e-Zbornik 30/2025.

Primljen: 29.10.2025.
Recenziran: 04.11.2025.
Prihvaćen: 14.11.2025.

Strucni rad
https://doi.org/10.47960/2232-9080.2025.30.15.71

Elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru

ISSN 2232-9080

Primjena nedestruktivne metode u analizi homogenosti betonskog temelja tunelske konstrukcije

Ekrem Bektašević
Rudarsko-geološko građevinski fakultet, UniverzitetuTuzli, dr.sc., ekrem.bektasevic@untz.ba
Satko Filipović
Direkcija za puteve Kantona Sarajevo, dipl.inž.građ., satko.filipovic@gmail.com
Esad Hurlov
„CELAB“ d.o.o. Kakanj, dipl.inž.građ., e.hurlov@gmail.com
Kemal Gutić
Rudarsko-geološko-građevinski fakultet, Univerzitet u Tuzli, Red.prof., kemal.gutic@untz.ba

Sažetak: U ovom je radu prikazana primjena metode impulsne refleksije (PET) na 22 pozicije temeljnog elementa visine 1,4 m, s ciljem neinvazivnog ocjenjivanja kvalitete izvedenog betona. Dodatna verifikacija izvršena je destruktivnim ispitivanjem putem kernovanja na pozicijama 1 i 21, gdje su analizirani parametri zapreminske mase, vlažnosti, poroznosti i tlačne čvrstoće. Korelacijska analiza ukazala je na negativnu vezu između poroznosti i čvrstoće, kao i između vlažnosti i čvrstoće, uz visoku pouzdanost regresijskog odnosa ($R^2 \approx 0.85$). Unatoč ograničenjima PET metode kod kraćih elemenata, pravilna kalibracija i kombiniranje s destruktivnim postupcima omogućuju pouzdanu interpretaciju. Dobiveni rezultati potvrđuju stabilnost reflektograma, ujednačenu brzinu impulsa i mehaničku ispravnost betonske mase, čime se potvrđuje tehnička valjanost temelja i primjenjivost metodologije u sličnim infrastrukturnim projektima.

Ključne riječi: nedestruktivne metode, tunel, ultrazvučno ispitivanje, PET metoda, destruktivna ispitivanja

Application of a non-destructive method in the analysis of the homogeneity of a concrete foundation in a tunnel structure

Abstract: This paper presents the application of the pulse echo test (PET) method at 22 positions of a foundation element with a height of 1.4 m, aiming at a non-invasive assessment of the quality of the produced concrete. Additional verification was carried out through destructive testing by coring at positions 1 and 21, where the parameters of bulk density, moisture content, porosity, and compressive strength were analyzed. Correlation analysis indicated a negative relationship between porosity and strength, as well as between moisture content and strength, with a high reliability of the regression relation ($R^2 \approx 0.85$). Despite the limitations of the PET method for shorter elements, proper calibration and combination with destructive procedures allow for reliable interpretation. The obtained results confirm the stability of the reflectograms, uniform pulse velocity, and mechanical integrity of the concrete mass, thereby confirming the technical validity of the foundation and the applicability of the methodology in similar infrastructure projects.

Key words: non-destructive methods, tunnel, ultrasonic testing, PET method, destructive testing

1. UVOD

Nagli razvoj urbanih područja u posljednjim desetljećima povećava potrebu za učinkovitijim korištenjem podzemnog prostora [1–3]. Izrada tunela predstavlja složen i interdisciplinaran proces [4–7], koji ne obuhvata samo projektiranje i izvođenje, već i sveobuhvatnu kontrolu kvaliteta izvedenih elemenata, osobito u kontekstu strukturne sigurnosti i dugotrajne funkcionalnosti konstrukcija.

U suvremenoj građevinskoj praksi, posebno u oblasti podzemne infrastrukture, pouzdana procjena kvalitete betonskih elemenata ključan je korak u verifikaciji konstrukcija [8]. Poseban izazov javlja se kod temelja tunelskih konstrukcija, gdje je pristup konstrukciji ograničen, a mogućnosti destruktivnog ispitivanja tehnički i logistički svedene na minimum. U takvim okolnostima, primjena nedestruktivnih metoda ispitivanja postaje nužna, ne samo zbog očuvanja integriteta konstrukcije, već i zbog potrebe za brzom, prostorno kontinuiranom i ekonomičnom analizom strukturne homogenosti [9-11].

Nedestruktivne metode omogućavaju uvid u unutarnju strukturu betonskih elemenata bez fizičkog oštećenja, čime se uklanja potreba za dodatnim sanacijama, prekidima u izvođenju radova ili kompliciranim logističkim zahvatima. Njihova je primjena osobito pogodna u fazama tehničke kontrole, kada je potrebno potvrditi da izvedeni elementi zadovoljavaju projektirane zahtjeve u pogledu homogenosti, kompaktnosti i strukturne ujednačenosti [12]. U tom kontekstu, nedestruktivne metode ne predstavljaju alternativu destruktivnim tehnikama, već njihov komplementaran alat koji omogućuje prostornu interpolaciju između točkastih rezultata dobivenih kernovanjem, te identifikaciju potencijalnih nepravilnosti koje bi mogle ostati neopažene klasičnim vizualnim pregledom [13,14].

