Rock Mechanics, Paris, France, ed. Vouille, G., Berest, P., 1999, pp. 1475–1478
- [37] Hartman, W., Lecinq, B., Higgs, J., David, T.: Non-destructive integrity testing of rock reinforcement elements in Australian mines. Proceedings of 2010 Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong, 2010, pp. 161–170
- [38] Lee, C.F.: Review of use of non-destructive testing in quality control in soil nailing works, Report No. 219, Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 2007.
- [39] Kelly, A.M., Jager, A.J.: Critically evaluate techniques for the in situ testing of steel tendon grouting effectiveness as a basis for reducing fall of ground injuries and fatalities, CSIR, Pretoria, 1996.