Provedba nedestruktivnih ispitivanja pomoću Impact-echo metode

Kučina, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:287008

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-08**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

SVEUČILIŠTE SJEVER

SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN

DIPLOMSKI RAD br. 8/GRD/2020

PROVEDBA NEDESTRUKTIVNIH ISPITIVANJA POMOĆU IMPACT - ECHO METODE

Lucija Kučina

Varaždin, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE SJEVER

SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN

Studij GRADITELJSTVO

DIPLOMSKI RAD br.8/GRD/2020

PROVEDBA NEDESTRUKTIVNIH ISPITIVANJA POMOĆU IMPACT - ECHO METODE

Student:

Lucija Kučina, 0949/336 D

Mentor:

doc. dr. sc. Matija Orešković

Varaždin, rujan 2020.

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za graditeljstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo

PRISTUPNIK Lucija KUČINA | MATIČNI BROJ 0949/336D

DATUM 22.09.2020. | KOLEGIJ Tehnička dijagnoza

NASLOV RADA PROVEDBA NEDESTRUKTIVNIH ISPITIVANJA POMOĆU IMPACT-ECHO METODE

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU IMPLEMENTATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTS USING THE IMPACT-ECHO METHOD

MENTOR dr.sc. Matija OREŠKOVIĆ | ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. prof.dr.sc. Božo SOLDO
2. doc.dr.sc. Matija OREŠKOVIĆ
3. doc.dr.sc. Aleksej ANISKIN
4. doc.dr.sc. Danko MARKOVINOVIĆ
5.

Zadatak diplomskog rada

BROJ 8/GRD/2020

OPIS

U diplomskom radu je potrebno obraditi nedestruktivne metode ispitivanja nosivih konstrukcija. Sama tema i težina rada je na nedestruktivnoj Impact-echo metodi. Potrebno je teoretski obraditi metodu te objasniti teoretske postavke na temelju kojih funkcionira uređaj i provedba ispitivanja. Potrebno je proračunima pokazati i dokazati ispravnost metode i svih segmenata metode. U praktičnom dijelu zadatka potrebno je uređajem ispitati oštećeni most te dijagnosticirati oštećenja, lokacije i težinu oštećenja.
Diplomski rad mora biti rađen prema Uputama za izradu Diplomskog rada Sveučilišta Sjever.

ZADATAK URUČEN | POTPIS MENTORA

SVEUČILIŠTE SJEVER

Predgovor

Zahvaljujem se ponajprije svom mentoru doc.dr.sc Matiji Oreškoviću na brojnim savjetima strpljenju i potpori tijekom izrade ovog diplomskog rada. Izuzetan ste čovijek i stručnjak, hvala Vam.

Zahvaljujem svim profesorima i asistentima sa Sveučilišta Sjever na suradnji i stečenim znanjima. Također, zahvaljujem se svim svojim kolegama i kolegicama, koji su uvijek bili uz mene i bili mi podrška.

Najveću zaslugu za ono što sam postigla pripisujem svojim roditeljima, koji su uvijek bili tu, uz mene, bez obzira da li se radilo o teškim ili sretnim trenucima i bez kojih sve ovo što sam postigla ne bi bilo moguće. Vama posvećujem ovaj rad.

Naposljetku bih se zahvalila dečku Juri, sestrama Marti i Barbari, Marini i svim prijateljima, koji su mi bili neizmjerno velika podrška tokom cijelog studija.

Lucija Kučina

Sažetak

U ovom diplomskom radu biti će obrađene ne destruktivne metode ispitivanja nosivih konstrukcija. Napravljena će biti usporedba između destruktivnih i ne destruktivnih metoda, te opisan proces tehničke dijagnoze na konstrukciji. Pojasniti će se trajnost betonske konstrukcije koja se mora ostvariti odgovarajućim planiranjem, projektiranjem i dimenzioniranjem, ali i također i odabirom građevnih proizvoda i izvođenjem radova.

Tema rada je ne destruktivna Impact-echo metoda. Ista je teoretski obrađena, te su objašnjene teoretske postavke na temelju kojih funkcionira uređaj i način ispitivanja. Proračunima će biti dokazana ispravnost metode i svih njezinih segmenata. U praktičnom dijelu zadatka uređajem će se ispitati oštećeni most, te će se dijagnosticirati oštećenja, lokacija kao i težina oštećenja.

Ključne riječi: Impact-Echo, udarni valovi, elastični valovi, titranje, brzina vala, frekvencija, amplituda, betonske konstrukcije, zidane konstrukcije, pukotine, trajnost konstrukcije, most.

Summary

In this master work, will be discussed non - destructive methods of testing load - bearing structures. A comparison between destructive and non-destructive methods will be made, and the process of technical diagnosis on the structure will be described. The durability of the concrete structure will be clarified, which must be achieved by appropriate planning, design and dimensioning, but also by the selection of construction products and execution of works.

The topic of the this master work is the non-destructive Impact-echo method. It is theoretically processed, and the theoretical settings on the basis of which the device operates and the test method are explained. The calculations will prove the correctness of the method and all its segments.

Keywords: Impact-Echo, impact waves, elastic waves, vibration, wave velocity, frequency, amplitude, concrete structures, masonry structures, cracks, structural durability, bridge.

Popis korištenih kratica

$\boldsymbol{\rho}$	Gustoča
Q	Promjenjiva djelovanja
G	Stalna djelovanja
A	Izvanredna djelovanja
DTA	Diferencijalna toplinska analiza
TGA	Termografijska analiza
h	Visina
$\mathbf{f_{max}}$	Maksimalna frekvencija
$\boldsymbol{v_s}$	Brzina rasprostiranja
E	Youngov modul elastičnosti
$\boldsymbol{\upsilon}$	Poissonov koeficjent
$\mathbf{C_p}$	Brzina P vala
$\mathbf{C_s}$	Brzina S vala
C	Brzina vala
$\boldsymbol{\lambda}$	Valna duljina
Z	Akustička impedancija
A	Amplitda
FTT	Fourierova transformacija
$\Delta\boldsymbol{t}$	Interval uzorkovanja
$\boldsymbol{\beta}$	Faktor oblika
T	Delbljina ploče
Ai	Amplituda kretanja čestica

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Oštećenja armirano-betonskih konstrukcija i ispitivanja istih 3
2.1.1. Beton i deformacije betona 3
2.1.2. Djelovanja na konstrukciju 5
2.1.3. Trajnost AB konstrukcija 7
2.1.4. Sljeganje kao jedan od glavnih uzroka oštećenja 8
2.1.5. Proučavanje uzroka i posljedica tehničkom inspekcijom 9
2.2. Destruktivna ispitivanja 11
2.3. Nedestruktivna ispitivanja - Impact - Echo metoda 12
2.3.1. Impact – Echo metoda 12
2.3.2. Način funkcioniranja Impact - Echa 15
2.3.3. Potrebna oprema 16
3. Udarni valovi 18
3.1. Elastični udarni valovi u krutom stanju 18
3.2. Udarni valovi nastali Impact - Echom 18
3.3. Širenje elastičnog vala 23
3.3.1. P,S i R valovi 23
3.3.2. Uvjeti rasprotiranja P i S valova 25
3.3.3. Brzina vala, frekvencija i valna duljina 27
3.4. Ponašanje udarnih valova na sučelju 29
3.4.1. Refleksija i refrakcija na čvrstom sučelju 29
3.5. Oblici valova 32
3.5.1. Valni oblici za čvrstu ploču (idealiziran slučaj) 33
3.6. Frekvencijska analiza 35
3.6.1. Interval uzorkovanja 37
3.6.2. Broj uzoraka i duljina zapisa 39
3.7. Izravno mjerenje brzine valova pomoću dva pretvornika 40
3.7.1. Brzina P-vala nakon testa Impact-Echa na ploči poznate debljine 41
3.8. Ispitivanje pukotina koje se nalaze na površini 43
3.8.1. Djelomice ispunjene pukotine 44
3.8.2. Ispitivanje betonskih ploča s asfaltnim slojevima 47
3.9. Ispitivanje zidanih konstrukcija 48
4. Praktična primjena Impact - Echo metode 50
4.1. Eksploatacijsko ispitivanje mosta Mozdernjak 50
5. Zaključak 57
6. Literatura 59

1. Uvod

Impact-Echo je metoda za nerazorna ispitivanja betonskih i zidanih konstrukcija. Temelji se na korištenju udarnih valova koji se šire kroz beton i zid, a reflektiraju se na unutarnjim pukotinama i vanjskim površinama. Upotrebljava se za određivanje položaja i opsega pukotina, delaminacije, šupljina, struktura poput saće i odvajanje u ravnim, ojačanim i naknadnim betonskim konstrukcijama.

Upotrebljava se za ploče, betonske podloge za asfalt, stupove i grede, šuplje cilindre. Ovu metodu koristimo za lociranje šupljina u žljebljenim tetivnim kanalima mnogih tipova posttenzioniranih struktura. Osigurava mjerenje debljine betonskih ploča s točnošću većom od 3 %, a može locirati šupljine u podlozi izravno od ploče i kolnika.

Metoda se najuspješnije koristi za identifikaciju i kvantificiranju sumnjivih problema unutar strukture, u kontroli kvalitete, kao što su mjerenje debljine novih kolnika autocesta, te u programima preventivnog održavanja, kao što su rutinske procjene paluba mostova za otkrivanje delaminacija.

Postoje dvije vrste ispitivanja, destruktivna i nedestruktivna ispitivanja. Ova ispitivanja, posebice nedestruktivna, u ovom radu biti će detaljnije objašjena. Najčešće korištene metode ispitivanja betona i zidova su destruktivne metode. To su bušenje, ili na drugi način uklanjanje dijela konstrukcije kako bi se omogućio vizualni pregled unutrašnjosti. Iako su ove metode vrlo pouzdane, one su također dugotrajne i skupe, a nedostaci koje ostavljaju često postaju žarišne točke za pogoršanje.

Tijekom proteklih nekoliko desetljeća, niz nedestruktivnih testova, uključujući rendgenske zrake, gama zrake, radar, infracrvenu termografiju i akustične metode, postali su široko korišteni, ne samo za beton, već i za druge konstrukcijske materijale. Akustične metode su najstariji i najrašireniji oblik ispitivanja bez razaranja. One se temelje na širenju, a u nekim slučajevima i refleksiji, udarnih valova u krutim tvarima. Dobro poznati primjer je udaranje čekićem u objekt i slušanje varijacija "zvonjavom" kako bi se otkrila prisutnost unutarnjih šupljina, pukotina ili drugih oštećenja. Za procjenu oštečenja betona korištene su tri tehnike temeljene na širenju udarnih valova i diferencirane metode za generiranje i primanje udarnih valova. Neke od takvih metoda su: metoda prijenosa ili impulsne brzine, rezonantna metoda i echo metoda.

Otkrivajući nedostatke u mjerenju broja čestica betonskih elemenata, ultrazvučne metode ranije su imale mali uspjeh u ispitivanju betona, jer se visokofrekventni udarni valovi (obično 100 kHz i više) snažno smanjuju zbog heterogene prirode materijala. Početkom 1970-ih počele su se primjenjivati impact metode na ispitivanje integriteta dubokih temelja, kao što su piloti.

Istraživači iz Nacionalnog ureda izmislili su termin Impact - Echo kako bi opisali ovu metodu, te je tako izdvojili od puls-echo metoda u kojima se pretvarači koriste za stvaranje udarnih valova. Impact - Echo temelji se na korištenju prijelaznih udarnih valova generiranih elastičnim djelovanjem. Kratkotrajni mehanički udarac, proizveden lupkanjem male čelične kugle na betonsku ili zidanu površinu, koristi se za stvaranje niskih frekvencija naprezanja koje se šire u strukturu i reflektiraju se u nedostatcima i/ili vanjskim površinama. Ispitivanje Impact – Echa oslanja se na tri osnovne komponente:mehanički udarni element koji može proizvesti kratkotrajne udarce, čije se trajanje može mijenjat, prijemnik/pojačalo za mjerenje površinskog odziva, sustav za analizu signala za prikupljanje podataka za snimanje, obradu i pohranjivanje valnih signala.
Objasnit će se važni aspekti primjene Impact-Echa na zidane konstrukcije, uključujući kako akustička svojstva opeke, bloka, morta i injektora utječu na odziv, učinci na signale odjeka jezgre od opeke, i učinci na reakciju uzrokovani pukotinama na sučeljima između cigle i morta. Objašnjava se odziv zidanih konstrukcija i upotreba Impact-Echa za otkrivanje šupljina u zidovima, uključujući praznine u višestrukim zidovima i šupljinama u betonskim zidanim konstrukcijama.

Kada se pravilno koristi metoda Impact-Echa, neusporediv je uspjeh u pronalaženju oštećenja kolnicima autocesta, mostova, zgrada, tunela, brana, molova, morskih zidova i mnogih drugih vrsta građevina. Njegova uporaba rezultirala je uštedom od milijuna dolara u troškovima popravka i naknadne ugradnje mostova, potpornih zidova i drugih velikih konstrukcija. Impact-echo nije metoda koja može izvoditi testove na betonskim i zidanim konstrukcijama i uvijek znati kakve je vrste oštećenje unutar konstrukcije ili ispod vanjske ovojnice građevine. Ova metoda se koristi za kontrolu kvalitete, kao što sumjerenje debljine novih kolnika autocesta, te u preventivnom programu održavanja, poput rutinske procjene mostovskih paluba do otkrivanja raslojavanja.

U daljnjem nastavku detaljno će biti pojašnjena ova metoda nedestruktivnog ispitivanja, kao i sve vrste udarnih i elastičnih valova. Shematski će biti prikazano mjerenje pomoću dva pretvornika, kao i s jednim. Objasnit će se način ispitivanja pukotina koje se nalaze na površini i unutar konstrukcije. Kao praktičan primjer uzeto je ispitivanje mosta Mozdernjak u Općini Kneginec, te su provedena ispitivanja i analiza dobiveih rezultata ovom metodom na određenom rasteru točaka.

2. Oštećenja armirano-betonskih konstrukcija i ispitivanja istih

2.1.1. Beton i deformacije betona

Kako su osnovni sastojci betona neorganskog porijekla dugo se smatralo da je beton neuništiv. Stoga se nije previše obraćala pažnja na zaštitu i održavanje. Uvelike ovisi od sredine u kojoj se nalazi betonska konstrukcija,njezin naćin održavanja i kvaliteta materijala u samoj betonskoj mješavini. Poslije deset godina već su vidljivi znakovi propadanja.

