

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava

Ekrem Bektašević

„PPG“ d.o.o. Sarajevo, doc. dr. sc., bektasevic.ekrem@gmail.com

Satko Filipović

Direkcija za puteve Kantona Sarajevo, dipl. ing. građ., satko.filipovic@gmail.com

Kemal Gutić

Rudarsko-geološko-građevinski fakultet, Univerzitet u Tuzli, prof. dr. sc., kemal.gutic@untz.ba

Namik Musa

„PPG“ d.o.o. Sarajevo, bacc. ing. rud., namikmusa18@gmail.com

Sažetak: Ispitivanje integriteta pilota predstavlja ključni aspekt geotehničke analize, a primjenom nedestruktivnih metoda omogućuje se pouzdana procjena stanja pilota bez fizičkog oštećenja konstrukcije. Ovaj rad se bavi primjenom metode Pile Echo Test (PET) za verifikaciju mehaničkih svojstava i kvalitete pilota koji služe kao osiguranje portalnih konstrukcija. Ispitivanje je pokazalo da su izmjerene brzine u opsegu od 4000 do 5000 m/s i amplifikacije između 25% i 35%, što ukazuje da piloti nemaju ozbiljnije strukturne probleme i da nije došlo do degradacije materijala koja bi uticala na nosivost ili stabilnost pilota. Korištenjem PET metode, omogućeno je precizno određivanje integriteta pilota, čime se povećava sigurnost i dugoročna stabilnost portalnih konstrukcija. Rezultati ovog istraživanja potvrđuju značaj primjene ove metode u geotehničkim analizama kao pouzdane tehnike za verifikaciju kvalitete pilota.

Ključne riječi: integritet pilota, nedestruktivne metode, tunel Kobilja Glava, ultrazvučno ispitivanje, PET metoda

Testing the integrity of reinforced concrete piles at the exit portal of the Kobilja Glava tunnel using a non-destructive method

Abstract: Testing the integrity of piles is a key aspect of geotechnical analysis, and the application of non-destructive methods allows for a reliable assessment of the condition of piles without causing physical damage to the structure. This paper focuses on the application of the Pile Echo Test (PET) method for verifying the mechanical properties and quality of piles that serve as supports for portal structures. The testing showed that the measured velocities ranged from 4000 to 5000 m/s, with amplifications between 25% and 35%, indicating that the piles do not have serious structural issues and that no material degradation has occurred that would affect the load-bearing capacity or stability of the piles. By using the PET method, the integrity of the piles can be precisely determined, thereby enhancing the safety and long-term stability of portal structures. The results of this study confirm the importance of applying this method in geotechnical analyses as a reliable technique for verifying the quality of piles.

Key words: pile integrity, non-destructive methods, Kobilja Glava tunnel, ultrasonic testing, PET method

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava

1. UVOD

Nagli razvoj urbanih područja tijekom posljednjih desetljeća pridonosi sve većoj potrebi za korištenjem podzemnog prostora. Tunel Kobilja Glava dvocijevni je tunel koji prolazi kroz istoimeno brdo, a na kojem se nalazi oko 500 stambenih građevina. Ukupna dužina desne tunelske cijevi iznosi 635,10 m, od čega je 587,10 m dužina podzemnog iskopa. Privremeni ulazni portal desne tunelske cijevi smješten je na stacionaži km 3+550,15, dok se privremeni izlazni portal nalazi na stacionaži km 4+137,15. Ukupna dužina lijeve tunelske cijevi iznosi 638,885 m, pri čemu je dužina iskopa 590,885 m. Privremeni ulazni portal lijeve tunelske cijevi smješten je na stacionaži km 3+546,952, dok se privremeni izlazni portal nalazi na stacionaži km 4+128,09. [1]

Tunel Kobilja Glava predstavlja dio glavnog projekta povezivanja transeuropske cestovne mreže na gradskoj saobraćajnici Prva transverzala u Kantonu Sarajevo. [2]

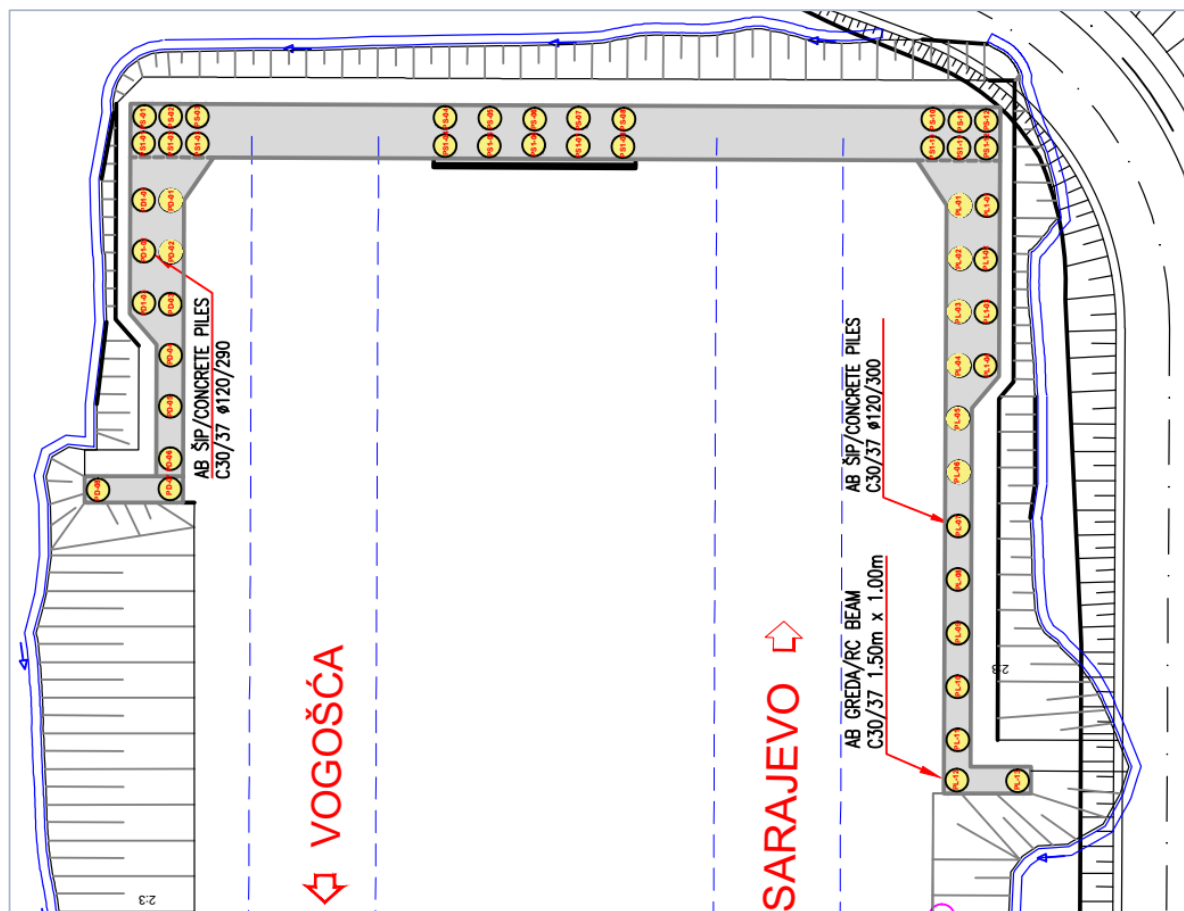
U zoni izlaznog portala tunela Kobilja Glava nalazi se eluvijalno-deluvijalni pokrivač debljine do 2 metra. Ispod pokrivača se nalazi raslabljeni geološki supstrat kojeg čine laporovite gline debljine oko 2 m. Ispod ovog sloja nalazi se neporemećeni geološki supstrat sastavljen od tamnosivih lapora. Eluvijalno-deluvijalni pokrivač čine pjeskovite gline pomiješane sa sitnom drobinom i pjeskovite gline smeđe boje, plastične konzistencije.

