

NAPREDNA SEIZMIČKA ANALIZA U KORELACIJI S HOEK-BROWNOVIM KRITERIJEM ČVRSTOĆE

KRISTIAN POLIĆ¹

¹ *Terravision consulting, Republika Hrvatska*

Sažetak

U radu je prikazan koncept integracije seizmičke refrakcijske tomografije s Hoek-Brownovim kriterijem čvrstoće radi dobivanja prostorno kontinuiranih geotehničkih parametara stijenske mase. Polazište istraživanja temelji se na empirijskoj korelaciji između brzine P-valova i jednoosne tlačne čvrstoće (UCS), nakon čega se dobivene vrijednosti transformiraju u parametre stijenske mase u kombinaciji s geološkom prospekcijom i laboratorijskim ispitivanjima, te konačno u koheziju i kut unutarnjeg trenja. Metodologija je primijenjena na stvarnim podacima seizmičke refrakcijske tomografije, pri čemu su dobiveni 2D modeli distribucije geotehničkih projektnih parametara. Rezultati pokazuju logičnu korelaciju između zona smanjenih brzina i smanjenih vrijednosti čvrstoće te potvrđuju mogućnost korištenja geofizičkih podataka za preliminarnu procjenu projektnih parametara. Pristup predstavlja konceptualni okvir za daljnji razvoj integriranih geofizičko-geomehaničkih modela.

Ključne riječi

seizmička refrakcijska tomografija, Hoek-Brown kriterij čvrstoće, jednoosna tlačna čvrstoća, kohezija, kut unutarnjeg trenja i stijenska masa.

1 Uvod

Seizmička refrakcijska tomografija u inženjerskoj praksi primarno se koristi za definiranje geometrije podzemlja i identifikaciju diskontinuiteta, pri čemu interpretacija najčešće završava na razini elastičnih parametara, osobito brzine P-valova. S druge strane, projektiranje u stijenskoj masi temelji se na mehaničkim parametrima poput jednoosne tlačne čvrstoće (UCS), kohezije i kuta unutarnjeg trenja, koji se u pravilu dobivaju laboratorijskim ispitivanjima i inženjersko-geološkom klasifikacijom. Suvremena istraživanja (npr. Handoyo et al., 2025) ističu nužnost integracije seizmičkih polja s mehaničkim parametrima kako bi se smanjila nesigurnost u ranoj fazi projektiranja. Barton (2006) je postavio temelje korelacije seizmičke brzine i kvalitete stijenske mase, dok recentni radovi (Aljabbaba et al., 2025) koriste napredne algoritme za izravno kartiranje krutosti i čvrstoće iz profila seizmičke refrakcijske tomografije.

Empirijske korelacije između brzine P-valova i UCS-a (npr. Kahraman, 2001) upućuju na postojanje kvantitativne veze između elastičnih i mehaničkih svojstava intaktne stijene. Hoek-Brownov kriterij čvrstoće omogućuje daljnju transformaciju parametara intaktne stijene u parametre stijenske mase, uzimajući u obzir stupanj raspucanosti i geološke uvjete (Hoek i Brown, 2018). Međutim, uobičajena praksa rijetko integrira seizmičke modele i kriterije čvrstoće u jedinstveni prostorni analitički okvir.

Polazeći od pretpostavke da u stijenskoj masi postoji fizikalna povezanost između elastičnih i mehaničkih svojstava, cilj rada je prikazati konceptualni model transformacije seizmičkog 2D polja brzina u prostorni prikaz parametara Hoek-Brownovog kriterija te konačno u koheziju i kut unutarnjeg trenja. Rad ne razrađuje sve detalje transformacijskog postupka, već demonstrira metodološku izvedivost i inženjersku konzistentnost takvog pristupa.

2 Metode

Predložena metodologija temelji se na integraciji geofizičkog i geomehaničkog pristupa u jedinstveni analitički okvir. Polazište predstavlja seizmička refrakcijska tomografija kojom se dobiva prostorna distribucija brzine P-valova, dok se završni rezultat definira u obliku projektno relevantnih parametara stijenske mase, u ovom slučaju kohezije i kuta unutarnjeg trenja.

Metoda se ne temelji na izravnom mjerenju mehaničkih parametara, već na transformaciji elastičnih svojstava u parametre čvrstoće kroz niz empirijskih i teorijskih relacija. Time se omogućuje prijelaz s fizikalno mjerljivih veličina na inženjerski upotrebljive parametre, uz zadržavanje prostornih kontinuiteta modela. Ulazni model i podaci koji se koriste pri ovoj analizi, dobiveni su obradom seizmičkih snimki u programu za obradu seizmičkih podataka pod nazivom Rayfract. Ovaj softverski alat daje završno rješenje u kombinaciji s programom Surfer koji se koristi za prostorni prikaz modela seizmičke refrakcijske tomografije (prostorni model brzina primarnih ili sekundarnih valova).