Propadanje betonske konstrukcije dijelimo na :

- unutarnje (povezano je sa proizvodnjom,ugradnjom i održavanjem betona)
- vanjske (povezano sa uvjetima u kojima se nalazi konstrukcija)

Kako bismo osigurali trajno kvalitetne izvedbe armiranobetonskih konstrukcija moramo već u fazi projektiranja betona uzimati u obzir sljedece smjernice:

- smanjiti vodo-cementni (vezivni faktor)
- povečati agregatno-cementni (vezivni faktor)
- izabrati odgovarajući tip cementa
- izabrati kvalitetan agregat odgovarajučeg sastava
- izabrati kvalitetan dodatak koji odgovara zahtjevima
- definirati način ugradnje i zbijanja
- definirati debljinu pokrovno-zaštitnog sloja nad armaturom
- definirati način njege i zaštite

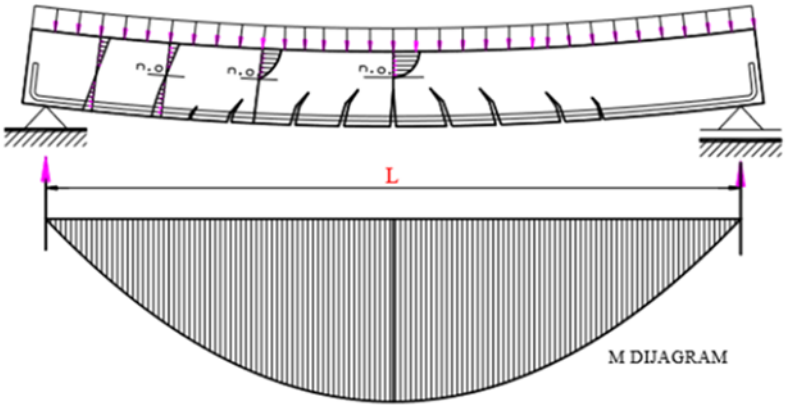
U građevini imamo problem sa oštečenjima AB konstrukcija. Korozija armature je najčešći uzrok propadanja AB konstrukcija.

Uobičajni vanjski znak pojave korozije armature su pukotine paralelne s armaturom i smeđe mrlje na površini.

U skladu sa EN 206, beton koji se predviđa za sustave od betona, armiranog i prednapetog betona, treba biti načinjen od agregata, cementa, vode i dodataka u omjeru koji će osigurati dobru obradivost i svojstva koja ne smiju biti ispod vrijednosti danih tim propisima. Za gustoću nearmiranog betona uzima se ρ = 2400 kg/m3, a armiranog ρ = 2500 kg/m3.

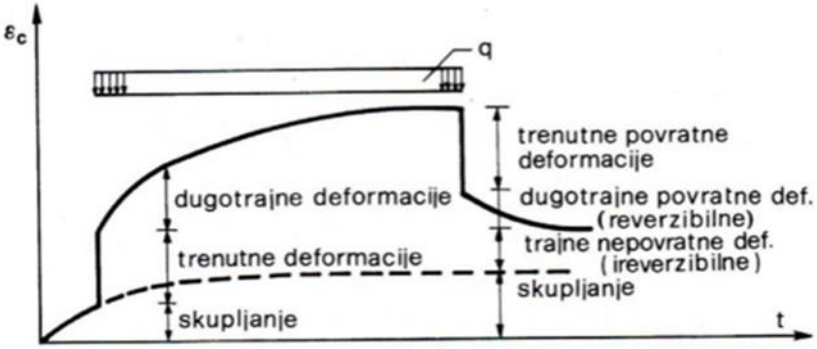
Glavne mehaničke karakteristike betona jesu njegove čvrstoće (tlačna, vlačna i posmična) i deformabilnost. Armirani beton je kombinacija dvaju po mehaničkim karakteristikama različitih materijala, betona i čelika, koji zajednički sudjeluju u nosivosti kao jedna monolitna cjelina. Beton kao i svaki kamen, ima znatno manju vlačnu nego tlačnu čvrstoću. Ukoliko promatramo prostu gredu od betona naprezana savijanjem, iznad neutralne osi vlada tlak, a ispod nje vlak. Dimenzije

poprečnog presjeka grede moraju se određivati iz nosivosti betona na vlak, dok će tlačna čvrstoća biti neiskorištena. Kod računanja nosivosti grede naprezane savijanjem uvijek se pretpostavlja da je beton pukao do neutralne osi i da ne sudjeluje u prijenosu vlačnih naprezanja. Kombinacijom betona i čelika u obliku armiranog betona postiže se dobro iskorištavanje oba materijala, pri čemu beton u prvom redu prima tlačna, a čelik vlačna naprezanja.



Slika br.2.1. Armiranobetonska greda u kojoj je beton naprezan na tlak, a čelik na vlak [1]

Deformabilnost materijala je njegovo svojstvo da se elastično i plastično deformira do trenutka razaranja. Na ova mehanička svojstva betona utječe veliki broj čimbenika, od kojih su najvažniji: kakvoća cementa, kakvoća i granulometrijski sastav ispune, vodocementni faktor, konstrukcija smjese betona, prirodne primjese u ispuni i vodi, te posebni dodaci cementu ili betonskoj smjesi da bi se postigla posebna svojstva, način pripreme i ugradnje betona u konstrukciju i njega betona.



Slika br.2.2. Razvoj deformacija betona s vremenom uz konstantno opterećenje i nakon rasterećenja [1]

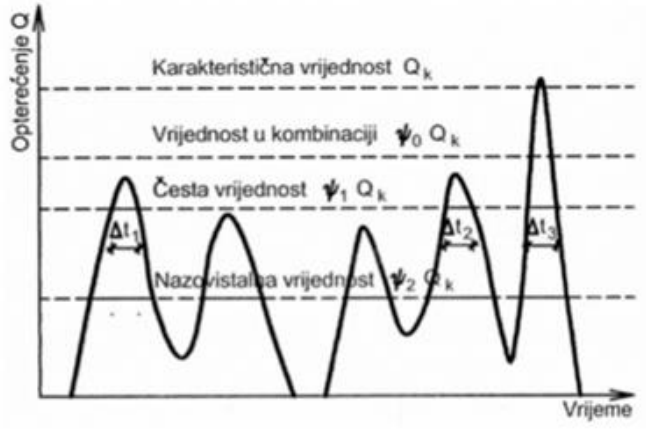
Jedan od glavnih uvjeta armiranobetonskih konstrukcija je potpuno sprezanje između betona i čelika, što znači da ne smije nastupiti klizanje armature u betonu. Pri malim posmičnim naprezanjima između armature i betona zadovoljava glatki okrugli presjek. S izradom kvalitetnijeg čelika rasla je sila u armaturi, pa je sve više prijetila opasnost da se čelik odijeli od betona. Sprečavanje klizanja postiže se upotrebom rebrastih ili sukanih profila te sukano rebrastih profila.

2.1.2. Djelovanja na konstrukciju

U sklopu europske norme EN 1991 nalaze se dijelovi koji opisuju pojedina djelovanja na konstrukcije kao vlastitu težinu, požar, snijeg, vjetar, temperaturu, djelovanja za vrijeme izvođenja, udar, eksplozije, pritisak zemlje i vode, led, valovi. Norma EN 1991 – 2 – odnosi se u potpunosti na mostove opisujući prometna djelovanja na mostove.

- stalna djelovanja G (vlastita težina, nepokretna oprema (dodatno stalno), pritisak tla, pritisak vode, prednapinjanje, slijeganje oslonaca, deformacije uslijed načina izgradnje konstrukcije)
- promjenljiva djelovanja Q (uporabno opterećenje, opterećenje snijegom i opterećenje vjetrom, djelovanje temperature, opterećenje ledom, promjena razine površine vode, opterećenje valovima)
- izvanredna djelovanja A (eksplozije, udar vozila, potres, požar, slijeganje i klizanje terena)

Stalna opterećenja su ona za koje se smatra da će vjerojatno djelovati na konstrukciju u cijelom vijeku trajanja, ili imati promjenu intenziteta ali su te promjene zanemarive u odnosu na srednju vrijednost. Promjenjiva opterećenja su ona za koje je vjerojatno da će djelovati tijekom zadane proračunske situacije te da će imati promjenu intenziteta tijekom vremena. Izvanredna opterećenja su općenito kratkog vremena trajanja, a vjerojatnost njihovog nastupanja u planiranom vijeku trajanja je mala. [1]



Slika br. 2.3. Promjenjivo djelovanje ima četiri reprezentativne vrijednosti. [1]

Pregled Hrvatskih i Europskih norma za djelovanja na konstrukciju

- HRN EN 1991-1-1: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, dio 1-1, opća djelovanja- obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada + HRN EN 1991-1-1-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)

- HRN EN 1991-1-2: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, dio 1-2, opća djelovanja- djelovanja na konstrukcije izložene požaru + HRN EN 1991-1-2-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1991-1-3: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, dio 1-3, opća djelovanja-opterećenje snijegom + HRN EN 1991-1-3-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1991-1-4: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, dio 1-4, opća djelovanja- djelovanja vjetra + HRN EN 1991-1-4-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1991-1-5: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, dio 1-5, opća djelovanja-toplinska djelovanja + HRN EN 1991-1-5-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1991-1-6: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, dio 1-6, opća djelovanja- djelovanja tijekom izvedbe + HRN EN 1991-1-6-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1991-1-7: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, dio 1-7, opća djelovanja-izvanredna djelovanja + HRN EN 1991-1-7-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1991-2: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, 2. dio, prometna opterećenja mostova + HRN EN 1991-2-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1991-3: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, 3. dio, djelovanja prouzročena kranovima i strojevima + HRN EN 1991-3-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1991-4: 2012- Eurokod 1, Djelovanja na konstrukcije, 4. dio, silosi i spremnici tekućina + HRN EN 19914-:2012/NA:2012 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1998-1: 2011- Eurokod 8, Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija, 1. dio, opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade + HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1998-2: 2011- Eurokod 8, Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija, 2. dio, mostovi + HRN EN 1998-2:2011/NA:2011 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1998-3: 2011- Eurokod 8, Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija, 3. dio, ocjenjivanje i obnova zgrada + HRN EN 1998-3:2011/NA:2011 (nacionalni dodatak)

- HRN EN 1998-4: 2011- Eurokod 8, Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija, 4. dio, silosi, spremnici i cjevovodi + HRN EN 1998-4:2011/NA:2011 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1998-5: 2011- Eurokod 8, Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija, 5. dio, temelji, potporne konstrukcije i geotehnička pitanja + HRN EN 1998-5:2011/NA:2011 (nacionalni dodatak)
- HRN EN 1998-6: 2011- Eurokod 8, Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija, 6. dio, tornjevi, jarboli i dimnjaci + HRN EN 1998-6:2011/NA:2011 (nacionalni dodatak)

2.1.3. Trajnost AB konstrukcija

Trajnost je svojstvo betonske konstrukcije koje se mora ostvariti odgovarajućim planiranjem, projektiranjem i dimenzioniranjem, ali i također i odabirom građevnih proizvoda i izvođenjem radova. Osiguranje kvalitetnog zaštitnog sloja preduvjet je osiguranju trajnosti. Na trajnost ab konstrukcija utječu i mnogi čimbenici.

Da bi se trajnost održala potrebno je zadovoljiti sljedeća tri zahtjeva:

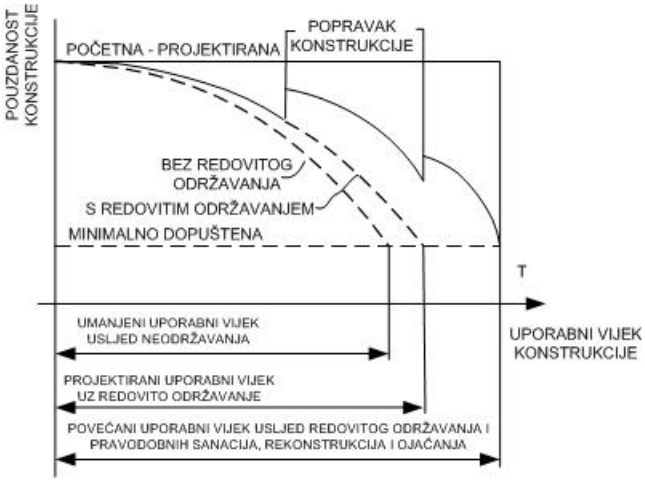
1. Projektiranj
2. Izvođenje
3. Održavanje

Projektiranje konstrukcije obuhvaća i planiranje održavanja građevine te se tijekom projektiranja može odlučiti između više strategija, primjerice kriterija minimalnog održavanja, optimalnog ukupnog troška tijekom uporabnog vijeka građevine ili pak optimalnog utjecaja građevine na okoliš.

Faza izvedbe konstrukcije je, uz projektiranje i održavanje, presudna za karakteristike koje određuju trajnost građevinske konstrukcije. Posebno valja imati na umu da je proces izgradnje velikih građevina, kao što su mostovi te razne monumentalne konstrukcije visokogradnje, vrlo složen, te da je konstrukcija tijekom same granje vrlo često izložena složenijim i nepovoljnijim stanjima naprezanja, nego u konačnoj uporabi. Tehničkim propisom za betonske konstrukcije propisuje se da građenje građevina koje sadrže betonsku konstrukciju mora biti takvo da betonska konstrukcija ima tehnička svojstva u skladu s tehničkim rješenjem građevine i u skladu sa zahtjevima za građenje danim projektom te da se osigura očuvanje tih svojstava i uporabljivost građevine tijekom njezina uporabnog vijeka.

Konstrukcija ne zadržava ovu početnu razinu sigurnosti i uporabljivosti tijekom svoga uporabnog vijeka, već se ona, uslijed vanjskih djelovanja i unutarnjih svojstava konstrukcije, postupno smanjuje, sve do potpunog iscrpljenja. Sve naknadne intervencije nakon početka uporabe

građevine nazivaju se održavanje. Samim radovima održavanja neke građevine može se bitno i u vrlo velikoj mjeri utjecati na njenu trajnost. Vlasnik građevine odgovoran je za njezino održavanje. Vlasnik građevine dužan je osigurati održavanje građevine tako da se tijekom njezina trajanja očuvaju temeljni zahtjevi za građevinu te unapređivati ispunjavanje temeljnih zahtjeva za građevinu, energetskih svojstava zgrada i nesmetanog pristupa i kretanja u građevini.