Prema materijalnom sastavu, sloj neporemećenog geološkog supstrata čine lapori tamnosive boje i slojevite tekture. [3, 4] Iskop podzemnih prostorija i tunela, kao i stabiliziranje neposredno iskopanog profila, jedan je od najizazovnijih i najodgovornijih inženjerskih zadataka. [5] Suvremeno projektiranje i izgradnja tunela zahtijeva primjenu odgovarajućih tehnika i tehnologija u svim fazama projekta. [6]

Zbog niskog nadsloja u zoni portalne konstrukcije te zahtjevnih geotehničkih i morfoloških uvjeta, projektom je predviđeno korištenje vertikalnih armirano-betonskih pilota za zaštitu predusjeka na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava. Predviđena je izrada 50 vertikalnih AB pilota promjera Ø120 cm. Raspored armirano-betonskih pilota na osiguranju portalne konstrukcije prikazan je na slici 1. Maksimalna dužina pilota iznosi 20 m, dok je minimalna 10,10 m (L = 20 m – 5 komada; L = 17 m – 27 komada; L = 15 m – 7 komada; L = 13,80 m – 8 komada; L = 10,10 m – 3 komada). [7]

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava



Slika 1. Situacija predusjeka izlaznog portala tunela Kobilja Glava [7]

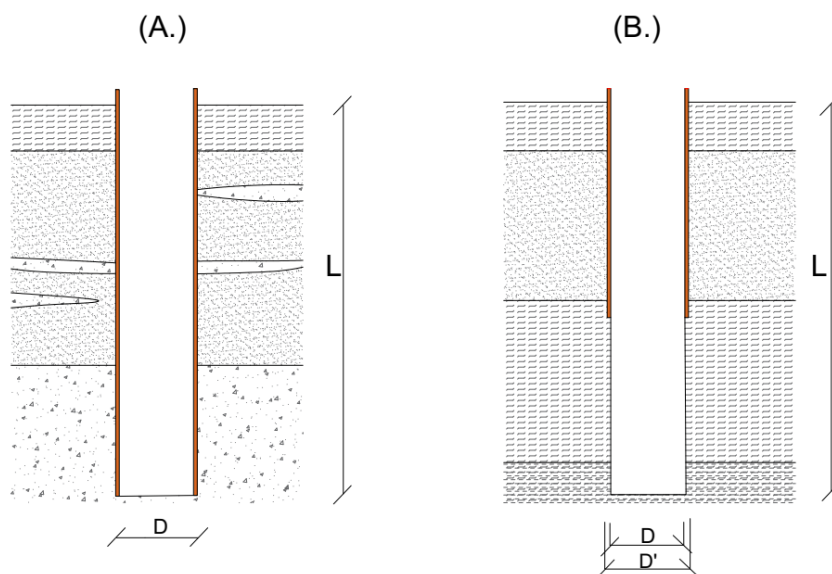
2. TEHNOLOGIJA IZRADE BUŠENIH PILOTA

Bušeni piloti (*eng. bored piles*) predstavljaju široko primjenjivane elemente dubokih temeljenja, a posebice u složenim geotehničkim uvjetima. Proces izrade započinje bušenjem vertikalne bušotine promjera i dubine definirane projektom, nakon čega slijedi armiranje i betoniranje. Prednosti ovakvih pilota uključuju mogućnost izvođenja u urbanim sredinama, minimalno narušavanje postojećih struktura i prilagodljivost različitim vrstama tla. [8]

Bušenje pilota može se vršiti različitim metodama, ovisno o karakteristikama terena i zahtijevanim performansama pilota. Najčešće metode uključuju bušenje sa ili bez zacjevljenja bušotine, primjenu stabilizacije pomoću bentonitne suspenzije ili korištenjem privremenih cijevi. Potpuno zacjevljene bušotine primjenjuju se kada postoji opasnost od urušavanja zidova bušotine dok se djelimično zacjevljene bušotine koriste u stabilnim slojevima tla. [9]

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

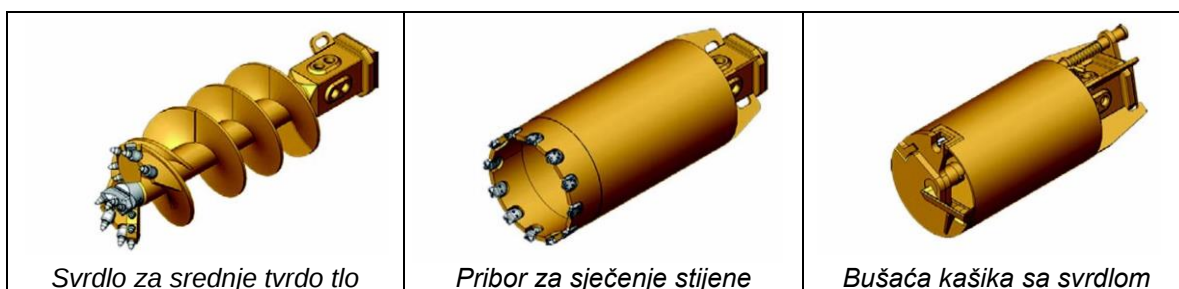
Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava



Slika 2. Zacijevljenost bušotina: A - potpuno, B – djelimično [10]

Kod metoda bušenja sa zacijevljivanjem, koristi se privremena čelična cijev koja podržava zidove bušotine. Ova tehnika je posebno pogodna za rad u vodonepropusnim slojevima i tlu koje nije kohezivno. Alternativno, kod primjene bentonitne suspenzije, bušotina se stabilizira tekućinom koja sprječava prodiranje vode i urušavanje. [11]

Bušenje se izvodi pomoću specijaliziranog bušačkog pribora koji uključuje različite vrste alata poput rotacijskih bušačkih glava, spiralnih svrdala i kašika za vađenje materijala (slika 3.). Suvremeni strojevi omogućavaju precizno vođenje bušenja i kontinuirano praćenje parametara procesa. [12]



Slika 3. Izgled bušačkog pribora za iskop pilota [10]

Dno cijevnih kolona treba napredovati brže od brzine obavljanja bušenja, posebice kada se radi u nevezanim i muljevitim prirodnim tvorevinama. Na taj način sprečava se prodiranje tla ispod dna cijevnih kolona. Bušenje je završeno kada se dođe do projektiranog dna, što se kontrolira s dva do tri uzastopna mjerenja visine bušotine građuiranom trakom. Preciznost mjerenja je reda veličine 1 cm. [13]

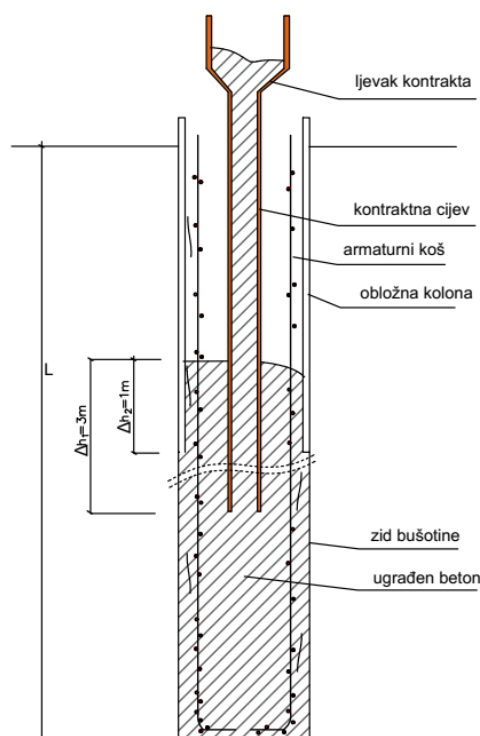
Nakon postizanja projektirane dubine bušotine pristupa se fazi armiranja i betoniranja. Armatura se obično sastoji od prethodno pripremljenih kaveza koji se spuštaju u bušotinu pomoću dizalica. Betoniranje pilota obavlja se kontraktorskim postupkom (slika 4.). Početak betoniranja obavlja se spuštanjem kontraktorske cijevi na visinu 20 cm od dna bušotine. [14]

Ugradnja betona počinje odozdo prema gore kako bi se spriječilo miješanje s vodom i osigurao kontinuitet betonske mase. [15] Tehnika betoniranja kontraktorskim postupkom

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava

podrazumijeva da se beton upumpava kroz cijev uronjenu u svježi beton na dnu bušotine čime se izbjegava segregacija materijala i kontaminacija podzemnom vodom. [16] Piloti se betoniraju betonima plastične konzistencije čije su karakteristike date u projektu. Obično se koristi beton klase C30/37 ili C35/45 kada se radi o ekstremnim uvjetima izloženosti.



Slika 4. Shematski prikaz betoniranja pilota [10]

Kod bušenih pilota beton se mora izliti najmanje 30 cm iznad projektirane kote vrha pilota kako bi se omogućilo uklanjanje kontaminiranog betona nakon očvršćavanja. Ovaj postupak pomaže u eliminaciji zona betona lošije kvalitete koje mogu biti pogođene muljem, podzemnom vodom ili nečistoćama tijekom izrade pilota. Uklanjanje kontaminiranog nadvišenja potrebno je izvršiti nakon što beton dostigne dovoljnu čvrstoću, a obično ne prije 72 sata od ugradnje. [17]

Vađenje zaštitne cijevi tokom izrade bušenih pilota uključuje hermetičko zatvaranje gornjeg dijela cijevi radi održavanja unutrašnjeg pritiska, upuštanje komprimiranog zraka pod pritiskom od približno dvije atmosfere te aktiviranje vibracijskog ili oscilatornog pokreta s ciljem smanjenja trenja duž zida cijevi. Potom se uz pomoć dizalice postupno cijev izvlači iz bušotine. Ove mjere su ključne za sprečavanje urušavanja zidova bušotine i očuvanje integriteta svježe ugrađenog betona. [18]

Primjena komprimiranog zraka tijekom izvlačenja zaštitne cijevi smanjuje trenje između cijevi i okolnog materijala olakšavajući izvlačenje. Dodatno, pozitivan tlak sprječava prodiranje tla ili podzemne vode u svježe ugrađen beton čime se osigurava bolja kvaliteta i integritet betona. Studije također pokazuju da lijevanje betona uz pomoć pritiska rezultira gušćom strukturom sa manje šupljina, poboljšavajući performanse tijela pilota. [19, 20]

Kod dugih zaštitnih cijevi, izvlačenje se vrši sukcesivno, dio po dio, u ovisnosti od položaja spojeva na cijevi. Kod kraćih zaštitnih cijevi, uklanjanje se uobičajeno obavlja odmah po završetku betoniranja. Tijekom izvlačenja zaštitne cijevi potrebno je održavati dovoljan hidrostatički tlak unutar bušotine kako bi se spriječilo urušavanje zidova i osiguralo kontinuirano podupiranje betonske mase. [8]

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava

Posebnu pozornost tijekom izrade bušenih pilota treba posvetiti kontroli kvalitete, koja obuhvaća pregled armature, kontrolu sastava i temperature betona kao i kontinuirani nadzor procesa ugrađivanja. Suvremene tehnike kontrole uključuju metode ispitivanja integriteta pilota (*eng. Pile Integrity Testing - PIT*) i metode akustične emisije koje omogućavaju otkrivanje eventualnih diskontinuiteta ili defekata u izvedenom elementu. [18]

Izbor tehnologije izvođenja bušenih pilota ovisi od brojnih faktora, uključujući karakteristike tla, razinu podzemne vode, zahtjeve nosivosti i pristupačnost lokacije. Pravilna analiza i prilagođavanje metode izvođenja ključne su za postizanje visoke kvalitete i dugotrajnog učinka temeljnog sustava. [21]