U sklopu projekta izgradnje tunelske konstrukcije Kobilja Glava, koja se izvodi u urbanom području pod složenim geotehničkim uvjetima, a dio je povezivanja Vogošće sa Sarajevom i prometnog povezivanja gradskog središta s autocestom A1 na koridoru Vc, ukazala se potreba za ocjenom homogenosti betonskog temelja. Zbog ograničenog pristupa temeljnim zonama, primijenjena je nedestruktivna metoda impulsne analize s ciljem prostorne procjene strukturne ujednačenosti bez narušavanja integriteta konstrukcije. U konkretnom slučaju, izvođač je raspolagao tehnički ispravnim, kalibriranim i za terensku primjenu verificiranim sustavom za PET (Pile Echo Test). Izbor ove metode nije bio isključivo motiviran njezinom ekonomičnošću, već prvenstveno činjenicom da je PET instrument predstavljao jedinu raspoloživu opciju u trenutku kontrole, čime je omogućena pravovremena i funkcionalna analiza bez dodatnih troškova ili odgoda [15].

Primjena impulsne metode omogućila je generiranje prostorno kontinuiranih podataka o reflektivnosti i unutarnjoj strukturi betonskog temelja, uz detekciju zona s potencijalnim odstupanjima u homogenosti [16]. Dobiveni rezultati korelirani su s prethodno izvedenim kernovanjem, čime je osigurana validacija metode i potvrđena njezina pouzdanost u konkretnim uvjetima [17].

Ovaj primjer u širem kontekstu potvrđuje da nedestruktivne metode, kada su pravilno primijenjene i podvrgnute tehničkoj kontroli, mogu predstavljati učinkovit alat za ocjenu kvalitete izvedenih betonskih elemenata. Njihova primjena ne zahtijeva posebne pripreme terena, ne narušava integritet konstrukcije, i omogućuje brzo donošenje odluka temeljenih na pouzdanim podacima. Za razliku od destruktivnih metoda koje pružaju informacije ograničene na pojedinačne točke ispitivanja, nedestruktivne metode omogućuju uvid u strukturna svojstva materijala u cijelom volumenu elementa, čime se značajno povećava pouzdanost procjene. U tom smislu, impulsna analiza betona, kao predstavnik nedestruktivnih metoda, pokazuje velik potencijal za integraciju u standardne protokole tehničke kontrole, uz mogućnost prilagodbe specifičnostima pojedinačnih projekata [18,19].

Ovaj rad prikazuje primjenu nedestruktivne metode u analizi homogenosti betonskog temelja tunelske konstrukcije, s fokusom na tehničku izvedbu, interpretaciju rezultata, korelaciju s destruktivnim ispitivanjima, te formalnu obradu podataka. Cilj je demonstrirati metodološku opravdanost primjene impulsne analize u realnim uvjetima, te potvrditi njezinu funkcionalnost kao pouzdanog alata u sustavnoj procjeni kvalitete infrastrukturnih betonskih elemenata.

2. METODOLOGIJA

Metodologija ovog istraživanja definira tehnički postupak primjene nedestruktivne metode impulsne analize (PET) na betonskom temelju tunelske konstrukcije, uz strogu kontrolu mjernih uvjeta, instrumentacije i obrade podataka, kao i validaciju rezultata primjenom destruktivnih metoda.

2.1. Primijenjena metoda

U ovom istraživanju primijenjena je metoda impulsne refleksije (Pile Echo Test – PET) radi procjene homogenosti betonskog temelja tunelske konstrukcije. Ispitivanje je provedeno u skladu sa standardom ASTM D5882-16 [20], što osigurava primjenu validirane procedure i pouzdanost dobivenih rezultata.

Metoda se temelji na generiranju mehaničkog impulsa, dok se reflektirani valovi bilježe u vremenskoj domeni. Refleksije nastaju na granicama slojeva različite gustoće i elastičnosti, što omogućuje identifikaciju unutarnjih nepravilnosti poput šupljina, segregacije i zona lošije zbijenosti [21, 22].

Za potrebe ispitivanja integriteta pilota korišten je uređaj Piletest PET (Pile Echo Tester), model PET Pro USB, proizvođača Piletest Ltd. (Izrael). Instrument koristi akcelerometar visoke osjetljivosti integriran u senzornu jedinicu (raspon mjerenja ±50 g, frekvencijski odziv 0–10 kHz). Pobuda je vršena udarnim čekićem mase 500 g. Signal sa senzora prenosi se putem vodootpornog USB mini kabelom na uređaj za snimanje i obradu, pri čemu se reflektirani impuls registrira i grafički prikazuje. Uređaj je kalibriran na točnost od ±5 %, a svi podaci se automatski pohranjuju radi naknadne analize.

Ukupno su ispitane 22 pozicije temeljnog betonskog elementa visine približno 1,4 m. Za generiranje impulsa korišten je ručni čekić s metalnom udarnom pločicom, dok je odziv reflektiranih signala registriran akcelerometrom visoke osjetljivosti povezan s prijenosnim digitalnim analizatorom.