Slika br.2.4. Odnos pouzdanosti konstrukcije i uporabni vijek konstrukcije

Mehanizmi i utjecaji na propadanje armiranobetonskih konstrukcija su brojni i vrlo različiti. Na objektima izgrađenim u prošlom stoljeću jasno su vidljivi određeni tipovi oštećenja kod kojih je razvidno da su nastali zbog kombinacije određenih faktora: dugotrajne eksploatacije konstrukcije, dugotrajnog kontinuiranog opterećenja, dinamičkih i na kraju kemijskih utjecaja.

Osnovni tipovi oštećenja konstrukcija:

- karakter i vrsta oštećenja ab stupova
- proces smrzavanja i odmrzavanja
- kemijska djelovanja
- alkalno – silikatna reakcija
- slijeganje
- skupljanje
- puzanje
- ab stupovi opterećeni aksijalnom silom

2.1.4. Sljeganje kao jedan od glavnih uzroka oštećenja

Uslijed promjene opterećenja nekog područja mijenja se stanje naprezanja u tlu, što uzrokuje promjenu volumena tla. Vertikalna komponenta volumne deformacije naziva se slijeganjem. U slučajevima kada je tlo saturirano, najprije promjenu naprezanja preuzima voda (raste porni tlak).

To izaziva neravnotežu u hidrauličkom polju u podzemnoj vodi, pokretanje vode s mjesta višeg potencijala prema mjestima nižeg potencijala.

Uzroci slijeganja mogu biti različiti:

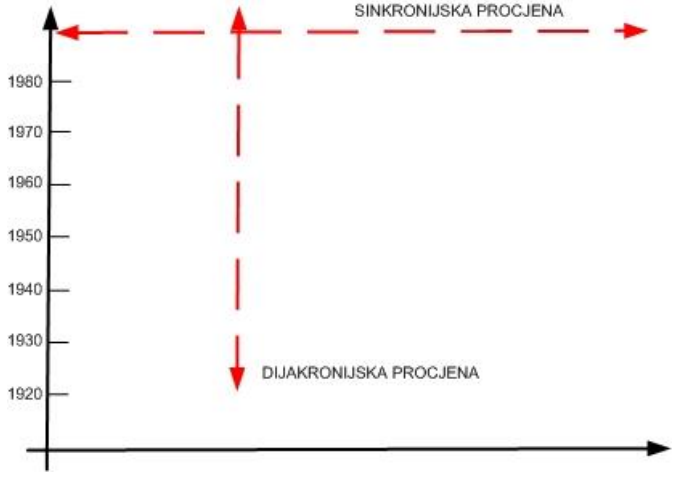
- isušivanje površinskih slojeva tla
- blizina drveća sa širokim korijenim sustavom
- puknuća cijevi, kanalizacijskih odvoda, i sl.
- iskopi u blizini građevine
- različitost u dimenzijama i dubinama temeljenja
- tla različitog litološkog sastava
- vibracije

Slijeganje je teško je procijeniti jer je nehomogeno, ima složene odnose naprezanja i deformacija, teško je odrediti reprezentativne parametre deformabilnosti tla, nepraktična je primjena složenih teorija koje bolje opisuju tlo od teorije elastičnosti, slijeganje slojeva kod koherentnih tala razvija s vremenom (konsolidacija). Zbog toga je određivanje slijeganja u mehanici tla ispravnije nazvati procjenom (prognozom) nego proračunom.

2.1.5. Proučavanje uzroka i posljedica tehničkom inspekcijom

Radimo procjenu zgrade ili uspoređujemo skupine zgrada i njihove izvedbe ili stanja u određenom trenutku ili vremenskom razdoblju. Pregledi zgrada, zapsi o stanju i istraživanju o propadanju su tipični primjeri sinkronijskih procjena.

Zgrade se mijenjaju ili razvijaju tijekom vremena. Obično se radi o procesu koji provode povjesničari arhitekture i geodeti za održavanje zgrada koji žele procijeniti stanje ili izvedbu tijekom izmjerenog vremenskog razdoblja. Pregledi održavanja, inspekcije građevinske baštine ili očuvanja i povijesna istraživanja starih svojstava tipične su metode dijakronijskih procjena.



Slika br.2.5. Sinkronijska i dijakronijska procjena

Sinkronijske procjene ne moraju se nužno provoditi unutar postojećeg vremenskog razdoblja. Mogu se uzeti procjene iz bilokojeg vremena iz povijesti.
Dijakronijske procjene mogu se provesti u diskretnim razdobljima u prošlosti gdje se proučavaju trendovi ili obrasci tijekom vremena.

Osnovni postupci inspekcije:

- Usvajanje zahtjeva klijenta.
- Utvrđivanje vrste i opsega istraživanja
- Priprema za istraživanje (osiguranje pristupa lokaciji i nabava opreme)
- Provođenje ankete (dokumentacija treće strane).
- Preliminarni uvid.
- Istraživanje (vanjsko i unutarnje).
- Usvajanje nalaza i analiza rezultata.
- Izrada izvješća i zaključka.

Istraživanje na licu mjesta sastoji se od 3 ključne komponente:

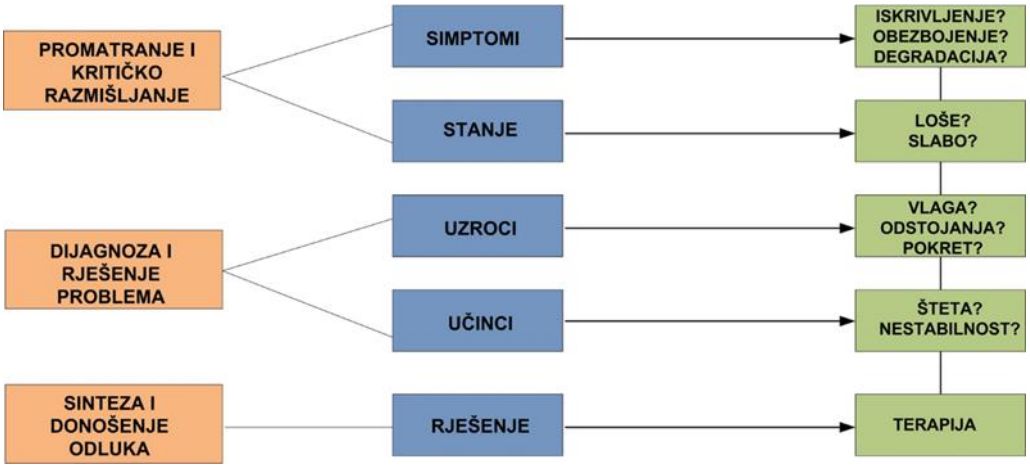
- Vanjska izmjera - vanjska fasada, gledano odozgo prema dolje i bilježeći nedostatke.
- Unutarnja kontrola - pregled unutarnjih zidova na gornjim razinama, u smjeru kazaljke na satu kako bi se pokrile sve prostorije i korelacija između grešaka zabilježenih izvana o utjecaju koji imaju iznutra.
- Pregled okolnog područja - identificiramo sve elemente izvana, što može rezultirati problemima unutar građevinskog područja. Npr. drveće, dokaz lokalnog slijeganja uzrokovanog rudarskim radovima.

Izrađujemo liste proceduralnih provjera na licu mjesta kako bi se osigurao sustavan i strukturiran pristup prikupljanju, tumačenju i izvješćivanju o nalazima. Prikupljamo nalaze evidencije dokaza, npr. skice, detaljne bilješke ili digitalne fotografije. Dužni smo prikupiti informacije i podatke na prioritetan način, eliminirati pogrešne ili sumnjive podatke. Iste treba provjeriti (ponovnom posjetom ili ponovnom procjenom) prije eliminacije.

Interpretiramo i potvrđujemo dokaze - objašnjavamo nalaze i detalje implikacije za klijenta, npr. rizici, troškovi. Potrbno je utvrditi glavna kritična područja. Sve ono što je viskokog rizika provjeravaju i drugi stručnjaci. Pregled rezultata - kritički ocijenjujemo nalaze i predložene zaključke i uspoređujemo ih s početnim kako bi se osigurala točnost i da ne postoji izloženost rizicima ili optužbama za nemarnost.

Ispitivanja na terenu poduzimaju se na licu mjesta, obično su točniji i reprezentativni za izvedbu jer su materijali ili proizvodi neporemećeni i nisu izmijenjeni ili kontaminirani uklanjanjem. Npr. infracrvena termografija i ispitivanje nepropusnosti. Laboratorijska ispitivanja

uključuje uklanjanje uzorka materijala za naknadno ispitivanje u testnom laboratoriju. Laboratorijski provedeni testovi pružaju iznimno preciznu reprezentaciju uzorka.



Slika br.2.6. Proces dijagnostike

2.2. Destruktivna ispitivanja

Ispitivanje čvrstoće betona obvezna je mjera u provedbi same izgradnje. Radi se za najtočnije i objektivnije određivanje mehaničkih svojstava materijala, što omogućuje predviđanje njegovog ponašanja pod utjecajem različitih opterećenja. Važnost takvih testova i ispravno tumačenje njihovih rezultata teško je procijeniti. Zato stručnjaci preporučuju u svakom slučaju provođenje takvih provjera, bez obzira na svrhu i opseg konstrukcije. Snaga betona je njegova sposobnost da opaža opterećenja i naprezanja (napetost, kompresija, savijanje, smicanje) i da im se odupre zbog unutarnjeg naprezanja. U tom slučaju, materijal se ne smije urušavati u jednom ili drugom obliku (raspad, pukotina, delaminacija). Delaminacija betona predstavlja svako oštećenje bez obzira na uzrok, naprimjer gubitak krutosti ili konstrukcijski nedostatak.

Laboratorij provjerava čvrstoću betona za različite oblike kontrole koji se izvode prema različitim tehnološkim shemama.

Uobičajeni destruktivni postupak ispitivanja betona sastoji se od vađenja valjaka promjera 40 mm iz oštećenog dijela konstrukcije i ispitivanje tlačne čvrstoće prema važećim normama [2] Poteškoće pri uzimanju uzoraka iz oštećene konstrukcije se mogu pojaviti zbog nemogućnosti vađenja samog betonskog uzorka bez armature ili ukoliko je konstrukcijski element pretrpio jača oštećenja zbog zadržavanja cjelovitosti uzorka. Potrebno je također uzeti i ispitati uzorke iz neoštećenog dijela konstrukcije, ako je to moguće [3];

Petrografskom se analizom pod mikroskopom promatraju izotropija, vrsta i gustoća pukotina na tankim uzorcima izrađenim iz valjaka. Cementna pasta postaje anizotropna pod polarizirajućim

svijetlom na temperaturama većim od 500°C. Pukotine se također mijenjaju s povećanjem temperature; na temperaturama nižim od 300°C pukotine se stvaraju na granici agregata i cementne matrice, a na temperaturama iznad 500°C pukotine se stvaraju i kroz cementnu matricu [3];

Diferencijalna toplinska analiza (DTA) i termogravimetrijska analiza (TGA) odnosi se na analizu promjena svojstava uzorka materijala koje su nastale djelovanjem visoke temperature. Diferencijalnom toplinskom analizom mjeri se temperatura uzorka i promjena ove temperature u odnosu na referentni materijal, termogravimetrijskom analizom prati se promjena težine uzorka prilikom njegovog zagrijavanja. Obje metode ispitivanja se koriste da bi se odredile promjene u strukturi betona izloženog visokim temperaturama temeljem fizikalno – kemijskih promjena koje se događaju u cementu. DTA i TGA daje zadovoljavajuće rezultate ukoliko se radi o betonu s nemješanim cementom. Cementi s dodatkom letećeg pepela ili granuliranom zgurom visokih peći skoro ne pokazuju nikakve promjene pri zagrijavanju [3];

Ispitivanje preostale krutosti je vrsta tlačnog ispitivanja koja se provodi na valjkastim uzorcima dužine 175 mm i promjera 75 mm. Uzorci se izlažu cikličnom opterećenju u rasponu od 0 do 45 MPa, a deformacije se mjere u središnjem dijelu uzorka u promjeru od 67 mm. Ispitivanja se provode za različito definirane module elastičnosti i različite histereze između ciklusa opterećenja [3].

Ispitivanje požarnog ponašanja (FB test) se provodi na način da se jezgra izvađena iz opožarene konstrukcije izreže u diskove širine 15 mm, a zatim se mjeri adsorpcija vode [3].

2.3. Nedestruktivna ispitivanja - Impact - Echo metoda

2.3.1. Impact – Echo metoda

Impact – Echo je metoda za nerazorna ispitivanja betonskih i zidanih konstrukcija.
Temelji se na korištenju udarnih valova koji se šire kroz betonske i zidane konstrukcije, a reflektiraju se na unutarnjim pukotinama i vanjskim površinama.
Upotrebljava se za određivanje položaja i opsega pukotina, delaminacija, šupljina, strukturama koje su nalik saćama, i ojačanjima u betonskim konstrukcijama. Upotrebljava se za ploče, asfaltne podloge, stupove i grede, šuplje cilindre. Ovu metodu koristimo za lociranje pukotina u tetivnim kanalima mnogih tipova posttenzioniranih struktura.

Impact - Echo metoda osigurava mjerenje debljina betonskih ploča s točnošću većom od 3 %, a može locirati pukotine izravno na ploči ili kolniku.

Metoda se najuspješnije koristi za identifikaciju i kvantifikaciju sumnjivih problema unutar strukture, u kontroli kvalitete, kao što su mjerenje debljine novih kolnika autocesta, te u programima preventivnog održavanja, kao što su rutinske procjene paluba mostova, te za otkrivanje delaminacija.

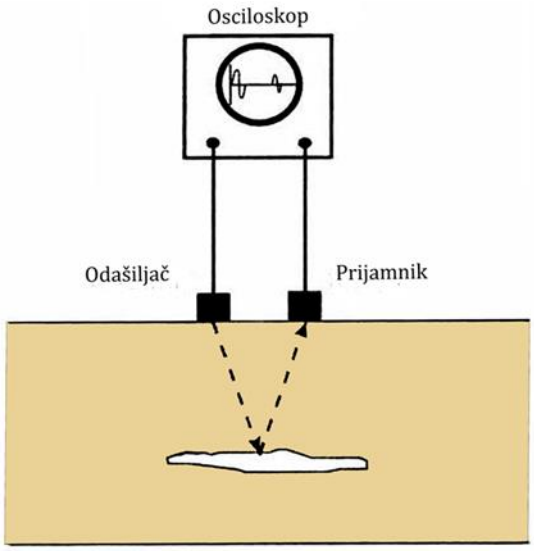
Intervencija na konstrukciji može biti ne samo u svrhu da se sanira već postojeća šteta, nego i radi prevencije mogućih oštećenja. Pobojšati konstrukciju možemo tako da ju ojačamo ili smanjenjem seizmičkih djelovanja. Izradi kvalitetne dokumentacije o samoj sanaciji oštečenja objekta mora prethoditi precizna identifikacija oštećenja. Najčešće korištene metode ispitivanja betona i zidova su destruktivne metode.