3. ISPITIVANJE INTEGRITETA PILOTA NEDESTRUKTIVNOM METODOM

Zbog višefaznosti i složenosti procesa izrade bušenih pilota, kao i ovisnosti rezultata o ljudskom faktoru, u pilotima se mogu pojaviti različiti nedostaci kao što su zone potpunog odsustva betona, poroznost, smanjena čvrstoća betona i prisutnost komada prirodnog tla. [22] Termin "kontinuitet betona" razumijeva se kao "pokazatelj kvalitete betona koji karakterizira kontinuitet materijala i odsustvo abnormalnih zona (mulj, šupljine)". [23]

Procedure testiranja integriteta pilota definirane su standardima u kojima su prikazani elementi, kriteriji i tijekovi ispitivanja. Jedna od najčešće korištenih neinvazivnih tehnika u tu svrhu jeste test eha pilota (*eng. Pile Echo Test – PET*) koja je u upotrebi još od 1970-ih godina. Ova metoda omogućava sveobuhvatnu analizu kontinuiteta pilota za sve tipove pilota i omogućuje otkrivanje strukturnih nedostataka unutar tijela pilota. [24]

Američki ASTM standardi predstavljaju jedne od najdetaljnijih i najpouzdanijih standarda. Njima su propisane jasno definirane procedure, pravila i sustav kontrole kvalitete. Ispitivanja integriteta pilota PET metodom prema američkim standardima definirana su putem ASTM D5882. [25]

Test integriteta pilota sa senzorom sonic integrity test (SIT) u praksi se često naziva i test eha pilota (PET), a pripada grupi niskodilatacionih testova (*eng. low strain test – LST*). Test integriteta pilota sa senzorom zasniva se na teoriji jednodimenzionalnog širenja vala kroz pilot, s ciljem utvrđivanja stvarne dužine pilota, postojanja defekata i diskontinuiteta te smanjenja poprečnog presjeka pilota. [26]

Ovaj test realizira se na principu indukcije, propagacije (širenja), refleksije, refrakcije i recepcije vala u pilotu. Indukcija vala inicira se vanjskim djelovanjem – udarom čekića – tako da je vanjski preneseni signal, u općem slučaju, impulsnog karaktera. Kada u elastičnom materijalu dođe do pobude, odmah se generiraju valovi počevši od točke pobude te napreduju uz smanjenje amplitude oscilacija poremećaja. [27, 28]

Brzina širenja vala kroz pilot može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

gdje je:

- v - brzina kretanja vala (m/s),
- E - modul elastičnosti betona (Pa),
- ρ - gustoća materijala (kg/m³).

Ukoliko je poznata brzina (v) kojom val putuje unutar osovine pilota, dubina defekta ili kraj pilota može se izračunati prema sljedećem izrazu:

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava

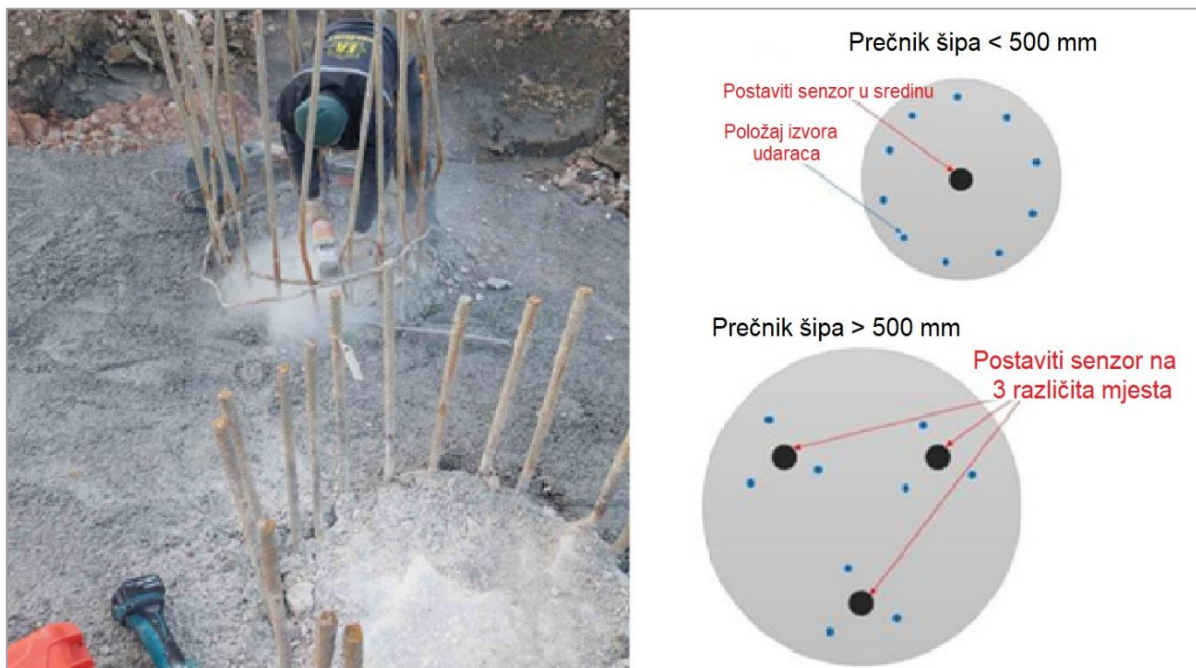
$$L = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2)$$

gdje je:

- L- dubina defekta ili kraja pilota (m),
- v - brzina kretanja vala kroz materijal (m/s),
- t- vrijeme putovanja vala do reflektirajuće točke (s).

Postupak ispitivanja integriteta pilota sastoji se od sljedećih koraka: [29]

- Površinu glave pilota potrebno je pripremiti prije ispitivanja. Površina glave pilota mora biti dostupna i iznad nivoa vode. Sav rastresiti beton, tlo ili drugi strani materijali koji nastaju tijekom izgradnje trebaju biti uklonjeni s površine pilota. Ako na površini postoji bilo kakvo onečišćenje, potrebno ga je ukloniti (pomoću brusilice) kako bi se dosegla čvrsta i zdrava betonska površina.
- Neophodno je pripremiti tri zone (po mogućnosti) ravnog, suhog betona na pilotu. Veličina takvih zona treba biti približno 100×100 mm za pričvršćivanje senzora (akcelometra) i za iniciranje vala posebnim čekićem po betonskoj površini (slika 5.).