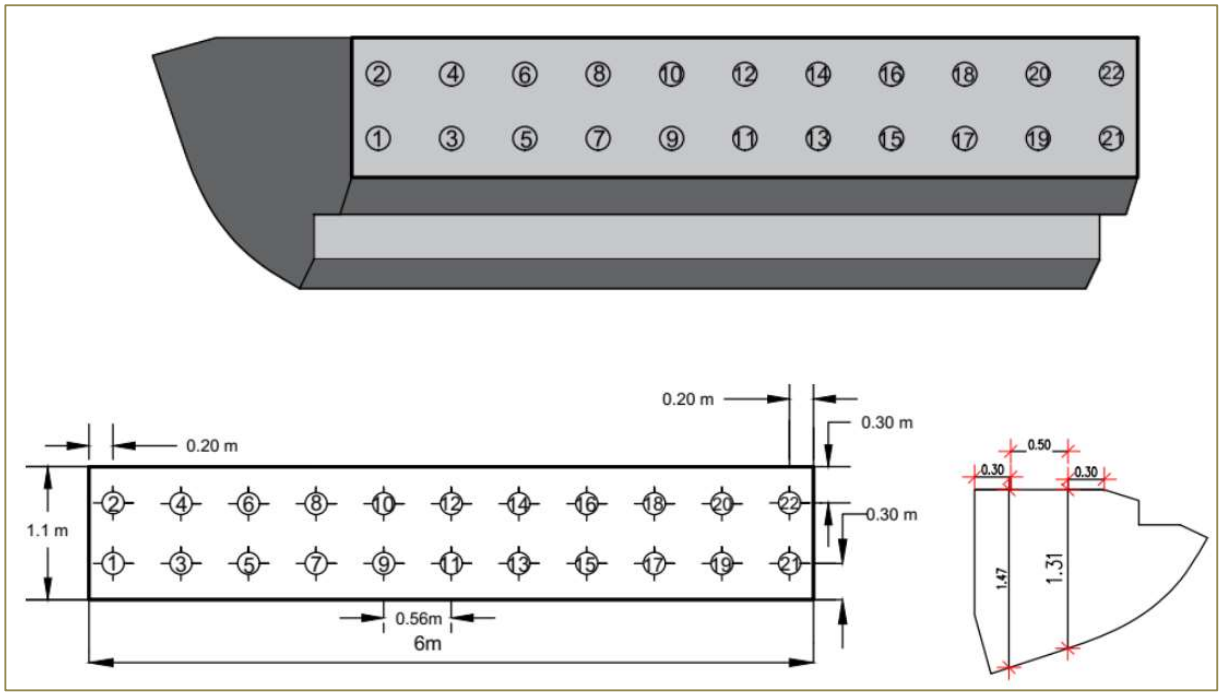
2.2. Lokacija i priprema terena

Ispitivanja su provedena u okviru radova na tunelu Kobilja Glava, u desnoj tunelskoj cijevi, na desnoj strani, na temelju oznake DK13/A. Lokacija je odabrana zbog specifičnih geotehničkih uvjeta i tehničkih zahtjeva projekta.

Prije početka mjerenja izvršena je priprema površine, koja je uključivala uklanjanje prašine, cementnog mlijeka, ostataka oplata i slobodnih čestica, kao i detaljan vizualni pregled radi detekcije eventualnih površinskih nepravilnosti. Na mjernim točkama površina betona dodatno je očišćena i premazana tankim slojem vazelina radi poboljšanja prijenosa impulsa između senzora i betonske mase. Ovim postupkom osiguran je kvalitetan kontakt senzora, minimiziran gubitak energije reflektiranih valova i omogućen jasan odziv u vremenskoj domeni [23,24].

Mjesta ispitivanja su označena u pravilnom rasteru, čime je osigurana prostorna ujednačenost prikupljenih podataka. Posebna je pažnja posvećena osiguranju stabilne kontaktne veze između senzora i površine betona, što predstavlja ključni čimbenik za pouzdanost dobivenih rezultata [25].

Tijekom ispitivanja, temperatura zraka kretala se između 18 °C i 22 °C, uz relativnu vlagu oko 60 %. Uvjeti su bili stabilni, bez direktnog izlaganja sunčevoj svjetlosti, čime je eliminiran utjecaj temperaturnih gradijenata na površinu betona. Vrijednosti su zabilježene u terenskom dnevniku i korištene kao referenca pri analizi odzivnih signala, s ciljem osiguravanja konzistentnosti i tehničke pouzdanosti rezultata. Na slici 1 prikazan je raspored točaka ispitivanja na temelju DK13/A.



Slika 1. Raspored točaka ispitivanja – DK13/A, PET metoda [izrada autora].

2.3. Protokol mjerenja

Mjerenja su izvedena na točkama raspoređenim u pravilnom rasteru, s prosječnim razmakom od 0,5 do 0,6 metara. Na svakoj su točki izvršena najmanje tri ponovljena udara, a za analizu je korišten prosječni rezultat. Ovim je postupkom minimiziran utjecaj slučajnih odstupanja te osigurana konzistentnost podataka [26].