To su bušenje, ili na drugi način uklanjanje dijela konstrukcije kako bi se omogućio vizualni pregled unutrašnjosti. Iako su ove metode vrlo pouzdane, one su također dugotrajne i skupe, a nedostaci koje ostavljaju često postaju žarišne točke za pogoršanje.

Tijekom proteklih nekoliko desetljeća, niz nedestruktivnih testova, uključujući rendgenske zrake, gama zrake, radar, infracrvenu termografiju i akustične metode, postali su široko korišteni, ne samo za beton, već i za druge konstrukcijske materijale. Akustične metode su najstariji i najrašireniji oblik ispitivanja bez razaranja. One se temelje na širenju, a u nekim slučajevima i refleksiji, udarnih valova u krutim tvarima. Dobro poznati primjer je udaranje čekićem u objekt i slušanje varijacija "zvonjavom" kako bi se otkrila prisutnost unutarnjih šupljina, pukotina ili drugih oštećenja. Za procjenu oštečenja betona korištene su tri tehnike temeljene na širenju udarnih valova i diferencirane metode za generiranje i primanje udarnih valova. Neke od takvih metoda su: metoda prijenosa ili impulsne brzine, rezonantna metoda i echo metoda [7]. U metodama Impact - Echo uvodi se ispitni medij na površini, gdje se pristupa pomoću sonde ili mehaničkim udarcem.

Ako se koristi odašiljač, metoda se naziva puls-echo; ako se koristi mehanički utjecaj, metoda se naziva Impact – Echo.

Kao što je prikazano na slici 7, u pulsnim echo tehnikama puls se širi kroz medij i reflektira se materijalnim defektima ili međusobnim razmakom između područja različitih gustoća i/ili elastičnih modula. Ti reflektirani valovi ili odbljesci prate se pomoću drugog pretvarača spojenog na površinu ispitnog objekta blizu izvora vala. Pretvarač se prikazuje na osciloskopu ili sličnom uređaju.



Slika br.2.7. Shema puls-echo tehnike primijenjene na ispitivanje betona.

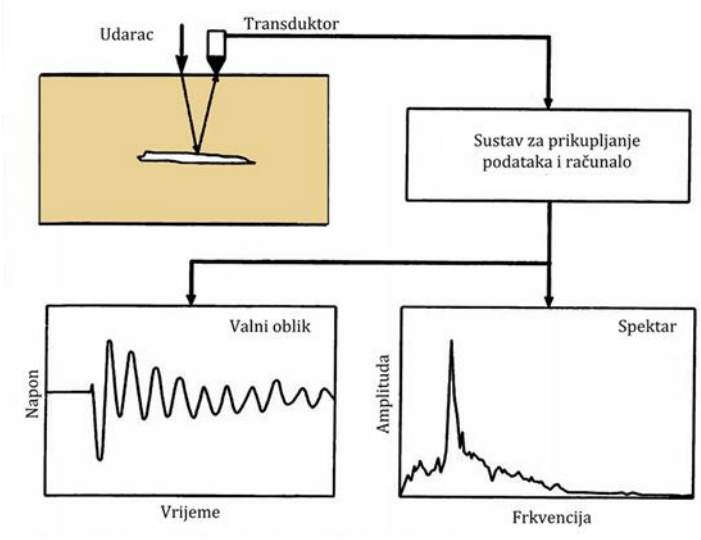
Pomoću vremenske baze na zaslonu određuje se vrijeme putovanja impulsa.
Ako je brzina vala u mediju poznata, vrijeme putovanja se može koristiti za određivanje lokacije oštečenja ili sučelja gdje se refleksija događa.
Od njihovog uvođenja u ranim 1940. , ultrazvučne pulsne-echo metode su razvijene u velikoj mjeri i postale su učinkovite, svestrane i pouzdane metode bez razaranja za metale, plastiku i druge homogene materijale.

Otkrivajući nedostatke u mjerenju broja čestica betonskih elemenata, ultrazvučne metode ranije su imale mali uspjeh u ispitivanju betona, jer se visokofrekventni udarni valovi (obično 100 kHz i više) snažno smanjuju zbog heterogene prirode materijala.

Početkom 1970-ih počele su se primjenjivati impact metode na ispitivanje integriteta dubokih temelja, kao što su piloti.
Istraživači iz Nacionalnog ureda izmislili su termin Impact - Echo kako bi opisali ovu metodu, te je tako izdvojili od puls-echo metoda u kojima se pretvarači koriste za stvaranje udarnih valova.

2.3.2. Način funkcioniranja Impact - Echa

Impact - Echo temelji se na korištenju prijelaznih udarnih valova generiranih elastičnim djelovanjem. Kratkotrajni mehanički udarac, proizveden lupkanjem male čelične kugle na betonsku ili zidanu površinu, koristi se za stvaranje niskih frekvencija naprezanja koje se šire u strukturu i reflektiraju se u nedostatcima i/ili vanjskim površinama.



Slika br.2.8. Pojednostavljeni dijagram metode Impact - Echo

Površinske pomake uzrokovane refleksijama tih valova bilježi sonda, smještena u blizini udara. Dobiveni signali pomaka prema vremenu pretvaraja se u frekvencijsku domenu i dobivaju se dijagrami amplitude prema frekvenciji (spektri).

Višestruke refleksije udarnih valova između udarne površine, pukotina i/ili oilernih vanjskih površina dovode do prolaznih rezonancija, koje se mogu identificirati u spektru, te se koriste za procjenu integriteta strukture ili za određivanje mjesta oštećenja.

2.3.3. Potrebna oprema

Ispitivanje Impact – Echa oslanja se na tri osnovne komponente:

- mehanički udarni element koji može proizvesti kratkotrajne udarce, čije se trajanje može mijenjat
- prijemnik/pojačalo za mjerenje površinskog odziva
- sustav za analizu signala za prikupljanje podataka za snimanje, obradu i pohranjivanje valnih signala

Slika 2.9. Prior za ispitivanje Impact – Echa [6]

1. Udarači: skup od 10 kaljenih kuglica od čelika na opružnim šipkama, koji se koriste za stvaranje valova naprezanja koji se šire unutar konstrukcije, a odražavaju ih nedostaci ili vanjska površina.
2. Ručne sonde: cilindrične su i ovakvi modeli se koriste za otkrivanje signala generacijom višestruke refleksije valova unutar strukture.
3. Pretvarač s dvije glave: koristi se za mjerenje brzine vala bilježenjem vremena putovanja vala naprezanja između dva elementa pretvarača koji se drže na fiksnoj udaljenosti (300 mm) na površini konstrukcije.
4. Analogno-digitalni sustav za prikupljanje podataka: prima i digitalizira naponsko-vremenske signale od pretvarača i šalje ih računalu (14-bitna razlučivost, maksimalna brzina uzorkovanja od 2 MHz na svakom od dva kanala).
5. Prijenosno računalo.
6. Računalni softver: softverImpact-E, zasnovan na sustavu Windows (na CD-u), analizira signale, vrši izračune i prikazuje rezultate ispitivanja na zaslonu računala.
7. Dva BNC kabela: za spajanje pretvarača na sustav za prikupljanje podataka.

8. Kabel za USB priključak za povezivanje sustava za prikupljanje podataka na serijski priključak ili USB priključak računala.
9. Punjač baterija
10. DC Power Supply:ulaz 6 -24v DC izlaz 12V DC za punjenje baterija u sustavu za skupljanje podataka.
11. Tiskani materijali

Sustav pruža korisniku sljedeće pogodnosti:

- Samo jedna površina mora biti dostupna za testiranje.
- Brzo otkrivamo debljinu nepoznatog člana, bez izbočenja.
- Otkriva nedostatke poput šupljina betona, betonskih saća, pukotina i raslojavanja.
- Mjesto dubine defekata i točan položaj

3. Udarni valovi

3.1. Elastični udarni valovi u krutom stanju

U klasičnoj dinamici krutog tijela pretpostavlja se da kada se primijeni sila u jednoj točki na izoliranom tijelu, cijelo tijelo reagira u tom trenu, sila prolazi linearno sa kutnim ubrzanjem.
U stvarnosti, primijenjena sila također proizvodi deformacije unutar čvrstog tijela.
Ako je deformacija unutar elastičnog raspona i ako se sila primjenjuje na kratke periode ili se brzo mijenja s vremenom - kao u slučaju elastičnog udara - učinci se mogu razmatrati u smislu širenja elastičnih udarnih valova unutar tijela.

U literaturi u kojoj se objašnjava teorija širenja valova u tekućinama i elastičnim krutinama, navodi se da samo jedna vrsta elastičnog vala, nazvana valom tlaka ili zvučnim valom, može razmnožavati u fluidnom mediju (medij koji ne može podnijeti smicajni napon).

Međutim, dvije vrste elastičnih valova mogu se širiti u krutom stanju: dilatacijski valovi (koji se nazivaju valovi kompresije, primarni valovi, ili P-valovi i valovi izobličenja (koji se nazivaju smični valovi, sekundarni valovi ili S-valovi).

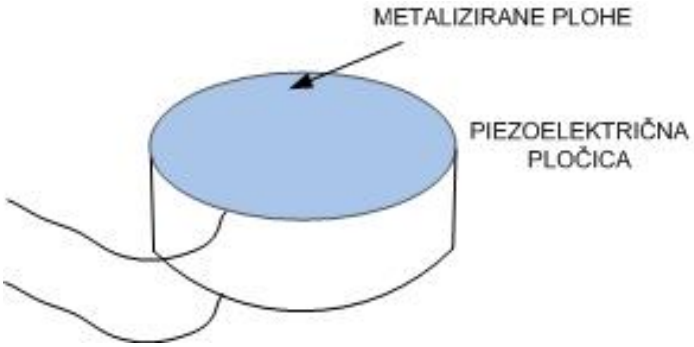
Treća vrsta elastičnog vala, poznata kao Rayleighovi valovi (R-valovi), mogu se širiti duž površine krutine.

3.2. Udarni valovi nastali Impact - Echom

Udarni valovi mogu se generirati bilo kojim mehanizmom koji može proizvesti silu koja se brzo mijenja s vremenom, kao što je piezoelektrični pretvornik ili sudar dvaju čvrstih tijela.

Postoje dvije vrste piezoelektričnih materijala. Prvu grupu čine prirodni materijali, koji piezoelektričnost posjeduju radi asimetrije kristalne strukture. Karakteristični predstavnik ove grupe je kvarc, koji je dugo vremena bio i jedini materijal iz kojeg su se izrađivali pretvornici, aktivni dio ultrazvučne sonde. Druga grupa piezoelektričnih materijala je umjetna. U pravilu, umjetni materijali su čvršći i kemijski inertni. Odlikuju se niskom proizvodnom cijenom i jednostavnošću primjene u odnosu na alternativna rješenja. Često nazivani sintetički pretvornici spadaju u ovu grupu, a proizvode se polariziranjem pločica po debljini, tako da se podudaraju smjer električnog i elastičnog polja. To su polikristalne keramike.

Piezoelektrični pretvornik se sastoji od komada piezoelektričnog materijala s bar s dvije elektrode postavljene na dijelu površine, vidljivo na slici 3.1.



Slika br.3.1. Piezoelektrični pretvornik

Osnovna je prednost piezoelektričnih pretvornika u tome što omogućuju stvaranje mehaničkih titraja u širokom rasponu frekvencija. Oni su danas najbrojniji među pretvornicima ultrazvučnih uređaja. Piezoelektrični efekt je prirodno svojstvo nekih kristala poput kvarca (SiO2) ili turmalina, koji su ujedno i najpoznatiji piezoelektrici. Za ultrazvučne pretvornike u najvećoj mjeri se primijenjuju umjetno dobiveni materijali koji imaju znatno prikladnija svojstva od prirodnih kristala. [4]

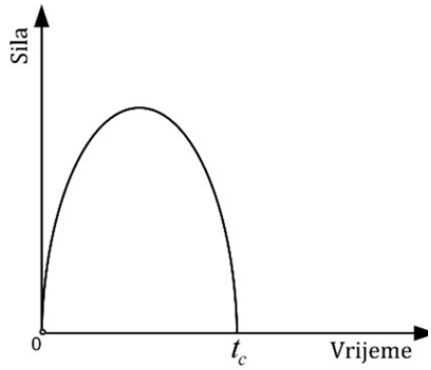
U ispitivanju Impact - Echa, udarni valovi generiraju se mehanički i to udaranjem malom čeličnom kuglom (tipično promjera 3 mm do 15 mm) na površinu konstrukcije.

Među važnim parametrima koji karakteriziraju impact su trajanje ili vrijeme kontakta udarca, tc, pomicanje kugle, D i kinetička energija sfere pri udaru.

Karakteristike udarnih valova koje generira elastični utjecaj kugle na čvrstu tvar, određuje njihovu sposobnost da pridonesu otkrivanju oštećenja u materijalu.

Varijacija sile udarca s vremenom, koja se naziva funkcija sila-vrijeme, točno je predstavljena polu-sinusnom krivuljom, kao što je prikazano na slici 3.2.

Trajanje ili vrijeme kontakta, tc, između malih čeličnih kuglica i betonskih površina je kratko, u rasponu od oko 15 do 100 μs.



Slika br.3.2. Polu-sinusna krivulja odnosa funkcije sile i vremena

Tijekom udara dio kinetičke energije u sferi pretvara se u elastičnu valnu energiju u betonu.
Maksimalna sila je proporcionalna kinetičkoj energiji pokretne kugle pri udaru, a pomaci čestica rezultirajućih udarnih valova proporcionalni su toj sili.
Vrijeme kontakta je linearna funkcija promjera kugle i ima vrlo slabu ovisnost o kinetičkoj energiji. Za čeličnu sferu koja je pala na betonsku ploču normalne čvrstoće s visine h, može biti izrađena pomoću jednadžbe :

$$t_c = \frac{0.0043\,D}{h^{0.1}} \tag{1}$$

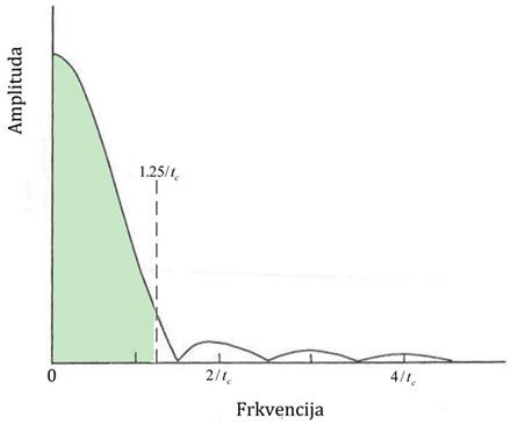
t_c je u sekundama, a D i h u metrima.
U praksi, čelične kuglice obično se ne ispuštaju, već su pričvršćene na opružni mehanizam koji se mehanički ili električno aktivira kako bi proizveo udar.
Ekvivalent h tipično se kreće od oko 0,2 do 4 m, a odgovarajući raspon od h0.1 je 0,85 do 1,15.