Slika 5. Priprema glave pilota za ispitivanje integriteta, lijevo - izrada autora, desno [30]

- Za uspješnu primjenu metode ispitivanja potrebna je čvrsta veza između vrha senzora i betonske površine (vrha pilota). Tanki sloj vazelina ili kita obično se koristi za čvrstu vezu između senzora i glave pilota (slika 6.). [30]

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

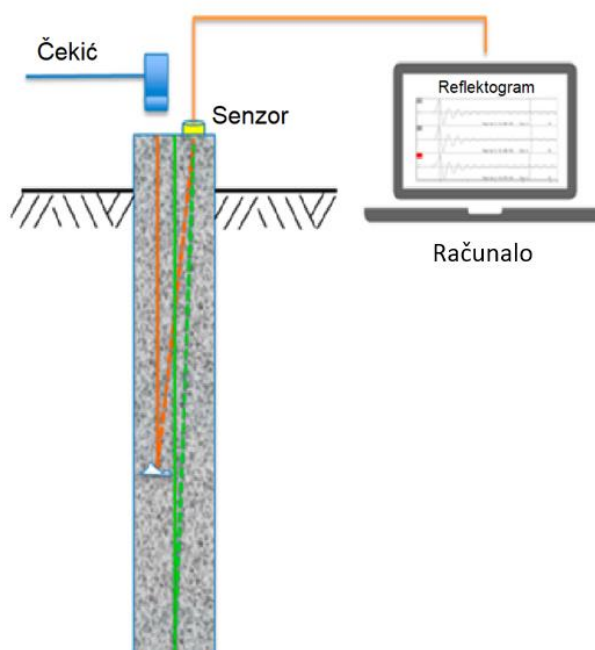
Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava



Slika 6. Način postavljanja senzora na glavu pilota [30]

- Posebnim čekićem (za pilote promjera manjeg od 1m koriste se čekići težine 0.5kg, 1.5kg i 3.5kg, a za pilote promjera većeg od 1m koriste se čekići težine 1.5kg, 3.5kg i 6kg) nanesimo minimalno tri lagana udarca na svakom pripremljenom mjestu glave pilota. Na zaslonu uređaja prikazan je grafikon (reflektogram) ovisnosti amplitude udara o duljini betonskog pilota. Ako operater utvrdi da su grafikon prihvataljivi za interpretaciju, ti se rezultati upisuju u memoriju uređaja za dodatnu obradu. Ako su udarci bili vrlo jaki ili vrlo slabi, uređaj neće registrirati bilo kakav signal i potrebno je ponoviti udarac. Udarci se proizvode sve dok operater ne može interpretirati zabilježene grafove (reflektograme). [22]

Shematski prikaz ispitivanja integriteta pilota primjenom PET metode niske deformacije prikazan je na slici 7. [31]



Slika 7. Shematski prikaz ispitivanja integriteta pilota primjenom PET metode [31]

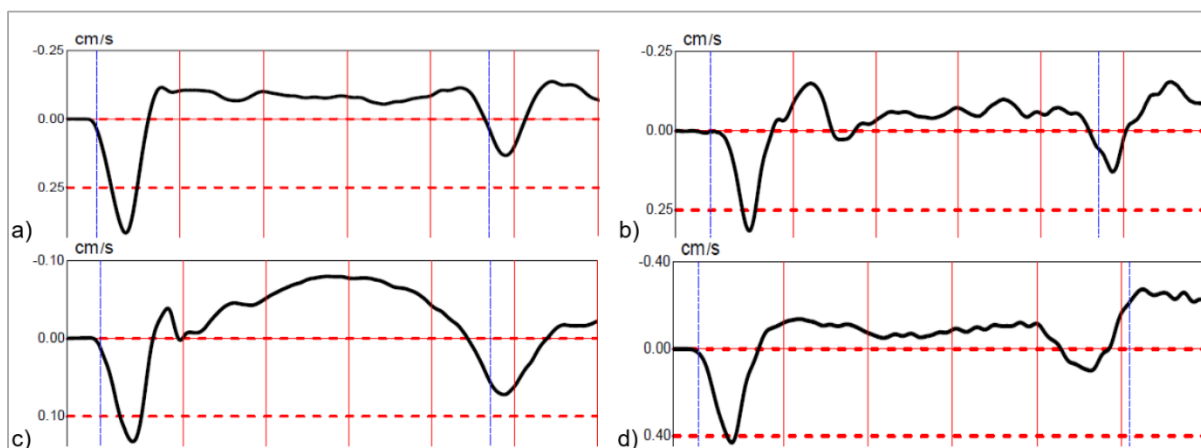
Interpretacija reflektograma sastoji se od sljedećih koraka: [32]

- ako se na reflektogramu uočavaju jasno vidljive fluktuacije (oscilacije u brzini širenja vala) to znači da pilot ima značajna suženja, pukotine, prodore, geološke utjecaje, itd.;
- ako takve fluktuacije nisu značajne to znači da je pilot bez nedostataka;
- ako reflektogram ima oštre fluktuacije to znači da pilot ima ozbiljne pukotine/suženja na mjestu početka fluktuacije.

Detaljnija klasifikacija reflektograma može se provesti prema [33]:

- AA – ispravan pilot s pozitivnim refleksijama ili kod koga se prije refleksije od baze pilota identificiraju manje promjene brzine i odstupanja brzine širenja vala, ne veće od 5% od prosječne brzine širenja vala;
- AB – refleksija od baze se jasno ne identificira, ali i nema znatnih smanjenja impedancije (proizvod gustoće materijala i brzine vala koji se kroz njega šire), pri čemu je moguć razlog za nepostojanje refleksije od baze velika krutost tla;
- PF – postoji jedna negativna refleksija ili više njih i/ili postoji bar jedno smanjenje impedancije, a s obzirom na to što je refleksija od baze smanjena, impedancija je manja nego kod defekta kod kojeg nema refleksije od baze;
- PD – brzina širenja vala odstupa više od 5% od prosječne brzine širenja vala, a što ukazuje na moguć defekt pilota, pri čemu postoji jedna refleksija ili više njih koje maskiraju refleksiju od baze pilota;
- IR – znatno kompleksan signal (odgovor), a što između ostalog ukazuje na lošu kvalitetu betona pri vrhu pilota i/ili na to da je ispitivanje provedeno prerano da bi beton dostigao potrebnu čvrstoću.