2.1 Transformacijski model

Transformacijski model temelji se na pretpostavci da u stijenskoj masi postoji fizikalna povezanost između elastičnih svojstava, koja se mjeri seizmičkim metodama, i mehaničkih parametara koji definiraju čvrstoću i deformabilnost materijala. U kompaktnim i relativno homogenim stijenskim sredinama brzina P-valova reflektira stupanj kompaktnosti, gustoću i prisutnost diskontinuiteta, što su ujedno čimbenici koji izravno utječu na tlačnu čvrstoću.

Polazišna veličina modela je 2D distribucija brzine P-valova (V_p) dobivena seizmičkom refrakcijskom tomografijom. Ovaj model predstavlja kontinuirano polje elastičnih svojstava i služi kao baza za daljnje transformacije.

U prvom koraku provodi se transformacija brzine P-valova u jednoosnu tlačnu čvrstoću (UCS) primjenom empirijskih korelacija razvijenih za intaktnu stijenu. Ovim korakom seizmički model prelazi iz domene fizikalnih parametara u domenu parametara čvrstoće intaktne stijene. Međutim, brzina P-valova dobivena seizmičkom refrakcijskom tomografijom predstavlja efektivni elastični odgovor stijenske mase u terenskim uvjetima (in-situ), pri čemu izmjerene vrijednosti odražavaju utjecaj pukotina, raspucanosti i heterogenosti na razini rezolucije metode. Stoga se dobiveni UCS u ovom radu ne interpretira kao laboratorijska čvrstoća idealno intaktne stijene, već kao ekvivalentni paramter čvrstoće koji predstavlja integrirani pokazatelj mehaničkog stanja stijenske mase u prirodnim uvjetima. Takav pristup omogućuje konzistentan prijelaz prema Hoek-Brownovom kriteriju, gdje se utjecaj diskontinuiteta dodatno eksplicitno modelira kroz parametre stanja stijenske mase.

Jedna od najčešće citiranih relacija je ona koju predlaže Kahraman (2001), gdje je utvrđena snažna nelinearna povezanost između brzine P-vala i UCS-a za širok spektar litoloških tipova. Najčešće izvedeni oblik korelacije može se zapisati u sljedećem obliku:

$$UCS = 9.95 V_p^{1.21} (R = 0.83) \quad (1)$$

Ova formula omogućuje pretvorbu brzina u realnu čvrstoću intaktne stijene, što potvrđuju klasična istraživanja Yasara i Erdogana (2004) te Moradiana i Behnie (2009) koja povezuju fizičko-mehanička svojstva kroz seizmički odziv.

Nakon primjene navedene empirijske relacije, dobivene su vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) za svaku ćeliju seizmičkog modela. Time je omogućena transformacija 2D polja brzina P-valova u 2D polje procijenjene čvrstoće.

U drugom koraku dobivene vrijednosti UCS-a integriraju se u Hoek-Brownov kriterij čvrstoće (Slika 1.), koji omogućuje prijelaz parametara intaktne stijene na parametre stijenske mase. Za integraciju i proračun koristilo se softversko rješenje vlastite izrade nazvano "ADV_SEIS_ANSYS" koje je kreirano prema formulacijama i analitičkim rješenjima iz rada Hoeka i Browna (2018). U model se uvode pokazatelji kvalitete stijenske (npr. GSI, faktor poremećenosti i odgovarajući parametri materijala) čime se uzima u obzir utjecaj raspucanosti i strukturne degradacije. Važno za napomenuti da recentna istraživanja (Li et al., 2023) naglašavaju primjenu V_p za izravno kvantificiranje GSI indeksa i faktora poremećenosti (D) unutar Hoek-Brownovog modela.

