

Primjena ultrazvučnih ispitivanja pri sanaciji AB stupova

Zekušić, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:304717>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Vedran Zekušić

**PRIMJENA ULTRAZVUČNIH ISPITIVANJA PRI
SANACIJI AB STUPOVA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Vedran Zekušić

**PRIMJENA ULTRAZVUČNIH ISPITIVANJA PRI
SANACIJI AB STUPOVA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivan Duvnjak

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Vedran Zekušić

**APPLICATION OF ULTRASOUND TESTS IN THE
RECONSTRUCTION OF RC COLUMNS**

MASTER THESIS

Supervisor: associate professor Ivan Duvnjak, Ph.D.

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Vedran Zekušić, 0082062069

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Primjena ultrazvučnih ispitivanja pri sanaciji AB stupova

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

13.11.2024.

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

Vedran Zekušić, 75530964020

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Primjena ultrazvučnih ispitivanja pri sanaciji AB stupova

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

izv. prof. dr. sc. Ivan Duvnjak

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

21.11.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

13.11.2024.

Potpis:

ZAHVALE

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivanu Duvnjaku na stručnim savjetima i prenesenom znanju prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se tvrtki MAR d.o.o. na podršci i suradnji prilikom provođenja eksperimentalnog istraživanja i tvrtki Urbane ideje d.o.o. na ustupljenoj projektnoj dokumentaciji.

Zahvaljujem se dr. sc. Daliboru Sekuliću na vrijednim savjetima koji su mi pomogli u istraživanju.

Posebno hvala mojoj obitelji bez koje bi ovaj cijeli put bio nezamislivo teži.

SAŽETAK

Predmet rada je analiza primjene ultrazvučnih ispitivanja pri sanaciji armiranobetonskih stupova.

U prvom dijelu rada opisane su neke od najčešćih nerazornih ispitnih metoda s naglaskom na metode koje se zasnivaju na djelovanju valova, a posebno na metodu ispitivanja ultrazvukom. Također su opisani i parametri vala, vrste valova i njihova podjela prema načinu na kojem se oni šire kroz različiti medij.

U drugom dijelu rada provedena je studija slučaja sanacije mosta u kojoj je opisano postojeće stanje mosta, prethodno provedena ispitivanja i postupak sanacije jednog njegovog stupa reprofilacijom. U eksperimentalnom dijelu opisan je postupak ultrazvučnog ispitivanja na stupu i dana je analiza dobivenih rezultata prije i nakon sanacije.

Zaključno se dokazalo je li došlo i u kojoj mjeri do povećanja kvalitete betona ispitivanog stupa nakon sanacije.

Ključne riječi: nerazorne metode ispitivanja; valovi; most; sanacija; stup mosta; reprofilacija; ultrazvučno ispitivanje

SUMMARY

The subject of the work is the analysis of the application of ultrasonic tests in the reconstruction of reinforced concrete columns.

In the first part of the paper, some of the most common non-destructive testing methods are described, with an emphasis on methods based on the action of waves, and especially on the ultrasonic testing method. Wave parameters, types of waves and their division according to the way they propagate through different media are also described.

In the second part of the work, a case study of the reconstruction of the bridge was carried out, in which the existing condition of the bridge was described, the previously conducted tests and the procedure for reconstructing one of its columns by reprofiling. In the experimental part, the procedure of ultrasonic testing on the column is described and the analysis of the results obtained before and after reconstruction is given.

In conclusion, it was proved whether and to what extent there was an increase in the quality of the concrete of the tested column after reconstruction.

Key words: nondestructive testing; waves; bridge; reconstruction; bridge column; reprofiling; ultrasonic test

SADRŽAJ

| | |
|---|------------|
| ZAHVALE | i |
| SAŽETAK | ii |
| SUMMARY | iii |
| SADRŽAJ | iv |
| 1. UVOD | 6 |
| 2. METODE ISPITIVANJA U GRAĐEVINARSTVU..... | 7 |
| 2.1. Nerazorne metode ispitivanja | 8 |
| 2.2. Teorijske postavke ultrazvučnih valova | 10 |
| 2.2.1. Longitudinalni valovi u prizmatičnom štapu:..... | 13 |
| 2.2.2. Izrazi za brzine različitih valova:..... | 14 |
| 2.3. Povijesni prikaz razvoja ultrazvučne metode | 17 |
| 2.4. Metoda određivanja brzine ultrazvučnog impulsa | 17 |
| 2.4.1. Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa | 23 |
| 2.5. Ultrazvučna tomografija | 23 |
| 2.6. Ostale nerazorne metode ispitivanja | 25 |
| 2.6.1. Metoda udara i odjeka..... | 25 |
| 2.6.2. Spektralna analiza površinskih valova (SASW) | 26 |
| 2.6.3. Radar..... | 27 |
| 2.6.4. Infracrvena termografija..... | 29 |
| 2.6.5. Akustička emisija..... | 31 |
| 3. STUDIJA SLUČAJA MOSTA | 32 |
| 3.1. Tehnički opis mosta | 34 |
| 3.2. Prethodna ispitivanja za potrebe projekta sanacije | 36 |
| 3.2.1. Vizualni pregled | 37 |
| 3.2.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće | 38 |
| 3.2.3. Ispitivanje vlačne čvrstoće betona pull-off metodom..... | 39 |
| 3.2.4. Ispitivanje indeksa odskoka sklerometra..... | 40 |
| 3.3. Opis postupka sanacije stupišta | 41 |
| 3.3.1. Propisana svojstva materijala korištenih za sanaciju stupišta..... | 41 |
| 3.3.1.1. Sanacijski mort za popravak betonskih elemenata | 41 |
| 3.3.1.2. Sustav premaza za zaštitu betona | 41 |
| 3.3.1.3. Akrilna boja | 41 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.3.2. | Reprofilacija oštećenih betonskih površina..... | 41 |
| 3.3.2.1. | Hidrodinamičko ukljanjanje betona | 42 |
| 3.3.2.2. | Reprofilacija površina sanacijskim betonom ili mortom | 43 |
| 4. | EKSPERIMENTALNI DIO ISTAŽIVANJA | 44 |
| 4.1. | Opis uređaja..... | 44 |
| 4.2. | Opis ultrazvučnog ispitivanja na stupu S1 | 46 |
| 4.3. | Obrada izmjerenih veličina | 60 |
| 4.4. | Rezultati ispitivanja prije sanacije..... | 63 |
| 4.5. | Rezultati ispitivanja nakon sanacije | 65 |
| 4.6. | Analiza rezultata ispitivanja i diskusija | 67 |
| 4.6.1. | Prije sanacije | 67 |
| 4.6.2. | Nakon sanacije | 67 |
| 5. | ZAKLJUČAK | 69 |
| 6. | POPIS LITERATURE | 70 |
| 7. | POPIS SLIKA | 72 |
| 8. | POPIS TABLICA | 74 |

1. UVOD

Svi materijali koji se koriste u građevinarstvu mogu se ispitivati prilikom proizvodnje, ugradnje i tijekom uporabnog vijeka.

Redovnim ili izvanrednim pregledom građevine tijekom kojeg se provode razne istražne aktivnosti i ispitivanja, donosi se odluka o potrebi sanacije građevine. Potrebno je provjeriti jesu li prisutne deformacije na građevini ili nekim njezinim elementima, postoje li pukotine, kakva je njihova veličina i smjer pružanja. Također je važno odrediti, ukoliko su prisutni, u kakvom su stanju zaštitni slojevi, odnosno sustavi zaštite. U konačnici se zaključuje ispunjava li građevina u cjelini zahtjeve određene projektom građevine.[1]

Temeljem analize rezultata ispitivanja izrađuje se projekt sanacije koji propisuje potrebne vrste radova i načine njihova izvođenja.

U ovom radu opisan je tijek sanacije jednog od stupova mosta na autocesti A2 Zagreb-Macelj. Projektom je propisano da se sanacija izvodi reprofilacijom oštećenih dijelova betona. Uklanjanje oštećenog betona provedeno je hidrodinamičkim postupkom nakon čega je izvršena ugradnja sanacijskog morta.

Prilikom izvođenja sanacijskih radova u svrhu eksperimentalnog dijela ovog rada provedeno je ispitivanje kvalitete betona stupa mosta prije i nakon sanacije. Ispitivanje je izvršeno metodom mjerenja prolaska ultrazvučnog impulsa na unaprijed definiranim ispitnim mjestima po principu ultrazvučne tomografije.

Metoda ultrazvučnog ispitivanja spada u grupu nerazornih ispitivanja jer prilikom njezinog provođenja ne nastaju oštećenja niti se utječe na funkcionalnost objekta koji se ispituje. Ultrazvučno ispitivanje se zasniva na širenju akustičnih valova kroz materijal. Analizom brzine prolaska vala dobiju se relativno pouzdani zaključci o kvaliteti materijala koji se ispituje. Kvaliteta ultrazvukom ispitivanog materijala u najvećoj mjeri ovisi o njegovoj gustoći i homogenosti. Metoda je korisna zbog brzine provođenja i relativno povoljne cijene.

Kao i kod svake nerazorne metode, najbolji se rezultati postižu u kombinaciji s nekom od razornih metoda, čime se znatno smanjuje opseg razaranja ukoliko bi se određena razorna metoda primjenjivala samostalno.

2. METODE ISPITIVANJA U GRAĐEVINARSTVU

Ovisno o stupnju invazivnosti, metode ispitivanja u građevinarstvu se dijele na:

- razorne,
- polurazorne i
- nerazorne metode.

Razorne metode ispitivanja su one nakon kojih materijal ostaje trajno oštećen. Njihovom primjermom postižu se kvantitativne vrijednosti iz kojih se može direktno zaključiti čvrstoću materijala, te granična stanja nosivosti i uporabivosti za element ili konstrukciju. Razorne metode ispitivanja mogu biti statičke ili dinamičke. Najčešće se koriste za normirana ispitivanja čvrstoće uzoraka na tlak, vlak ili savijanje. Također, u skupinu razornih metoda spadaju i testovi probnih opterećenja konstrukcija, najčešće mostova (slika 1). To je iznimno važan test koji se provodi prije puštanja novog ili konstruktivno saniranog mosta u upotrebu i njime se dokazuje da je most sposoban preuzeti izrazito velika opterećenja unutar okvira svoje uporabivosti. Ponekad se u istraživačke svrhe postojeći mostovi koji više nisu u upotrebi podvrgnu testu opterećenja do potpunog otkazivanja kako bi se stekla nova saznanja o ponašanju takvih konstrukcija pri kritičnim opterećenjima, te na taj način unaprijedili modeli korišteni u projektiranju budućih mostova.[2]



Slika 1. Prikaz probnog opterećenja na mostu [3]

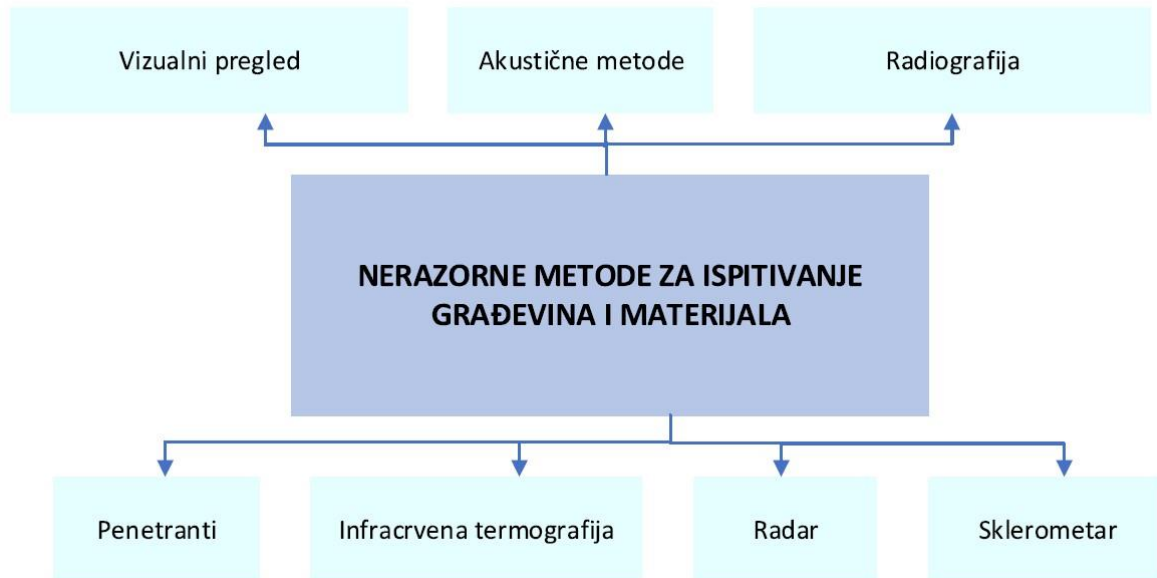
Razlika između polurazornih i nerazornih metoda je u tome što je kod prvih materijal obično lokalno i površinski oštećen prilikom ispitivanja. U slučaju nerazornih metoda ne nastaju nikakva oštećenja. Stoga su nerazorne metode prikladne za ispitivanje u građevinarstvu kao i za ispitivanje velikih površina do značajne dubine. Osim toga, u slučaju nerazornih metoda, mjerenja se mogu ponavljati čime se mogu postići točniji rezultati mjerenja.

2.1. Nerazorne metode ispitivanja

Nerazorne metode ispitivanja (eng. NDT – Nondestructive testing ili Non destructive testing) se najčešće definiraju kao skup metoda temeljenih na principima fizike sa svrhom utvrđivanja svojstava materijala ili komponenata sustava te otkrivanja različitih vrsta defekata, a da se pritom ne utječe na funkcionalnost objekta koji se ispituje.

Nerazorne metode se uglavnom koriste za ispitivanje čvrstoće i proučavanje njezinih promjena tijekom vremena. Obično se na ovaj način ispituju uzorci izvađeni iz konstrukcije, a ponekad se ispituju cijeli elementi ili cijele konstrukcije.[4]

Opća klasifikacija nerazornih metoda koje su korisne za ispitivanje čvrstoće i trajnosnih svojstava zgrada i građevinskih materijala prikazana je na slici 2.



Slika 2. Klasifikacija nerazornih metoda

Svako ispitivanje kvalitete i cjelovitosti ugrađenog materijala započinje vizualnim pregledom. Ono se može provoditi direktno (golim okom) ili indirektno (optičkim pomagalom). Na ovaj način moguće je pregledati samo vidljiva makroskopska oštećenja bez kvantitativnih podataka. Stoga se ispitivanje u drugom koraku dopunjuje s nekom od drugih postojećih metoda.

Te se metode mogu zasnivati na raznim fizikalnim principima od kojih se veliki broj metoda zasniva na proučavanju ponašanja valova u interakciji s ispitivanim materijalom. Neke od njih su:

- Metoda ispitivanja ultrazvukom
- Metoda udara i odjeka
- Spektralna analiza površinskih valova
- Radar
- Radiografija
- Infracrvena termografija
- Akustička emisija

U eksperimentalnom dijelu ovog rada korištena je jedna od najčešće korištenih metoda koja se temelji na akustičkim valovima, a to je metoda ispitivanja ultrazvukom. Stoga će se u slijedećim poglavljima pobliže opisati svojstva akustičnih valova i primjena ultrazvučne metode.

2.2. Teorijske postavke ultrazvučnih valova

Val je prijenos poremećaja tj. odstupanje od ravnotežnog položaja ili prijenos energije bez prijenosa mase. Prema prirodi poremećaja valovi se mogu dijeliti na:

- elektromagnetske i
- mehaničke valove.

Elektromagnetski val je prijenos titraja električnog i magnetnog polja (u vakuumu ili u sredstvu).

Mehanički val je prijenos titraja atoma i/ili molekula tvari (elastičnog sredstva). Akustični valovi su vrsta mehaničkih valova.

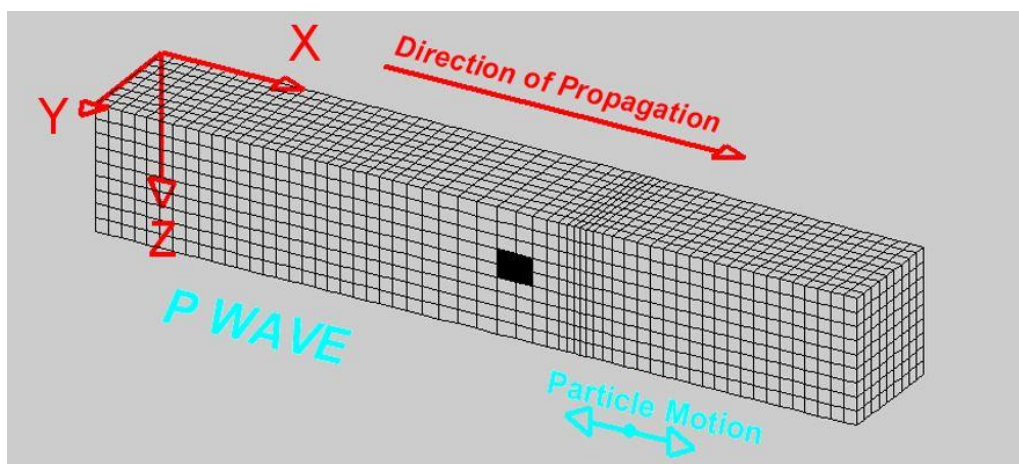
Ovisno o materijalu kroz koji se prenosi energija i ostalim značajkama, kao što su oblik i dimenzije i općenito stanje materijala, posebno njegova elastična svojstva, nastat će razne vrste valova, a to su:

- longitudinalni i
- transverzalni.

Na slikama 3-5 prikazani su različiti oblici širenja valova.

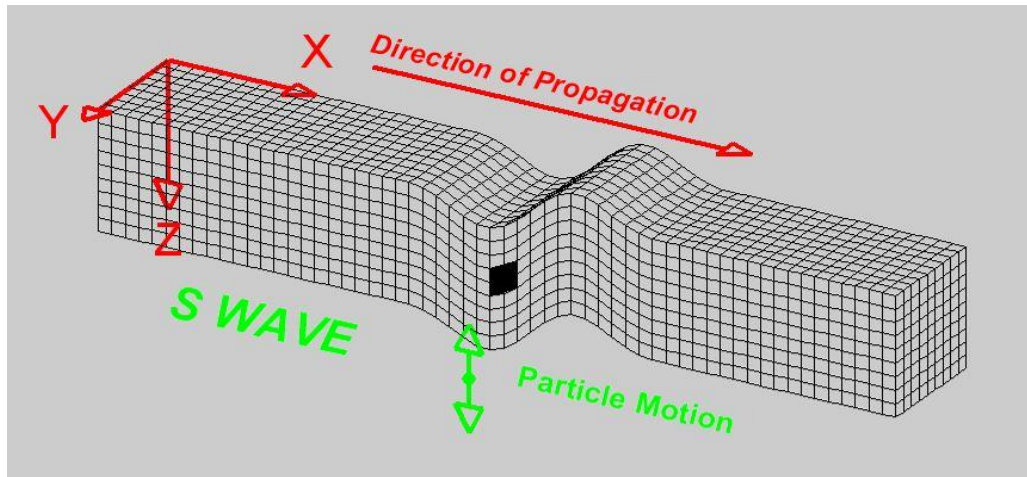
U građevinskoj praksi sa za in situ i laboratorijska mjerenja najviše koriste mjerenja zasnovana na longitudinalnim ultrazvučnim valovima. [5]

Kod longitudinalnih valova titranje čestica se događa u smjeru širenja vala, te uzrokuju zgušćenja i razrjeđenja u sredstvu kojim se šire. Takav val se još naziva L-valom (P-valom) (slika 3). L-val može se širiti u sva tri agregatna stanja.



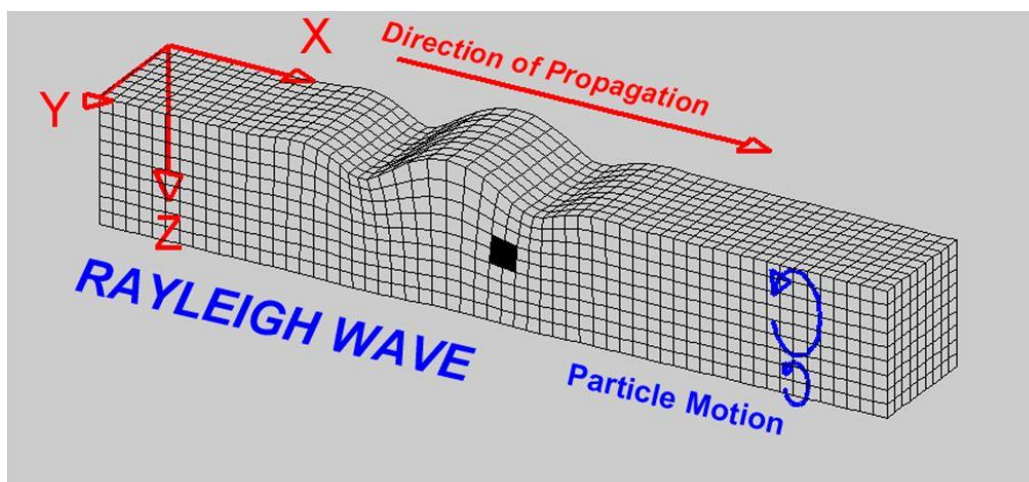
Slika 3. Prikaz longitudinalnog vala [5]

Kod transverzalnih valova titranje čestica se događa u smjeru okomitom na smjer širenja vala, takav val se još naziva T-valom (S-valom) (slika 4). T-val se može širiti materijalom koji je u krutom agregatnom stanju.