Tako ovisnost vremena kontakta na visini pada (na kinetičku energiju pri udaru) slaba, i može se zanemariti, što dovodi do jednostavnog linearnog odnosa između kontaktnog broja i promjera kugle.

$$t_c = 0.0043\,D \tag{2}$$

Impact udarni valovi sastoje se od široke raspodjele frekvencija, a ta raspodjela je određena funkcijom sila-vrijeme.
Raspodjela amplitude i frekvencije u udarnim valovima nastalih djelovanjem kugle na krutinu s trajanjem tc prikazana je na slici.

Ta se raspodjela dobiva izračunavanjem Furijeove transformacije funkcije sila-vrijeme.



Slika br.3.3. Raspodjela amplitude i frekvencije u udarnim valovima

Budući da je frekvencija inverzna vremenu, horizontalna skala može se izraziti kao $1/t_c$. Funkcija je nula na 1,5/t, što znači da udarni valovi nemaju komponentu s tom frekvencijom. Naknadne nule su na $2.5/t_c$, $3.5/t_c$, itd. Relativna amplituda je vrlo mala iznad prve nule. Amplitude udarnih valova dovoljne za ispitivanje Impact - Echa su na frekvencijama ispod $1,25/t_c$ (zasjenjeno područje).

Ako definiramo fmax = 1,25/ t_c kao maksimalnu frekvenciju korisne energije, i kombiniramo to s jednadžbom (2), rezultat je približan odnos između f_{max} i promjera kugle D.

$$t_c = 0.0043\, D \qquad (3)$$

$$f_{max} = \frac{291}{D}$$

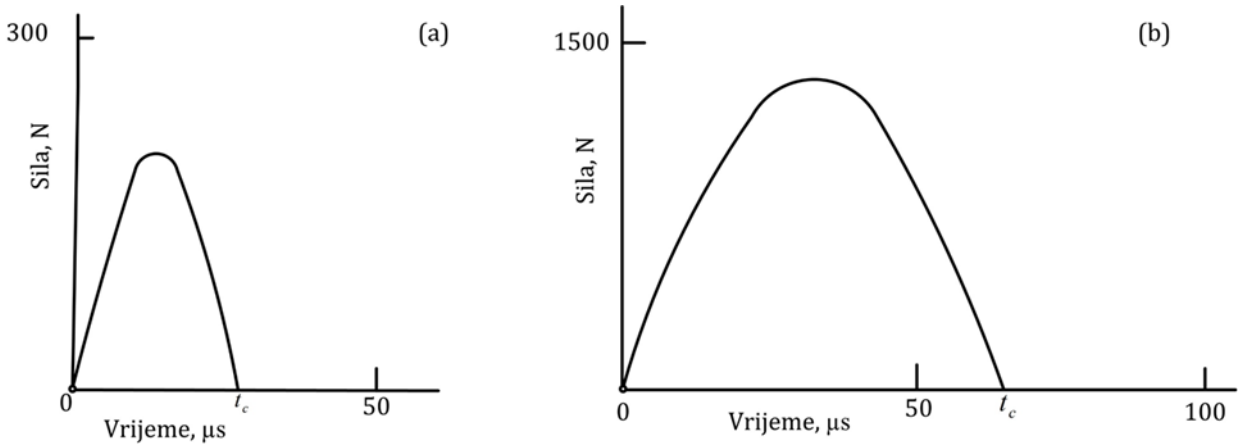
f_{max} je u Hz, a D je u metrima.

Kugla promjera 3 mm daje korisne frekvencije do oko 97 kHz, dok jedna koja ima promjer od 20 mm daje korisne frekvencije do samo oko 15 kHz.

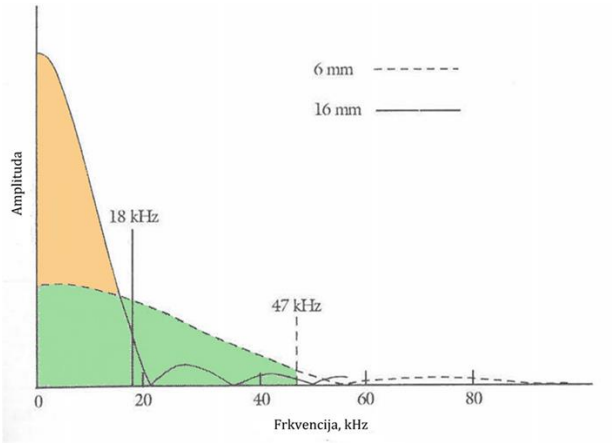
Za brzinu vala od 4000 m /s, odgovarajuća minimalna razina je 41 i 267 mm.

Utjecaj promjera kugle na vrijeme kontakta i maksimalnu korisnu frekvenciju (prikazano na slikama 3.4. i 3.5.).

Prva slika uspoređuje vrijeme kontakta, a druga frekvencijski raspon i maksimalnu korisnu frekvenciju, koje proizvodi udar kuglom promjera 6 mm i 16 mm.



Slika br.3.4. Odnos vremena i sile



Sika br. 3.5. Prikaz maksimalne korisne frekvencije koju proizvodi udar

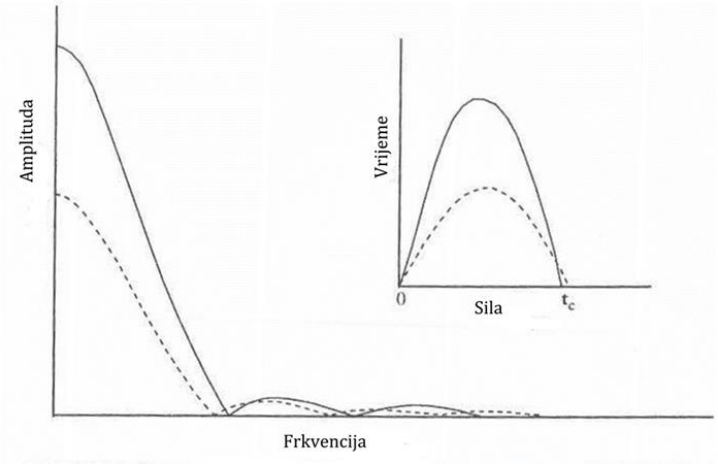
Utjecaj manje kugle ima kraće vrijeme kontakta i stvara udarne valove s korisnim amplitudama u širem rasponu frekvencija, ali je maksimalna amplituda niža.

Maksimalna korisna frekvencija je 47 kHz, u usporedbi s 18 kHz za kuglu od 16 mm.

Kako se promjer kugle smanjuje, raspon korisnih frekvencija postaje veći, ali to povećava vjerojatnost da će se valovi višeg frekvencijskog napona raspršiti prirodnim nehomogenostima u betonu.

U praksi je dokazano da najmanja kugla korisna u ispitivanju impact-echa ima promjer od oko 3 mm. Maksimalna amplituda kretanja čestica u udarnim valovima izazvanim udarcima je proporcionalna maksimalnoj snazi udara.

U tipičnim ispitivanjima Impact-Echa sa čeličnim kuglicama pričvršćenim na opružne šipke, kuglice se odbijaju za 15 do 25 mm i oslobađaju, stvarajući maksimalnu silu reda veličine 1 kN. Povećanje sile udara povećava amplitudu pomaka čestica, kao što je prikazano na slici 3.6.



Slika br.3.6. Usporedba krivulja sile i vremena i raspodjele frekvencija za dva impact ispitivanja sa istom kuglom, a s različitim brzinama sudara.

Maksimalna sila je proporcionalna kinetičkoj energiji kugle pri udaru, koja je pak proporcionalna visini (ili "ekvivalentnoj visini") iz koje se ispušta.
Međutim, kao što je prikazano jednadžbom (1), visina pada ima vrlo mali učinak na vrijeme kontakta, a time i na maksimalnu korisnu frekvenciju.
Udvostručavanje visine pada (koja udvostručuje maksimalnu snagu udarca) smanjuje vrijeme udarca za manje od 10 posto.

3.3. Širenje elastičnog vala

Širenje prolaznih udarnih valova u heterogenom ograničenom krutom stanju, kao što je element betonske konstrukcije, složen je fenomen.

U nastavku objašnjenje, kao podloga za razumijevanje i korištenje metode Impact-Echa

3.3.1. P,S i R valovi

Šire se radijalno od žarišta (hipocentra) u svim smjerovima.
Primarni ili P-valovi su longitudinalni potresni valovi koji se najbrže rasprostiru i prvi stižu do seizmoloških postaja. Njihova je brzina oko 6 km/s kroz površinske stijene, do 14 km/s u blizini Zemljine jezgre, 8 km/s u vanjskome sloju Zemljine jezgre i 11 km/s u blizini Zemljina središta.

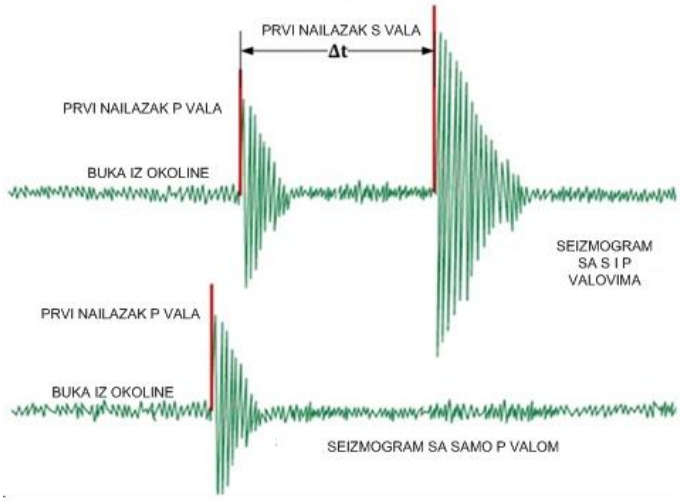
Sekundarni ili S-valovi su transverzalni potresni valovi koji stižu do seizmoloških postaja nakon primarnih. Šire se samo kroz čvrstu tvar. Njihova je brzina oko 3,4 km/s u blizini površine, do 7,2 km/s u dubini, blizu granice s tekućom vanjskom jezgrom. Na temelju vremenskoga razmaka između pristizanja primarnih i sekundarnih potresnih valova određuje se epicentralna udaljenost neke seizmološke postaje.

U geofizici se praćenjem i analiziranjem širenja potresnih valova, koji se na granicama slojeva različitih svojstava lome, reflektiraju i konvertiraju, mogu utvrditi dubine i svojstva pojedinih Zemljinih slojeva. Takvi se postupci koriste i pri traženju nalazišta nafte i plina; (gutenbergov diskontinuitet; mohorovičićev diskontinuitet).

Vremenski razmak između pojave P-valova i S-valova na seizmološkim postajama raste povećanjem udaljenosti seizmološke postaje od epicentra potresa. Amplituda titranja S-valova je približno pet puta veća od amplitude P-valova, pa uzrokuju jače podrhtavanje tla na površini. S-valovi nose oznaku S zato jer su sekundarni tj. oni pristižu na mjesto opažanja tek nakon P-valova. S-valovi nazivaju se još i poprečni ili transverzalni seizmički valovi.
U P-valovima, kretanje čestica na fronti vala paralelno je s smjerom širenja, stvarajući tlačnu ili vlačnu napetost. U S-valovima, kretanje čestica je okomito na smjer širenja, stvarajući smično

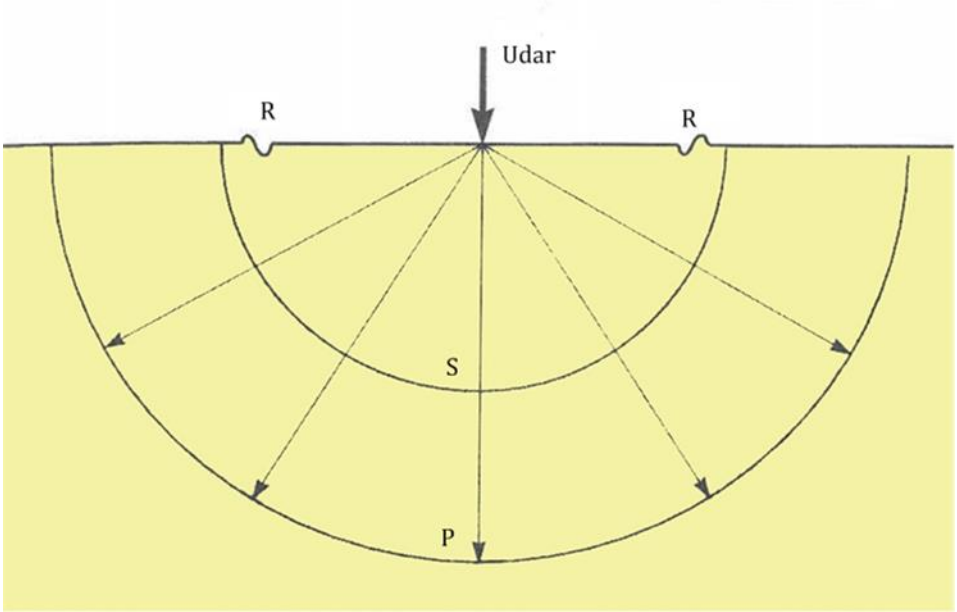
naprezanje. R-valovi putuju duž čvrstih površina, a karakterizira ih gibanje čestica koje je retrogradno eliptično. U slučaju udarnih valova, P i S valovi šire se čvrsto duž sfernih valnih područja, a R-valovi putuju radijalno prema van po površini.

Vrste valova shematski su ilustrirane na slici 3.7. .