Mjerni proces praćen je u stvarnom vremenu, a reflektirani signali su odmah pregledani radi provjere kvalitete. U slučaju odstupanja ili šuma, mjerenje je ponovljeno na istoj točki. Snimanje i obrada signala provedeni su pomoću softverskog paketa PET Win 8.5, koji omogućava digitalnu akviziciju, filtriranje i interpretaciju reflektiranih impulsa u stvarnom vremenu. U cilju eliminacije šuma i poboljšanja odnosa signal/šum, primijenjen je band-pass filter u frekvencijskom području 200–3000 Hz, što odgovara tipičnim vrijednostima za betonske pilote duljine do 20 metara. Softver automatski vrši normalizaciju amplituda i određivanje vremena odjeka na temelju prvog značajnog reflektiranog impulsa. Analiza se temelji na identifikaciji vremena putovanja reflektiranih valova, amplitudama refleksije, frekvencijskoj analizi i

koeficijentu prigušenja. Ovi parametri omogućuju procjenu homogenosti betonske mase te detekciju potencijalnih nepravilnosti [27].

Princip mjerenja zasniva se na indukciji, propagaciji, refleksiji i recepciji valova. Valovi se iniciraju udarcem čekića, a njihova se brzina kroz materijal može odrediti prema izrazu [28]:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{1}$$

gdje je:

- v - brzina vala (m/s),
- E- modul elastičnosti betona (Pa),
- ρ- gustoća materijala (kg/m^3).

Poznavajući brzinu vala i vrijeme putovanja do reflektirajuće plohe, dubina defekta ili kraja pilota može se izračunati kao [28]:

$$L = \frac{v \cdot t}{2} \tag{2}$$

gdje je:

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

Na slici 2 prikazan je terenski segment mjerenja na jednoj od ispitnih točaka, sa jasno vidljivom mjernom opremom i operaterima tijekom prikupljanja i kontrole podataka.

Slika 2. Prikaz mjernog procesa na jednoj od ispitnih točaka [izrada autora].

2.4. Korelacija sa destruktivnim ispitivanjem

Radi potvrde rezultata nedestruktivne metode, provedeno je kernovanje na odabranim točkama temelja, na pozicijama 1 i 21, prikazanim na slici 1. Jezgre su izvađene do dubine od 1,2 metra, s ciljem utvrđivanja homogenosti betona, prisutnosti segregacija, šupljina, kao i za laboratorijsko ispitivanje tlačne čvrstoće.

Dobiveni uzorci su vizualno analizirani, a njihova je struktura uspoređena s reflektivnim profilima dobivenim PET mjerenjima. Uzorci betona pripremljeni su i ispitani u skladu sa zahtjevima norme EN 12504-1 [29], koja propisuje postupke laboratorijskog ispitivanja za ocjenu mehaničkih karakteristika betona.

U laboratoriji su određeni svi relevantni parametri potrebni za ocjenu kvalitete betona: poroznost, apsorpcija vode i tlačna čvrstoća. Rezultati laboratorijskih ispitivanja zatim su uspoređeni sa signalima dobivenim PET metodom, čime je omogućena detaljna validacija nedestruktivne analize [21,27]. Na slici 3. prikazano je uzimanje jezgrenih uzoraka s lokacija 1 i 21 (prikazane na slici 1) i njihova priprema za laboratorijska ispitivanja.

Slika 3. Uzimanje jezgrenih uzoraka sa lokacija 1 i 21 i priprema za laboratorijska ispitivanja [izrada autora].