Na slici 8. prikazani su reflektogrami SIT integriteta pilota dobiveni PIT-QFV opremom: a) regularan pilot, b) pilot s redukcijom impedancije u početnom dijelu, c) efekt povećanja impedancije i krutosti tla i d) pilot izgrađen kraći nego što je projektom predviđeno. [34]



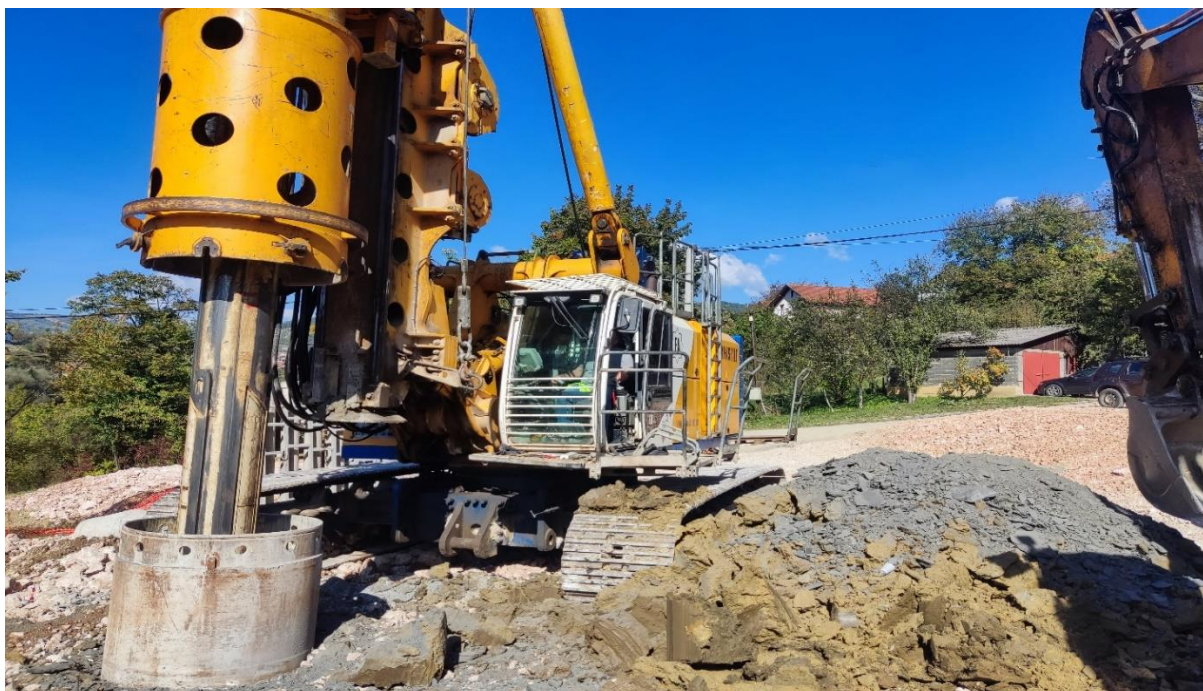
Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava

Slika 8. Reflektogrami SIT integriteta pilota dobijeni PIT-QFV američkom opremom: a) regularan pilot; b) pilot s redukcijom impedancije u početnom dijelu; c) efekt povećanja impedancije i krutosti tla; d) pilot izgrađen kraći nego što je projektom predviđeno [34]

3.1 Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava

U zoni izlaznog portala tunela Kobilja Glava izvršena je izrada 50 pilota kako je bilo predviđeno projektnom dokumentacijom. Bušeni pilota izvedeni su tehnologijom rotacijskog bušenja pomoću stroja Bauer (slika 9.).

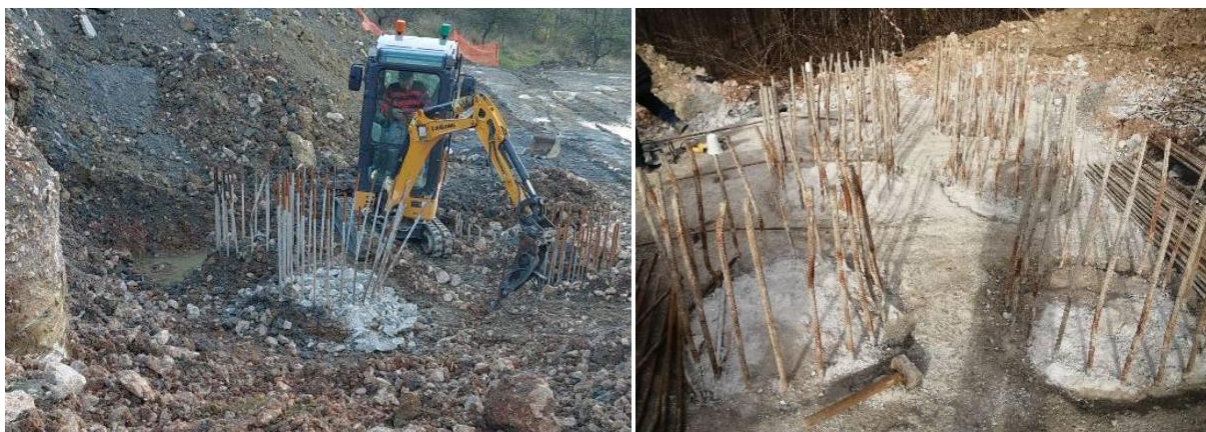


Slika 9. Bušenje pilota za zaštitu predusjeka izlaznog portala tunela Kobilja Glava, (izrada autora)

Prilikom bušenja pilota izvršeno je zacjevljenje svake bušotine u zoni pokrivača, odnosno do supstrata (lapora). Oprema korištena tijekom ispitivanja integriteta pilota bila je FPrimeC – iPile koja se sastoji od ručnog čekića, senzora (akcelerometra) i uređaja za snimanje, obradu i prikazivanje podataka. Prije početka ispitivanja izvršena je detaljna priprema površine glave pilota za ispitivanje integriteta (slika 10.).

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava



Slika 10. Priprema pilota za ispitivanje integriteta (izrada autora)

Nakon provedene detaljne pripreme glava na svim pilotima izvršeno je ispitivanje integriteta pilota PET metodom na svim izvedenim pilotima u skladu sa standardom ASTM D5882-16 (slika 11.).