Slika 4. Prikaz transverznog vala [5]

Interakcijom osnovnih valova s granicama sredstva kroz kojeg se šire, nastaju različite vrste površinskih valova koji imaju i longitudinalnu i transverzalnu komponentu a karakterizira ih širenje u području blizu površine materijala. Takvi valovi nazivaju se Rayleighovi valovi ili R-valovi. Amplituda Rayleighovih valova se naglo eksponencijalno smanjuje po dubini (Slika 5). [6]



Slika 5. Prikaz Rayleighovog vala [5]

Longitudinalni valovi se u usporedbi s transverzalnim i Rayleighovim valovima najbrže šire kroz materijal i ne interferiraju s ostalim valnim modovima. [5] Većina nerazornih metoda bazirana na ultrazvučnom ispitivanju, koristi svojstva sve tri vrste valova [7].

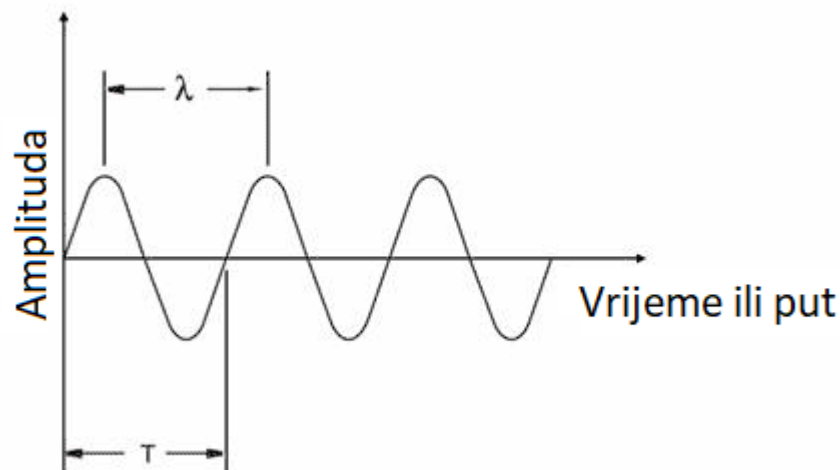
Glavni parametri vala su valna duljina i period (slika 6). Broj ciklusa izvedenih u jednoj sekundi naziva se frekvencija i mjeri se u hercima (Hz). Ultrazvučna frekvencija je frekvencija veća od 20 kHz. Vrijeme potrebno za završetak punog ciklusa naziva se razdoblje i mjeri se u sekundama.[8] Odnos između frekvencije i perioda vala dan je formulom:

$$f = \frac{1}{T}$$

Gdje je:

f – frekvencija (s^{-1}) ili (Hz)

T – period (s)



Slika 6. Osnovni parametri vala [8]

Brzina zvuka u idealno elastičnom materijalu pri danoj temperaturi i tlaku je konstantna. Odnos između brzine zvuka i valne duljine je sljedeći:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

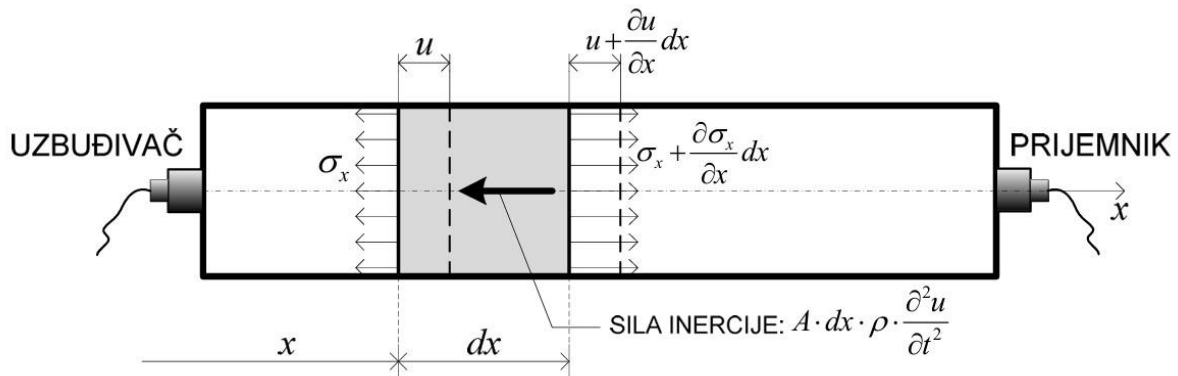
Gdje je:

λ – valna duljina (m)

v – brzina zvuka (m/s)

f – frekvencija (Hz)

2.2.1. Longitudinalni valovi u prizmatičnom štapu:



Slika 7. Rasprostiranje uzdužnih valova u štapu [9]

Prema D'Alambertovu principu za promatrani element štapa (slika 7) jednadžba gibanja [10] glasi:

$$\sigma_x \cdot A + A \cdot dx \cdot \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) \cdot A = 0 \quad (1)$$

Iz izraza (1) dobivamo:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x}. \quad (2)$$

Hookeov zakon za jednoosno stanje naprezanja glasi $\sigma_x = \varepsilon_x \cdot E$, gdje je $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$, pa je:

$$\sigma_x = \frac{\partial u}{\partial x} \cdot E. \quad (3)$$

Ako izraz (3) uvrstimo u izraz (2), dobit ćemo jednadžbu širenja vala:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Opće rješenje jednadžbe (4) tražimo u obliku:

$$u(x, t) = X(x) \cdot T(t). \quad (5)$$

$$\text{Jedno rješenje je: } u = a \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (6)$$

Gdje je:

λ – duljina vala,

T – period titranja.

Ako izraz (6) uvrstimo u izraz (4), dobit ćemo:

$$-a \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t = -\frac{E}{\rho} \cdot a \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (7)$$

Iz izraza (7) dobivamo vezu brzine širenja valova, modula elastičnosti i gustoće materijala:

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{E}{\rho} \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \quad (8)$$

$$\left(\frac{\lambda}{T}\right)^2 = \frac{E}{\rho} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\lambda}{T}\right)^2 = v^2 = \frac{E}{\rho} \quad (10)$$

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (11)$$

Brzina širenja valova u betonu je $v = 2 \text{ km/s}$ do $v = 4,5 \text{ km/s}$, u čeliku $v = 5 \text{ km/s}$, a u zraku $v = 330 \text{ m/s}$. U izrazu (11) E je dinamički modul elastičnosti u N/m^2 , ρ je gustoća materijala (volumenska masa) u kg/m^3 , a v brzina u m/s . [10]

2.2.2. Izrazi za brzine različitih valova:

Očvrsnuli beton pokazuje pri dovoljno malim naprezanjima gotovo idealno elastična svojstva, pa se na njih može primijeniti teorija širenja elastičnih valova kroz kruti materijal. Rješavanjem valne jednadžbe zaključuje se da se kroz idealno elastični medij mogu širiti longitudinalni, transverzalni (slika 8) i Rayleighovi akustični valovi. [5]

U čvrstim tijelima za longitudinalne i transverzalne valove, brzina zvučnog vala je dana slijedećim formulama:

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

Gdje je:

v_L - brzina longitudinalnih valova

ρ - gustoća materijala

E - Youngov dinamički modul elastičnosti

ν - Poissonov koeficijent

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}$$

gdje je:

v_T - brzina transverzalnih valova

E - Youngov dinamički modul elastičnosti

G - modul posmika

ρ - gustoća materijala

ν - Poissonov koeficijent

Prikazane jednadžbe ukazuju da s porastom Youngovog modula elastičnosti dolazi do porasta brzine ultrazvuka kod viskoelastičnih i elastičnih materijala. Dakle, kod svježeg cementnog materijala se treba uočiti porast brzine ultrazvuka već nakon par sati kada se prelaskom cementnog gela iz Newtonove tekućine u Binghamovo tijelo počinju javljati elastična svojstva. [7]

Brzina Rayleighovih, površinskih valova dobije biranjem pogodnog rješenja jednadžbe:

$$l^6 - 8l^4 + 8l^2(3 - 2n^2) + 16(n^2 - 1) = 0$$

gdje je:

$n = v_T / v_L$ – omjer brzina širenja transverzalnih i longitudinalnih i valova

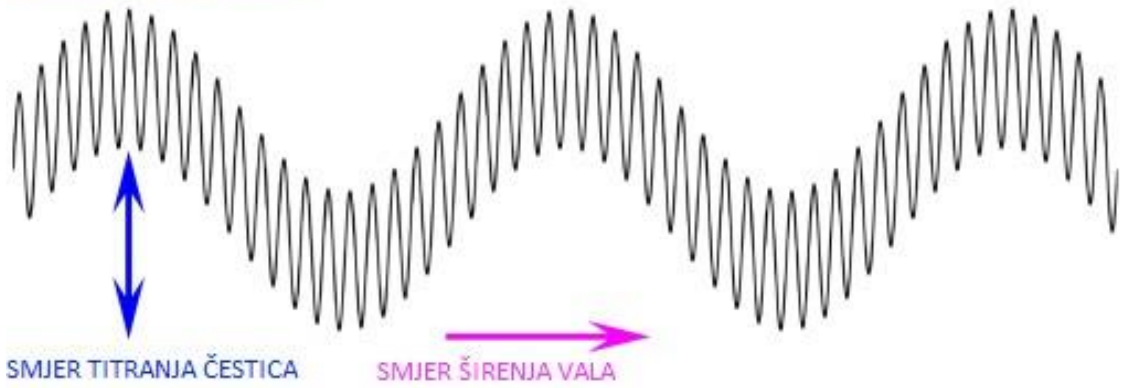
$l = v_R / v_T$ – omjer brzina širenja Rayleighovih i transverzalnih valova

Pri tome se uzima u obzir da je beton elastičan, izotropan i homogen medij, dovoljne debljine, te da izvori valova djeluju kao točkasti izvori. [7]

Brzina širenja Rayleighovog vala (v_R) može se odrediti pomoću Bergmanove aproksimacije:

$$v_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} v_T \quad [5]$$

TRANSVERZALNI VAL



LONGITUDINALNI VAL



Slika 8. Shematski prikaz transverznog i longitudinalnog vala [11]

2.3. Povijesni prikaz razvoja ultrazvučne metode

Ključan doprinos korištenju akustičnih metoda dao je Lord Rayleigh u svom radu „*The Theory of Sound*“ iz 1877. godine, gdje je objasnio ponašanje akustičnih valova u različitim medijima i na taj način postavio temelje za daljnja istraživanja u području ultrazvuka. Također, otkrića braće Curie (1880.) i Lippmanna (1881.) vezana uz piezoelektrične efekte omogućila su razvoj uređaja za generiranje i primanje ultrazvučnih valova, ključnih za daljnju primjenu u industriji.

Drugi svjetski rat ubrzao je istraživanja primjene ultrazvuka u betonu, osobito u kontekstu nerazornih metoda ispitivanja. Razvijena je metoda mjerenja dinamičkog modula elastičnosti betona pomoću dva prijamnika i mjerenja vremena prolaska zvučnih valova kroz beton. Kasnih 1940-ih istraživači u Engleskoj i Kanadi su razvili ultrazvučne ispitivače za ocjenu kvalitete betona.

Godine 1967. metoda ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa je postala službena ispitna metoda u Sjedinjenim Američkim Državama odobrena od strane Američkog udruženja za ispitivanje i materijale (ASTM).

U Europi je 1969. godine Međunarodna unija ispitnih i istraživačkih laboratorija za materijale i konstrukcije (RILEM) objavila smjernice za ispitivanje betona ultrazvučnom metodom.

Tijekom 1970-ih i 1980-ih, razvijeni su prijenosni uređaji poput PUNDIT-a (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) koji su omogućili jednostavnije ispitivanje betona na terenu. S razvojem digitalne elektronike i računalnih tehnologija, ultrazvučne metode postale su preciznije i učinkovitije.

Danas se ultrazvučne metode koriste za praćenje stanja betonskih konstrukcija tijekom njihovog uporabnog vijeka smanjujući rizik od oštećenja i nesreća kao što je urušavanje zgrada ili infrastrukturnih objekata. Uvođenje automatiziranih sustava za praćenje stanja betona također je poboljšalo sigurnost i učinkovitost pregleda omogućujući pravovremeno otkrivanje potencijalnih problema i smanjenje troškova održavanja kao i kontinuirano praćenje kvalitete betonskih objekata tijekom cijelog njihovog životnog vijeka. [12]

2.4. Metoda određivanja brzine ultrazvučnog impulsa

Kako je u eksperimentalnom dijelu Diplomskog rada korištena metoda ispitivanja ultrazvukom u ovom poglavlju detaljnije će se razmatrati način mjerenja i obrade rezultata navedene metode.

Metoda određivanja brzine ultrazvučnog impulsa temelji se na određivanju karakteristika uzdužnog širenja ultrazvučnog impulsa kroz materijal. [13]

Prema normi *EN 12504-4, Ispitivanje betona – 4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa*, mjerenje brzine impulsa može se koristiti za:

- određivanje ujednačenosti betona,
- prisustva pukotina ili šupljina,
- promjena svojstava tijekom vremena,
- određivanju dinamičkih fizikalnih svojstava,
- procjenjivanje čvrstoće u betonskim elementima ili uzorcima na licu mjesta. [14].

Ispitivanje ultrazvukom koristi se uglavnom kod ispitivanja homogenih materijala kao što su beton i čelik, a u nekim slučajevima se pokazala uspješna primjena kod ispitivanja opeke. [15]

Metoda se pokazala pouzdanom za in situ ispitivanja konstrukcija, te se često primjenjuje zbog brzine i relativno povoljne cijene. [13]

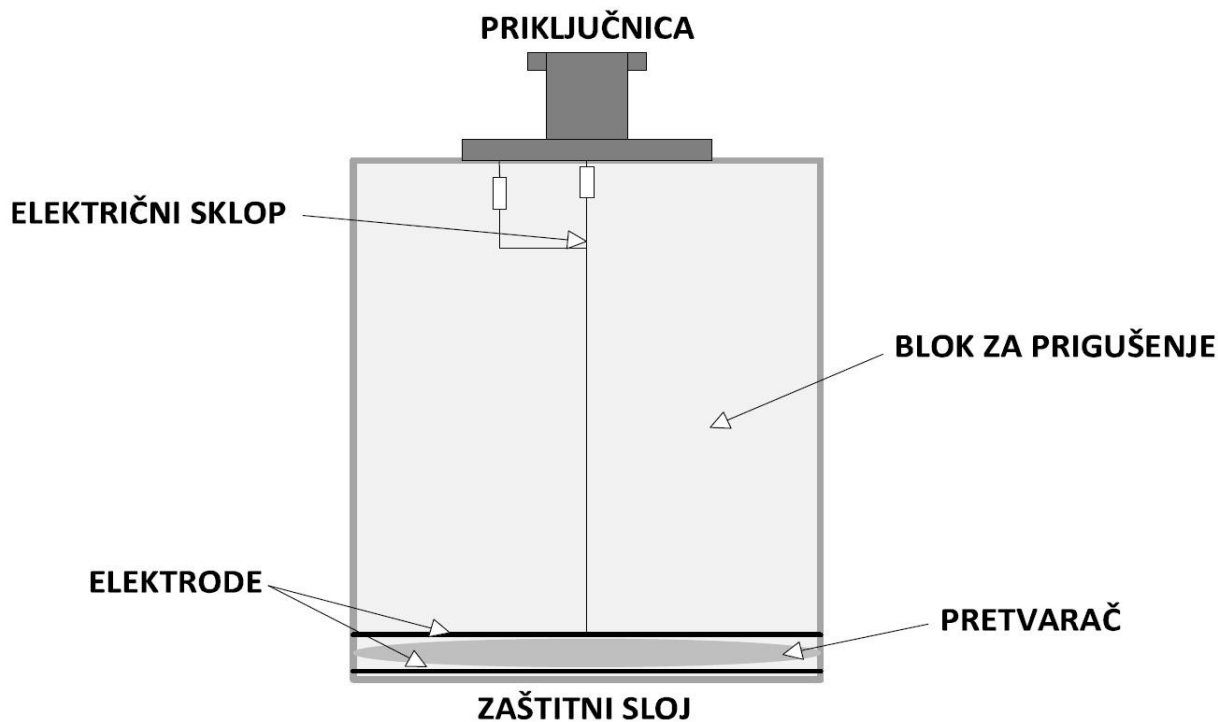
Metodu određivanja brzine ultrazvučnog impulsa je moguće koristiti i za specifične svrhe, kao što su otkrivanje prisutnosti grešaka u betoniranju ili štete uzrokovane požarom. Relativno niska cijena opreme potaknula je mnoge istraživače na traženje novih namjena za korištenje. Ova metoda omogućuje izvođenje više ispitivanja na istom mjestu. To je naročito korisno za kontinuirano praćenje stanja zgrada ili nekog drugog objekta kako bi bilo moguće predvidjeti potrebe za održavanjem i na taj način im produžiti uporabni vijek. [13]

Dio ultrazvuka koji generira udar zvuka naziva se sonda. Ona funkcionira tako što se u njoj nalazi dio koji titra, a zove se pretvarač.

Ultrazvuk se može generirati:

- Piezoelektričnim pretvaračem
- Magnetostriksijskim pretvaračem
- Mehaničkom pobudom
- Toplinskom pobudom
- Elektrostatski
- Elektrodinamički

U ovom radu je korištena sonda (slika 9.) s najčešćom vrstom pretvarača, a to je kvarcni piezoelektrični pretvarač. On funkcionira na način da se na pogodno odrezanom kvarcnom kristalu javlja električni napon kad se mehaničkim djelovanjem na njega stvara elastična deformacija. Važno je napomenuti kako isti piezoelektrik može biti i prijamnik i predajnik. Može se reći kako je piezoelektrik materijal koji pretvara električni impuls u mehaničko titranje. [6]



Slika 9. Poprečni presjek sonde

Uređaj funkcionira tako što se kroz sondu emitira kratkotrajni ultrazvučni impuls, te se mjeri vrijeme prolaska kroz materijal do prijarnika. Izmjerene vrijednosti je zatim potrebno protumačiti. (Tablice 1 i 2)

Tablica 1. Brzina širenja longitudinalnih ultrazvučnih valova kroz razne materijale [9]

| Materijal | Brzina širenja vala v (m/s) |
|-----------------|-------------------------------|
| Zrak | 330 m/s |
| Voda | 1450 m/s |
| Beton | 2000 do 4500 m/s |
| Čelik | 5850 m/s |
| Aluminij | 6300 m/s |
| Ljevano željezo | 4400 m/s |

Tablica 2. Ocjena kvalitete betona ovisno o brzini ultrazvuka [10]

| Brzina v (m/s) | Kvaliteta betona |
|------------------|--------------------|
| 4500 m/s | odličan beton |
| 3600 – 4500 m/s | vrlo dobar beton |
| 3000 – 3600 m/s | dobar beton |
| 2100 – 3000 m/s | općenito loš beton |
| do 2100 m/s | slab beton |

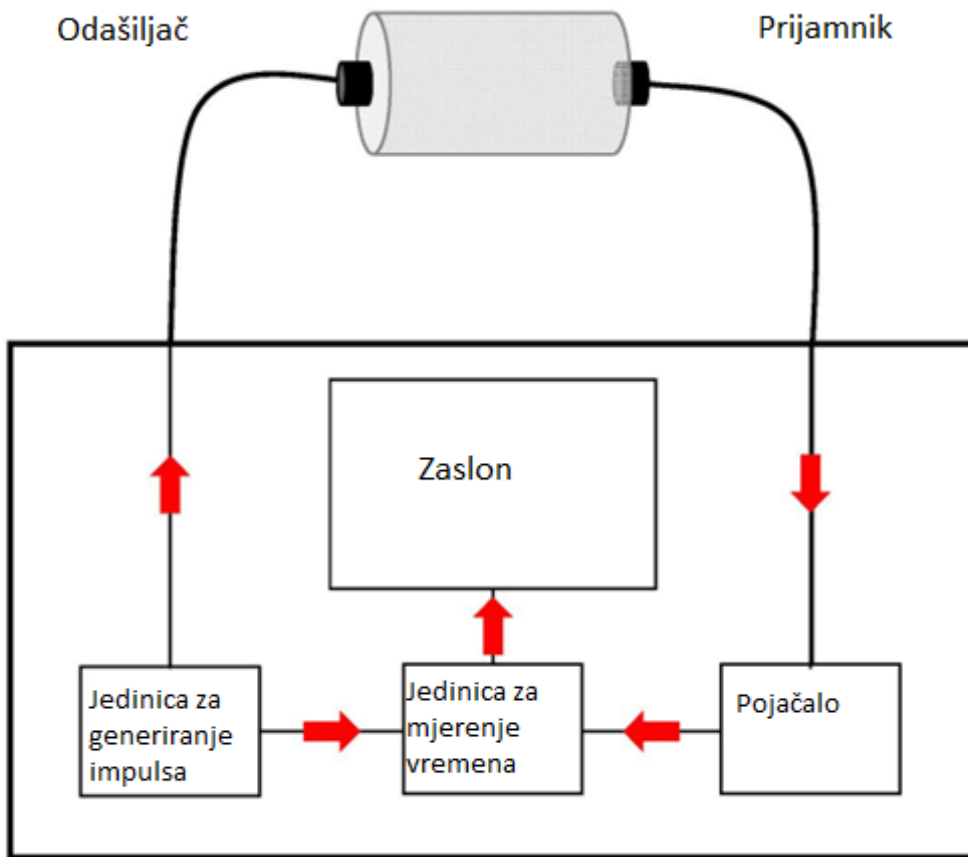
Kada signal dođe do diskontinuiteta (npr. pukotine na valnom putu ili granice materijala različitih impedancija) dio energije signala će se reflektirati natrag od površine diskontinuiteta. Reflektirani ultrazvučni signal pretvara se nazad u električni signal i takav se šalje na obradu signala i u uređaj za prikaz odaziva (slika 10.). [14]

Kod ultrazvučnih ispitivanja betona dužina vala je uvjetovana maksimalnim promjerom zrna ispune (agregata) i mora biti veća od maksimalnog promjera zrna Tako se na slici vala na osciloskopu izbjegavaju nepravilnosti zbog heterogenog sastava betona. Za ispitivanje betona primjenjuje se ultrazvuk sa frekvencijom u području od 50 do 120 kHz, dok se za ispitivanje metala primjenjuje ultrazvuk sa znatno višom frekvencijom od 0,5 do 15 MHz [9]

Mora postojati prikladan akustični kontakt između betona i svakog pretvarača. Kod većine betonskih površina, obrada je dovoljno glatka da osigura dobar akustični spoj između betona uz korištenje medija za spajanje kao što je litijeva mast, mazivo, mekani sapun i kaolinska/glicerolska pasta uz pritiskanje pretvarača na površinu betona.