Y-depth (rel., m)	V_p (m/s)	UCS (MPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	γ (MN/m ³)	σ_{cm} (MPa)	ϕ' (°) TUNNEL	c (MPa) TUNNEL	Density (g/cm ³)
120.7903	4307.38	58.249	1.492	-0.216	0.0246	3.488	30.38	0.438	25.111
120.7904	4309.25	58.271	1.492	-0.216	0.0246	3.489	30.39	0.438	25.112
120.7905	4319.55	58.392	1.495	-0.217	0.0247	3.498	30.40	0.439	25.133
120.7906	4323.83	58.442	1.497	-0.217	0.0247	3.501	30.40	0.439	25.142
120.7907	4324.92	58.455	1.497	-0.217	0.0247	3.502	30.41	0.439	25.144
120.7908	4322.23	58.524	1.499	-0.217	0.0247	3.504	30.42	0.439	25.139
120.7909	4327.52	58.586	1.500	-0.217	0.0247	3.507	30.42	0.440	25.143
120.7910	4328.81	58.591	1.501	-0.217	0.0247	3.508	30.42	0.440	25.143
120.7911	4330.08	58.606	1.501	-0.217	0.0247	3.509	30.43	0.440	25.144
120.7912	4331.08	58.618	1.502	-0.217	0.0247	3.510	30.43	0.440	25.145
120.7913	4331.33	58.621	1.502	-0.217	0.0247	3.511	30.43	0.440	25.146
120.7914	4333.10	58.642	1.503	-0.217	0.0247	3.513	30.43	0.440	25.147
120.7915	4283.63	58.068	1.473	-0.213	0.0246	3.444	30.32	0.434	25.052
120.7916	4285.10	58.086	1.474	-0.213	0.0246	3.445	30.32	0.434	25.052
120.7917	4286.68	58.105	1.474	-0.213	0.0246	3.447	30.33	0.434	25.054
120.7918	4288.01	58.121	1.475	-0.213	0.0246	3.448	30.33	0.434	25.056
120.7919	4289.45	58.138	1.476	-0.213	0.0246	3.450	30.33	0.434	25.058
120.7920	4270.90	57.918	1.451	-0.210	0.0245	3.431	30.26	0.429	25.016
120.7921	4272.33	57.935	1.452	-0.210	0.0245	3.432	30.26	0.429	25.018
120.7922	4273.80	57.953	1.453	-0.210	0.0245	3.434	30.27	0.429	25.020

Slika 1. Sintetička matrica geomehaničkih parametara.

Treći korak obuhvaća transformaciju nelinearnog Hoek-Brownovog kriterija u ekvivalentne Mohr-Coulomb parametre, odnosno koheziju (c) i kut unutarnjeg trenja (ϕ), unutar definiranog raspona naprezanja relevantnog za promatrani inženjerski problem. Time se omogućuje primjena rezultata u standardnim numeričkim i analitičkim modelima stabilnosti.

Važno je naglasiti da svaki korak transformacijskog lanca uključuje određenu razinu aproksimacije, budući da se prijelaz provodi između fizikalno različitih parametarskih domena od elastičnih svojstava izmjerenih metodom seizmičke refrakcijske tomografije do parametara čvrstoće definiranih geomehaničkim kriterijima. Model stoga ne predstavlja izravno mjerenje mehaničkih svojstava, već kvantitativno utemeljenu procjenu dobivenu integracijom empirijskih relacija i teorijskih kriterija čvrstoće.

Cilj ovog rada nije potpuna kalibracija svih koeficijenata niti konačna determinacija apsolutnih vrijednosti parametara, već demonstracija metodološke konzistentnosti transformacijskog pristupa. Poseban naglasak stavljen je na provjeru fizikalne logike prijelaza između pojedinih faza modela te na očuvanje prostorne koherentnosti dobivenih rezultata. Time se pokazuje da je moguće razviti integrirani okvir koji omogućuje kontinuirani prikaz mehaničkih parametara stijenske mase na temelju seizmičkih podataka, uz jasno definirana ograničenja i pretpostavke.

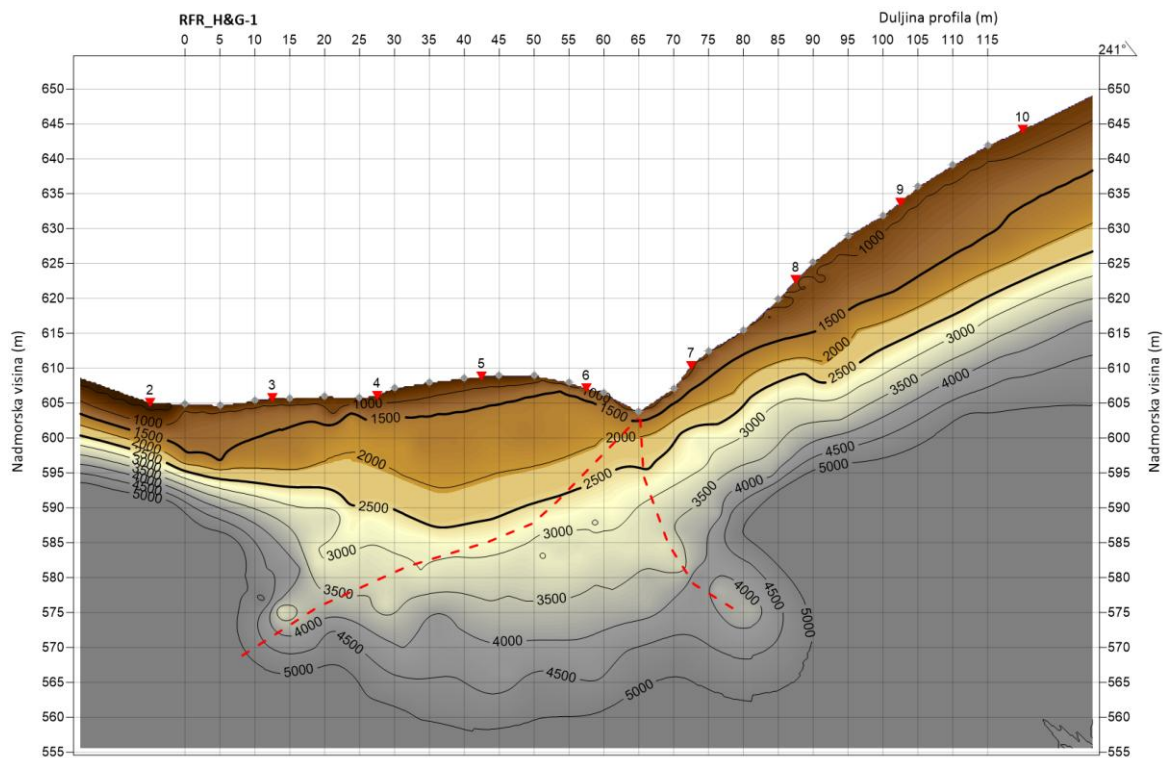
2.2 Istraživano područje i geološki kontekst