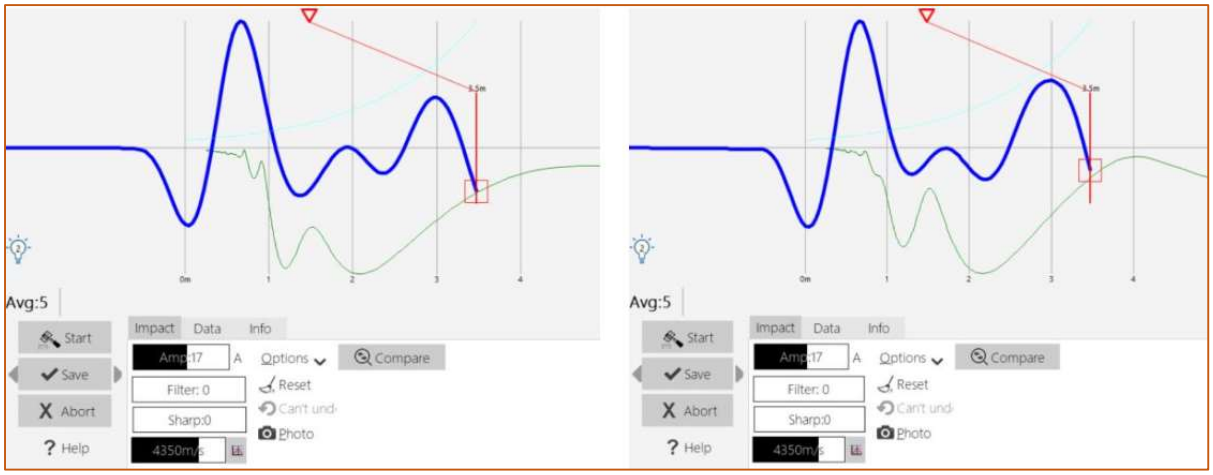
3. REZULTATI I DISKUSIJA

U okviru istraživanja kvalitete temelja tunelske konstrukcije Kobilja Glava, provedena su kombinirana ispitivanja primjenom nedestruktivne PET metode i destruktivne laboratorijske analize uzoraka dobivenih kernovanjem. Cilj je bio utvrditi homogenost betonske mase, identificirati eventualne lokalne nepravilnosti, te potvrditi pouzdanost indirektne metode kroz korelaciju sa mehaničkim parametrima betona.

3.1. PET ispitivanja

PET metoda je primijenjena na ukupno 22 pozicije (vidi Sliku 1) duž longitudinalne osi temelja. Na svim točkama zabilježena je identična brzina propagacije impulsa od 4350 m/s, uz stabilne reflektograme i jasno definiranu refleksiju. Amplitude reflektiranih signala kretale su se u rasponu od 16 do 18 A, dok se broj ponovljenih udara po točki kretao između 3 i 5, pri čemu su za analizu korišteni prosječni rezultati.

Na slici 4 prikazan je karakterističan odziv PET metode na pozicijama 1 i 21 (Slika 1), uz identifikaciju reflektiranih impulsa i stabilnost signala.



Slika 4. Reflektogrami zabilježeni PET metodom na pozicijama 1 i 21 – odziv impulsa i amplitudna stabilnost.

3.2. Destruktivna analiza

Na pozicijama 1 i 21 (vidi Sliku 1) izvršeno je uzimanje uzoraka metodom kernovanja, s ciljem laboratorijske analize fizičko-mehaničkih svojstava betonske mase. Ukupno su ispitana četiri uzorka, po dva sa svake pozicije.

Laboratorijska obrada obuhvatila je određivanje zapreminske mase, vlažnosti, poroznosti i tlačne čvrstoće. Ispitivanja su provedena u skladu s važećim normama, uz primjenu standardiziranih postupaka za obradu i interpretaciju rezultata.

U tablici 1 prikazani su pojedinačni rezultati za svaki uzorak, uključujući njihove dimenzije, masu, izračunati volumen, volumensku masu, sadržaj vode, stupanj poroznosti, te utvrđenu tlačnu čvrstoću uz korekciju prema faktoru homogenosti.

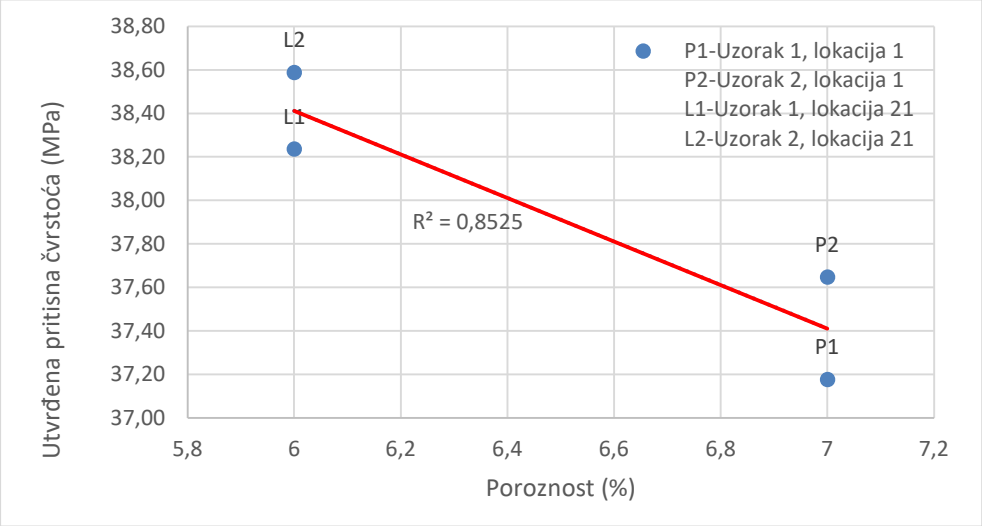
Tablica 1. Rezultati laboratorijskog ispitivanja uzoraka betona

Lokacija ispitivanja	Dimenzije uzorka (mm)		Masa uzorka (gr)	Volumen (m^3)	Volumenska masa (kg/m^3)	Vlažnost W (%)	Poroznost P (%)	Utvrđena tlačna čvrstoća na uzorku (MPa)	
	d	h						fck,is	fck,is/0,85
Pozicija 1	92,7	100,0	1530	0,67	2268	1,6	7	31,6	37
Pozicija 1	92,7	100,0	1533	0,67	2273	1,6	7	32,0	38
Pozicija 21	92,7	100,0	1555	0,67	2305	1,5	6	32,5	38
Pozicija 21	92,7	100,0	1554	0,67	2304	1,5	6	32,8	39

Gdje fck,is označava vrijednost utvrđenu na konkretnom uzorku, a fck,is/0,85 predstavlja korekciju u skladu sa standardnim odnosom između ispitnog oblika uzorka i projektirane referentne vrijednosti.