Mjerenja vremena prolaska se ponavljaju sve dok se ne dobije minimalna vrijednost, koja indicira da je debljina medija za spajanje svedena na minimum.

Vrlo hrapava i neravna površina betona se mora izgladiti i izravnati brušenjem, ili upotrebom brzo vezujućeg epoksidnog ljepila. Za upotrebu na jako hrapavim površinama dostupni su posebni pretvarači. [14]



Slika 10. Shematski prikaz rada ultrazvučnog uređaja [16]



Slika 11. Moderni ultrazvučni uređaj [17]

Većina modernih prijenosnih uređaja (slika 11.) ima sposobnost samostalno izračunavati i prikazivati brzinu prolaska vala na zaslonu, temeljem izmjerenog vremena i unaprijed unesenog puta u korisničkom sučelju uređaja.

Stariji uređaji uglavnom bilježe samo vrijeme koje val prijeđe od odašiljača do prijarnika, te je brzinu potrebno izračunati ručno. Takav uređaj i postupak korišteni su u eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada.

2.4.1. Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Brzina ultrazvučnog impulsa se računa na osnovi jednostavne relacije:

$$v = \frac{l}{t}$$

gdje je:

l – razmak između predajnika i prijarnika (m)

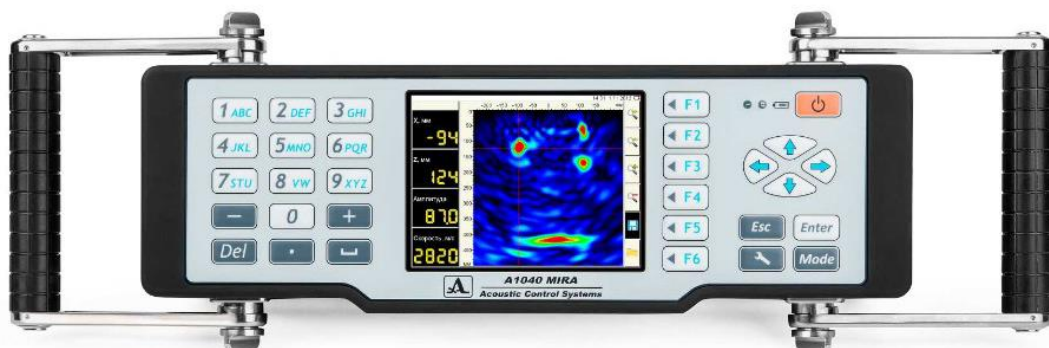
t – vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa (s)

[14]

2.5. Ultrazvučna tomografija

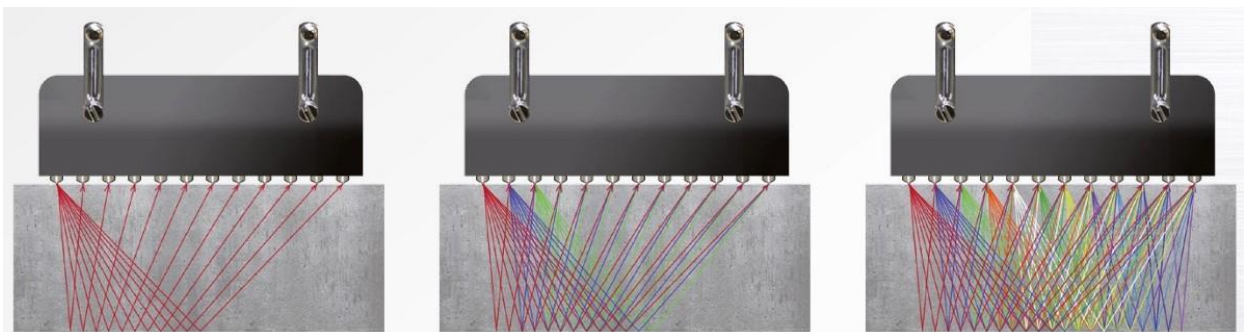
Ultrazvučna tomografija (UT) koristi se kao dodatak ultrazvučnoj metodi za poboljšanu kontrolu kvalitete koja pomaže u donošenju odluka o sanaciji. Otkrivanje nedostataka pomoću ultrazvučne tomografije zahtijeva stručnost ispitivača. Namijenjena je za kontrolu betonskih konstrukcija, ferobetona i kamena s jednostranim pristupom radi utvrđivanja cjelovitosti materijala u konstrukciji, traženja stranih umetaka, šupljina, neinjektiranih površina, ljuštenja i pukotina, te mjerenja debljine objekta. Moguće je kontrolirati debljine do 2 metra. Ultrazvučni tomograf koristi posmične valove, a sustav je sposoban generirati 3D tomografske slike betonskih elemenata, što omogućuje otkrivanje nedostataka na betonskim konstrukcijama.

Ultrazvučni tomografski uređaj sadrži 40 „touch and go“ odašiljačkih i prijarnih sonde. Sonde su čvrsto učvršćene u nizu s 10 kanala od 4 sonde što rezultira otvorom za skeniranje od 400 mm x 50 mm. Svaka od sondi može djelovati kao prijarnik ili odašiljač sa zadanom radnom ultrazvučnom frekvencijom od 55 kHz.(slika 12.)

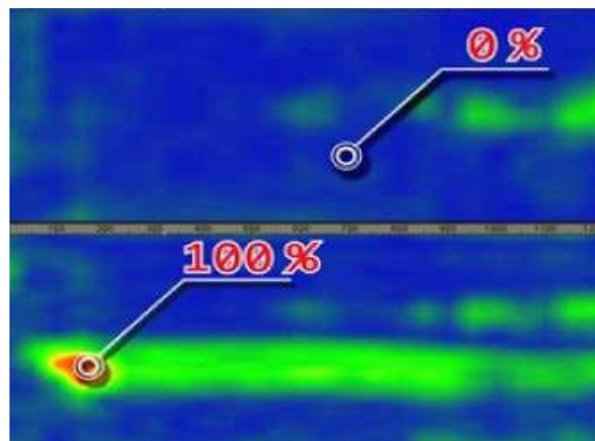


Slika 12. Uređaj za ultrazvučnu tomografiju A1040 – MIRA [18]

Uređaj mjeri vrijeme širenja signala između pretvarača na fiksnim udaljenostima za kalibraciju brzine materijala i koristi tehniku fokusiranja sintetičkog otvora za analizu u načinu skeniranja za rekonstrukciju medija ispod mjerenja na temelju refleksije posmičnih valova.. Primjenjiv za ispitivanje betona omogućava snimanje unutarnje strukture objekata od betona, armiranog betona, različitog kamena. Zahvat primjenjuje pulse echo tehniku pri jednostranom pristupu objektu. Instrument je primjenjiv za ispitivanje betona za traženje provodnih kanala, vodova, otkrivanje stranih tijela, rupa, saća, pukotina i drugih nedostataka unutar betonskih objekata i za procjenu stanja armature u betonu. Zbog obrade tomografskih podataka dobiva se detaljnija slika strukture elementa. Slika 13 prikazuje rad uređaja, a slika 14 rezultate ultrazvučne tomografije, prikazujući zone detekcije s 0% šupljina (plavo) i 100% šupljina (crveno). Ostale boje rezultat su interpolacije između dviju krajnosti i učinaka refleksije valova koje emitira uređaj. [13]



Slika 13. Shematski prikaz ispitivanja [19]



Slika 14. Interpretacija rezultata uređaja [13]

2.6. Ostale nerazorne metode ispitivanja

2.6.1. Metoda udara i odjeka

Najjednostavniji način primjene metode udara i odjeka uključuje udaranje čekićem po betonskoj površini, čime se detektiraju unutarnje pukotine i delaminacije prepoznatljivim šupljim zvukom. Po istom principu može se vući i lanac po površini betona kako bi se pratile promjene u zvuku. Ova metoda najčešće se koristi na kolnicima. Danas su razvijene preciznije instrumentalne metode koje omogućuju otkrivanje početnih oštećenja. Oprema za ispitivanje ovom metodom se sastoji od

- mehaničkog udarača ili piezoelektričnog uređaja koji generira multifrekvencijski akustični impuls,
- širokopojsnog piezoelektričnog pretvornika koji detektira reflektiranu energiju od unutarnjih pukotina i
- digitalne jedinice za prikupljanje i spektralnu analizu podataka.

Fourierova transformacija koristi se za pretvaranje prikupljenih podataka iz vremenske u frekvencijsku domenu. Različite vrste defekata imaju specifične spektralne "potpise" koji omogućuju identifikaciju pukotina i odlamanja u betonu. Kada se impuls primijeni na površinu konstrukcije, dolazi do višestrukih refleksija elastičnih valova između gornje i donje površine, što rezultira odzivnim signalom stalnog perioda T . U betonu s oštećenjima, valni oblik postaje složen i teže ga je interpretirati. Fourierovom transformacijom signala, odzivni spektar se znatno pojednostavljuje, što olakšava analizu rezultata mjerenja.

Na slici 15 se vidi da u frekvencijskom spektru jedna frekvencija ima oštri maksimum na osnovi kojeg se može izračunati debljina konstrukcijskog elementa (npr. ploče mosta) prema relaciji:

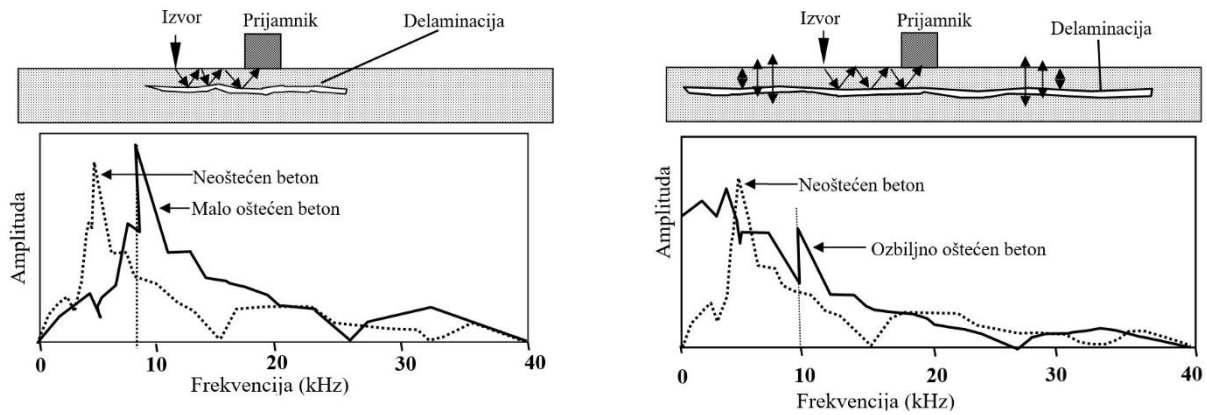
$$D = \frac{v_L}{2f_T}$$

gdje je:

f_T – frekvencija kod koje se pojavio maksimum

v_L – brzina širenja longitudinalnog vala

D – debljina ploče



Slika 15. Odziv signala u frekvencijskoj bazi za različite stupnjeve oštećenja betona [7]

Na slici 15 se također može uočiti da u slučaju neoštećenog i slabo oštećenog betona dominira jedan maksimum, dok se kod jako oštećenog betona pojavljuje više maksimuma zbog refleksija na delaminacijama. Primjenom formule na ostale frekvencije koje imaju maksimume može se odrediti dubina delaminacija. [7]

2.6.2. Spektralna analiza površinskih valova (SASW)

Metoda spektralne analize površinskih valova (SASW) koristi se za ispitivanje elastičnih svojstava i slojevitosti konstrukcija. Ova metoda temelji se na fenomenu disperzije površinskih (Rayleighovih) valova, što znači da valovi različitih frekvencija prodiru na različite dubine. Ako se elastična svojstva materijala mijenjaju s dubinom, brzina širenja Rayleighovih valova također varira. Tako je moguće odrediti elastična svojstva duž dubine materijala. Ova metoda se primjenjuje tako što se na površinu materijala izvrši udarac koji generira površinski valni impuls širokog frekvencijskog spektra. Dva prijemnika, postavljena na površinu betona, detektiraju ove valove. Fourierova transformacija tada pretvara signal iz vremenske u frekvencijsku domenu, a za svaku frekvenciju određuje se fazna razlika između signala koje detektiraju dva prijemnika. Ovi podaci služe za računanje frekvencijske ovisnosti brzine impulsa (disperzijske karakteristike) prema jednadžbi:

$$v(f) = \frac{2\pi Rf}{\Phi(f)}$$

gdje je:

$\Phi(f)$ – fazna razlika dvaju signala

R – razmak između prijemnika

$v(f)$ – brzina širenja vala

f – frekvencija

Na osnovi ovako dobivene disperzijske krivulje provodi se numerički iterativni proračun da bi se odredila brzina promjene brzine posmičnih valova (v_s) s dubinom. Posmični modul i dinamički Youngov modul elastičnosti mogu se odrediti iz:

$$G = \rho v_s^2 \quad E = 2G(1 + \nu)$$

gdje je:

G – posmični modul elastičnosti

E – dinamički Youngov modul elastičnosti

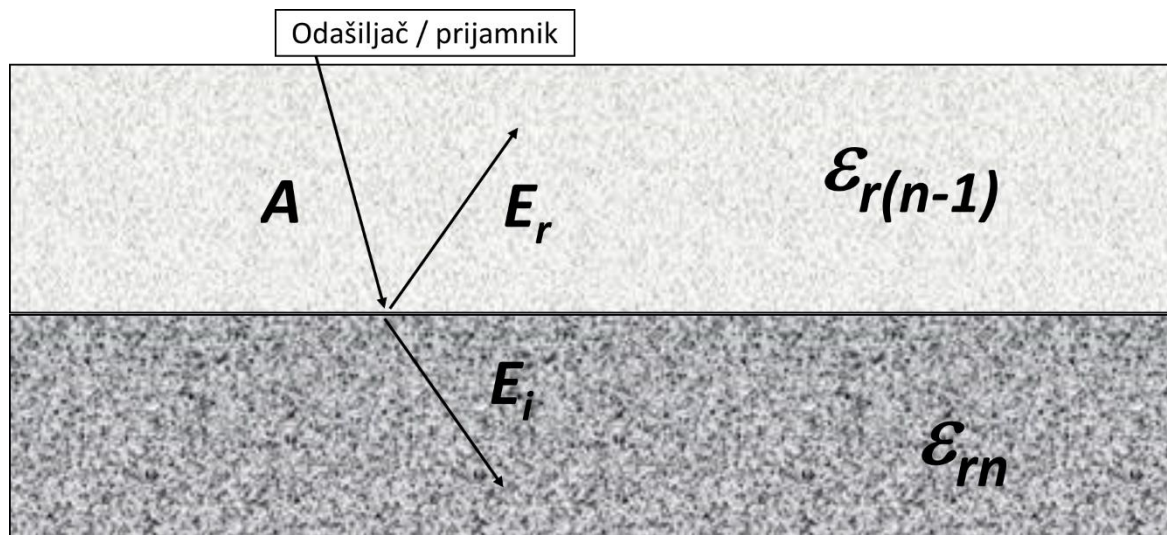
ρ - gustoća betona

v_s – brzina širenja posmičnih valova

Ovo je pojednostavljeni opis rada SASW metode. Stvarni numerički proračuni koji se koriste u računalnim programima prilikom analize rezultata mjerenja su sofisticiraniji. [7]

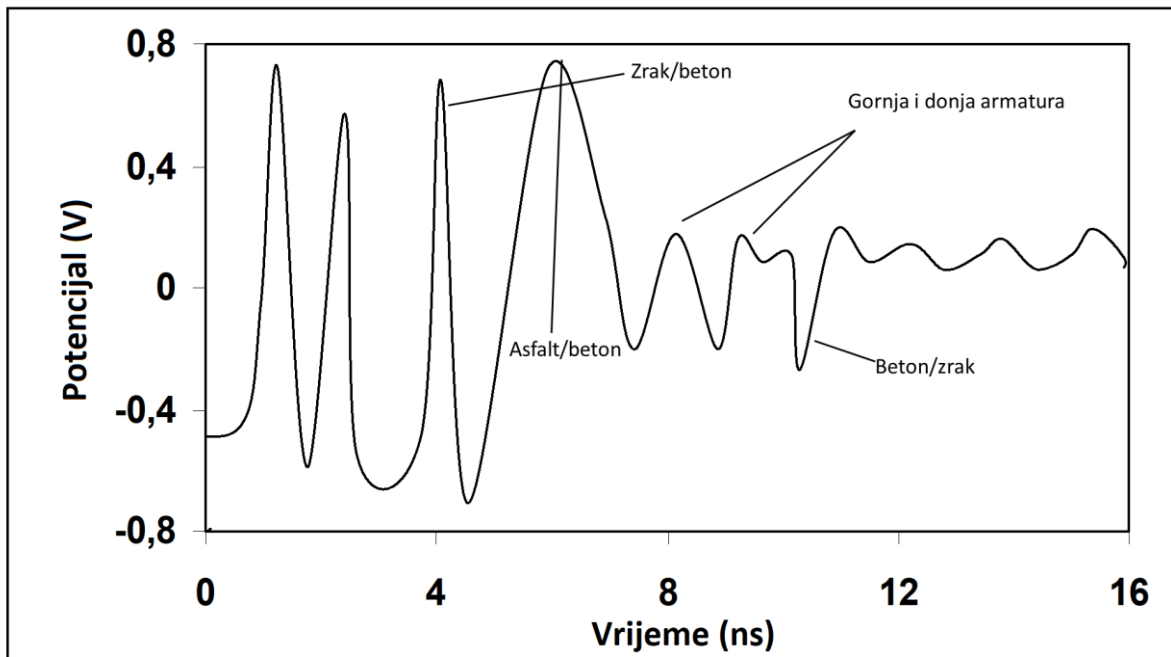
2.6.3. Radar

Metoda radara funkcioniše na principu odašiljanja impulsa elektromagnetskih valova u mikrovalnom području kroz istraživani betonski element. Impuls mikrovalnog zračenja šalje odašiljač, koji se u materijalu prilikom nailaska na svaku promjenu materijala ili diskontinuitet djelomično propušta, a djelomično reflektira (slika 16.). Reflektirano zračenje se vraća natrag do prijemnika.



Slika 16. Refleksija i transmisija u slojevima različitog materijala [7]

Slika 17 prikazuje tipični valni oblik zračenja reflektiranog u ploči mosta, gdje se mogu vidjeti refleksije zbog prisustva slojeva različitih materijala.



Slika 17. Tipični valni oblik reflektiranog zračenja za ploču mosta [7]

Jednadžba koja opisuje refleksije na tipičnoj slojevitoj konstrukciji je:

$$r(t) = \rho_A \cdot s(t) + \rho_C (1 - \rho_A^2) \cdot s(t - 2T_a) + \rho_R (1 - \rho_C^2) (1 - \rho_A^2) \cdot s(t - 2T_a - 2T_C)$$

gdje je:

$s(t)$ - transmitirani signal

ρ_A - koeficijent refleksije između zraka i asfalta

ρ_C - koeficijent refleksije između asfalta i betona

T_A - vrijeme kašnjenja signala koji se širi od površine asfalta prema površini betona

T_C - vrijeme kašnjenja signala koji se širi od površine betona prema sloju armature

Koeficijent refleksije je povezan s relativnom dielektričnom konstantom za svaki sloj u konstrukciji relacijom:

$$\varepsilon_r = \left[\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right]^2$$

gdje je:

ϵ_r - relativna dielektrična konstanta materijala

ρ - koeficijent refleksije

Debljina pojedinog sloja materijala se može izračunati iz:

$$T = \frac{2D\sqrt{\epsilon_r}}{c}$$

gdje je:

T - vrijeme kašnjenja reflektiranog signala u odnosu na emitirani signal

D - debljina materijala

c - brzina svjetlosti

Osim za mjerenje geometrijskih karakteristika, metoda radara koristi se i za otkrivanje oštećenja u konstrukcijama. Ova tehnologija je učinkovita u prepoznavanju šupljina, područja s visokim sadržajem vlage i delaminacija. Kada se u konstrukciji pojave delaminacije, nastali procjep ispunjen je vodom ili zrakom, što uzrokuje značajniju refleksiju mikrovalnog zračenja u usporedbi s refleksijom na sučelju beton - čelik. Na mjestu delaminacije, val nailazi na dva sučelja - prvo prilikom ulaska u procjep, a zatim prilikom izlaska, što kod manjih procjepa uzrokuje preklapanje refleksija, smanjujući amplitudu refleksije i otežavajući detekciju. Kako bi se povećala pouzdanost detekcije defekata, razvijen je radar s dvostrukom frekvencijom (300 MHz i 1 GHz). Istraživanja su pokazala da antene s različitim frekvencijama reagiraju na različite tipove i veličine oštećenja, što omogućuje širu identifikaciju oštećenja.