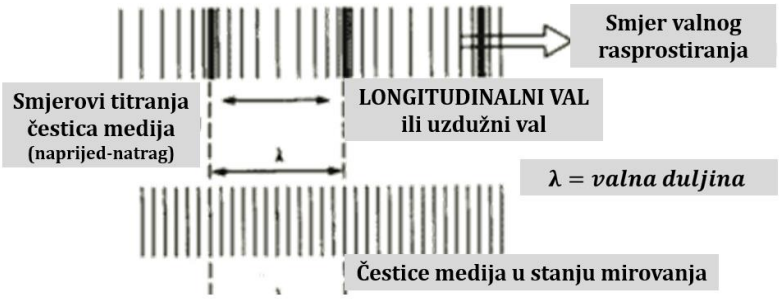
Slika br.3.7. Seizmogramski prikaz
nailaska P-vala a potom i S-vala do neke seizmološke postaje

Važno je uočiti da seizmograf prvo registrira nailazak P-valova, a nakon nekog vremena (ΔT) registrira i nailazak S-valova



Slika br.3.8. Shematski prikaz udarnih valova uzrokovanih udarom

Naziv P valova (uzdužni ili longitudinalni) proizlazi iz činjenice što čestice oscilirajuće sredine (medija) titraju duž linije rasprostiranja tih valova.



Slika br. 3.9. Prikaz smjera valnog rasprostiranja i smjerova titranja

Naziv poprečni ili transverzalni val koji se još koristi za S-valove proizlazi iz činjenice da pri tom valnom gibanju čestice (molekule) osciliraju poprečno tj. transverzalno na pravac (liniju) valnog gibanja.

Brzina rasprostiranja S-valova manja je od brzine P-valova i otprilike iznosi $v_s = 60\%\ v_p$

Dok se P i S valovi rasprostiru kroz 3 dimenzije (prostorni valovi), R i L valovi gibaju se u dvije dimenzije tj. po površini kugle zemaljske. Oba valna gibanja nastaju kao posljedica složene transformacije P i S valova pri njihovom nailasku na površinu kugle zemaljske. Brzina širenja R valova u tipičnom homogenom elastičnom mediju iznosi oko 90% v_S, a slično je s brzinom širenja L valova, premda su nešto sporiji od R valova, dakle:

$$v_R \cong 90\% v_S \qquad (4)$$
$$v_L \cong v_R(90\% v_s)$$

3.3.2. Uvjeti rasprotiranja P i S valova

Osobito je važno istaknuti činjenicu da se P-valovi šire kroz svaki medij (čvrsti, tekući, plinoviti) dok se S-valovi mogu širiti *samo* kroz čvrsti medij, ili točnije rečeno, *kroz dovoljno čvrsti medij.* Istina, u tim su materijalima brzine v_P i v_S ipak manje nego li bi to bilo da su ti isti materijali čvrsti i kruti.

Među važnim parametrima koji karakteriziraju impact su trajanje ili vrijeme kontakta udarca, t_c , pomicanje kugle, D i kinetička energija sfere pri udaru

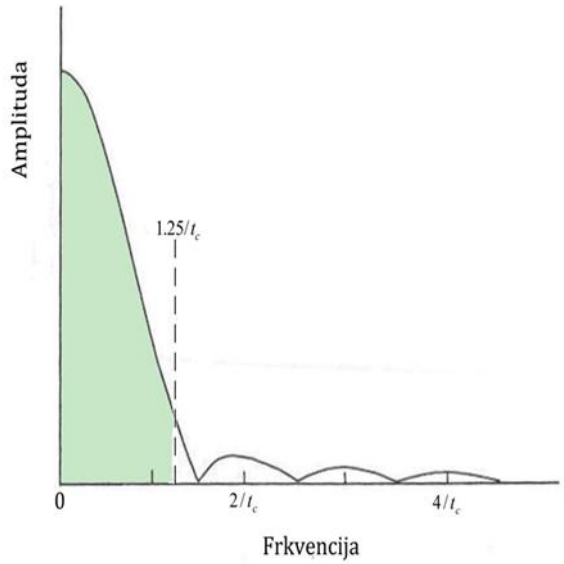
Karakteristike udarnih valova koje generira elastični utjecaj kugle na čvrstu tvar, određuje njihovu sposobnost da pridonesu otkrivanju nedostatka u materijalu.

Tijekom udara dio kinetičke energije u sferi pretvara se u elastičnu valnu energiju u betonu. Maksimalna sila je proporcionalna kinetičkoj energiji pokretne kugle pri udaru, a pomaci čestica rezultirajućih udarnih valova proporcionalni su toj sili.
Za čeličnu kuglu koja je pala na betonsku ploču normalne čvrstoće s visine h, vrijeme kontakta možemo izraziti pomoću jednadžbe :

$$t_c = \frac{0.0043D}{h^{0.1}} \tag{5}$$

$$t_c = 0.0043D \tag{6}$$

Impact udarni valovi sastoje se od široke raspodjele frekvencija, a ta raspodjela je određena funkcijom sila-vrijeme.
Raspodjela amplituda i frekvencija u udarnim valovima nastalih djelovanjem kugle na krutinu s trajanjem t_c prikazana je na slici 3.10.



Slika br. 3.10. Raspodjela amplitude i frekvencije u udarnim valovima

Maksimalna amplituda kretanja čestica u udarnim valovima izazvanim udarcima je proporcionalna maksimalnoj snazi udara.

3.3.3. Brzina vala, frekvencija i valna duljina

Brzine valova u homogenom, polu-beskonačnom, elastičnom krutom stanju uzroci su Youngovog modula elastičnosti E, gustoće mase , i Poissonovog koeficijenta.
Youngov modul elastičnosti je fizikalna veličina koja opisuje koliko se izduljena elastična tijela skraćuju ili produljuju pod djelovanjem sile ovisno o materijalu od kojega su načinjena; omjer je naprezanja pod djelovanjem vlačne sile i relativne promjene duljine: $E = \sigma/\varepsilon = (F/P)/(\Delta L/L0)$, gdje je σ naprezanje, ε linearna elastična deformacija, F vlačna sila, P ploština početnoga poprečnog presjeka, ΔL promjena duljine, L0 početna duljina. Mjerna je jedinica paskal (Pa). Što je manji modul elastičnosti, uz isto naprezanje, veća je deformacija tijela.

Poissonov omjer ili Poissonov koeficijent (oznaka: υ) se određuje kao omjer poprečnog smanjenja i uzdužnog produljenja nekog materijala prilikom vlačnog ispitivanja na kidalici. Bio bi jednak 0,5 ako se obujam tijela prilikom rastezanja ne bi promijenio. Dobio je naziv prema Siméonu Poissonu (1781. – 1840.), francuskom fizičaru i matematičaru. Ako se materijal tlači u smjeru jedne osi, onda se on širi u smjeru druge dvije osi. [14]

Većina materijala ima Poissonov omjer u području od 0 do 0,5. Čelik i tvrdi polimeri imaju Poissonov omjer oko 0,3. Guma ima gotovo vrijednost 0,5, dok za pluto iznosi 0.

Brzine P i S valova koje se šire u beskonačnim krutinama daju se sljedećim izrazima:

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{7}$$

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \tag{8}$$

- C_P je brzina P vala
- C_S je brzina S vala
- P-valovi putuju najvećim brzinama, a slijede ih S valovi i Rvalovi tim redoslijedom.
- Za beton normalne čvrstoće, brzine P vala variraju od oko 3000 do 5500 m/s.
- Teoretski izrazi za brzine između P, S i R vala su samo funkcije Poissonova omjera.
- Za Poissonov omjer od 0,18, tipičnu vrijednost za beton, omjer brzine S vala do brzine P vala je 0,62.
- Omjer R vala do P vala brzine 0,57.

Udarni valovi, kao i drugi fizički valovi, vode se temeljnom jednadžbom širenja valova:

$$C = f\lambda \tag{9}$$

gdje je C brzina vala, f je frekvencija, a λ valna duljina.

Za brzinu vala od 4000 m/s valne duljine na odabranim frekvencijama između 1 kHz i 1 MHz dane su u tablici 1.

Frekvencija (kHz)	Valna duljina λ (m)
1	4.0
10	0.4
50	0.2
100	0.04
500	0.02
1000	0.004

Interakcija udarnih valova s unutarnjim diskontinuitetima u velikoj mjeri ovisi o odnosu valne duljine, dimenzije i dubine diskontinuiteta.

Općenito, valovi valne duljine λ, odrazit će se diskontinuitetima koji imaju dimenzije približno jednake ili veće nego λ, ali neće vidjeti one koji su manji.

Drugi način da se to kaže je da će diskontinuitet duljine l odražavati udarne valove koji imaju valne duljine reda veličine l ili manje, ali će biti nevidljivi onima s dužim valnim duljinama.

Beton sadrži mnogo malih unutarnjih diskontinuiteta - mikrostrukture na mjestima između veziva, agregata i pora, pri čemu tipično imaju dimenzije od nekoliko centimetara ili manje.

Udarni valovi s valnim duljinama od oko 5 cm ili manje (frekvencije 80 kHz ili više) raspršeni su ovim prirodnim nehomogenostima i imaju ograničenu sposobnost prodiranja, dok udarni valovi s valnim duljinama od oko 5 cm ili duže (frekvencije 80 kHz ili niže) mogu se raspršiti kroz čvrsti beton kao što je to bio-homogeni medij.

Impact Echo na betonsku površinu proizvodi udarne valove s valnim duljinama od oko 5 cm do nekoliko metara, to je raspon dobro prilagođen za otkrivanje oštećenja, kao što su pukotine, raslojavanje, šupljine, nekonsolidirani beton i sl.

Brzina P-vala može se odrediti korištenjem udarnih valova na dva različita načina:

- mjerenje vremena putovanja P ili R valova između dva pretvornika na međusobnoj fiksnoj udaljenosti na betonskoj površini;
- izvođenje ispitivanja Impact-Echa na čvrstu strukturu poznatih dimenzija (poželjno na ploču) i izračunavanje brzine vala.

Brzine valova u betonu obično variraju od 3500 do 5000 m/s. Kada je nepoznata brzina udara, 4000 m/s je dobra početna procjena. Stoga je točnost rezultata djelomično određena poznatim C_p.

3.4. Ponašanje udarnih valova na sučelju

Sučelje je definirano kao granica između dva materijala koji imaju različita akustička svojstva. Ta dva materijala mogu biti vrlo slična, kao u slučaju betonske tkanine za popravke koja se primjenjuje na postojeću betonsku konstrukciju, ili vrlo različita, kao u slučaju sučelja beton/zrak: svojstvo koje određuje ponašanje valova naprezanja na sučeljima je akustička impedancija, Z definirana kao brzina gustoće vremena valova.

Točnije, relativna razlika u akustičkoj impedanciji između dva materijala. Kada udarni val pogodi sučelje između različitih medija, on prolazi i refleksiju i lom.

Prvo razmatramo geometriju P-vala: odbijanje na beton/zrak sučelje gdje se gotovo sva energija udarnog vala reflektira zbog vrlo velike razlike akustičke impedancije između betona i zraka.

Akustička impedancija (Z) omjer je zvučnog tlaka (ρ) i brzine čestica (v) u mediju ili akustičkom elementu u kojem se rasprostire zvučni val. Ovisno o tome razlikujemo karakterističnu akustičku impedanciju medija (Z_0) od impedancije akustičkog elementa u kojem se taj medij nalazi. [15]

Karakteristična impedancija se određuje za medij u uvjetima slobodnog raspostiranja vala, tj. kada nema reflektiranih valova. Ovisna je o materijalu i može se odrediti iz umnoška njegove gustoće (ρ) i brzine zvuka (c), tj. brzine kojom se zvučni val u tom materijalu širi.

3.4.1. Refleksija i refrakcija na čvrstom sučelju

Na čvrstom sučelju gotovo se sva energija u incidentnom valu reflektira . Međutim, na sučelju između dva čvrsta medija, udarni valovi se djelomično reflektiraju od sučelja i djelomično se prelamaju (prenose) preko sučelja.

P val se pojavljuje na savršeno spojenom sučelju između dva različita kruta medija kada je smjer širenja normalan za sučelje.

U tom slučaju amplitude reflektiranih i lomljenih valova ovise o relativnoj razlici akustičke impedancije između područja odvojenih sučeljem.

Amplitude reflektiranog i lomljenog P vala, A reflektirano i A refrakcirano, daju jednadžbu:

$$A_{reflektirano} = A_i \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \tag{10}$$

$$A_{refrakcirano} = A_i \frac{(2Z_2)}{(Z_2 + Z_1)} \tag{11}$$

Gdje je Z_1 akustička impedancija područja u kojem se val približava sučelju, Z_2 je akustička impedancija područja izvan sučelja, a A_i je amplituda gibanja čestica u incidentnom valu. Odnos $A_{reflektirano}$ /A_i je koeficijent refleksije R:

$$R = \frac{A_{reflektirano}}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{(Z_2 + Z_1)} \tag{12}$$

Ovdje je korisno razmotriti tri ograničavajuća odnosa između Z_2 i Z_1

$Z_2 << Z_1$

U granici kada Z_2 postane vrlo mali u odnosu na Z_1, $A_{reflektirano}$, A_i i A refraktirano približavaju se nuli.

Amplituda reflektiranog vala približava se amplitudi udarnog vala.

Amplituda je u fizici najveći otklon *(elongacija)* od srednje vrijednosti veličine kojom se opisuje val ili titranje. Vrijednost se amplitude izražava u istim mjernim jedinica kojima se izražava i vrijednost te fizikalne veličine.[16]

Promjena algebarskog znaka ukazuje na to da val prolazi kroz promjenu nakon refleksije.

Refleksija je odbijanje ravnih valova na graničnoj površini dvaju sredstava (medija). Ako je granična ploha glatka, tj. neravnine su prema valnoj duljini (λ) zanemarive, nastaje tzv. *regularna refleksija,* kod koje je upadni kut valova jednak kutu refleksije; u suprotnom slučaju nastaje *difuzna refleksija:* valovi se reflektiraju u svim smjerovima. Omjer reflektirane i upadne energije naziva se koeficijentom refleksije. Ako je taj koeficijent ovisan o valnoj duljini upadnih valova, nastaje *selektivna refleksija.* Kada ravni val prelazi iz gušćega sredstva u rjeđe, reflektirani je val u fazi s upadnim valom. U obrnutom slučaju reflektirani je val za $\pi/2$ ($\lambda/4$) pomaknut prema upadnomu valu. Upadni i reflektirani val daju interferencijom stojni val. Stojni val, također i stacionarni val, je val koji nastaje superpozicijom (zbrajanjem) dvaju valova jednake amplitude i frekvencije. Refleksijom elastičnoga transverzalnoga vala dobiva se transverzalni i longitudinalni reflektirani val. Longitudinalnoga reflektiranog vala nema ako je titranje upadnoga transverzalnog vala okomito na ravninu upada. To je najčešći slučaj na koji se nailazi u ispitivanju Impact-Echa.