Slika 11. Ispitivanje integriteta pilota PET metodom (izrada autora)

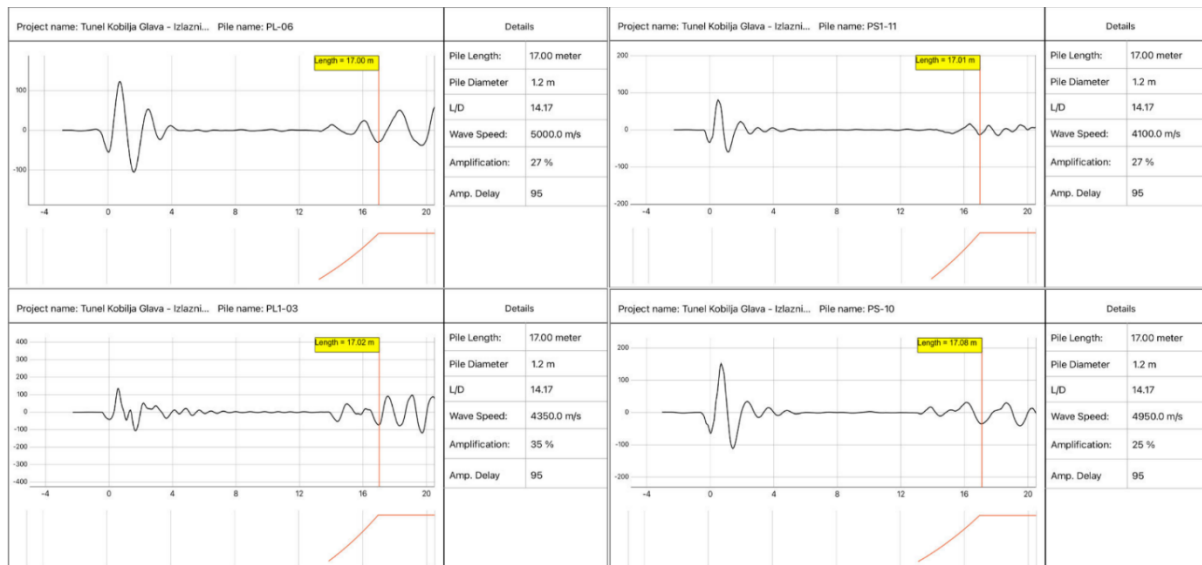
4. ANALIZA I REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom provedeno je na svih 50 izvedenih pilota koji su izrađeni u sklopu zaštite izlaznog portala tunela Kobilja Glava. Cilj testiranja bio je utvrđivanje prisutnosti eventualnih defekata, prekida, promjene presjeka, stvarne dužine ili nehomogenosti u materijalu pilota kako bi se osigurala njihova stabilnost i dugotrajnost u funkciji zaštite konstrukcije.

Analizom dobivenih signala odraznog vala ustanovljeno je da su svi ispitani piloti pokazali kontinuiran i stabilan odziv bez izraženih anomalija koje bi ukazivale na prisutnost značajnih diskontinuiteta. Reflektirani signali su jasno definirani pri čemu je registrirana pravilna propagacija vala duž cijele dužine pilota, što ukazuje na njegovu potpunu strukturnu cjelovitost (slika 12.).

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava



Slika 12. Reflektogrami ispitivanja integriteta pilota nedestruktivnom metodom udarnog impulsa (SIT)

Brzine valova u rasponu od 4000 m/s do 5000 m/s su indikativne za betonske pilote bez ozbiljnih strukturnih problema. [34,35,36] Vrijednosti ispod ovog raspona mogu signalizirati potencijalne defekte ili degradaciju materijala, što može utjecati na nosivost i stabilnost pilota. [34]

Amplifikacija signala u rasponu od 25% do 35% ukazuje na adekvatnu refleksiju valova, što ukazuje na dobru kvalitetu betona bez značajnih defekata poput pukotina ili šupljina. Korištenjem linearne ili eksponencijalne amplifikacije moguće je precizno detektirati i locirati nepravilnosti unutar pilota. [37,38]

Prema istraživanju autora Lee i White [39] slične metode su primijenjene na infrastrukturnim projektima u Aziji, pri čemu su rezultati pokazali da su ultrazvučne tehnike dale najpreciznije procjene homogenosti pilota. Također, prema studiji autora Brown i dr. [40] PIT metoda se pokazala kao pouzdana metoda u identifikaciji ozbiljnih defekata u betonskim temeljima.

Ovi nalazi dodatno potvrđuju pouzdanost primijenjenih ispitivanja i njihovu relevantnost u procjeni integriteta pilota na ovom projektu. Ove informacije su izuzetno korisne za ocjenu integriteta, nosivosti i dugoročne stabilnosti pilota u građevinskim projektima. [36]

5. ZAKLJUČAK

Ispitivanje integriteta pilota pomoću PET metode predstavljalo je ključni dio kontrole kvalitete temeljenja u okviru ovog istraživanja. Svi ispitani piloti pokazali su zadovoljavajuće rezultate, što potvrđuje njihovu strukturnu cjelovitost i adekvatnu izvedbu u skladu s projektnim zahtjevima.

Rezultati testa ukazuju na to da u ispitivanim pilotima nisu detektirani značajni defekti, prekidi ili smanjenja presjeka koja bi mogla utjecati na njihovu nosivost i dugoročnu stabilnost. Kontinuirani i jasno definirani odzivi valova, bez anomalija koje bi ukazivale na nehomogenosti ili dislokacije u materijalu, potvrđuju kvalitetu izvedenih radova i konzistentnost primijenjene tehnologije izrade pilota.

Ovo istraživanje potvrđuje efikasnost PET metode kao brze, pouzdane i neinvazivne tehnike za ocjenu integriteta pilota. Dobiveni rezultati mogu služiti kao osnova za buduća istraživanja, unapređenje ispitnih procedura i optimizaciju metoda kontrole kvalitete u području

temeljenja. Preporučuje se nastavak primjene ove metode u sličnim projektima kako bi se osigurala dugoročna stabilnost i sigurnost konstrukcija oslonjenih na duboko temeljenje.