Nedavno je razvijen prototip mobilnog radarskog sustava koji omogućava slikovnu rekonstrukciju defekata u betonu. Ovaj sustav, ugrađen u specijalizirano vozilo koje se kreće po površini mosta, pruža slike visoke kvalitete koje omogućuju vizualizaciju unutarnje strukture materijala. Podaci prikupljeni s više antena pohranjuju se u veliku memoriju, a brzi procesori koriste poseban algoritam za rekonstrukciju slike konstrukcije. Najnoviji eksperimenti pokazali su učinkovitost u detekciji tankih delaminacija u betonu. [7]

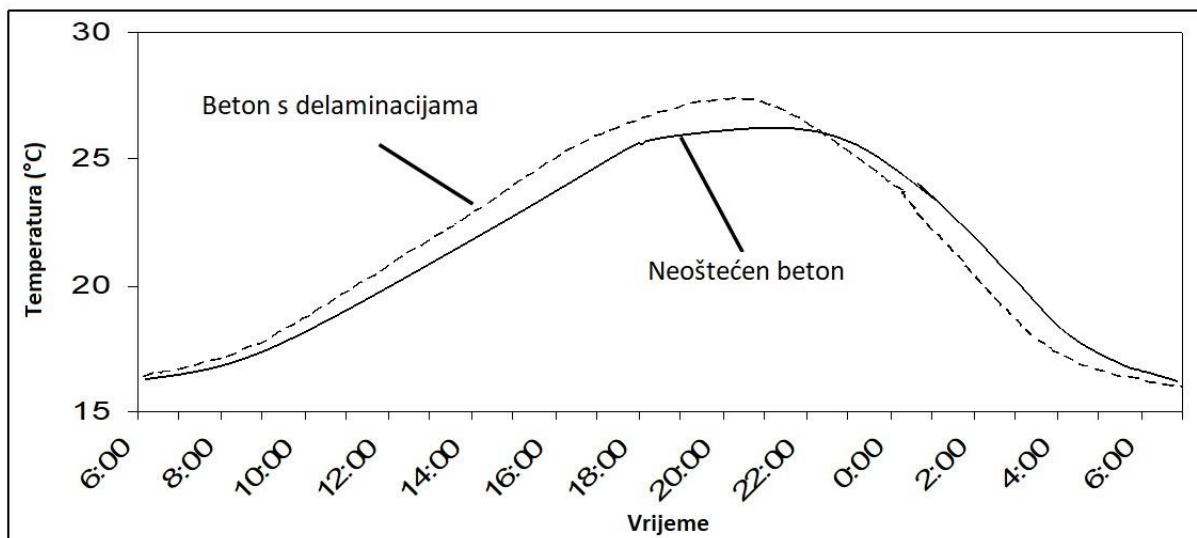
2.6.4. Infracrvena termografija

Metoda infracrvene termografije temelji se na principu promjene toplinskog toka kod prisutnosti anomalija u materijalu što utječe na površinsku temperaturu materijala.

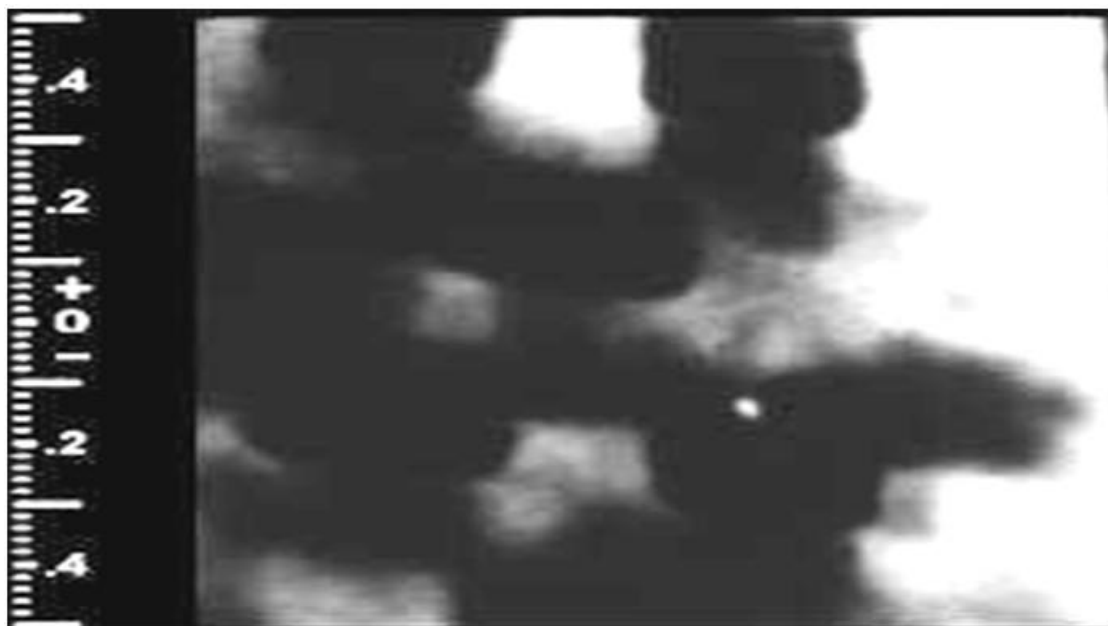
Glavne komponente mjernog sustava uključuju:

- infracrvenu kameru,
- sustav za prikupljanje podataka i
- jedinicu za snimanje podataka.

Ova metoda posebno se preporučuje za otkrivanje oštećenja na velikim betonskim konstrukcijama poput ploča mostova. Delaminacije i šupljine obično su ispunjene vodom, što rezultira različitim toplinskom vodljivošću i specifičnim toplinskim kapacitetom u odnosu na okolni beton. Tijekom dnevnog ciklusa zagrijavanja i hlađenja, uzrokovanog sunčevim zračenjem i promjenama temperature zraka, površinska temperatura betona se mijenja. Zagrijavanje i hlađenje područja s anomalijama razlikuje se od neoštećenog betona (slika 18). Na slici 19 prikazan je tipičan termogram koji prikazuje područja s delaminacijama.



Slika 18. Brzina zagrijavanja i hlađenja za oštećeni i neoštećeni beton [7]



Slika 19. Termogram područja s delaminacijama [7]

Glavne prednosti ove metode uključuju mogućnost brzog snimanja velikih površina, beskontaktno provođenje ispitivanja, te relativno nisku cijenu opreme. Međutim, nedostatak metode je u tome što ne omogućuje precizno određivanje dubine oštećenja. [7]

2.6.5. Akustička emisija

Akustička emisija predstavlja naponske valove generirane naglim promjenama naprezanja u materijalima, uzrokovanim promjenama u njihovoj unutarnjoj strukturi. Ove promjene mogu biti posljedica stvaranja ili rasta pukotina te delaminacija. Kad naprezanja premaše vlačnu čvrstoću betona, dolazi do njegovog pucanja, pri čemu se dio elastične energije pretvara u kinetičku energiju u obliku elastičnih valova. Ti se valovi šire prema površini betona, gdje ih je moguće detektirati piezoelektričnim sensorima. Dobiveni električni signali se filtriraju, pojačavaju i obrađuju. Metoda akustične emisije često se koristi za kvalitativno objašnjavanje oštećenja prikupljanjem velikog broja podataka, no u novije vrijeme sve se više primjenjuje i kvantitativna analiza AE signala. Razvojem senzora i računalne tehnologije omogućeno je brzo prikupljanje podataka i analiza AE valnih oblika za karakterizaciju izvora emisije. Prednost ove metode je što je dovoljan mali broj piezoelektričnih senzora za detekciju, a u sustav se ne unosi nikakav signal koji bi mogao utjecati na rezultate mjerenja. [7]

3. STUDIJA SLUČAJA MOSTA

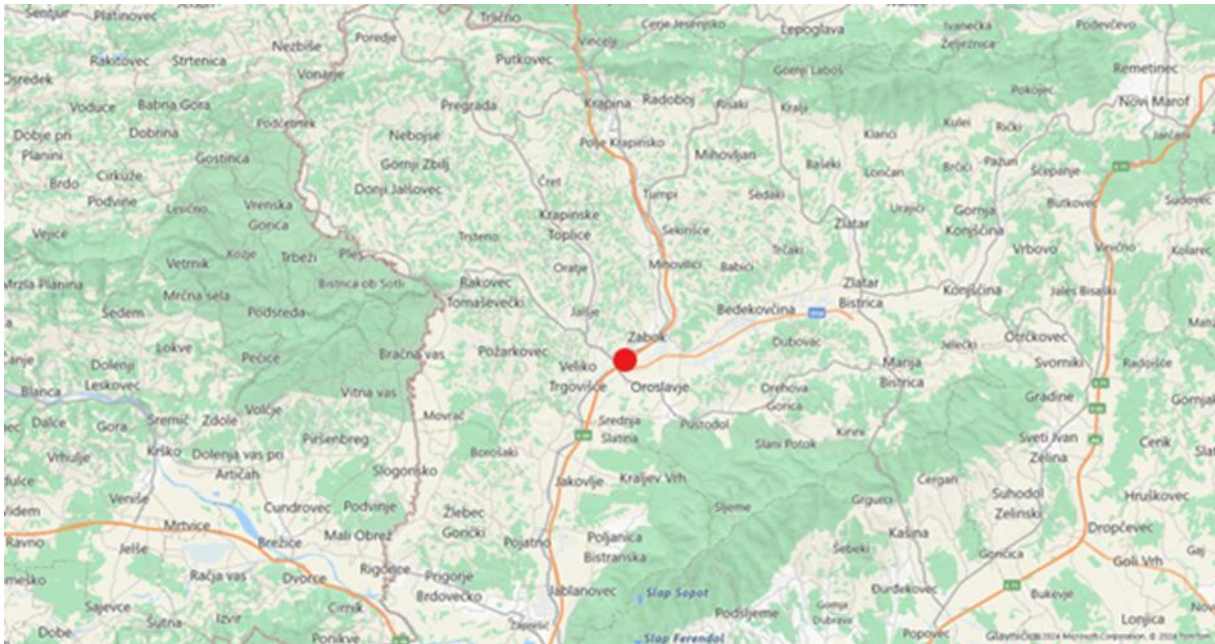
Prilikom projekta sanacije gornjeg i donjeg ustroja mosta na autocesti A2 Zagreb-Macelj, između svih ostalih radova izvedena je sanacija reprofilacijom površine stupa mosta. U svrhu utvrđivanja uspješnosti sanacije, prije i poslije izvođenja reprofilacije površine stupa ispitana je brzina prolaza ultrazvučnog vala kroz stup. Rezultati ispitivanja obrađeni su u 4. poglavlju.

U ovom poglavlju dan je tehnički opis mosta, opis istražnih radova i postupka sanacije na ispitivanom stupu mosta.



Slika 20. Pogled na most prije sanacije sa zapadne strane

Europski cestovni pravac E 59 proteže se u pravcu sjever – jug od Jihlave u Češkoj, preko Beča, Graza, Maribora, i Krapine prema Zagrebu, a dio tog pravca je autocesta A2 Zagreb – Macelj, dionica B, Zabok – Krapina na kojoj se predmetnim mostom u km 27+220 premošćuje rijeka Krapinica (slika 20.) . Most se sastoji od istočnog i zapadnog, po jednog za svaki smjer autoceste. U smjeru Zabok - Krapina promet se odvija istočnim, a u smjeru Krapina – Zabok zapadnim mostom. Mostovi nemaju službeni naziv.



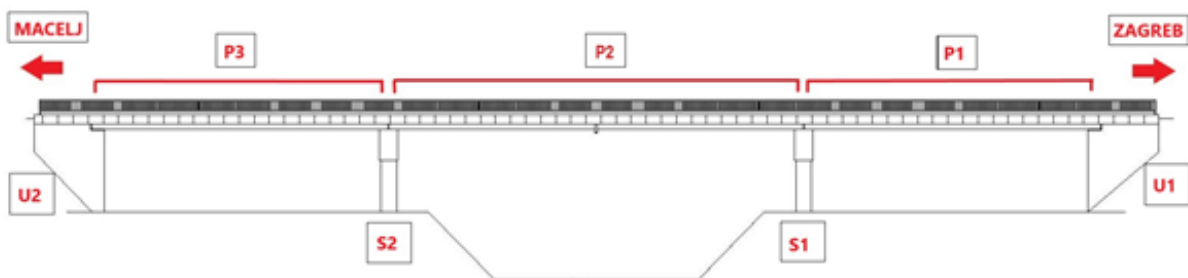
Slika 21. Prikaz lokacije mosta na karti [20]

Mostovi su pušteni u promet 1996. g. u sklopu izgradnje dionice Zabok – Krapina [21]. Tada je istočni most izgrađen u cijelosti dok je zapadni, postojeći most rekonstruiran tijekom izgradnje istočnog objekta. Tijekom te rekonstrukcije na zapadnom objektu potpuno je zamijenjena rasponska konstrukcija, a donji ustroj je obnovljen i dograđen [22].

Predmet ovog rada je zapadni most.

3.1. Tehnički opis mosta

Niveleta mosta vertikalno je u blagoj konveksnoj krivini s tjemenom u srednjem rasponu, dok je horizontalno u pravcu i rijeku premošćuje srednjim od ukupno tri raspona. Osi upornjaka i stupišta su zakošeni pod kutem od $24,7^\circ$ u odnosu na os autoceste, a prema geodetskoj izmjeri osni razmak upornjaka i stupišta iznosi $19,26 + 27,51 + 19,26$ m. [22] Ukupna duljina objekta sa upornjacima prema geodetskoj izmjeri iznosi 75,1 m, a širina iznosi 14,45 m. Širina kolnika s dva prometna i jednim zaustavnim trakom iznosi 10,7 m, a obostrano smješteni hodnici 1,85 m. Poprečni pad je jednostrani i iznosi 2,5 % na zapadnu stranu objekta.



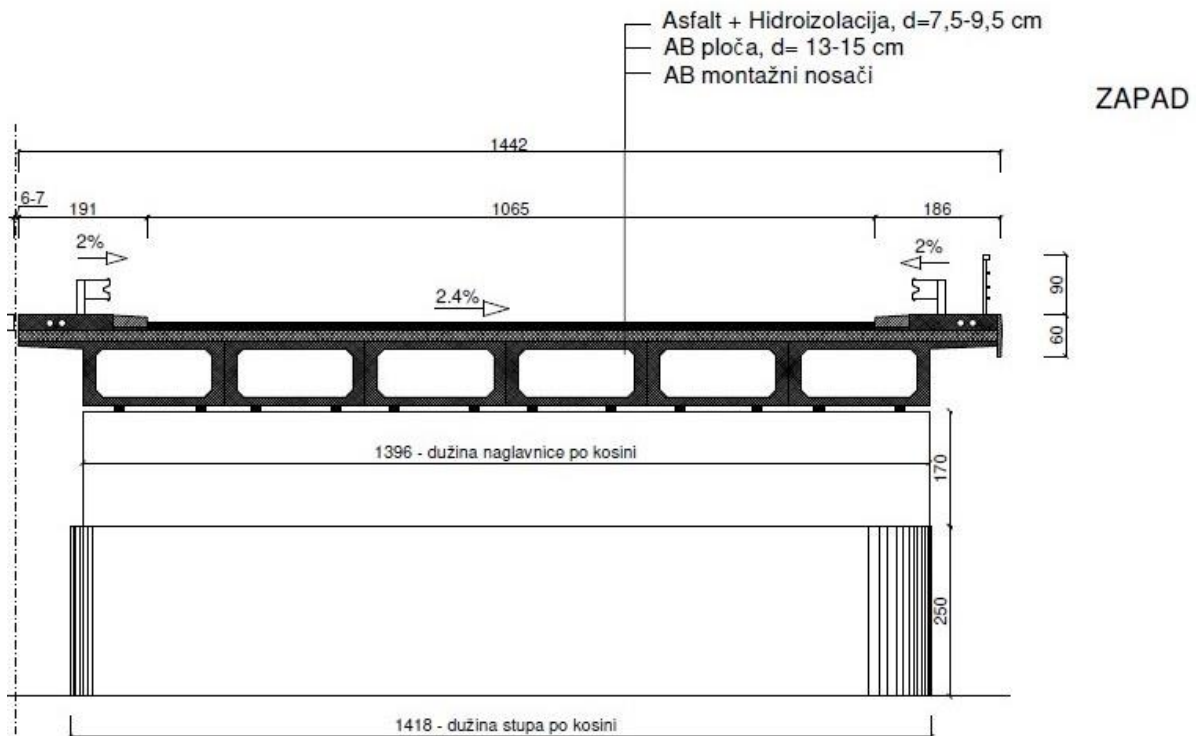
Slika 22. Pogled na zapadnu stranu objekta [22]

Donji ustroj mosta sastoji se od upornjaka U1 i U2 te stupišta S1 i S2. Upornjaci i stupovi su monolitni armirano betonski zidovi, izvedeni na licu mjesta, a temeljenje je plošno [22]. Stupišta S1 i S2 s naglavnim gredama i čeonim zidovima upornjaka su širine 14,18 m. Upornjaci i stupišta mosta su dograđeni u smjeru zapada i na njima su izvedene nove naglavne grede i povišeni su radi uklapanja u novu niveletu objekta. Na upornjacima je na prelazu s nasipa na most izvedena prijelazna ploča duljine 3,4 m. Na naglavnim gredama stupova kao i na čeonim zidovima upornjaka izvedeni su armiranobetonski „jastuci“ s elastomernim ležajevima kao osloncima za rasponsku konstrukciju.



Slika 23. Podgled mosta u rasponu P2

Rasponska konstrukcija na oba objekta je istog tipa i sastoji se od tri polja. U svakom polju nalazi se po 6 glavnih nosača. Svaki glavni nosač oslanja se na svakoj naglavnici i na upornjacima na po dva elastomerna ležaja. Glavni nosači su sanduci poprečnih dimenzija 115/210, predgotovljeni adhezijski prednapeti montažni armiranobetonski elementi približnih dimenzija poprečnog presjeka 115 x 210 cm.



Slika 24. Poprečni presjek rasponske konstrukcije [22]

Povrh glavnih nosača, radi njihova sprežanja, izvedena je monolitna tlačna ploča, a nad stupištima su radi povezivanja polja glavni nosači povezani kontinuitetnim pločama (slika 24). Na tlačnoj ploči su sa svake strane izvedeni monolitni armiranobetonski pješački hodnici s poprečnim padom 2 % prema kolniku. Vijenci su na zapadnom hodniku visine 60 cm od predgotovljenih AB elemenata, dok na istočnom hodniku vijenac nije izveden. Rubnjaci kolnika izvedeni su od tipskih predgotovljenih rubnjaka širine i dužine 50 cm. Na reškama dilatacija na oba upornjaka izvedene su bešavne prijelazne naprave tipa Thorma Joint.

Oborinska odvodnja osigurana je poprečnim i uzdužnim padom kolnika te prihvatom vode u 3 slivnika na zapadnoj strani objekta i jedan površinski ispust niz pokos nasipa na sjevernoj strani objekta. Slivnici imaju slobodan ispust pod most a otvoreni ispust niz pokos nasipa.

Na pješačkim hodnicima je završni sloj izveden od lijevanog asfalta približne debljine 3 cm. Na hodnicima je postavljena čelična odbojna ograda tipa JDOO te desno čelična ograda za pješake, dok s lijeve strane nije postavljena pješačka ograda jer su objekti međusobno udaljeni svega 6 do 7 cm. [22]

3.2. Prethodna ispitivanja za potrebe projekta sanacije

Istražni radovi provedeni su s ciljem procjene stanja korištenih materijala i utvrđivanja položaja te opsega oštećenja na konstruktivnim elementima mosta. Vrsta i količina potrebnih ispitivanja definirana je projektnim zadatkom, dok su mjesta ispitivanja odabrana na terenu, uzimajući u

obzir rezultate vizualnih pregleda i potrebu za dobivanjem relevantnih informacija o stanju pojedinih konstruktivnih elemenata, kao i same konstrukcije mosta. [23]

Vizualnim pregledom ustanovljeno je da je beton stupišta općenito u dobrom stanju, osim manjih površinskih oštećenja na nekim mjestima. Zidovi su izgrađeni tako da su stupovi starog mosta jednostrano prošireni prema zapadu, a na njima su postavljene nove naglavne grede pune širine. Stupovi i naglavne grede su u relativno dobrom stanju, iako su prisutna lokalna oštećenja, poput ljuštenja betona uzrokovanog vlagom, korozije armature i mrlja oko vertikalnih pukotina. Najveća oštećenja zabilježena su na naglavnicama u zonama ispusta kolničkih slivnika. [22]

Na konstrukciji mosta izvršena su sljedeća ispitivanja:

- Vizualni pregled objekta,
- Prekucavanje površina konstruktivnih elemenata građevine čekićem,
- Bušenje valjaka promjera $\phi 100$ mm dijamantnom bušilicom, prema normi HRN EN 12504-1, piljenje, brušenje i priprema uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće betona prema normi HRN EN 12390-3,
- Ispitivanje karbonatizacije betona prskanjem 1%-tnom otopinom phenolphthaleina prema normi HRN EN 14630,
- Ispitivanje vlačne čvrstoće postojećeg betona pull-off metodom prema normi HRN EN 1542,
- Nerazorno ispitivanje indeksa odskoka sklerometra, prema normi HRN EN 12504-2, u svrhu utvrđivanja ujednačenosti kvalitete betona,
- Određivanje koncentracije kloridnih iona u betonskom prahu prema RCT-metodi s izradom profila klorida svakih 1 cm do minimalne dubine,
- Određivanje duljine i površinske širine nastalih pukotina,
- Analiza i obrada dobivenih rezultata ispitivanja.