Pojavljuje se kada je na sučelju pukotina ili praznina unutar betona ili vanjske površine.

$$Z_2 << Z_1 \tag{13}$$

Kod ispitivanja Impact-Echa ovaj slučaj se javlja, na primjer, kada je prvo područje betonsko, a drugo je od čelika. Ovo je posebno važno u tumačenju rezultata ispitivanja provedenih prilikom armiranja čelika.

Z_2 i Z_1 jednaki su ili gotovo jednaki

U tim slučajevima, sva ili gotovo sva energija vala prenosi se preko sučelja. Refleksija će se pojaviti samo ako je značajan dio sučelja nevezan ili postoji pukotina na sučelju.

Numeričke studije pokazale su da apsolutna vrijednost koeficijenta refleksije mora biti oko 0,24 ili više kako bi relativna amplituda pomaka čestica uzrokovana reflektiranim valovima bila značajna u ispitivanju Impact-Echa [7]

Ako je količina Z_2 - Z_1 u jednadžbi (13) negativna, dolazi do promjene nakon refleksije. Smjer kretanja čestica uzrokovan širenjem P vala je okrenuti val kompresije koji se reflektira kao udarni val i udarni val kao val kompresije. Otkrivanje oštećenja pomoću udarnog vala oslanja se na detekciju prijelaznih valova uzrokovanih višestrukim refleksijama P valova između dva sučelja.

Moguće su tri kombinacije faznih promjena u ovom slučaju:

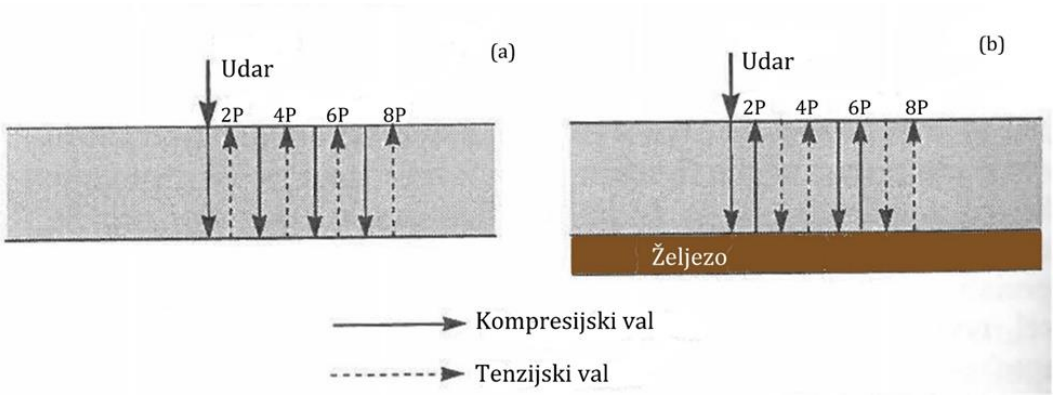
(1) nema promjene faze na bilo kojem sučelju,

(2) postoji promjena faze na jednom sučelju, ali ne i na drugom, i

(3) postoji promjena faze na oba sučelja.

U ispitivanju Impact-Echa, jedno od reflektirajućih sučelja je udarna površina, sučelje beton / zrak, gdje su $(Z_2 – Z_1) <0$ i uvijek mijenjaju fazu.

Stoga su ovdje zanimljive kombinacije (2) i (3). Razlika između ova dva slučaja shematski je prikazana na slici 3.11.



Slika br.3.11. Promjene u reflektiranim P valovima: (a) promjena faze na oba sučelja; (b) promjena faze samo na gornjem sučelju

Vrlo važna razlika u ponašanju P vala pojavljuje se u ova dva slučaja.

Iako je početni P val generiran udarnim valom kompresije u svakom slučaju, u (a), paralelne valne refleksije koje dolaze na udarnu površinu su uvijek udarni valovi, dok su u (b) naizmjenično kompresije i udarni valovi.

Dolazak udarnog vala uzrokuje unutarnje pomicanje površine, dok dolazak vala kompresije uzrokuje pomak prema van.

Valovi koji se reflektiraju između dva betonska/zračna sučelja proizvode uzastopna pomicanja prema unutra pri udarnoj površini, dok valovi koji se reflektiraju između betonskog/čeličnog sučelja i sučelja beton/zrak proizvode izmjenične vanjske i unutarnje pomake na udarnoj površini.

Prvi je slučaj najčešći, budući da su unutarnji nedostaci općenito betonska/zračna sučelja, a druge vanjske površine su betonska/zračna, betonska/betonska ili betonska/tlačna sučelja, za koja vrijedi $Z_2 < Z_1$ i promjena faze.

Drugi postupak nastaje kada postoji unutarnje ili vanjsko reflektirajuće sučelje koje je beton/čelik, kao u slučaju unutarnjeg armiranog čelika ili betona vezanog na čelični element. Može se pojaviti i u slučaju betona koji je u kontaktu sa stijenom koja ima veću akustičnu impedanciju, kao što je tunel ili rudnik.

Udarni valovi koji se pojavljuju na sučelju beton /čelik također se prelamaju u čelik. Ako je donja površina čelika čelično/betonsko ili čelično/zračno sučelje, ti se valovi ponovno reflektiraju (i u prvom slučaju prelamaju).

3.5. Oblici valova

Kod ispitivanja Impact-Echa, udarni napon uzrokuje pomake na površini koje otkriva prijemnik, koji se nalazi na maloj udaljenosti (obično 30 - 50 mm) od mjesta udara.

Pretvarač detektira pomake normalne površine i proizvodi analogni napon koji je proporcionalan tom pomaku. Rezultirajući signal naponskog vremena - valni oblik, je glavni dio ispitivanja Impact-Echa.

Valni oblik sadrži važne tražene informacije: frekvencije komponenti proizvedene višestrukim refleksijama P-vala između udarne površine, pukotina i drugih sučelja i površina. Iako je teško identificirati ključne frekvencije iz samog valnog oblika, važno je razumjeti prirodu valnih oblika koji su rezultat višestrukih refleksija valova i kako složene valne oblike proizvode kombinacija jednostavnih periodičnih komponenti.

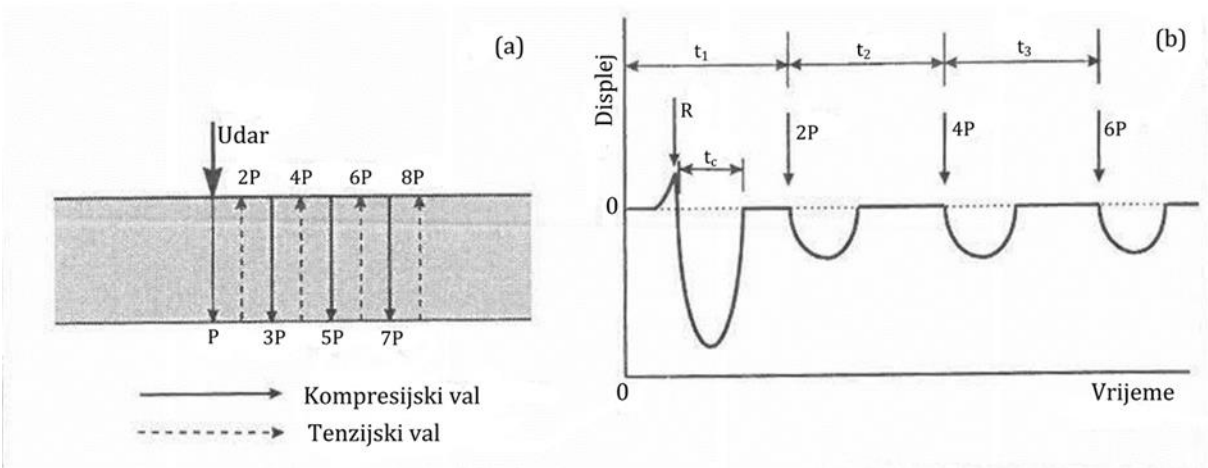
3.5.1. Valni oblici za čvrstu ploču (idealiziran slučaj)

Ploče su najjednostavniji i najčešći objekti na koje se nailazi u ispitivanju Impact-Echa. "Idealna" ploča je definirana kao svaka struktura s dvije paralelne površine ili površine, za koje su bočne dimenzije dovoljno velike da višestruke refleksije s bočnih granica ne dopiru do sonde tijekom ispitivanja.

Za idealnu ploču valnim oblikom dominiraju pomaci nastali uglavnom višestrukim refleksijama valova između dvije suprotne površine. Prvo razmatramo slučaj utjecaja na čvrstu ploču debljine T, za koju su obje strane betonska/zračna sučelja kao što je prikazano na slici 21.

Glavna obilježja valnog oblika detektiranog na pretvorniku su oni koje proizvodi P val, koji putuje u strukturu i višestruko reflektira između dviju površina i R vala, koji putuje po površini.

Refleksije P-valova prikazane su shematski u (a), a idealizirani slučaj dobivenog valnog oblika prikazan je u (b), gdje strelice označavaju vrijeme dolaska P valova i R vala.



Slika br.3.12. Impact-Echo na ploči. Shematski prikazi: (a) refleksije P valova i (b) valnog oblika.

R-val putuje po površini betonske konstrukcije. Ako su bočne dimenzije ploče velike u odnosu na debljinu, refleksije R vala iz rubova ne dopiru do sonde tijekom kratkog perioda (2 do 4 mili-sekunde) u kojem se bilježe signali i pomaci koji su ispitivani. Njezin se prolaz pojavljuje samo na početku valnog oblika.

Kada R-val stigne do pretvarača, on uzrokuje relativno veliki pomak prema dolje (negativni napon).

Iako R-val ne daje informacije o pukotinama (osim pukotina koje su vidljive na površini), njegov oblik i dimenzije pružaju važne informacije o utjecaju i učestalosti sadržaja nastalih valova naprezanja.

Kao što je prikazano na Slici br. 3.12., R val obično ima najveću amplitudu bilo kojeg oblika valnog oblika. To je obrnuta slika funkcije sila-vrijeme, a njezin oblik je oblik polu-sinusnog vala. Širina R vala - vrijeme t_c na slici - je vrijeme kontakta, faktor koji određuje frekvencijski sadržaj valova naprezanja koji su posljedica Impact-Echa. Vrijeme kontakta mjeri se između dviju točaka gdje R val presijeca nulti naponski vod. Pred njim su pomaci uzrokovani sferičnim P i S valovima koji se kreću po površini. Razdvajanje vremena tih početnih dolaznih valova je vrlo malo, jer je pretvornik blizu točke udara. Ovi P i S valovi valovi uzrokuju male promjene napona prije R vala, kao što je prikazano na slici 3.12. (b). Višestruke refleksije P valova unutar ploče pružaju glavne informacije za Impact-Echo test. U čvrstoj ploči, P-val se reflektira naprijed-natrag između dvije površine.

Ako su to oba betonska/zračna sučelja, val se podvrgava promjeni faze kod svakog odraza.

Kao rezultat toga, početni val P, i slijedeće neparne refleksije 3P, SP, 7P, ..., koje dosežu površinu dna, su valovi kompresije, dok su parcijalne refleksije, 2P, 4P, 6P, ..., povratak na udarnu površinu što označuje udarne valove. Dolazak udarnog vala na gornju površinu uzrokuje unutarnje pomicanje, nakon čega slijedi vraćanje površine u prvobitni položaj.

Proteklo vrijeme, t_1, između udarca i dolaska 2P vala na površinu je udaljenost koju je val prešao - dvostruka debljina, ili 2T - podijeljeno brzinom P vala Cp; to jest, $t_1 = 2T/C_p$.

Uzastopni dolasci valova javljaju se u jednakim vremenskim razmacima - to jest, vremenski intervali t_1, t_2 i t_3 na slici 3.12. su jednaki.

Tako dolasci P vala na gornju površinu uzrokuju pomake koji su periodični u prirodi, a ta periodičnost je dominantni pokazatelj valnog oblika nakon prolaska R vala.

Period valnog oblika na slici 3.12. je t_1, a njegova frekvencija f je $\frac{1}{t_1}$, recipročna za neko vremensko razdoblje.

To daje jednostavan odnos koji je u središtu metode Impact-Echa:

$$f = \frac{C_p}{2T} \tag{13}$$

Ova jednadžba dokazuje da valnim oblikom proizvedenim višestrukim P valnim refleksijama između dvije površine čvrste ploče dominira periodička funkcija s frekvencijom približno jednakom brzini vala podijeljenoj s dvostrukom debljinom ploče.

3.6. Frekvencijska analiza

U ograničenim krutinama koje sadrže pukotine, refleksije nastaju iz različitih unutarnjih i vanjskih sučelja, uzrokujući površinska pomaka s različitim frekvencijama i amplitudama i proizvodeći valne oblike koji su često vrlo složeni.

U mnogim slučajevima teško je, ako ne i nemoguće, identificirati točno vrijeme dolaska valova i odrediti ključne frekvencije od samog ispitivanja valnog oblika.

Ako se valni oblik transformira u frekvencijsku domenu, važne se frekvencije pojavljuju kao različiti vrhovi u amplitudnom spektru. Ova transformacija se postiže matematičkom funkcijom koja se zove Fourierova transformacija i temelji se na načelu da svaka funkcija ovisna o vremenu može biti predstavljena kao zbroj sinusnih krivulja različitih amplituda i frekvencija.

U analizi digitalnih signala Fourierova se transformacija provodi numeričkim izračunima na digitaliziranom valnom obliku, koristeći tehniku poznatu kao brzu Fourierovu transformaciju ili FFT. , opisuju da se valni oblik koji se transformira dobiva iz Fourierove transformacije.

Primjeri sinusnih valova i njihovog amplitudnog spektra (dobiveni pomoću FFT tehnike) prikazani su na slikama 3.13. 3.14. i 3.15.

Na slici 3.13. valni oblik je jednostavna sinusna krivulja s frekvencijom od 5 kHz i amplituda je jednaka 1. spektar se sastoji se od jednog vrha na 5 kHz.

Frekvencija je fizikalna veličina koja iskazuje broj ponavljanja neke periodične pojave u jedinici vremena (periodično gibanje). Jednaka je recipročnoj vrijednosti trajanja jednog od ponavljajućih događaja, perioda T, tj. $f=1/T$. Mjerna jedinica frekvencije jest herc (Hz), što je poseban naziv za recipročnu sekundu ($Hz=s^{-1}$).