Istraživanje je provedeno u zoni portala tunela u stijenskoj masi izgrađenoj pretežno od škriljavih stijena (eng. *slate*), koje karakterizira izražena laminiranost, anizotropija i prisutnost sekundarnih diskontinuiteta. Takve litološke jedinice predstavljaju geotehnički zahtjevno okruženje zbog varijabilnosti mehaničkih svojstava, osobito u prijelaznim zonama trošenja i u područjima povećane raspucanosti. Škriljci su metamorfne stijene

fine granulacije kod kojih je razvijena škriljavost kao dominantna strukturna značajka. Mehaničko ponašanje takvih stijena izrazito je ovisno o orijentaciji diskontinuiteta u odnosu na smjer glavnih napreznja, što može rezultirati značajnim razlikama u čvrstoći i deformabilnosti. U zoni portala tunela dodatni je problem prisutnost relaksiranih i djelomično dekomprimiranih površinskih slojeva, kao i potencijalno degradiranih zona uslijed atmosferskih utjecaja.

Geofizička istraživanja seizmičkom refrakcijskom tomografijom provedena su s ciljem definiranja prostorne varijabilnosti seizmičkih brzina unutar ove heterogene stijenske mase. Posebna pažnja posvećena je prijelazu između površinski oslabljenih zona i dubljih, kompaktnijih dijelova stijenske mase, budući da takvi prijelazi imaju ključnu ulogu u projektiranju stabilnosti portala tunela.

Seizmički model pokazuje jasnu diferencijaciju zona nižih i viših brzina (Slika 2.), što se interpretira kao posljedica varijabilnog stupnja raspucanosti i degradacije. Upravo takav geološki kontekst čini predmetnu lokaciju pogodnom za testiranje predloženog transformacijskog modela, jer omogućuje analizu ponašanja metode u uvjetima izražene anizotropije i heterogenosti, koji su tipični za mnoge infrastrukturne projekte u krškim i metamorfno preoblikovanim terenima.



Slika 2. Model seizmičke refrakcijske tomografije na istraživanom području.

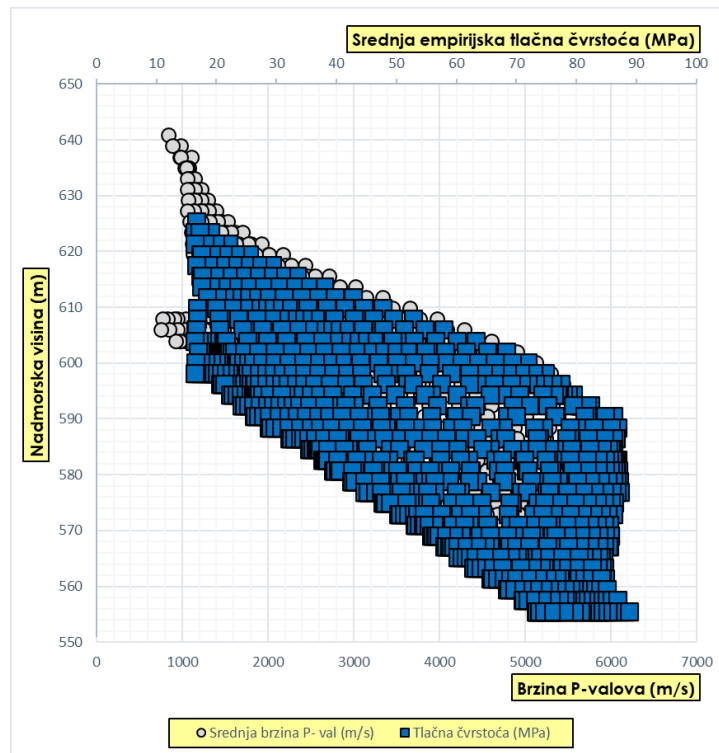
Odabir zone portala tunela stoga nije slučajna, već predstavlja realan inženjerski scenarij u kojem je potreban pouzdan i prostorno kontinuiran prikaz mehaničkih parametara, osobito u ranoj fazi projektiranja.