3.2.1. Vizualni pregled

Vizualnim pregledom ispitivanog stupišta S1 s ciljem utvrđivanja vrste, položaja i opsega oštećenja, utvrđeni su tragovi vlaženja i ljuštenja u zoni slivnika, postojanje vidljivih pukotina na zidu stupišta širine 0,3 mm i na naglavnoj gredi širine 0,5 mm. [23]

Također je utvrđeno postojanje lokalnih segregacija betona na površini što upućuje na potencijalno loša trajnosna svojstva betona.

Na temelju rezultata vizualnog pregleda donesena je odluka o daljnjem tijeku istražnih radova te su određene pozicije provedbe ispitivanja.

Zaključeno je da će se u neposrednoj blizini mjesta na kojemu je uočena jedna takva segregacija obavljati ultrazvučno ispitivanje koje je detaljno opisano u poglavlju 4 – Eksperimentalni dio istraživanja.



Slika 25. Pogled na stupište S1

3.2.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Ispitivanje tlačne čvrstoće betona provedeno je u ispitnom laboratoriju. Vađenje uzoraka betona provedeno je bušenjem valjaka promjera $\varnothing 100$ mm iz elemenata konstrukcije prema normi HRN EN 12504-1 (slika 26.). Bušenje je provedeno bušilicom s dijamantnom krunom. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona provedeno je u skladu s normom HRN EN 12390-3. Uzorci su u laboratoriju piljenjem svedeni na ispitne uzorke nazivnih dimenzija $\varnothing 100/100$ mm. Prije ispitivanja uzorci su čuvani 24 sata u normiranim uvjetima na $(20\pm 2)^\circ\text{C}$. Rezultati tlačnih čvrstoća betona dobiveni su izračunom sile loma po površini valjka.

Na stupištu S1 izvađen je valjak iz zida stupišta koji je usmjeren prema upornjaku U1. Rezultat ispitivanja tlačne čvrstoće na tom valjku iznosi 24,7 MPa. Također je na istom stupištu izvađen jedan valjak iz naglavne grede čija čvrstoća iznosi 23,5 MPa. [23]



Slika 26. Bušenje uzorka betona iz konstrukcije

3.2.3. Ispitivanje vlačne čvrstoće betona pull-off metodom

Ispitivanje vlačne čvrstoće betona pull-off metodom (slika 27.) provedeno je, prema normi HRN EN 1542. Ispitno mjesto pripremljeno je površinskim brušenjem i zarezivanjem betona s dijamantnom krunom promjera $\varnothing 50$ mm. Rezultati ispitivanja predstavljaju površinsku vlačnu čvrstoću prionjivosti betona.

Na stupištu S1 provedeno je ispitivanje pull-off metodom. Ispitivanje je provedeno na površini zida stupišta koja gleda na upornjak U1. Rezultat ispitivanja iznosi 1,1 MPa [23]



Slika 27. Primjer ispitivanja vlačne čvrstoće pull-off metodom

3.2.4. Ispitivanje indeksa odskoka sklerometra

Sklerometrom se provode nerazorna ispitivanja čvrstoće površinskog sloja betona i određivanje homogenosti čvrstoće površinskog sloja betonske konstrukcije. Za ispitivanje je korišten uređaj „Tecnotest“, istoimenog proizvođača, model AT 241/E (slika 28.). Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN 12504-2.

Na stupištu S1 provedeno je ispitivanje sklerometrom na zidu stupišta i na naglavnoj gredi, na površinama koje gledaju prema upornjaku U1.

Rezultati ispitivanja na zidu stupišta su:

- Minimalna vrijednost odskoka sklerometra: 36
- Maksimalna vrijednost odskoka sklerometra: 41
- Medijan indeksa sklerometra: 40

Rezultati ispitivanja na naglavnoj gredi su:

- Minimalna vrijednost odskoka sklerometra: 38
- Maksimalna vrijednost odskoka sklerometra: 41
- Medijan indeksa sklerometra: 40

[23]



Slika 28. Sklerometar Tecnotest AT241/E [24]

3.3. Opis postupka sanacije stupa

3.3.1. Propisana svojstva materijala korištenih za sanaciju stupa

3.3.1.1. Sanacijski mort za popravak betonskih elemenata

Za sanaciju oštećenih betonskih površina koristi se polimercementni sanacijski mort za reprofilaciju AB površina klase R4 ($f_c=45 \text{ N/mm}^2$), prema HRN EN 1504-3 [22]:

- Maksimalno zrno agregata (mm) $D_{\max} < 4 \text{ mm}$
- Tlačna čvrstoća nakon 28 dana (HRN EN 12190) klasa R4: 45 N/mm^2
- Prionjivost (HRN EN 1542) $\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$
- Termička kompatibilnost (smrzavanje-odmrzavanje), prionjivost nakon 50 ciklusa (HRN EN 13687-1) $\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$
- Modul elastičnosti (HRN EN 13412) $\geq 20 \text{ GPa}$. [22]

3.3.1.2. Sustav premaza za zaštitu betona

Sustav za zaštitu betonskih površina sastoji se od zaštitnog polimercementnog premaza i akrilne boje, oznake C prema normi HRN EN 1504-2:2001, točka 3, (Proizvodi i sustavi za zaštitu i popravak betonskih konstrukcija; dio 2: Proizvodi i sustavi za površinsku zaštitu).

Polimercementni premaz:

- Ukupna debljina sloja polimercementnog premaza $2,0 - 4,0 \text{ mm}$;
- Prionjivost (HRN EN 1542) $\geq 0,8$ (pojedinačno $0,5$) MPa;
- Termička kompatibilnost (smrzavanje-odmrzavanje)
 - Prionjivost nakon 50 ciklusa (HRN EN 13687-1) $\geq 0,8$ (pojedinačno $0,5$) MPa;
- Premoštenje pukotina (HRN EN 1062-7) do $1,0 \text{ mm}$;
- Otpor difuziji vodene pare $1,1 \text{ m}$;
- Otpor difuziji ugljičnog dioksida $> 500 \text{ m}$. [22]

3.3.1.3. Akrilna boja

- Otpornost na agresivne tvari iz atmosfere (CO_2 , SO_2 , soli, UV zrake);
- Koeficijent kapilarnog upijanja vode (HRN EN 1062-3) $< 0,1 \text{ kg/m}^2/\text{h}^{0,5}$. [22]

3.3.2. Reprofilacija oštećenih betonskih površina

Sanacija stupa izvršena je na način da se reprofilirao oštećeni postojeći beton stupa. Reprofiliranju je prethodilo hidrodinamičko uklanjanje betona.

3.3.2.1. Hidrodinamičko ukljanjanje betona

Svi oštećeni, karbonatizirani i dijelovi betona koji sadrže kloride uklonjeni su prije reprofilacije. Uklanjanje se provodilo hidrodinamičkim postupkom koristeći vodeni mlaz visokog pritiska (do 2500 bara). Hidrodinamički postupak (još se naziva i hidrodemoliranje) može se vršiti pomoću robota (slika 29.) ili visokotlačnom pumpom kojom se ručno upravlja. Ovaj način uklanjanja betona je precizan i ne stvara vibracije stoga ne utječe na ostale dijelove i ne oštećuje konstrukciju.

Pri određivanju dubine uklanjanja betona bilo je potrebno zadovoljiti slijedeće kriterije:

- sadržaj kloridnih iona $< 0,05\%$ na masu betona,
- prionjivost betona mjerena pull-off metodom prema HRN EN 1542 $\geq 1,5$ MPa,
- pH betona $> 9,5$,
- otvorenost strukture betona, tj. barem 50% vidljivih zrna agregata. [22]

Priprema podloge ključan je korak u reprofilaciji. Hidrodinamičkim postupkom uklanjanja oštećenog betona može se postići adekvatna hrapavost podloge čime se osigurava dobra prionjivost novog sloja. Podloga mora biti očišćena od nečistoća i zaštićena od daljnjeg onečišćenja prije nanošenja novog morta.



Slika 29. Robot za hidrodinamičko ukljanjanje betona

Nakon uklanjanja oštećenog betona potrebno je jednoliko očistiti armaturu u skladu sa zahtjevima koji su propisani u normi HRN EN 1504-10, odnosno potrebno je ukloniti koroziju, oljuštene dijelove i ostale nečistoće nakon čega se armatura treba zaštititi zaštitnim premazom. Postojeća armatura se mora vizualno pregledati, kako bi se utvrdio eventualni stupanj

oštećenosti armature. Čišćenje armature može se provesti pomoću mlaza vode prilikom hidrodinamičkog uklanjanja betona. Stupanj čistoće armature prema HRN EN ISO 8501-1 treba iznositi D Sa 2½. Otvorena ploha očišćene armature ne smije stajati otvorena više od 6 sati.

Ukoliko je promjer šipke armature mehaničkim oštećenjem ili korozijom smanjen 10% ili više i poprečni presjek šipke je po cijelom obodu, smanjen za 20% armaturu treba zamijeniti. [22]

3.3.2.2. Reprofilacija površina sanacijskim betonom ili mortom

Prije reprofiliacije površinu je potrebno je još jednom detaljno očistiti površinu vodom pod visokim tlakom (diznom s rotacijskom glavom i/ili miniwash-em) kako bi se uklonili svi nevezani ostaci i labava zrna. Po završetku čišćenja potrebno je ispuhati zaostalu vodu pomoću kompresora s površine koja se reprofilira. Očišćenu površinu potrebno je zaštititi od onečišćenja.

Reprofilaciju je najbolje provesti u što kraćem vremenu nakon čišćenja kako bi se osigurala zasićena površinski suha površina na koju će se ugraditi novi materijal.

Ukoliko sanacijski materijal zahtijeva nanošenje veznog sloja na površinu koja se reprofilira, reprofilaciju je potrebno provesti u vremenu sukladnom uputi proizvođača.

Reprofilacija polimercementnim mortom se izvodi strojno. Mort se ugrađuje na način da se mlaznica pumpe za mort drži okomito na površinu, na udaljenosti optimalnoj za ugradnju (slika 30.) a mlazna struja materijal optimalno zbija i ugrađuje na površinu. Ugrađeni mort na kraju se zaglađuje pomoću letve i gletera. [22]



Slika 30. Strojna ugradnja morta na čeonom zidu upornjaka

4. EKSPERIMENTALNI DIO ISTAŽIVANJA

Na donjem ustroju mosta na autocesti A2 Zagreb-Macelj izvršeno je eksperimentalno ispitivanje ultrazvučnom metodom.

Ispitivanje je provedeno u dvije faze:

1. mjerenje vremena prolaska ultrazvučnog vala kroz element prije sanacije i
2. mjerenje vremena prolaska ultrazvučnog vala kroz element poslije sanacije.

Temeljem rezultata mjerenja dobivene su brzine koje su prikazane 3D dijagramom.

4.1. Opis uređaja

Prijenosni ultrazvučni nerazorni digitalni indikacijski test (PUNDIT) sastoji se od dva pretvarača od kojih jedan služi kao odašiljač, a drugi kao prijemnik. Pretvarači se koriste za slanje i primanje frekvencije od 54 kHz. Za brzu kalibraciju uređaja neposredno prije korištenja, koristi se kalibracijska šipka kroz koju prolaze valovi u trajanju od 26 μ s. Na slici 31 je prikazan PUNDIT uređaj zajedno s dva pretvarača i kalibracijskom šipkom.



Slika 31. PUNDIT uređaj

Brzina vala se mjeri postavljanjem dva pretvarača, po jedan sa svake strane betonskog elementa. Zatim se tanki sloj masti nanosi na površinu sonde kako bi se osigurao učinkovit prijenos vala između betona i sonde. Vrijeme koje je valu potrebno da putuje očitava se s PUNDIT zaslona, a brzina vala može se izračunati na sljedeći način:

$$v = \frac{l}{t}$$

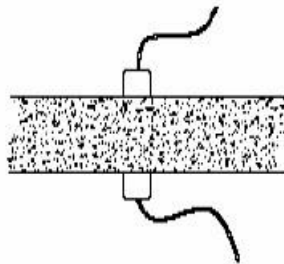
Gdje je:

v - Brzina vala, m/s.

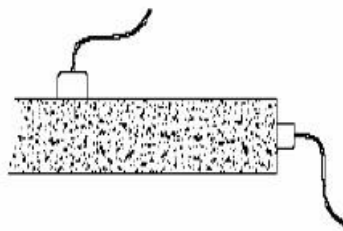
l - Udaljenost između pretvarača, mm.

t - Vrijeme putovanja, s.

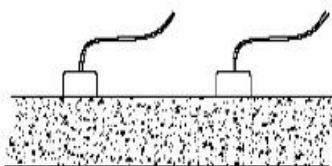
Postavljanje pretvarača na betonski element može se izvesti u tri formata, kao što je prikazano na slikama 32-34. [25]



Slika 32. Direktni postupak [25]



Slika 33. Poludirektni postupak [25]



Slika 34. Indirektni postupak [25]

4.2. Opis ultrazvučnog ispitivanja na stupu S1

Ispitivanje je provedeno na stupištu mosta S1. Stupište je izvedeno u obliku zida na vrhu kojeg se nalazi armiranobetonska naglavna greda. Mjesto ispitivanja je odabrano temeljem vizualnog pregleda uz navedene kriterije. Kriteriji za izbor ispitnog mjesta bili su:

- mjesto je unutar dosega ispitivača,
- mjesto je dovoljno blizu ruba stupa zbog ograničene duljine kablova uređaja,
- na površini ima vizualnih naznaka lošeg stanja betona što ukazuje na to da će biti potrebna sanacija.

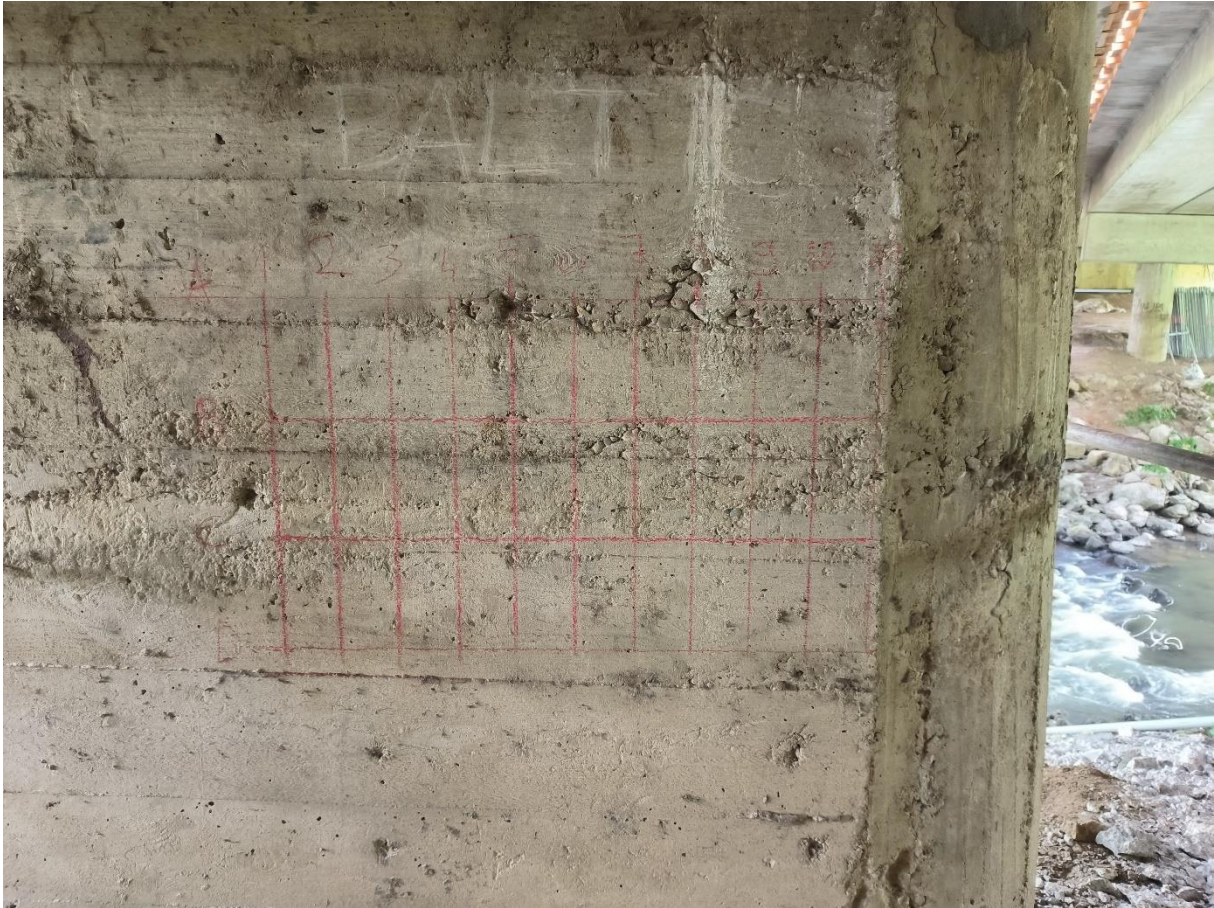
Postojeći beton na odabranom ispitnom mjestu je potrebno djelomično izbrusiti brusilicom za beton zbog zaglađivanja površine, što je preduvjet za ostvarivanje dobrog kontakta sa sondom ultrazvuka. Nakon brušenja su se kredom ucrtavale mjerne točke. Nacrtna je linija duljine 1 m koja je podijeljena svakih 10 cm. (slike 35.-37.)



Slika 35. Brušenje postojećeg betona brusilicom za beton



Slika 36. Označavanje mjernog mjesta na stupištu S1



Slika 37. Mjerno mjesto na stupištu S1

Isti postupak je bio proveden i na suprotnoj strani stupa na način da su iscrtane oznake bile zrcalno simetrične. Za prijenos linije iz prve ravnine na drugu su se koristili jednostavni alati poput daske, mjerne trake i libele, te su u pozicioniranju pomogle naglavna greda i skela pričvršćena za stupište.



Slika 38. Prenošenje linije na susjednu ravninu



Slika 39. Prenošenje linije na susjednu ravninu pomoću mjerne trake



Slika 40. Odmjeravanje pozicije pomoću naglavne grede

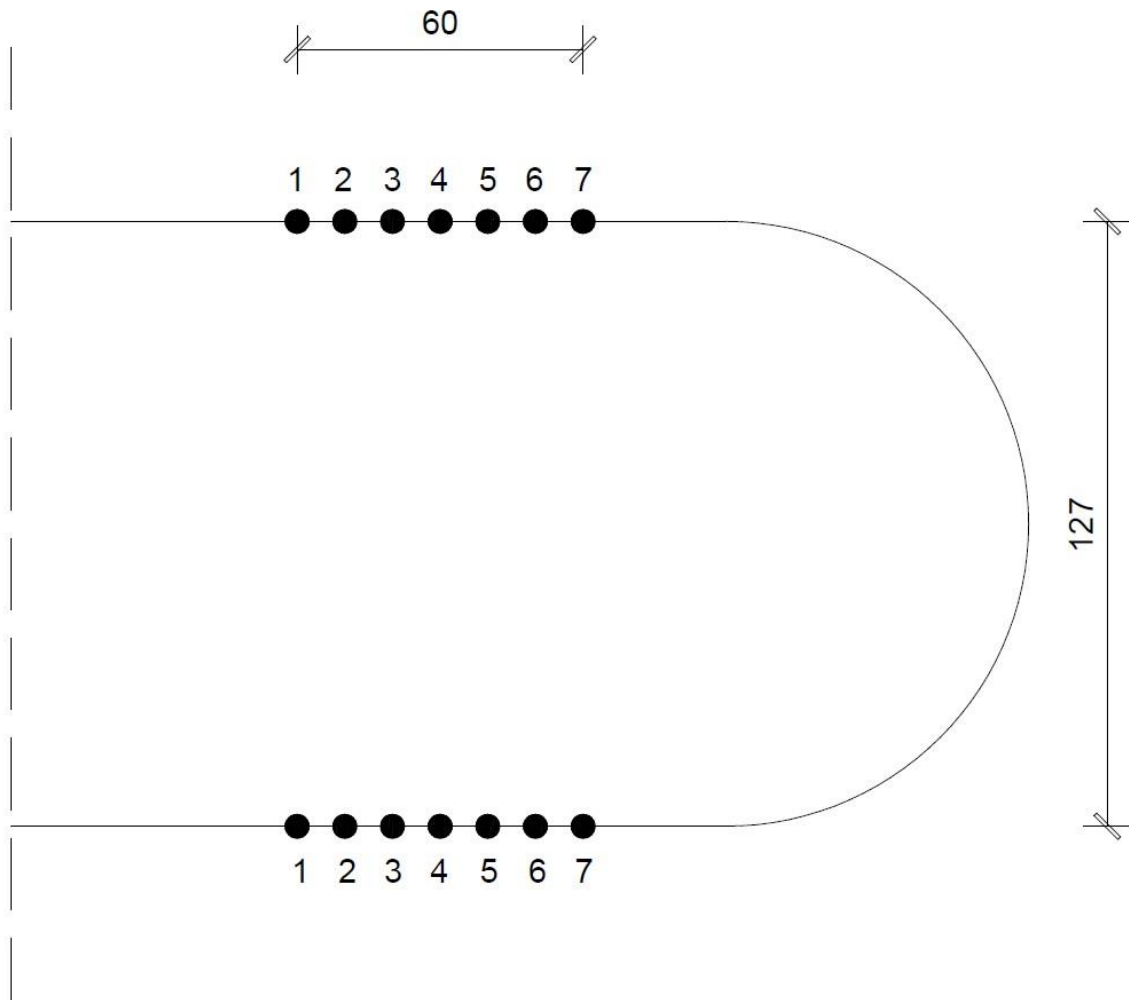
Ispitivanje se sastojalo od dvije faze. U prvoj fazi se u prethodno označenim točkama na liniji mjerilo direktnim postupkom vrijeme prolaska ultrazvučnog vala kroz beton u postojećem stanju.