LITERATURA

1. Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.: Defining the optimal distance between technological sequences during tunnel excavation in poor rock mass, Electronic collection of papers, Faculty of Civil Engineering, University of Mostar, 28th edition, pp. 45-55, ISSN 2232-9080 (online edition), 2024.
2. Filipović, S., Bektašević, E., Gutić, K., Musa, N., Sakić, N.: Research on the phenomenon of increasing borehole diameter at the installation of rod anchors in marl using wet technology compared to dry drilling procedure, Global Journal of Engineering and Technology Advances, 22 (02), pp. 1-14, 2025.
3. Marinos, P., Hoek, E.: Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bull. Eng. Geol. Env., 60, pp. 85-92., 2001.
4. Marinos, V., Fortsakis, P., Prountzopoulos, G.: Estimation of geotechnical properties and classification of geotechnical behaviour in tunnelling for flysch rock masses, Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. IOS Press. pp. 435-440, 2011.
5. Kadrić, S., Bektašević, E., Gutić, K., Sikira, D.: Numerical analysis of the stability of the Ibarac tunnel excavation and stabilization of the collapsed part, parking niche, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, Nauka+Praksa, Broj 26, 2023.
6. Bektašević, E., Gutić, K., Kadrić, R., Kadrić, S., Sikira, D.: Deformation analysis during tunnel excavation in poor rock mass, 8th International Conference on Road and Rail Infrastructures – CETRA 2024, Cavtat, pp. 799-805, 2024.
7. IRGO Consulting d.o.o., Misija G31 – Geotehnička izvedbena studija za izlazni portal tunela Kobilja Glava, Sarajevo, 2023.
8. Brown, D. A., Turner, J. P., Castelli, R.J.: Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods. Federal Highway Administration (FHWA), 2010.
9. Tomlinson, M. J.: Foundation Design and Construction. 7th Edition, Prentice Hall, 2001.
10. <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/397/820/elementi-i-tehnologija-izrade-busenih-sipova>, preuzeto 05.02.2025. god.
11. Poulos, H. G.: Pile Foundations Design and Construction Practice, 5th Edition, CRC Press, 2011.
12. Zhou, Y., Liu, H., Zhang, M., Wang, Z.: Intelligent Drilling Technology Based on Real-Time Monitoring and Optimization, Processes, 12 (11), 2478, 2024.
13. Bektašević, E., Gutić, K., Sikira, D.: Tunneling, With practical examples, LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN: 978-620-7-80623-2, pp. 259-265, 2024.
14. Aličković Hodžić, M.: Metodologija radova zaštite kosine izlaznog portala, 2023.
15. Das, B.M.: Principles of Foundation Engineering, 7th Edition, Cengage Learning, 2010.
16. FHWA (Federal Highway Administration): Design and Construction of Driven Pile Foundations, 2016, https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/gec12/nhi16009_v1.pdf
17. Illinois Department of Transportation (IDOT): Drilled Shaft Foundation Construction Inspection Manual, 2019.
18. O'Neill, M. W., Reese, L. C.: Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025, 1999.

19. Federal Highway Administration: Drilled Shafts Manual. FHWA GEC 10, U.S. Department of Transportation, 2018, <https://danbrownandassociates.com/wp-content/uploads/2020/02/GEC10-Drilled-Shaft-Final-10-5-18.pdf>, pristupljeno 10.02.2025.
20. Dong, Y., Chen, F., Chen, Y.: Investigation of the Extraction of the Casing for Large Diameter Cast-in-Place Piles by Vibratory Hammers in Clays, *Indian Geotechnical Journal*, 48, pp. 430–441, 2018.
21. Bowles, J.E.: *Foundation Analysis and Design*, 5th Edition, McGraw-Hill, New York, 1997.
22. Tulebekova, A., Shakirova, N., Zhankina A., Muratov, Y.: Non-destructive testing of bored piles. *Technobius*. 1. 0002, 2021.
23. Likins, G., Rausche, F., Webster, K., Klesney, A.: *Defect Analysis for CSL Testing, Contemporary Issues In Deep Foundations*, Reston, VA, American Society of Civil Engineers, pp. 1–10, 2007.
24. Omarov, A., Iwasaki, Y.: Comparative study of pile quality control techniques, *Technobius*, 4,1, 2024.
25. ASTM International: *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*, West Conshohocken, USA, 2016.
26. Ćosić, M., Božić-Tomić, K., Šušić, N.: Pile Integrity and Load Testing: Methodology and Classification, *Building Materials and Structures*, Vol. 62, No. 1, pp. 43–68, 2019.
27. Bektašević, E., Antičević, H., Gutić, K., Sikira, D.: Determination of the depth of the rock mass damage zone around the excavation profile by blasting with seismic cross-hole tomography in the "Šubir" tunnel on the Zagreb-Split motorway, *Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, Nauka+Praksa*, 27, 2024.
28. Bektašević, E., Antičević, H., Gutić, K., Sikira, D.: Application of seismic methods for determining the depth of the rock mass damage zone around the excavation profile by blasting, *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 18(03), pp. 139–151, 2024.
29. Wei, L.: Low Strain Detection and Numerical Simulation of Pile Integrity, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 825, 1, 2021.
30. <https://fprimec.com/how-to-perform-low-strain-pile-integrity-test/>, pristupljeno 11.02.2025.
31. Mohamed, A., Aljuboori, N., Al-Jawadi, A.: Tracking Shaft Integrity of Jet Grouting Piles Injected in Soft Soil Layers Based on Sonic Integrity Test Method: A Case Study from Erdemli, Mersin Region, South Turkey, 57, pp. 54-66, 2024.
32. White, R., Nagy, M., Allin, R.: Comparing cross-hole sonic logging and low-strain integrity testing results, *The 8th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles*, pp. 471-476, 2008.
33. Liang L., Rausche F.: Quality Assessment Procedure and Classifications of Cast-In-Place Shaft using Low Strain Dynamic Test, *36th Annual Conference on Deep Foundations*, Deep Foundations Institute, Boston, USA, pp. 553– 562, 2011.
34. Ćosić, M., Božić-Tomić, K., Šušić, N.: Ispitivanje integriteta šipova- testiranje i analiza rezultata, *Građevinski materijali i konstrukcije*, 62, pp. 39-59., 2019.
35. Kumar Jha, E. P.: Pile Construction Issues and Quality Control of PIT Test, Department of Roads, Nepal, Preuzeto s: https://dor.gov.np/uploads/publication/publication_1580218342.pdf
36. Piletest: How accurate is PET for pile testing? Preuzeto s: <https://www.piletest.com/post/how-accurate-is-pet-for-pile-integrity-test>
37. Ismail, M. A., Mohamad, H., Yatim, J. M., Ali, N., Mohd Noor, M.: Analysis of Reflectograms of Pile Integrity Test Using Image Processing Technique, 2022.

Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N.

Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava

38. Construction Civil: Integrity Test of Pile – Purposes, Procedure & Limitations. Preuzeto s: <https://www.constructioncivil.com/integrity-test-of-pile-pit-procedure/>, pristupljeno 11.02.2025.
39. Lee, J., White, R.: Non-Destructive Testing of Piles in Large Infrastructure Projects, Engineering Structures Journal, 2018.
40. Brown, P., Smith, D., Wilson, T. Comparative Study on Pile Integrity Testing Methods, International Journal of Geotechnical Engineering, 2019.