3 Rezultati

U ovom su poglavlju prikazani i analizirani rezultati dobiveni integracijom seizmičkih tomografskih mjerenja i geomehaničke parametrizacije stijenske mase škriljavaca (eng. *slate*). Primjenom razvijene proračunske matrice, podaci o brzinama longitudinalnih valova (V_p) pretvoreni su u kontinuirane prostorne modele ključnih inženjerskih parametara čvrstoće. Fokus analize je na kvantifikaciji jednoosne tlačne čvrstoće (UCS), kohezije (c) i kuta unutarnjeg trenja (ϕ), čime se omogućuje detaljan uvid u prostornu varijabilnost kvalitete masiva i identificiranje kritičnih zona rastrošenosti na portalu tunela.

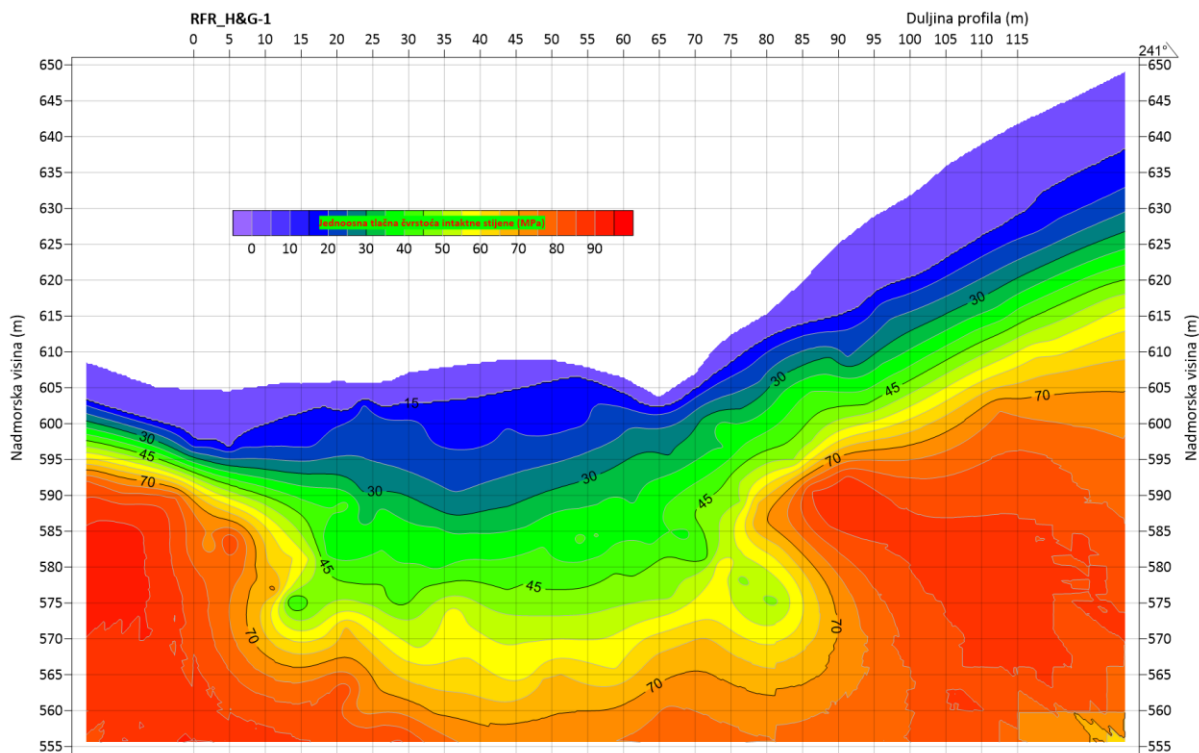
3.1 Prostorna raspodjela UCS-a

Analiza rezultata provedena na dionici u škriljancima ukazuje na izraženu korelaciju između brzina longitudinalnih seizmičkih valova (V_p) i mehaničkih parametara stijenske mase. Prema izvedenoj proračunskoj matrici, u zoni kompaktnog masiva zabilježene su brzine V_p u rasponu od 4178 m/s do 4795 m/s, što je rezultiralo izračunatim vrijednostima jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) od 56.2 MPa do 66.3 MPa. Ovi podaci, vidljivi na prostornom modelu raspodjele čvrstoće, svrstavaju istraživani škriljavec u kategoriju čvrstih stijena (eng. *Strong Rock*) prema ISRM standardima, što je u potpunosti sukladno teorijskim očekivanjima za zdrave metamorfne stijene s gustom folijacijom. Na slici 3 dan je 1D usporedni prikaz raspodjele jednoosne tlačne čvrstoće i V_p po dubini.