Nakon provedenog mjerenja i obrade rezultata u prvoj fazi, pokazalo se da u rubnim točkama dolazi do prevelikog rasipanja rezultata. Odlučeno je da se izbace takve točke te da se uzorak smanji na 7 mjernih točaka. Sukladno navedenom, ispitivanje je provedeno na uzorku od 60 cm podijeljenom na 7 mjernih točaka s razmakom od 10 cm između svake točke. (slika 41)

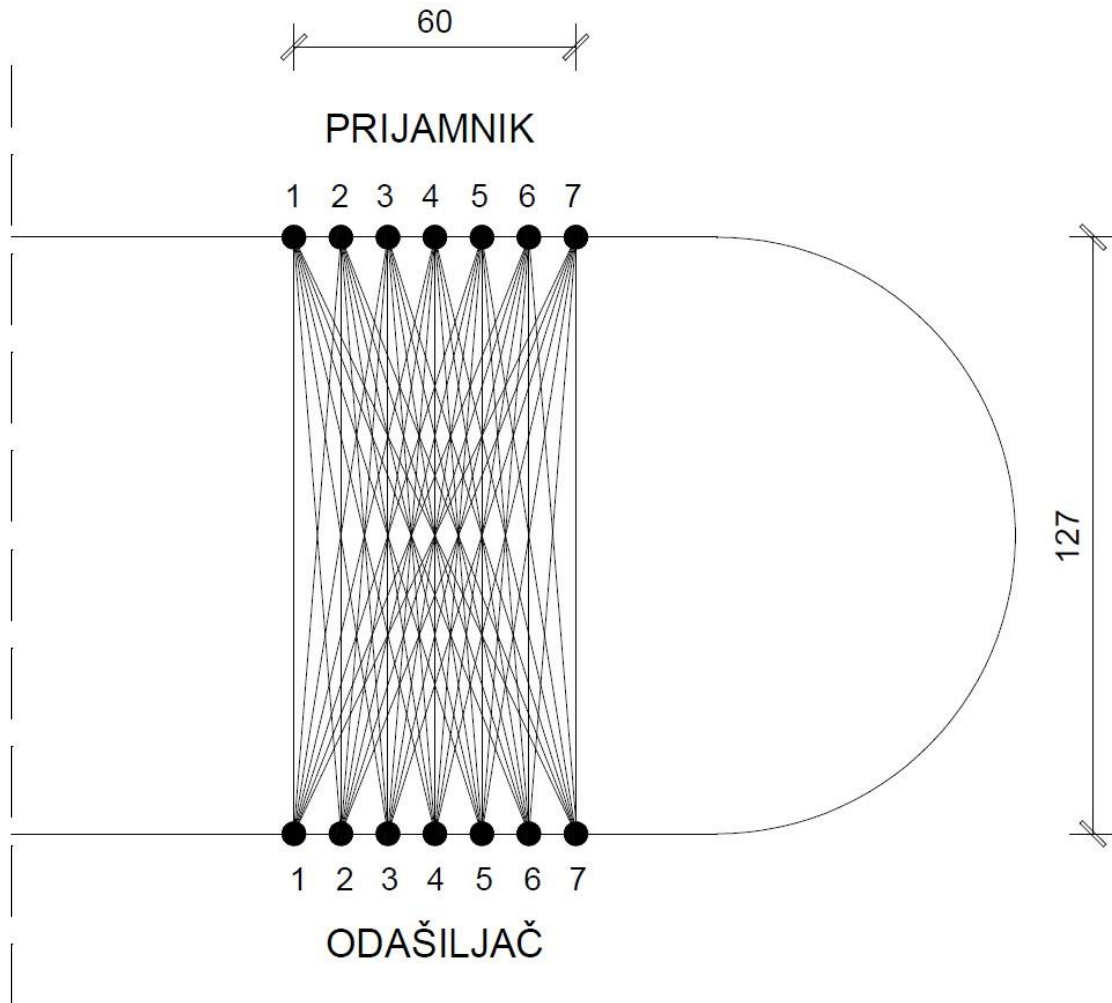
Mjerenje je provedeno na način da se na južnoj površini zida nalazila sonda koja je odašiljala ultrazvučne valove, a na sjevernoj površini se nalazila sonda koja je zaprimala valove.

Sonda koja je odašiljala se pomicala po mjernim točkama, dok se sonda koja je zaprimala valove držala fiksiranom u jednoj točki sve dok odašiljačka sonda nije prošla svaku mjernu točku na svojoj strani. Nakon što je odašiljač prošao svaku mjernu točku, prijamnik se pomaknuo u slijedeću točku. Proces se ponavljao sve dok nije bila izmjerena svaka od 7 točaka sa svakom od 7 nasuprotnih točaka. Ukupno je bilo izmjereno 49 različitih vremena prolaska vala u svakoj fazi. (slika 42)

Kako bi se poboljšala kontaktna svojstva i sonde odašiljača i sonde prijarnika bilo je potrebno koristiti litijevu višenamjensku mazivu mast na spoju samih sondi s površinom zida. (slika 43) Pretpostavka je da se saniranjem susjednih površina povećavaju šanse za dobivanje boljih rezultata u drugoj fazi mjerenja vremena prolaska vala kroz element.



Slika 41. Skica poprečnog presjeka stupa sa oznakama mjernih točaka



Slika 42. Putanje ultrazvučnih valova



Slika 43. Prva faza ispitivanja ultrazvukom

U drugoj fazi izvršena je sanacija ispitane površine. Sanacija se provela metodom hidrodinamičkog uklanjanja površinskog sloja betona do dubine cca 10 cm, tj. do prvog reda armature. Hidrodinamičko uklanjanje bilo je primijenjeno na obje strane stupa. (slike 44-46)



Slika 44. Hidrodinamičko uklanjanje betona stupašta S1



Slika 45. Uklonjeni površinski sloj betona



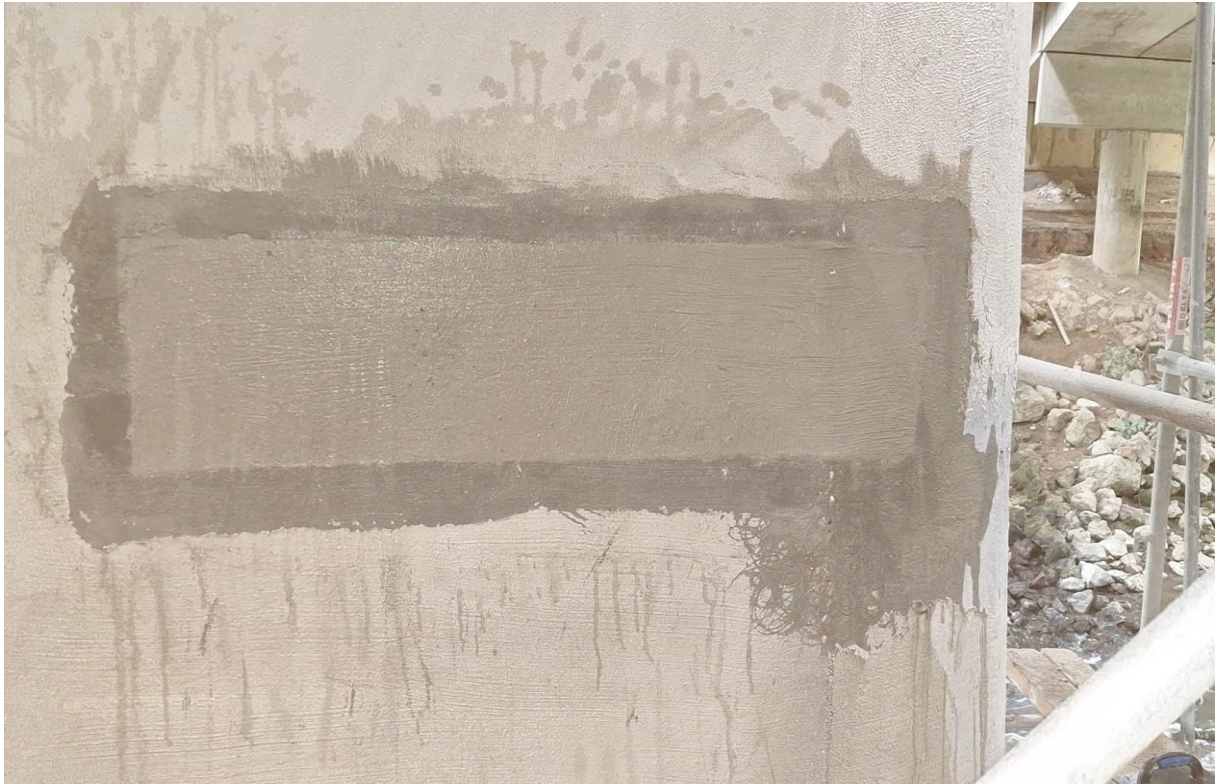
Slika 46. Mjerenje dubine uklonjenog postojećeg betona

Nakon uklanjanja betona, potrebno je bilo izloženu postojeću armaturu premazati s antikoroziivnim cementnim mortom. (slika 47)



Slika 47. Zaštita postojeće armature

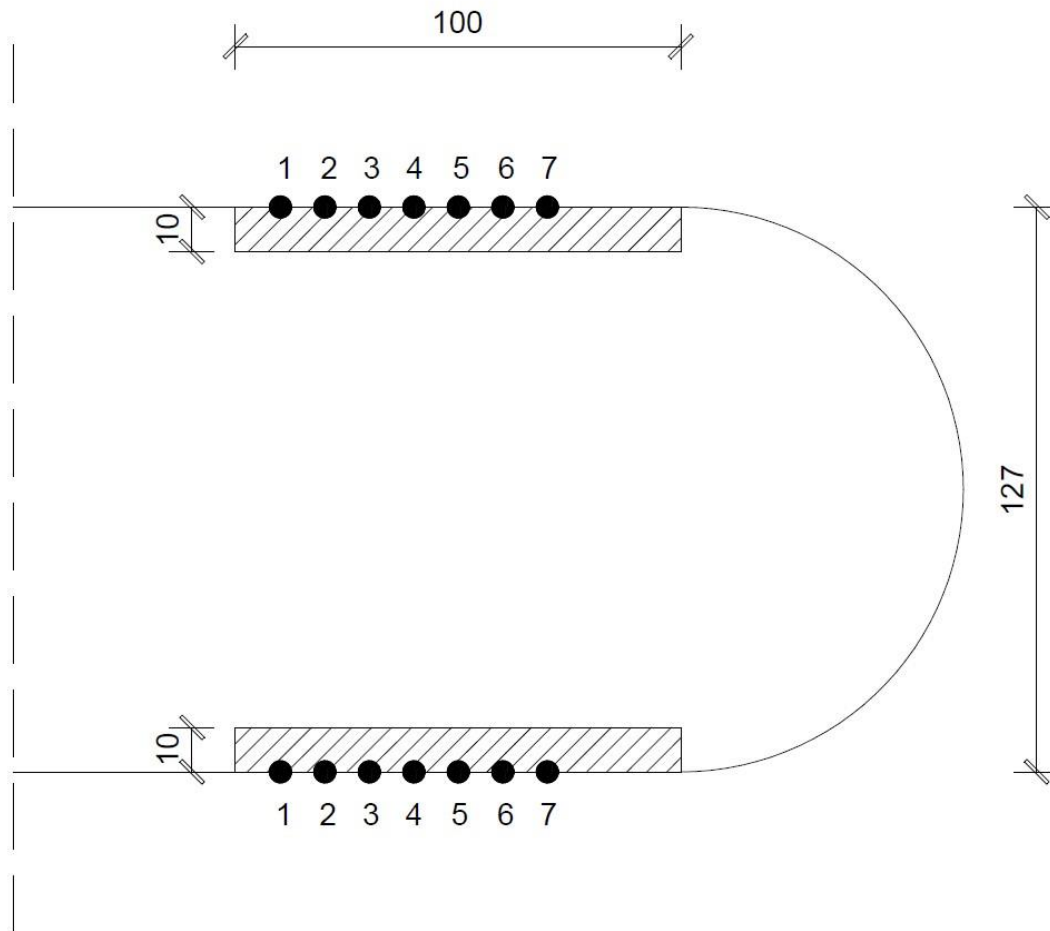
Nakon zaštite armature, šupljina se ispunila polimer cementnim mortom klase R4 u debljini jednakoj debljini uklonjenog betona hidrodinamičkim postupkom. (slika 49)



Slika 48. Ugradnja sanacijskog morta

Na kraju se preko cijelog stupa površinski nanosio tanki sloj hidroizolacijskog polimer cementnog morta kao zaštita od prodora vode u element. (slika 48)

Nakon sanacije susjednih strana stupa, slijedila je druga faza mjerenja vremena prolaska vala kroz element. Potrebno je bilo ponovo kredom ucrtati linije na istom mjestu kao i u prvoj fazi mjerenja. To se postiglo odmjeravanjem pomoću istih mjera i alata kao u prvoj fazi ispitivanja.

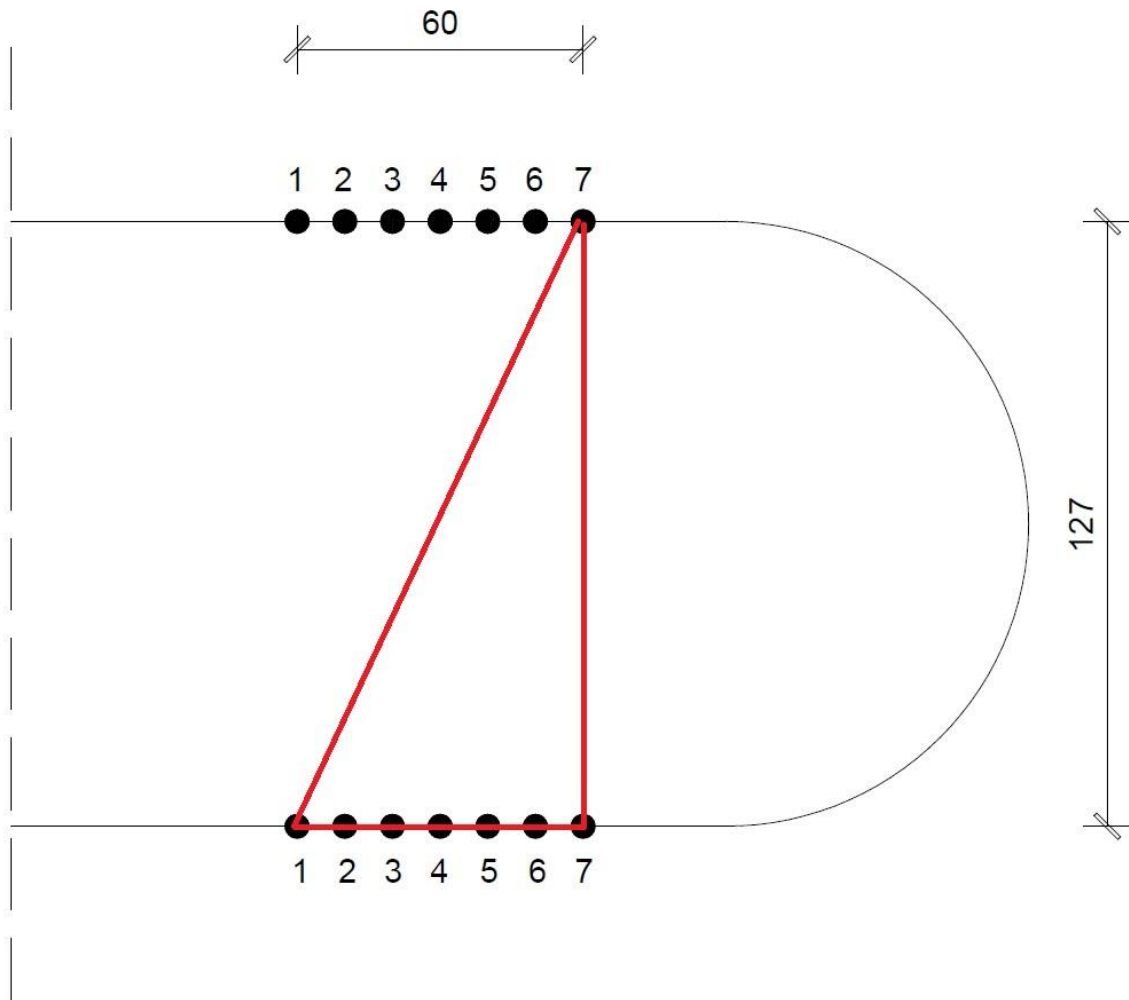


Slika 49. Prikaz reprofilacije u poprečnom presjeku

4.3. Obrada izmjerenih veličina

Izmjerene veličine vremena izražene su u mikrosekundama (μs). Potrebno je bilo izračunati brzine prolaska ultrazvučnog vala na pojedinim mjernim točkama.

Put je dobiven na način da je izmjerena debljina zida u metrima (m), te ona predstavlja najkraći mogući put kojeg val može preći od odašiljača do prijarnika. Sve ostale vrijednosti puteva koji se pojavljuju u računima dolaze iz trigonometrijskog odnosa kateta i hipotenuza pravokutnog trokuta kojeg se može vidjeti u poprečnom presjeku promatranog stupa. (slika 50) Gdje najkraći put to jest debljina zida predstavlja prvu katetu, a udaljenost između točaka na istoj strani zida drugu katetu, i na kraju put predstavlja hipotenuza promatranog trokuta. Tražena hipotenuza se može jednostavno izračunati pomoću Pitagorinog poučka.