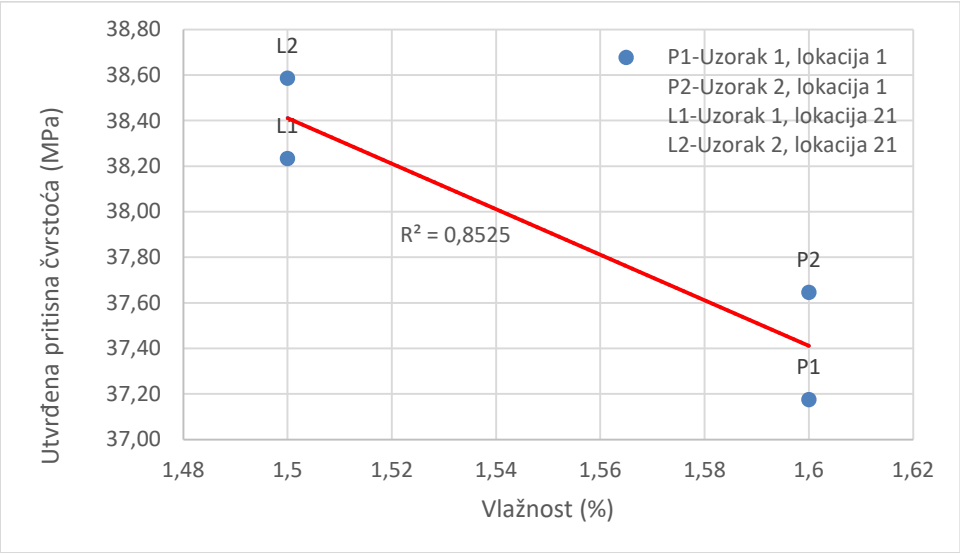
Rezultati ispitivanja pokazuju da se vrijednosti tlačne čvrstoće kreću u rasponu od 31,6 do 32,8 MPa, što je iznad projektirane vrijednosti od 30 MPa. Poroznost se kreće između 6 % i 7 %, dok je vlažnost stabilna i niska (1,5 %–1,6 %), što upućuje na povoljne uvjete očvršćavanja i očuvanja strukture betona. Uočena odstupanja su minimalna i ne utječu na funkcionalnost temelja.

Slika 5 prikazuje korelaciju između izmjerene tlačne čvrstoće i poroznosti uzoraka. Vidljivo je da porast poroznosti blago utječe na smanjenje čvrstoće, no svi uzorci ostaju unutar prihvatljivog raspona, bez značajnih odstupanja od projektiranih vrijednosti.



Slika 5. *Korelacija između tlačne* čvrstoće *i poroznosti uzoraka betona – pozicije 1 i 21*

U nastavku, na slici 6 prikazan je odnos između sadržaja vlage u uzorcima i njihove tlačne čvrstoće, s jasno izraženim trendom koji potvrđuje utjecaj vlažnosti na mehanička svojstva betona.



Slika 6. *Korelacija između tlačne* čvrstoće *i vlažnosti uzoraka betona – pozicije 1 i 21*

Analiza uzoraka sa pozicija 1 i 21 ukazuje na izraženu negativnu korelaciju između sadržaja vlage i tlačne čvrstoće, kao i između poroznosti i tlačne čvrstoće. U oba slučaja, povećanje vlage i poroznosti dosljedno se povezuje sa smanjenjem čvrstoće. Dobivena regresijska relacija ($R^2 \approx 0.85$) potvrđuje visoku pouzdanost uočenog trenda, koji je u skladu s očekivanim ponašanjem betona u suhim i kompaktnim uvjetima. Ovakva veza može se koristiti kao referentni kriterij za kontrolu kvalitete u laboratorijskim i terenskim analizama.

Kombinirana analiza PET rezultata i laboratorijskih ispitivanja ukazuje na konzistentnost u kvaliteti izvedenih temelja. Reflektogrami su stabilni, bez znakova diskontinuiteta, dok fizičko-mehanički parametri uzoraka potvrđuju da je betonska masa homogena, kompaktna i u skladu s projektiranim zahtjevima. Metodološki pristup, koji uključuje neinvazivnu terensku analizu i destruktivnu laboratorijsku verifikaciju, pokazao se učinkovitim u ocjeni stanja temelja bez potrebe za dodatnim intervencijama ili odgodama.

3.3. Ograničenja primjene PET metode

Metoda reflektiranog impulsa (PET) standardno se primjenjuje na pilote duljine veće od 4 m, no novija tehnička iskustva ukazuju da se uz pravilnu kalibraciju i optimizaciju udarne energije mogu dobiti pouzdani odzivi i kod kraćih betonskih elemenata [30,31]. Frekvencijska analiza, izbor senzora i kontrola spektra impulsa omogućuju primjenu na temeljne elemente kraće od 2 m, pod uvjetom da se osigura dovoljan odziv u vremenskoj domeni.