Slika 3. Usporedni prikaz raspodjele brzine P-valova i jednoosne tlačne čvrstoće po dubini.

Dobiveni model pokazuje izraženu prostornu varijabilnost unutar zone portala tunela, s ukupnim rasponom vrijednosti UCS-a od približno 15 MPa do 90 MPa. Najniže vrijednosti koncentrirane su u površinskim slojevima i središnjoj zoni modela gdje seizmička tomografija indicira smanjene brzine P-valova, što vjerojatno odlikava mehaničku rastrošenost škriljavca uslijed egzogenih procesa. Usporedbom s rezultatima sličnih istraživanja na anizotropnim stijenama, uočava se da dobiveni trend rasta čvrstoće s dubinom prati povećanje gustoće masiva, koja se u dubljim horizontima stabilizira na približno 2.51 g/cm³. Posebno je značajna kontinuirana tranzicija čvrstoće s dubinom bez naglih diskontinuiteta, čime se potvrđuje prostorna konzistentnost transformacijskog modela (Slika 4).



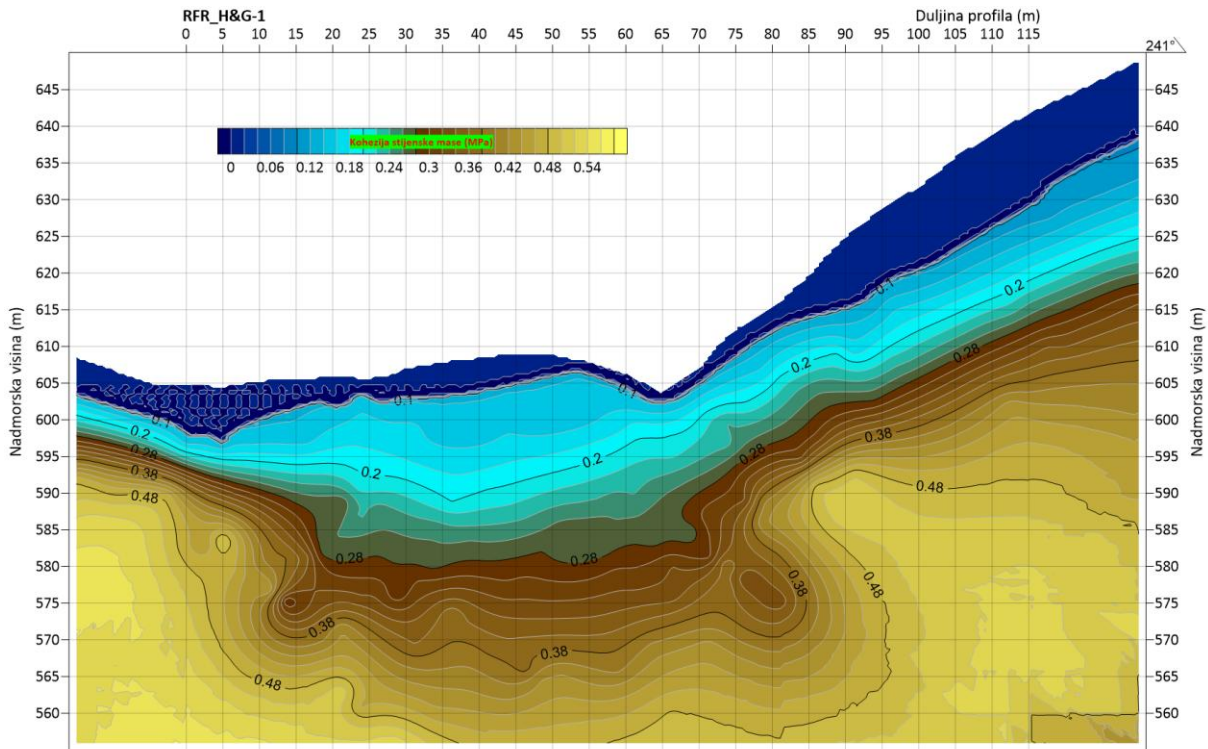
Slika 4. Prostorni prikaz raspodjele jednoosne tlačne čvrstoće na temelju modela seizmičke refrakcije.