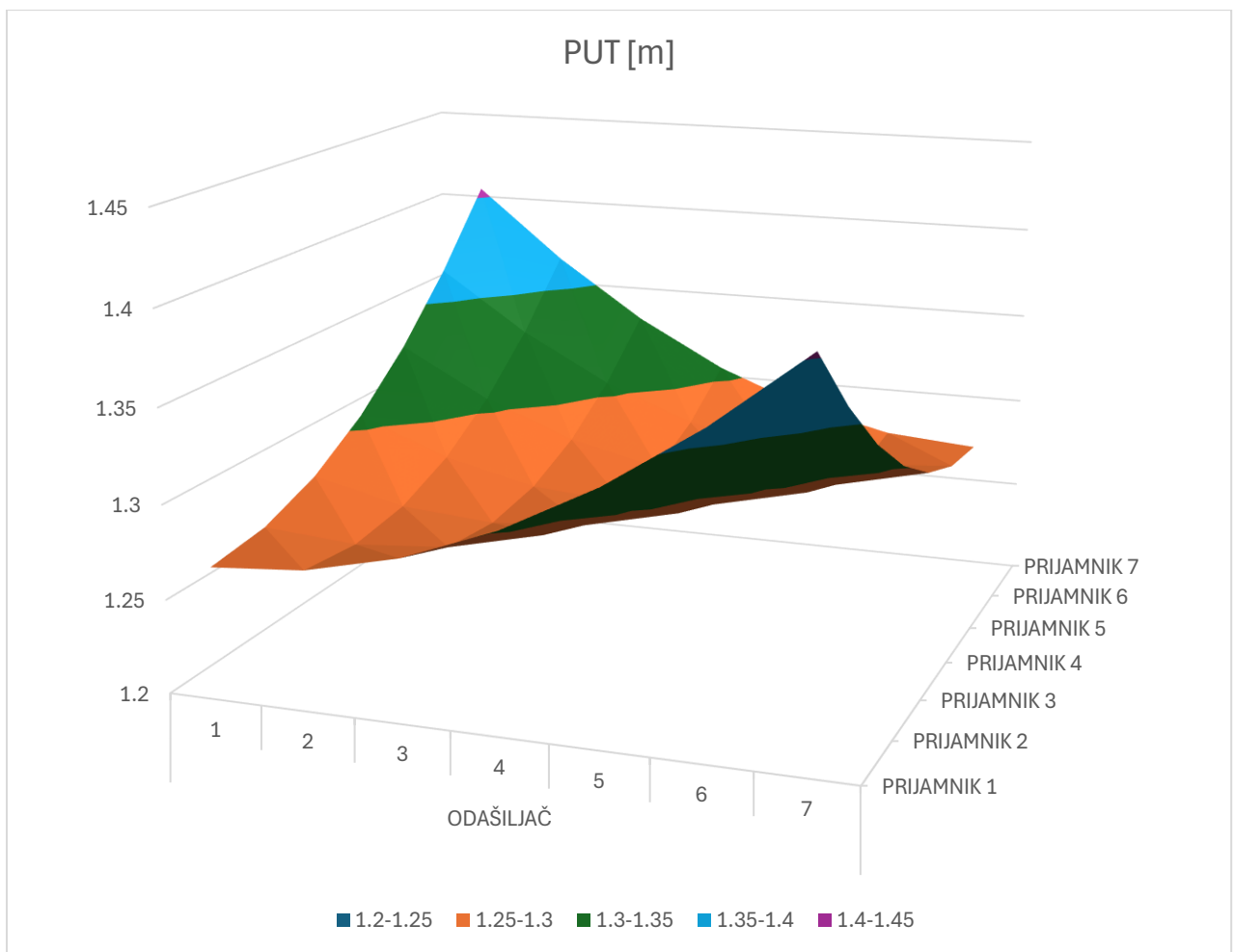


Slika 50. Primjer pravokutnog trokuta za izračun duljine puta

U tablici 3 je dan prikaz duljina svih puteva koji su korišteni u računanju brzine prolaska vala za svaku poziciju. Na slici 51 je dan prikaz 3D dijagrama puteva prema vrijednostima iz tablice 3. Na X-osi dijagrama se nalaze pozicije odašiljača, a na Y-osi pozicije prijarnika, dok se na Z-osi nalaze vrijednosti duljine puteva izračunate pomoću Pitagorinog poučka. Uparivanjem bilo koje pozicije odašiljača na X-osi s bilo kojom pozicijom prijarnika na Y-osi može se dobiti vrijednost izračunate duljine puta za svaku poziciju. Duljine puteva izražene su u metrima [m].

Tablica 3. Duljine puteva ultrazvučnih valova (m)

| | | ODAŠILJAČ | | | | | | |
|-----------|---|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| PRIJAMNIK | 1 | 1.27 | 1.273931 | 1.285652 | 1.304952 | 1.331503 | 1.364881 | 1.4046 |
| | 2 | 1.273931 | 1.27 | 1.273931 | 1.285652 | 1.304952 | 1.331503 | 1.364881 |
| | 3 | 1.285652 | 1.273931 | 1.27 | 1.273931 | 1.285652 | 1.304952 | 1.331503 |
| | 4 | 1.304952 | 1.285652 | 1.273931 | 1.27 | 1.273931 | 1.285652 | 1.304952 |
| | 5 | 1.331503 | 1.304952 | 1.285652 | 1.273931 | 1.27 | 1.273931 | 1.285652 |
| | 6 | 1.364881 | 1.331503 | 1.304952 | 1.285652 | 1.273931 | 1.27 | 1.273931 |
| | 7 | 1.4046 | 1.364881 | 1.331503 | 1.304952 | 1.285652 | 1.273931 | 1.27 |



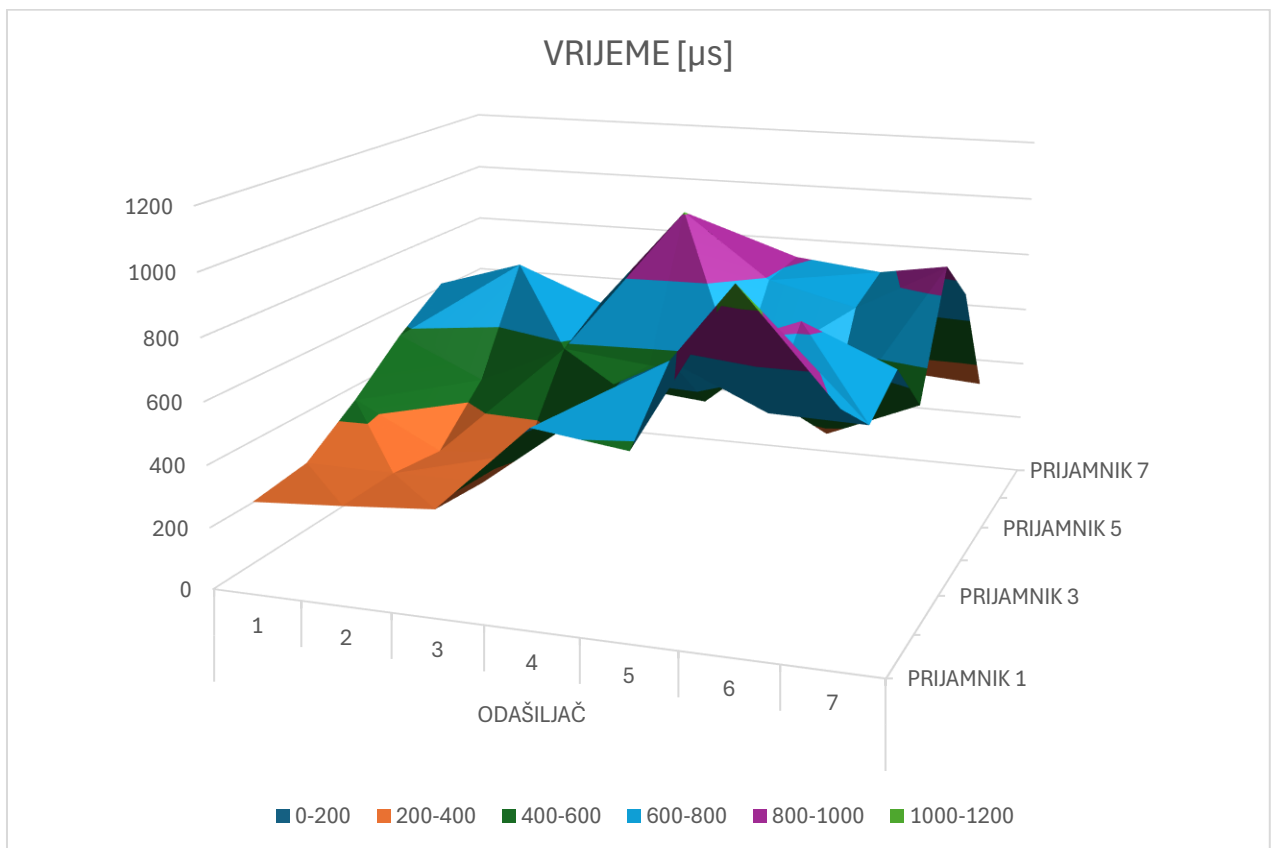
Slika 51. 3D dijagram puteva ultrazvučnih valova

4.4. Rezultati ispitivanja prije sanacije

U tablici 4 dan je prikaz izmjerenih vremena prolaska vala u fazi prije sanacije, za svaku poziciju. Na slici 52 je dan prikaz 3D dijagrama vremena prema vrijednostima iz tablice 4. Na X-osi dijagrama se nalaze pozicije odašiljača, a na Y-osi pozicije prijarnika, dok se na Z-osi nalaze vrijednosti izmjerenih vremena u μs . Uparivanjem bilo koje pozicije odašiljača na X-osi s bilo kojom pozicijom prijarnika na Y-osi može se dobiti vrijednost izmjerenog vremena za svaku poziciju.

Tablica 4. Izmjereno vrijeme prolaska vala prije sanacije – faza 1 (μs)

| | | ODAŠILJAČ | | | | | | |
|-----------|---|-----------|-----|-----|------|-----|------|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| PRIJAMNIK | 1 | 299 | 319 | 342 | 620 | 581 | 1087 | 761 |
| | 2 | 323 | 320 | 321 | 545 | 762 | 629 | 622 |
| | 3 | 441 | 295 | 319 | 575 | 547 | 828 | 703 |
| | 4 | 581 | 451 | 585 | 554 | 537 | 377 | 501 |
| | 5 | 693 | 783 | 669 | 1007 | 793 | 721 | 882 |
| | 6 | 505 | 509 | 411 | 575 | 806 | 773 | 716 |
| | 7 | 325 | 317 | 312 | 536 | 672 | 332 | 311 |

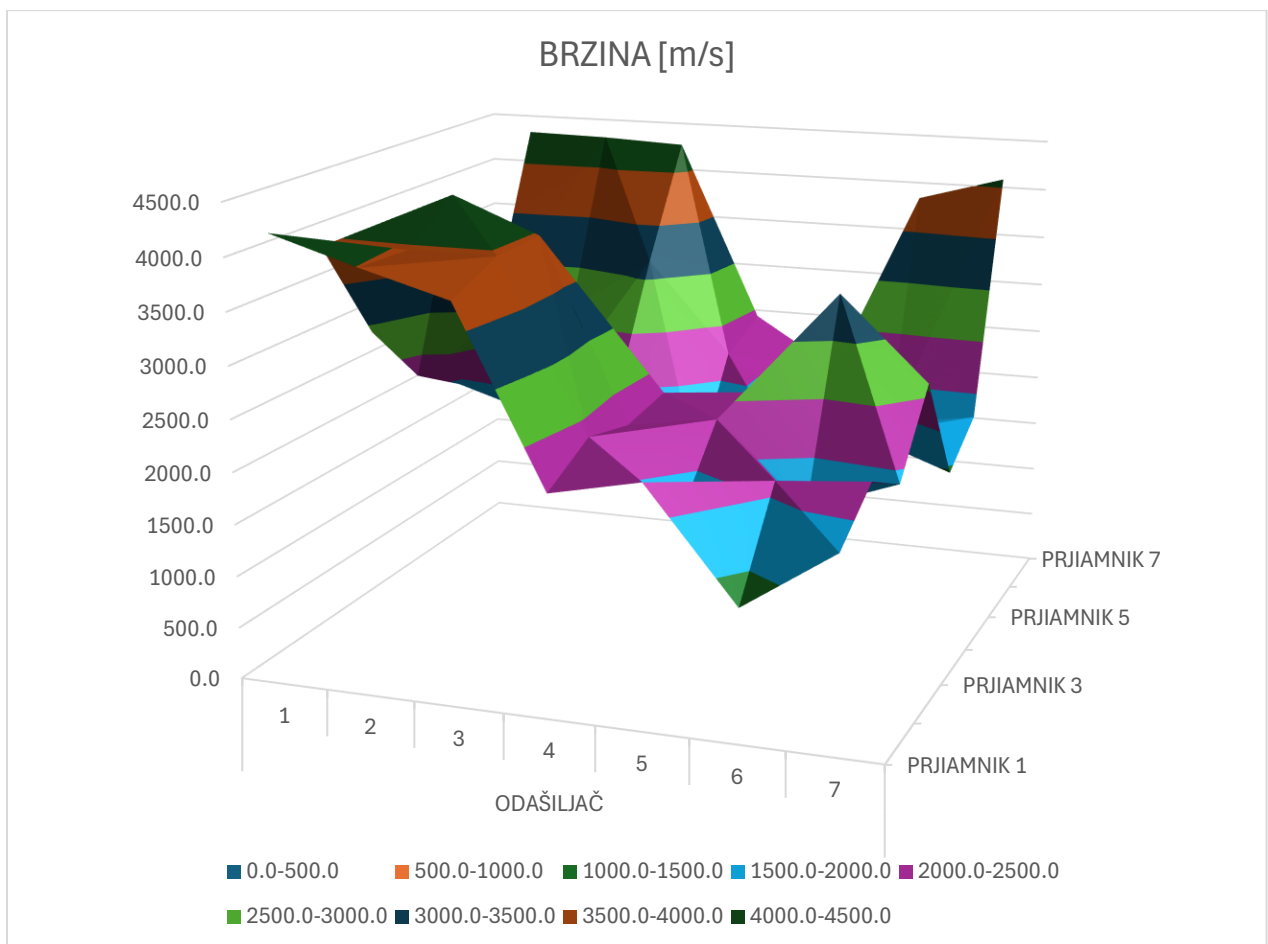


Slika 52. 3D dijagram vremena prolaska valova prije sanacije – faza 1

U tablici 5 je dan prikaz izračunatih brzina prolaska u fazi prije sanacije, a na slici 53 je dan prikaz 3D dijagrama brzina prema vrijednostima iz tablice 5. Na X-osi dijagrama se nalaze pozicije odašiljača, a na Y-osi se nalaze pozicije prijarnika, dok se na Z-osi nalaze vrijednosti izračunatih brzina u m/s. Uparivanjem bilo koje pozicije odašiljača na X-osi sa bilo kojom pozicijom prijarnika na Y-osi može se dobiti vrijednost brzine na Z-osi za svaku određenu poziciju.

Tablica 5. Prikaz brzina prolaska ultrazvučnih valova prije sanacije – faza 1 (m/s)

| | | ODAŠILJAČ | | | | | | |
|----------|---|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| PRJAMNIK | 1 | 4247.5 | 3993.5 | 3759.2 | 2104.8 | 2291.7 | 1255.6 | 1845.7 |
| | 2 | 3944.1 | 3968.8 | 3968.6 | 2359.0 | 1712.5 | 2116.9 | 2194.3 |
| | 3 | 2915.3 | 4318.4 | 3981.2 | 2215.5 | 2350.4 | 1576.0 | 1894.0 |
| | 4 | 2246.0 | 2850.7 | 2177.7 | 2292.4 | 2372.3 | 3410.2 | 2604.7 |
| | 5 | 1921.4 | 1666.6 | 1921.8 | 1265.1 | 1601.5 | 1766.9 | 1457.7 |
| | 6 | 2702.7 | 2615.9 | 3175.1 | 2235.9 | 1580.6 | 1642.9 | 1779.2 |
| | 7 | 4321.8 | 4305.6 | 4267.6 | 2434.6 | 1913.2 | 3837.1 | 4083.6 |



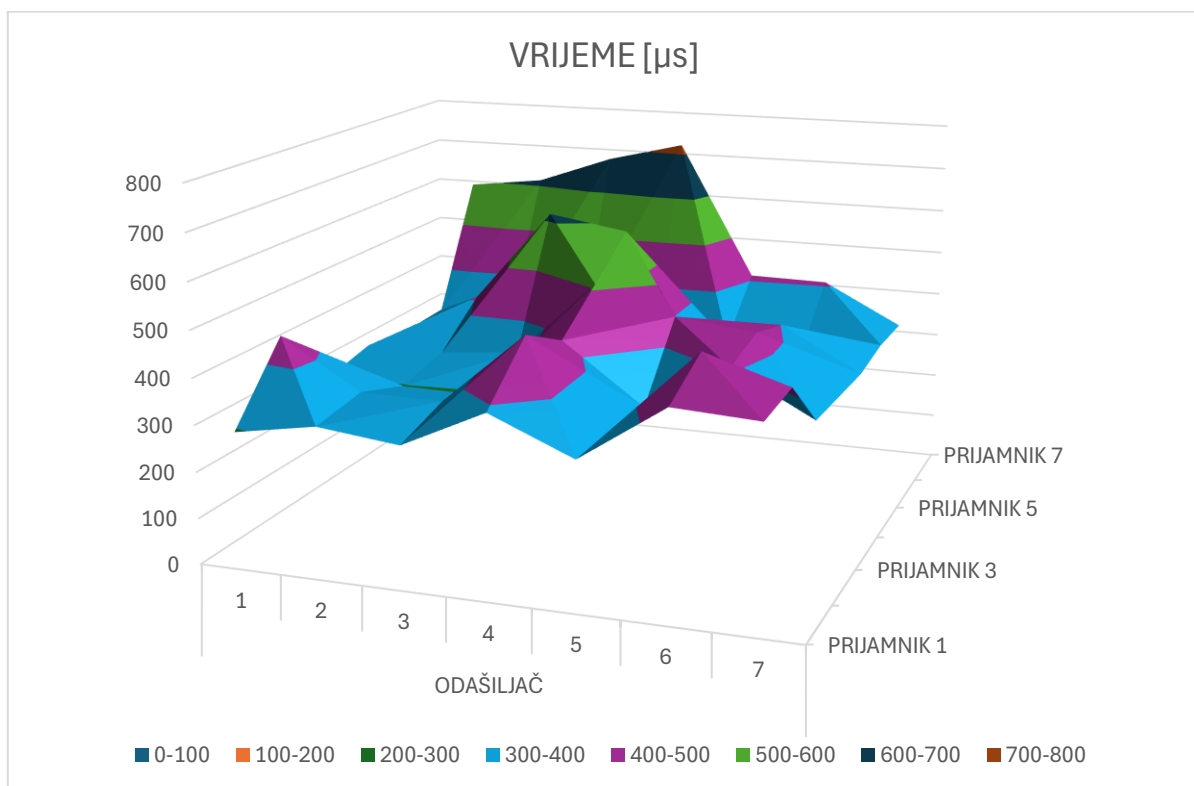
Slika 53. 3D dijagram brzina prolaska ultrazvučnih valova prije sanacije – faza 1

4.5. Rezultati ispitivanja nakon sanacije

U tablici 6 dan je prikaz izmjerenih vremena prolaska vala u fazi nakon sanacije, za svaku poziciju. Na slici 54 je dan prikaz 3D dijagrama vremena prema vrijednostima iz tablice 6. Na X-osi dijagrama se nalaze pozicije odašiljača, a na Y-osi pozicije prijarnika, dok se na Z-osi nalaze vrijednosti izmjerenih vremena u μs . Uparivanjem bilo koje pozicije odašiljača na X-osi s bilo kojom pozicijom prijarnika na Y-osi može se dobiti vrijednost izmjerenog vremena za svaku poziciju.

Tablica 6. Vrijeme prolaska ultrazvučnih valova nakon sanacije – faza 2 (μs)

| | | ODAŠILJAČ | | | | | | |
|-----------|---|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| PRIJAMNIK | 1 | 295 | 325 | 305 | 390 | 315 | 437 | 427 |
| | 2 | 446 | 341 | 339 | 495 | 309 | 493 | 437 |
| | 3 | 299 | 299 | 297 | 433 | 304 | 407 | 312 |
| | 4 | 323 | 323 | 339 | 509 | 451 | 432 | 307 |
| | 5 | 309 | 406 | 615 | 587 | 299 | 399 | 302 |
| | 6 | 313 | 307 | 305 | 303 | 295 | 295 | 317 |
| | 7 | 591 | 613 | 677 | 721 | 410 | 407 | 315 |

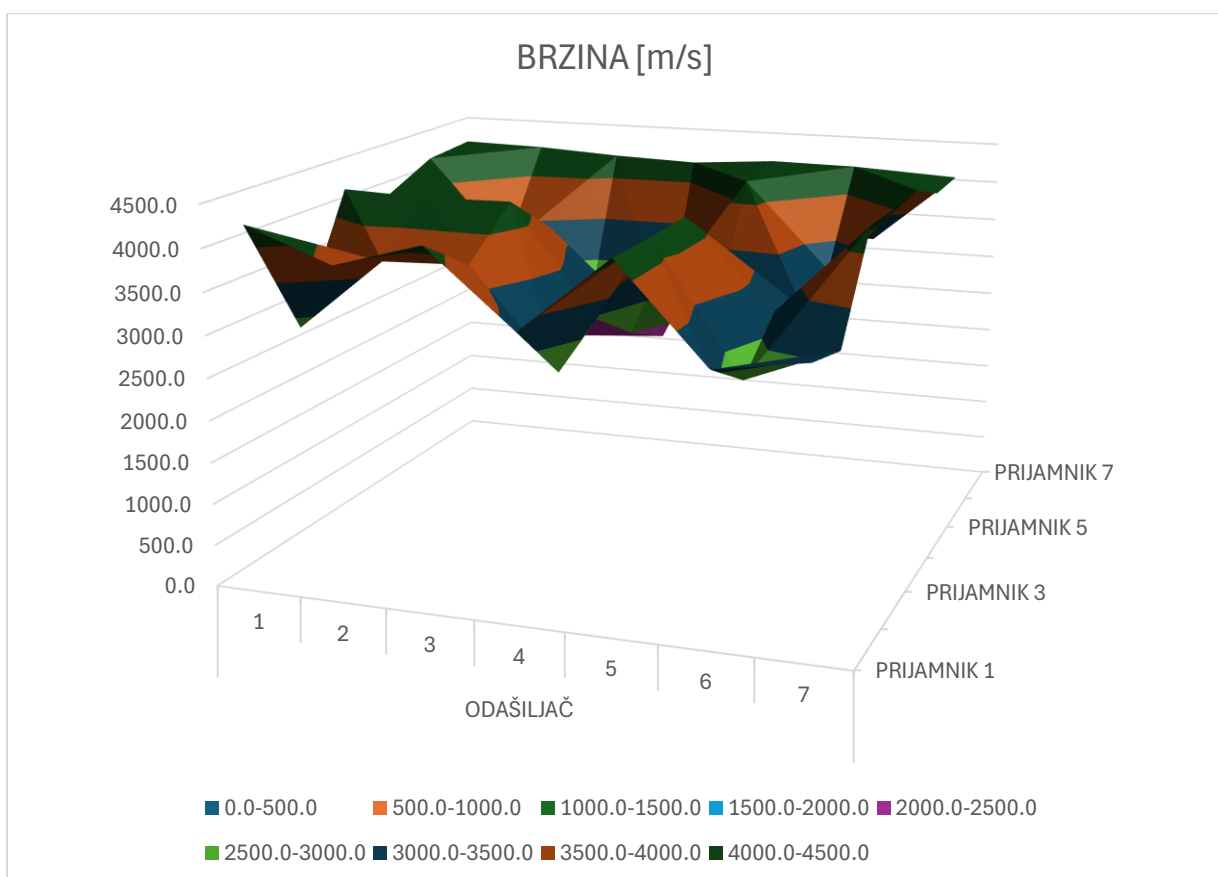


Slika 54. 3D dijagram vremena prolaska ultrazvučnih valova nakon sanacije – faza 2

U tablici 7 je dan prikaz izračunatih brzina prolaska u fazi poslije sanacije, a na slici 55 je dan prikaz 3D dijagrama brzina prema vrijednostima iz tablice 7. Na X-osi dijagrama se nalaze pozicije odašiljača, a na Y-osi se nalaze pozicije prijamnika, dok se na Z-osi nalaze vrijednosti izračunatih brzina u m/s. Uparivanjem bilo koje pozicije odašiljača na X-osi sa bilo kojom pozicijom prijamnika na Y-osi može se dobiti vrijednost brzine na Z-osi za svaku određenu poziciju.