U cilju potvrde valjanosti rezultata PET metode, često se koristi kombinacija s destruktivnim ispitivanjem putem kernovanja, gdje se analiziraju fizičko-mehanička svojstva jezgre: gustoća, homogenost, čvrstoća i prisutnost šupljina [32,33]. Usporedba rezultata omogućuje verifikaciju kvalitete temelja i povećava pouzdanost ocjene stanja konstrukcije.

Ipak, primjena PET metode na kraće elemente zahtjeva dodatnu pozornost u interpretaciji, osobito u prisutnosti složenih graničnih uvjeta, višeslojnih materijala ili lokalnih nehomogenosti. Reflektogrami mogu biti osjetljiviji na površinske nepravilnosti, a amplitudni odziv može varira u zavisnosti od geometrije i kontaktne površine. U takvim slučajevima preporučuje se dopunska analiza niskofrekventnim metodama ili direktna verifikacija putem uzorkovanja.

4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad prikazuje primjenu metode PET na 22 ispitne pozicije temeljnog elementa visine 1,4 m, uz dopunsko destruktivno ispitivanje putem kernovanja na pozicijama 1 i 21. Cilj istraživanja bio je ocijeniti kvalitetu izvedenog temelja na osnovi brzine propagacije impulsa, amplituda odziva i fizičko-mehaničkih svojstava betonske mase. Dobiveni rezultati ukazuju na stabilan reflektogram, homogenu strukturu betona, nisku poroznost i tlačne čvrstoće iznad projektiranih vrijednosti.

Korelativna analiza pokazala je izraženu negativnu vezu između poroznosti i čvrstoće, kao i između sadržaja vlage i čvrstoće, uz visoku pouzdanost regresijske relacije ($R^2 \approx 0.85$). Ovi odnosi potvrđuju očekivano ponašanje betona u kompaktnim i suhim uvjetima, te omogućuju kvantitativnu procjenu kvalitete izvedenih elemenata. Usporedba rezultata PET metode i kernovanih uzoraka potvrđuje tehničku valjanost reflektiranih podataka i povećava pouzdanost ocjene stanja konstrukcije.

Unatoč ograničenjima PET metode kod kraćih elemenata, pravilna kalibracija, optimizacija udarne energije i dopunska verifikacija putem uzorkovanja omogućuju pouzdanu interpretaciju. Metodološki pristup primijenjen u ovom istraživanju pokazao se učinkovitim i

primjenjivim u infrastrukturnim projektima u kojima je potrebna brza, neinvazivna i višeslojna dijagnostika temelja.

LITERATURA

1. Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., & Musa, N. (2024). Definiranje optimalnog razmaka između tehnoloških sekvenci pri iskopu tunela u lošijoj stijenskoj masi. *e-Zbornik: Elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta*, *14*(28), 45–55. Preuzeto s https://hrcak.srce.hr/324584
2. Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Hodžić, D., & Musa, N. (2025). Analysis of surface deformations during excavation of a small overburden tunnel in weak rock masses. *Journal of the Faculty of Civil Engineering and Architecture*, *40*(1), 35–48. https://doi.org/10.62683/ZRGAF40.3
3. Filipović, S., Bektašević, E., Gutić, K., Musa, N., & Sakić, N. (2025). 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*(2), 1–14. https://doi.org/10.30574/gjeta.2025.22.2.0019
4. Bektašević, E., Mušija, A., Gutić, K., Beganović, S., & Čehajić, D. (2023). Analysis of the groundwater influence on the categorization of the rock mass and support type of the Zenica tunnel on the route of the Vc corridor. *Journal of Faculty of Civil Engineering*, *44*, 5–19. https://doi.org/10.14415/JFCE-894
5. Bektašević, E., Gutić, K., Kadrić, R., Kadrić, S., & Sikira, D. (2024). Deformation analysis during tunnel excavation in poor rock mass. *8th International Conference on Road and Rail Infrastructure – CETRA 2024*, Cavtat, 799–805.
6. Bektašević, E., Antičević, H., Gutić, K., & Sikira, D. (2024). 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*(3), 139–151. https://doi.org/10.30574/gjeta.2024.18.3.0051
7. Kadrić, S., Bektašević, E., Gutić, K., & Sikira, D. (2023). Numerical analysis of the stability of the Ibarac tunnel excavation and stabilization of the collapsed part, parking niche. *Nauka+Praksa*, *26*.
8. Okiye, S. E. (2021). *Model for advancing quality control practices in concrete and soil testing for infrastructure projects: Ensuring structural integrity*. *IRE Journals*, *4*(9), 295-322. Hertz Terotech Ltd., Lagos, Nigeria. ISSN: 2456-8880. [accessed on 2025 Sep 03]. Available from: https://www.irejournals.com/formatedpaper/1708975.pdf
9. Poncetti, B. L., Vega Ruiz, D., de Assis, L. S., Machado, L. B., da Silva, T. B., Akinlalu, A. A., & Futai, M. M. (2025). *Tunnel inspection review: Normative practices and non-destructive method advancements for tunnels with concrete cover. Applied Mechanics*, *6*(2), 41. Department of Structural and Geotechnical Engineering, Universidade de São Paulo. ISSN: 2673-3161. https://doi.org/10.3390/applmech6020041
10. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Training Course Series No. 17. Industrial Applications and Chemistry Section, IAEA, Vienna. ISSN: 1018–5518. [accessed on 2025 Sep 03]. Available from: https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-17_web.pdf
11. FPrimeC Solutions Inc. (2024). *Non-destructive testing for structural condition assessment*. FPrimeC Knowledge Centre. https://fprimec.com/non-destructive-testing-for-structural-condition-assessment/
12. Tefera, B. B., & Tarekegn, A. G. (2025). Non-Destructive Testing Techniques for Condition Assessment of Concrete Structures: A Review. *American Journal of Civil Engineering*, 13(1), 10-31. https://doi.org/10.11648/j.ajce.20251301.12
13. Bungey, J.H., & Grantham, M.G. (2006). Testing of Concrete in Structures: Fourth Edition (4th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781482264685
14. American Concrete Institute (ACI). (2013). *Report on nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures* (ACI 228.2R-13). Farmington Hills, MI: ACI Committee 228. ISSN: 0887-0806.