3.2 Izvedeni parametre stijenske mase (c i ϕ)

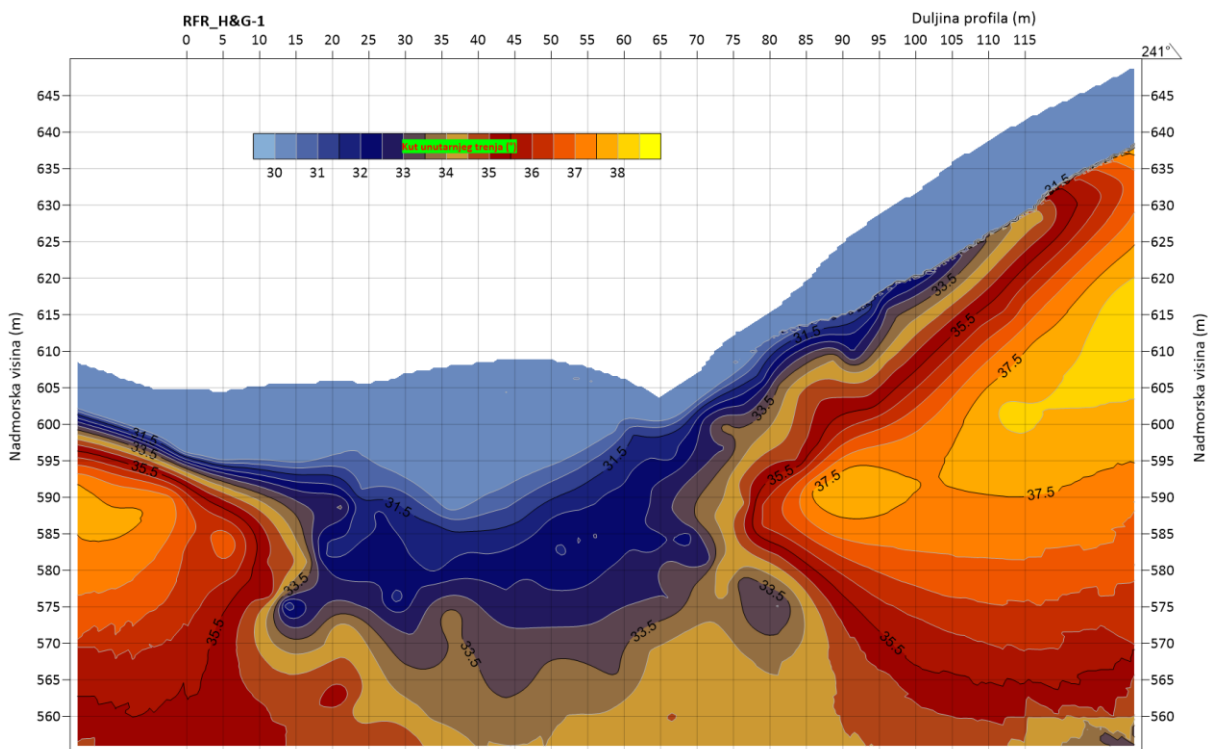
Primjenom generaliziranog Hoek-Brownovog kriterija, uz fiksne parametre geološkog indeksa čvrstoće (GSI = 50) i faktora poremećenosti ($D = 0.7$), dobiven je kontinuirani model raspodjele kohezije (c) i kuta unutarnjeg trenja (ϕ). Izračunata kohezija u stabilnim zonama profila kreće se u rasponu od 0.43 MPa do 0.56 MPa, dok vizualizacija na razini cijelog profila pokazuje varijacije od 0.2 MPa do preko 0.5 Mpa (Slika 5). Niže vrijednosti kohezije prate zone smanjenog UCS-a i povećane raspucanosti, dok njezino povećanje u dubljim dijelovima modela izravno korelira s porastom čvrstoće i smanjenim stupnjem degradacije masiva.

Kut unutarnjeg trenja pokazuje raspon vrijednosti u matrici od 27.2° do 31.1° , dok prostorna vizualizacija obuhvaća širi raspon u skladu s varijacijama brzina na cijelom profilu (Slika 6). Ovi rezultati pokazuju visoku razinu suglasja s literaturnim vrijednostima za škriljavce, koji zbog svoje izražene folijacije i potencijalne prisutnosti filosilikata tipično pokazuju kutove trenja u rasponu od 25° do 35° . Zone s povišenim vrijednostima kuta trenja prostorno se podudaraju s kompaktnijim dijelovima stijenske mase, dok se u degradiranim zonama bilježe snižene vrijednosti. Ovakav integrirani pristup osigurava objektivnu bazu za kvantifikaciju rizika tijekom izvođenja radova, posebno u kompleksnim zonama epikrsta i prijelaznih formacija.

Dobiveni raspon kohezije od 0.43 do 0.56 MPa te kuta unutarnjeg trenja između 27.2° i 31.1° vjerno reflektira narušeni strukturni integritet škriljavaca na istraživanom području, čime se numerički potvrđuje njihova klasifikacija kao stijenske mase srednje kvalitete prema empirijskim postavkama Hoeka i Marinosa (2000).



Slika 5. Prostorni prikaz raspodjele vrijednosti kohezije na temelju modela seizmičke refrakcije.