Tablica 7. Brzina prolaska ultrazvučnih valova nakon sanacije – faza 2 (m/s)

| | | ODAŠILJAČ | | | | | | |
|-----------|---|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| PRIJAMNIK | 1 | 4305.1 | 3919.8 | 4215.3 | 3346.0 | 4227.0 | 3123.3 | 3289.5 |
| | 2 | 2856.3 | 3724.3 | 3757.9 | 2597.3 | 4223.1 | 2700.8 | 3123.3 |
| | 3 | 4299.8 | 4260.6 | 4276.1 | 2942.1 | 4229.1 | 3206.3 | 4267.6 |
| | 4 | 4040.1 | 3980.3 | 3757.9 | 2495.1 | 2824.7 | 2976.0 | 4250.7 |
| | 5 | 4309.1 | 3214.2 | 2090.5 | 2170.2 | 4247.5 | 3192.8 | 4257.1 |
| | 6 | 4360.6 | 4337.1 | 4278.5 | 4243.1 | 4318.4 | 4305.1 | 4018.7 |
| | 7 | 2376.6 | 2226.6 | 1966.8 | 1809.9 | 3135.7 | 3130.1 | 4031.7 |



Slika 55. 3D dijagram brzina prolaska ultrazvučnih valova nakon sanacije – faza 2

4.6. Analiza rezultata ispitivanja i diskusija

4.6.1. Prije sanacije

Srednja vrijednost vremena prolaska ultrazvučnog vala prije sanacije iznosi 560,67 (μs), dok najmanje vrijeme iznosi 295 (μs), a najveće vrijeme iznosi 1087 (μs).

Srednja vrijednost brzine ultrazvučnog vala prije sanacije iznosi 2642,12 (m/s), dok najmanja brzina iznosi 1255,6 (m/s), a najveća brzina iznosi 4321,8 (m/s).

Usporedbom srednje vrijednosti brzine ultrazvučnog vala prije sanacije s kriterijima za ocjenu kvalitete betona [10], vidljivo je da ovi rezultati spadaju u grupu „općenito loš beton“.

Standardna devijacija vrijednosti brzine ultrazvučnog vala prije sanacije iznosi 977,6 (m/s) što iznosi približno 37% srednje vrijednosti brzine ultrazvučnog vala.

4.6.2. Nakon sanacije

Srednja vrijednost vremena prolaska ultrazvučnog vala nakon sanacije iznosi 391,33 (μs), dok najmanje vrijeme iznosi 295 (μs), a najveće vrijeme iznosi 721 (μs).

Srednja vrijednost brzine ultrazvučnog vala nakon sanacije iznosi 3535,43 (m/s), dok najmanja brzina iznosi 1809,9 (m/s), a najveća brzina iznosi 4360,6 (m/s).

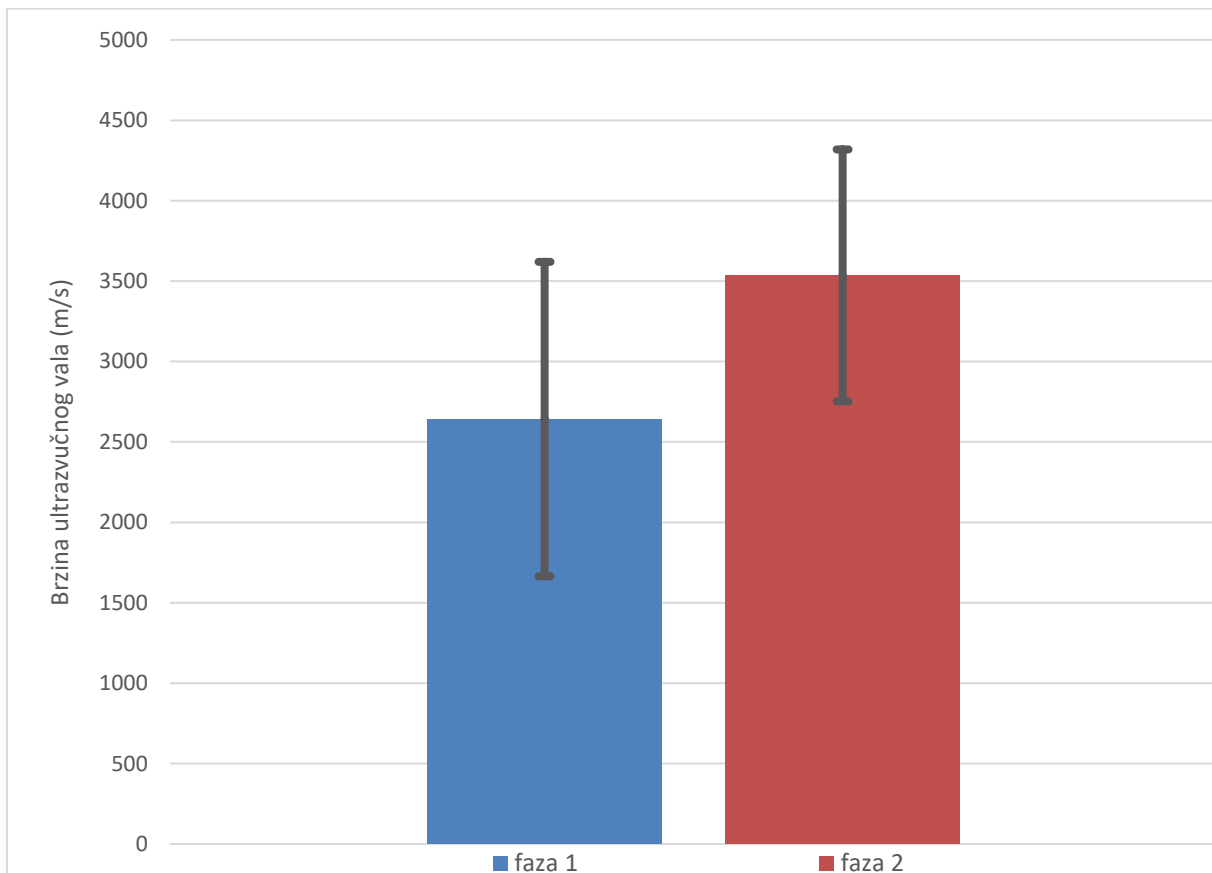
Usporedbom srednje vrijednosti brzine ultrazvučnog nakon vala nakon sanacije sa kriterijima za ocjenu kvalitete betona [10], vidljivo je da ovi rezultati spadaju u grupu „dobar beton“.

Standardna devijacija vrijednosti brzine ultrazvučnog vala nakon sanacije iznosi 783,2 (m/s) što iznosi približno 22% srednje vrijednosti brzine ultrazvučnog vala.

Tablica 8. Usporedba brzina prolaska ultrazvučnih valova prije i nakon sanacije

| | Prije sanacije (faza 1) | Nakon sanacije (faza 2) | Razlika |
|---|---|----------------------------------|---------|
| Brzina ultrazvučnog vala (m/s) | 2642,12 | 3535,43 | 893,31 |
| Standardna devijacija (m/s) | 977,6 | 783,2 | 194,4 |
| Udio standardne devijacije u srednjoj vrijednosti (%) | 37 | 22 | 15 |
| Klasifikacija kvalitete betona [10] | Općenito loš beton (2100 – 3000 m/s) | Dobar beton (3000 – 3600 m/s) | |

Na slici 56. prikazane su srednje vrijednosti te standardne devijacije brzina ultrazvučnog vala u objema fazama.



Slika 56. Grafikon srednjih vrijednosti i standardnih devijacija brzina ultrazvučnog vala u obje faze

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je, između ostalog, opisan tijek sanacije jednog od stupova mosta preko rijeke Krapinice na autocesti A2 Zagreb-Macelj. Sanacija stupa mosta izvedena je reprofilacijom hidrodinamičkim postupkom i ugradnjom sanacijskog morta klase R4 na 16 % površine poprečnog presjeka stupa, a s ciljem povećanja kvalitete betona nakon sanacije.

Nadalje, provedena su ispitivanja kvalitete betona prije i nakon sanacije metodom mjerenja prolaska ultrazvučnog vala na unaprijed definiranim ispitnim mjestima po principu ultrazvučne tomografije. Temeljem usporedbe rezultata ispitivanja prije i nakon sanacije donesena je ocjena o kvaliteti betona odnosno uspješnosti sanacije.

Usporedbom srednjih vrijednosti vremena prolaska ultrazvučnog vala kroz stup prije i nakon sanacije može se zaključiti da je ono kraće nakon sanacije nego li je to bilo prije sanacije.

Usporedbom brzine ultrazvučnog vala kroz stup prije i nakon sanacije može se zaključiti da je sanacijom kvaliteta betona stupa povećana za jednu kategoriju [10] u odnosu na početno stanje prije sanacije.

Također usporedbom udjela standardnih devijacija u srednjim vrijednostima brzina ultrazvučnog vala kroz stup prije i nakon sanacije može se zaključiti da je sanacijom standardna devijacija brzine smanjena za 15% u odnosu na početno stanje prije sanacije.

Iz gore navedenog, zaključuje se da se na navedenom primjeru sanacije, sa korištenom mjernom opremom, metodom mjerenja prolaska ultrazvučnog impulsa može jasno utvrditi razlika u kvaliteti betona prije i nakon sanacije.

S obzirom na cijenu koštanja ispitne opreme i vrijeme potrebno za provedbu ispitivanja može se zaključiti da se primjenom navedene metode na ovakvim i sličnim primjerima sanacije mogu dobiti relativno pouzdani zaključci o kvaliteti betona kojeg se ispituje.

Međutim, bitno je naglasiti kako postoje i ograničenja upotrebe ultrazvuka, primjerice prisutnost velikog rasipanja rezultata, kao što se može vidjeti iz rezultata ovih ispitivanja, pa se može zaključiti da je ovu metodu najbolje koristiti kao jedan od pokazatelja uspješnosti provedene sanacije.

6. POPIS LITERATURE

- [1] Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja: Pravilnik o održavanju građevina; Narodne novine; NN 122/2014; 2014. Dostupno: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_10_122_2343.html [Pristupljeno 29.10.2024.]
- [2] Häggström, J; i dr.: Testing Bridges to Failure – Experiences, SCISPACE; 2017. Dostupno: <https://typeset.io/papers/testing-bridges-to-failure-experiences-28po45y9r7> [Pristupljeno 01.11.2024.]
- [3] Prikaz probnog opterećenja na mostu; Dostupno: <https://csabd.net/structural-design-for-bridges/> [Pristupljeno 01.11.2024.]
- [4] Schabowicz, K: *Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering*; 2019.
- [5] Mikulić, D.; Bjegović, D.; Štirmer, N.; Sekulić, D.: *Primjena ultrazvučnih metoda za određivanje svojstava mladog betona*; 2005.
- [6] Banjad Pečur, I.; Skazlić, M.; Gabrijel, I.; Milovanović, B.; Predavanje iz kolegija Nerazorna ispitivanja: Ispitivanje ultrazvukom; 2024.
- [7] Sekulić, D.; Bjegović, D.; Mikulić, D.: *Nerazorne ispitne metode za određivanje stanja betonskih konstrukcija*; 2001.
- [8] About Motors: Ultrasound - parameters, wave types, attenuation and reflection, dostupno: <https://about-motors.com/ultrasound/theory/> [Pristupljeno 08.09.2024.]
- [9] Duvnjak, I.; Predavanje iz kolegija Mehanika materijala: Ispitivanje bez razaranja; 2024.
- [10] Krolo, J.; Šimić, D.: *Mehanika materijala*; 2011.
- [11] Shematski prikaz transverznog i longitudinalnog vala; Dostupno: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/longitudinal-wave> [Pristupljeno 12.11.2024.]
- [12] Karaiskos, G.; Deraemaeker, A.; Aggelis, D.G.; Van Hemelrijck, D.: *Monitoring of Concrete Structures using the Ultrasonic Pulse Velocity Method*
- [13] Lorenzi, A.; Reginato, L. A.; Favero, R. B.; Silva Filho, L. C.: *3D Ultrasonic Tomography Technique as a tool to Evaluate Concrete Structures*
- [14] Europski odbor za normizaciju: Europska Norma EN 12504-4: Ispitivanje betona – 4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa, verzija na hrvatskom; 2004.
- [15] Zielinska, M.; Rucka, M.: *Non-Destructive Assessment of Masonry Pillars using Ultrasonic Tomography*; MDPI; 2018.
- [16] Ultrasonic Pulse Eco Tester; Dostupno: <https://certifiedmtp.com/ultrasonic-pulse-velocity-tester/#&gid=1&pid=4> [Pristupljeno 27.10.2024.]

-
- [17] Ultrasonic Concrete Tester 110-240V 50/60Hz 1Ph; Dostupno: <https://www.ele.com/product/pundit-lab-ultrasonic-concrete-tester-110-240v-50-60hz-1ph> [Pristupljeno 10.09.2024.]
- [18] A1040 MIRA, Dostupno: https://acs-international.com/product/a1040-mira/?utm_medium=cpc-extension&gad_source=1 [Pristupljeno 23.10.2024.]
- [19] Acoustic Control Systems – ACS Group Saarbrücken 2018: ULTRASONIC LOW-FREQUENCY TOMOGRAPH A1040 MIRA OPERATION MANUAL
- [20] Karte autocesta; Dostupno: <https://www.auto-karta-hrvatske.com/> [Pristupljeno 12.09.2024.]
- [21] Autocesta A2; Dostupno: https://hr.wikipedia.org/wiki/Autocesta_A2 [Pristupljeno 12.09.2024.]
- [22] Šokman, A. i dr.: IZVEDBENI PROJEKT SANACIJE - MOST KRAPINA – ZAPADNI OBJEKT NA AUTOCESTI A2, dionica B Zaprešić - Krapina, km 27+220, URBANE IDEJE d.o.o., Samobor; 2020.
- [23] Šokman, A. i dr.: ELABORAT O PROVEDENOM SPECIJALISTIČKOM PREGLEDU I ISTRAŽNIM RADOVIMA – MOST KRAPINA NA AUTOCESTI A2, dionica B Zaprešić - Krapina, km 27+220, URBANE IDEJE d.o.o., Samobor; 2020.
- [24] Sklerometar Tecnotest AT241/E, Dostupno: <https://archiwum.allegro.pl/oferta/mlotek-schmidta-tecnotest-modena-at-241-e-i7268198015.html> [Pristupljeno 06.09.2024.]
- [25] Baqer Abdul Hussein Ali: *Assessment of Concrete Compressive Strength by Ultrasonic Non-Destructive Test*; 2008.

7. POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Prikaz probnog opterećenja na mostu [3] | 7 |
| Slika 2. Klasifikacija nerazornih metoda | 9 |
| Slika 3. Prikaz longitudinalnog vala [5] | 10 |
| Slika 4. Prikaz transverzalnog vala [5] | 11 |
| Slika 5. Prikaz Rayleighovog vala [5] | 11 |
| Slika 6. Osnovni parametri vala [8] | 12 |
| Slika 7. Rasprostiranje uzdužnih valova u štapu [9] | 13 |
| Slika 8. Shematski prikaz transverzalnog i longitudinalnog vala [11] | 16 |
| Slika 9. Poprečni presjek sonde | 19 |
| Slika 10. Shematski prikaz rada ultrazvučnog uređaja [16] | 21 |
| Slika 11. Moderni ultrazvučni uređaj [17] | 21 |
| Slika 12. Uređaj za ultrazvučnu tomografiju A1040 – MIRA [18] | 23 |
| Slika 13. Shematski prikaz ispitivanja [19] | 24 |
| Slika 14. Interpretacija rezultata uređaja [13] | 24 |
| Slika 15. Odziv signala u frekvencijskoj bazi za različite stupnjeve oštećenja betona [7] | 26 |
| Slika 16. Refleksija i transmisija u slojevima različitog materijala [7] | 27 |
| Slika 17. Tipični valni oblik reflektiranog zračenja za ploču mosta [7] | 28 |
| Slika 18. Brzina zagrijavanja i hlađenja za oštećeni i neoštećeni beton [7] | 30 |
| Slika 19. Termogram područja s delaminacijama [7] | 30 |
| Slika 20. Pogled na most prije sanacije sa zapadne strane | 32 |
| Slika 21. Prikaz lokacije mosta na karti [20] | 33 |
| Slika 22. Pogled na zapadnu stranu objekta [22] | 34 |
| Slika 23. Podgled mosta u rasponu P2 | 35 |
| Slika 24. Poprečni presjek rasponske konstrukcije [22] | 36 |
| Slika 25. Pogled na stupašte S1 | 38 |
| Slika 26. Bušenje uzorka betona iz konstrukcije | 39 |
| Slika 27. Primjer ispitivanja vlačne čvrstoće pull-off metodom | 39 |
| Slika 28. Sklerometar Tecnotest AT241/E [24] | 40 |
| Slika 29. Robot za hidrodinamičko uklanjanje betona | 42 |
| Slika 30. Strojna ugradnja morta na čeonom zidu upornjaka | 43 |
| Slika 31. PUNDIT uređaj | 44 |
| Slika 32. Direktni postupak [25] | 45 |
| Slika 33. Poludirektni postupak [25] | 45 |
| Slika 34. Indirektni postupak [25] | 45 |
| Slika 35. Brušenje postojećeg betona brusilicom za beton | 46 |
| Slika 36. Označavanje mjernog mjesta na stupaštu S1 | 47 |
| Slika 37. Mjerno mjesto na stupaštu S1 | 48 |

| | |
|---|----|
| Slika 38. Prenošnje linije na susjednu ravninu | 49 |
| Slika 39. Prenošnje linije na susjednu ravninu pomoću mjerne trake | 49 |
| Slika 40. Odmjeravanje pozicije pomoću naglavne grede..... | 50 |
| Slika 41. Skica poprečnog presjeka stupa sa oznakama mjernih točaka..... | 52 |
| Slika 42. Putanje ultrazvučnih valova | 53 |
| Slika 43. Prva faza ispitivanja ultrazvukom..... | 54 |
| Slika 44. Hidrodinamičko uklanjanje betona stupišta S1 | 55 |
| Slika 45. Uklonjeni površinski sloj betona | 56 |
| Slika 46. Mjerenje dubine uklonjenog postojećeg betona | 57 |
| Slika 47. Zaštita postojeće armature | 58 |
| Slika 48. Ugradnja sanacijskog morta..... | 59 |
| Slika 49. Prikaz reprofilacije u poprečnom presjeku | 60 |
| Slika 50. Primjer pravokutnog trokuta za izračun duljine puta | 61 |
| Slika 51. 3D dijagram puteva ultrazvučnih valova..... | 62 |
| Slika 52. 3D dijagram vremena prolaska valova prije sanacije – faza 1 | 63 |
| Slika 53. 3D dijagram brzina prolaska ultrazvučnih valova prije sanacije – faza 1..... | 64 |
| Slika 54. 3D dijagram vremena prolaska ultrazvučnih valova nakon sanacije – faza 2 | 65 |
| Slika 55. 3D dijagram brzina prolaska ultrazvučnih valova nakon sanacije – faza 2 | 66 |
| Slika 56. Grafikon srednjih vrijednost i standardnih devijacija brzina ultrazvučnog vala u obje faze | 68 |

8. POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Brzina širenja longitudinalnih ultrazvučnih valova kroz razne materijale [9] | 19 |
| Tablica 2. Ocjena kvalitete betona ovisno o brzini ultrazvuka [10] | 20 |
| Tablica 3. Duljine puteva ultrazvučnih valova (m) | 62 |
| Tablica 4. Izmjereno vrijeme prolaska vala prije sanacije – faza 1 (μs) | 63 |
| Tablica 5. Prikaz brzina prolaska ultrazvučnih valova prije sanacije – faza 1 (m/s)..... | 64 |
| Tablica 6. Vrijeme prolaska ultrazvučnih valova nakon sanacije – faza 2 (μs)..... | 65 |
| Tablica 7. Brzina prolaska ultrazvučnih valova nakon sanacije – faza 2 (m/s)..... | 66 |
| Tablica 8. Usporedba brzina prolaska ultrazvučnih valova prije i nakon sanacije..... | 68 |