[accessed on 2025 Sep 03]. Available from: https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/228213.pdf

15. Proceq SA. (2018). *Portable Non-Destructive Concrete Testing Instruments*. PROTSURV South Africa. [accessed on 2025 Sep 03]. Available from: https://www.protsurv.com/wp-content/uploads/2018/11/proceq.pdf

16. FPrimeC Solutions Inc. (2020). *Ultrasonic Pulse Echo Tomography for Concrete*. [accessed on 2025 Sep 03]. Available from: https://fprimec.com/ultrasonic-pulse-echo-tomography-for-concrete/

17. Siorikis, V. G., Antonopoulos, C. P., Pelekis, P., Christovasili, K., and Hatzigeorgiou, G. D. (2020). Numerical and experimental evaluation of sonic resonance against ultrasonic pulse velocity and compression tests on concrete core samples, *Vibroengineering PROCEDIA*, Vol. 30, pp. 168–173, https://doi.org/10.21595/vp.2020.21328.

18. Causevic, A., Rustempašić, N., & Skoko, M. (2008). Destruktivne i nedestruktivne metode ispitivanja materijala kod zidanih konstrukcija. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4005.2240.

19. Zatar, W., Chen, G., Nghiem, H., & Xiao, F. (2024). Ultrasonic Pulse-Echo Signals for Quantitative Assessment of Reinforced Concrete Anomalies. *Applied Sciences*, *14*(11), 4860. https://doi.org/10.3390/app14114860

20. ASTM D5882-16. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. ASTM International.

21. Sansalone, M., & Streett, W. B. (1997). *Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Bullbrier Press. ISBN: 9780961261061

22. Grosse, C. U., & Reinhardt, H. W. (2005). *Advanced testing of cement-based materials during setting and hardening* (RILEM Report 31). Bagneux, France: RILEM Publications. ISBN 9782912143815

23. Breysse, D. (2012). *Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods.* Construction and Building Materials, 33, 139–163. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103

24. Aggelis, D. G., & Shiotani, T. (2007). *Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements.* Cement and Concrete Composites, 29(9), 700–711. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.05.001

25. Malhotra, V.M., & Carino, N.J. (2003). Handbook on Nondestructive Testing of Concrete (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420040050

26. Carino, N. J. (1996). *The Impact-Echo Method*. National Institute of Standards and Technology. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860355

27. Carino, N. J. (2015). *Impact Echo: The Fundamentals*. Presented at the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, Germany, https://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/257_carino_nicholas.pdf

28. Bektašević, E., Filipović, S., Gutić, K., Musa, N. (2025). *Ispitivanje integriteta pilota nedestruktivnom metodom na izlaznom portalu tunela Kobilja Glava*. e-Zbornik, Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, broj 29, godište 15, str. 58. https://doi.org/10.47960/2232-9080.2025.29.15.58

29. European Committee for Standardization. (2009). *EN 12504-1:2009. Testing concrete in structures – Cored specimens – Taking, examining and testing in compression*. Brussels: CEN.

30. Lorenzi, A., Silva Filho, L. C. P., & Lorenzi, L. S. (2015). Application of ultrasonic pulse velocity to detect concrete defects. *e-Journal of Nondestructive Testing*, 20(12), 1–11. Retrieved from: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2015/Lorenzi1.pdf

31. Pile Dynamics, Inc. (n.d.). *Using the Pile Integrity Tester (PIT) to Measure Short Piles*. Retrieved September 11, 2025, from: https://www.pile.com/resources/faqs/minimum-pile-length-can-tested-pit/

32. Barrow Mix Concrete. (2025, June 3). *What Is Core Sampling? Testing Concrete Strength After Installation*. Retrieved September 11, 2025, from: https://barrowmixconcrete.com/what-is-core-sampling-testing-concrete-strength/

33. White, H. (2023, November 13). *Core Extraction and Testing of Concrete: A Comprehensive Guide to Structural Integrity*. Retrieved September 11, 2025, from: https://build-construct.com/tips/core-extraction/