Slika 6. Prostorni prikaz raspodjele vrijednosti kuta unutarnjeg trenja na temelju modela seizmičke refrakcije.

3.3 Konzistentnost i inženjerska interpretacija

Analiza rezultata pokazuje da model jasno diferencira površinski degradirane zone od dubljih, kompetentnijih dijelova stijenske mase. Prijelazi između zona odvijaju se postupno, bez nerealnih skokova parametara, što upućuje na fizikalnu opravdanost transformacijskog lanca.

Dobiveni parametri omogućuju identifikaciju potencijalno nepovoljnih zona u području portala tunela, osobito u središnjem dijelu profila gdje su vrijednosti UCS-a, kohezije i kuta trenja istovremeno smanjene. Upravo takve zone imaju ključan utjecaj na stabilnost iskopa i odabir sustava podgrade.

Rezultati potvrđuju da integracija seizmičkih podataka i Hoek-Brownovog kriterija omogućuje generiranje prostorno kontinuiranog geomehaničkog modela, koji može služiti kao pouzdana osnova za preliminarnu projektne analize i smanjenje nesigurnosti u ranoj fazi projektiranja.

4 Zaključak

U ovom radu prikazan je konceptualni i metodološki okvir za transformaciju seizmičkog modela brzine P-valova u prostorni model geomehaničkih parametara stijenske mase primjenom Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće i njegove ekvivalentne Mohr-Coulombove formulacije. Time je uspostavljen integrirani transformacijski lanac koji omogućuje prijelaz s geofizički izmjerenih elastičnih parametara na inženjerski relevantne parametre kohezije (c) i kuta unutarnjeg trenja (ϕ).

Primjena metodologije na škriljavoj stijenskoj masi u zoni portala tunela pokazala je da dobiveni modeli UCS-a, kohezije i kuta trenja pokazuju prostornu konzistentnost, geološku logiku i inženjersku prihvatljivost. Zone smanjenih seizmičkih brzina sustavno koreliraju sa sniženim vrijednostima čvrstoće i smanjenim parametrima posmične otpornosti, dok dublji i kompaktniji dijelovi stijenske mase pokazuju progresivno povećanje mehaničkih parametara. Takva raspodjela potvrđuje fizikalnu utemeljenost transformacijskog postupka.

Važno je naglasiti da predloženi pristup ne pretendira zamijeniti laboratorijska i terenska geomehanička ispitivanja, već predstavlja metodološki okvir za njihovu dopunu i prostornu ekstrapolaciju. Svaki korak transformacije uključuje određenu razinu aproksimacije i empirijske relacije, no rezultati pokazuju da integracija seizmičkih podataka i kriterija čvrstoće stijenske mase može generirati smislen, kontinuiran i projektno upotrebljiv model u ranoj fazi projektiranja.

Temeljni doprinos rada nije u razvoju novog kriterija čvrstoće, već u demonstraciji da je moguće uspostaviti konzistentan most između geofizičkog modela i geomehaničke interpretacije, pri čemu se seizmička tomografija koristi kao kvantitativni nositelj informacija o prostornoj varijabilnosti stijenske mase. Takav pristup otvara mogućnost daljnjeg razvoja integriranih modela u kojima se geofizički podaci koriste ne samo deskriptivno, već i kao aktivni ulaz u mehaničke analize stabilnosti.

Dobiveni rezultati potvrđuju da je predloženi način razmišljanja metodološki održiv te predstavlja realnu osnovu za daljnju kalibraciju, validaciju i primjenu u složenijim geološkim uvjetima.

Literatura

- Aljabbab, A., Alotaibi, A. M. i Albeshar, Z. I. (2025) 'Valuation of near-surface deposit stiffness and site characterization through seismic refraction tomography', *Journal of King Saud University*.
- Barton, N. (2006) *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. UK & Netherlands: Taylor & Francis.
- Handoyo, H. et al. (2025) 'Geotechnical Parameters Determination by Using Seismic Refraction Tomography in The New Capital City of Indonesia, Nusantara: Implication to Analysis of Soil Compaction', *Indonesian Journal on Geoscience*, 12(3).
- Hoek, E. i Brown, E. T. (2018) 'The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3).

- Kahraman, S. (2001) 'Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7).
- Li, S., Ling, T., Liu, D. i Liang, S. (2023) 'Determination of Rock Mass Parameters for the RHT Model Based on the Hoek–Brown Criterion', *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(4).
- Marinos, P. i Hoek, E. (2000) 'GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation', *Proceedings of the GeoEng 2000 International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne.
- Moradian, Z. O. i Behnia, M. (2009) 'Predicting the unconfined compressive strength and static young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic tests', *International Journal of Geomechanics*, 9(1).
- Yasar, E. i Erdogan, Y. (2004) 'Estimation of rock physicomaterial properties using hardness methods', *Engineering Geology*, 71(3).