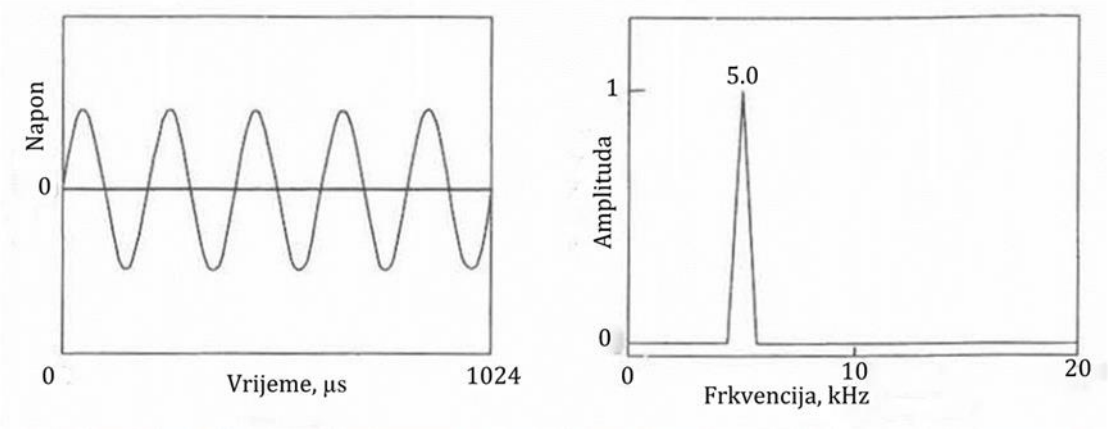
Kutna ili kružna frekvencija ili pulzacija (znak ω) umnožak frekvencije i broja 2π, dakle:$\omega=2\pi f$. Mjerne jedinice kutne frekvencije jesu radijan u sekundi (rad/s) ili recipročna sekunda (s^{-1}), koje su jednake hercu. [17]

Frekvencijom se opisuju periodične pojave, kao što su gibanje po zatvorenim krivuljama, gibanje oko ravnotežnog položaja, promjene vrijednosti neke veličine oko ravnotežne vrijednosti (titranje), širenje promjena nekih svojstava ili stanja (valovi) i dr. Pri valovitim pojavama stalan je odnos između frekvencije i brzine v, širenja,$f\cdot\lambda=v$, gdje je λ valna duljina, tj. udaljenost između najbližih točaka jednakog stanja titranja. U mikrosvijetu postoji jednoznačan odnos između frekvencije elektromagnetskog zračenja i energije fotona, $E= h\cdot f$, gdje je h Planckova konstanta. Planckova konstanta jedna je od osnovnih fizikalnih konstanti, koja se ne pojavljuje u okviru klasične fizike, ali se kao veličina često pojavljuje u kvantnoj mehanici.

Ljudsko je uho osjetljivo za zvuk u rasponu frekvencija od oko 16 Hz do 20 kHz, frekvencija svjetlosti za koju je ljudsko oko najosjetljivije (zelena svjetlost valne duljine 550 nm) iznosi oko

545 THz (10^9 Hz), normirana frekvencija izmjenične struje u energetskoj mreži je 50 Hz itd. Frekvencija se mjeri frekventometrima. Mjeri se izravno, uspoređivanjem s istovrsnom pojavom poznate frekvencije, ili posredno, npr. mjerenjem vremena i brojanjem, zatim mjerenjem brzine širenja i valne duljine i sl.

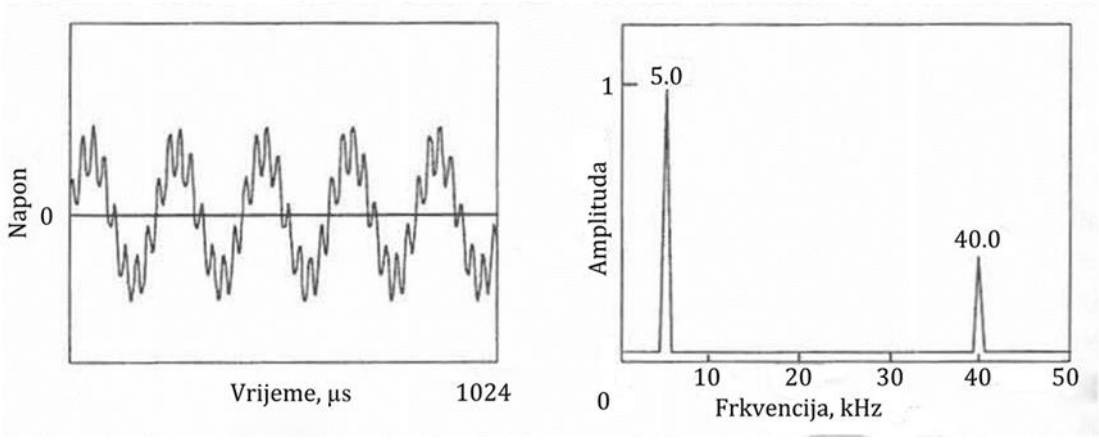
Frekvencija događaja, u teoriji vjerojatnosti i teoriji pogrešaka, učestalost nekog događaja kao omjer broja rezultata i broja pokusa.



Slika br.3.13. Valni oblik koji se sastoji od jednostavnog sinusnog vala i odgovarajućeg amplitudnog spektra.

Slika 23 prikazuje valni oblik koji se sastoji od dvaju sinusnih valova, s frekvencijama od 5 i 40 kHz.

Spektar pokazuje oštre vrhove na tim frekvencijama, s istim amplitudama.

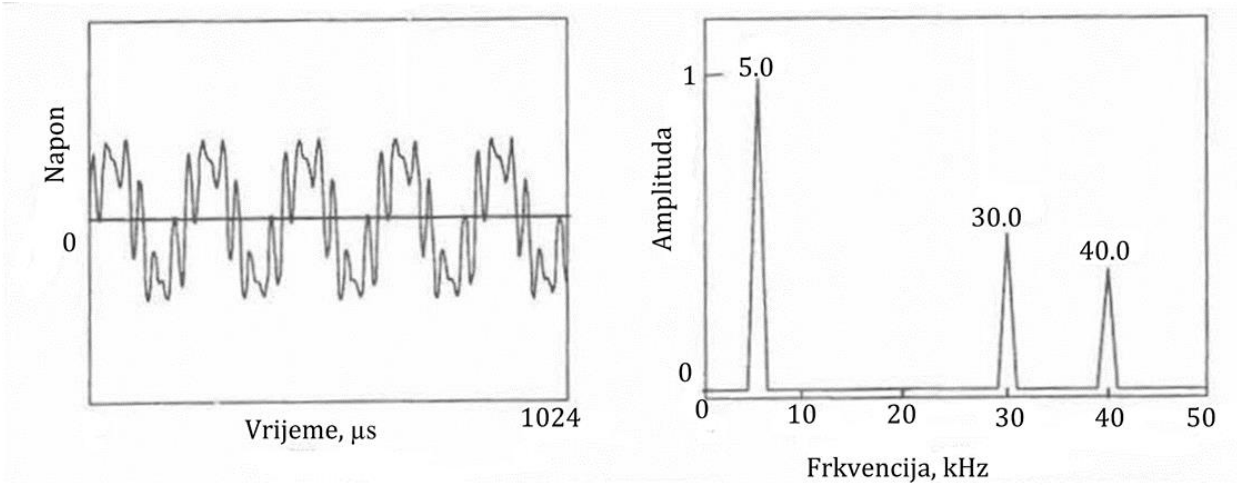


Slika br.3.14. Valni oblik koji se sastoji od dva sinusna vala različitih amplituda i frekvencija i odgovarajućeg amplitudnog spektra.

Na slici 3.15. valni oblik je zbroj triju sinusnih valova različitih amplituda i frekvencija, a spektar se sastoji od tri oštra vrha na tim frekvencijama i s istim amplitudama.

Valni oblici dobiveni testovima Impact-Echa su kombinacije neperiodičnih pomaka (npr. R val) i periodičnih pomaka različitih frekvencija i amplituda (koje proizlaze iz višestrukih refleksija P valova).

Prikaz takvog valnog oblika kao zbroja sinusnih valova zahtijeva spektar koji pokriva širok raspon frekvencija s različitim amplitudama.



Slika br.3.15. Valni oblik koji se sastoji od triju sinusnih valova različitih amplituda, frekvencije i odgovarajućeg amplitudnog spektra.

3.6.1. Interval uzorkovanja

Interval uzorkovanja određuje, između ostalog, najvišu frekvenciju koja se može riješiti u valnom obliku. Recipročnost intervala uzorkovanja, 1/Δt, je frekvencija uzorkovanja (ili brzina), izražena u podatkovnim točkama u sekundi.

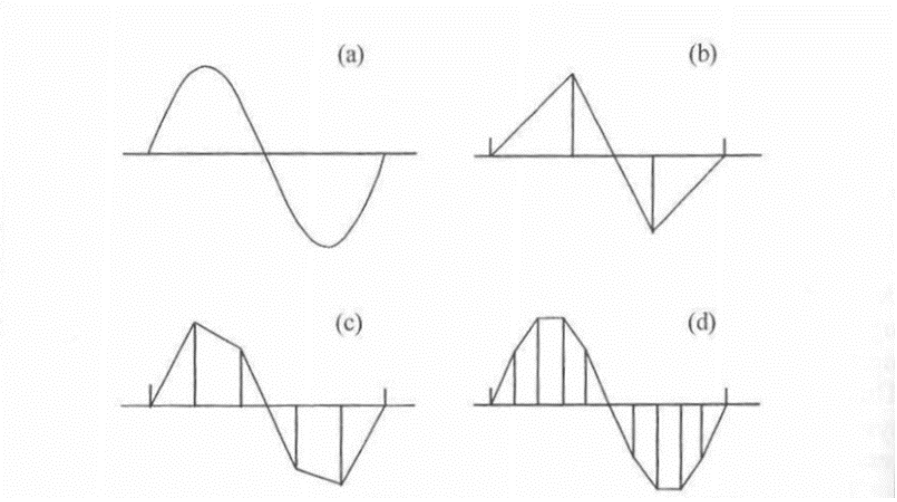
Sustav za prikupljanje podataka koji ima minimalni interval uzorkovanja od jedan (10-6sec), ima maksimalnu brzinu uzorkovanja od 1 MHz ili 106 podatkovnih točaka u sekundi.

Opće pravilo u obradi signala je da signale treba uzorkovati na frekvenciji koji je veći od dvostruke maksimalne frekvencije koju treba uhvatiti (frekvencija Nyquista). Nyquist je 1928. godine napisao: „*Sinusni signal se može u potpunosti rekonstruirati iz uzorkovanog signala ukoliko je frekvencija uzorkovanja bar dvostruko veća od frekvencije sinusnog signala.*“

U skladu s tim pravilom, ako se refleksija P vala u ploči događa na frekvenciji, f, od 10 kHz (razdoblje od 100 µs) na primjer, frekvencija uzorkovanja (brzina) mora biti veća od 2f, ili 20 kHz (interval uzorkovanja <50 µs).

Međutim, pokazalo se da bi se za precizno snimanje Impact-Echa, valni oblici trebali uzorkovati na frekvenciji koja je najmanje deset puta veća od najveće.

Drugi način da se to kaže jest da je potrebno deset ili više uzoraka po ciklusu.
To je vidljivo na slici 3.16. , koja pokazuje kako je jedan ciklus sinusnog vala (a) predstavljen intervalima uzorkovanja koji osiguravaju tri, pet i deset uzoraka po ciklusu, pri čemu prva točka na prvoj nuli funkcije.



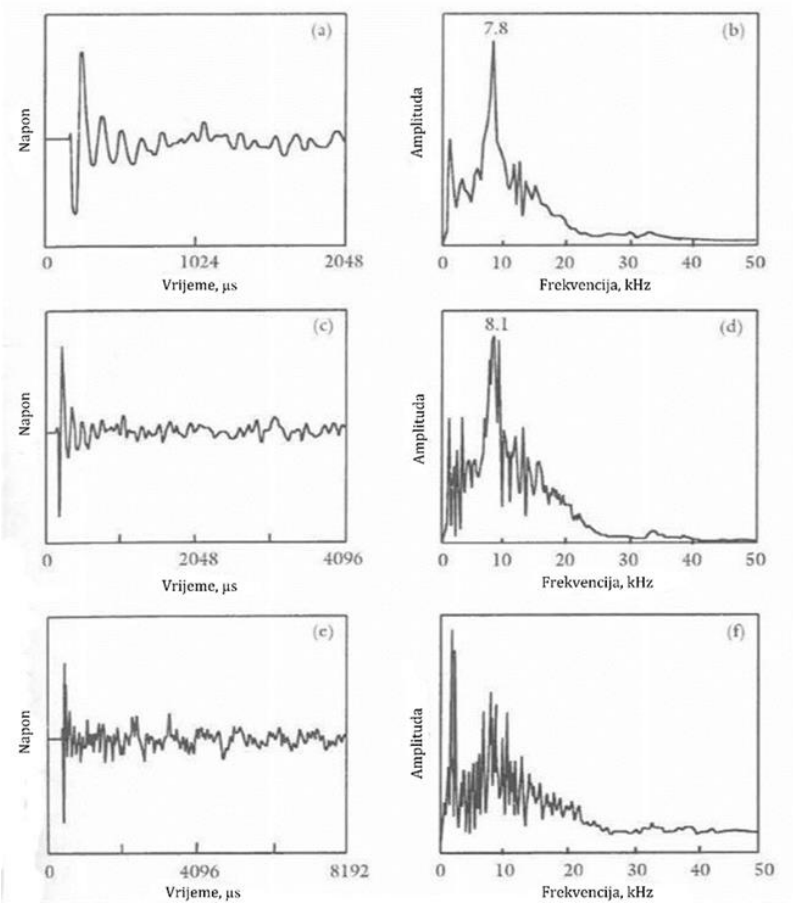
Slika br.3.16. Prikaz jednog ciklusa sinusnog vala (a) koji je predstavljen intervalima uzorkovanja

Stoga, za točnost, intervali uzorkovanja koji osiguravaju najmanje deset uzoraka po ciklusu na najvišoj frekvenciji trebali bi se koristiti u ispitivanju metodom Impact-Echa.

Ako je frekvencija, f, u Hz, a interval uzorkovanja, Δt, u sekundama, maksimalni interval uzorkovanja koji će osigurati zadovoljavajuću reprezentaciju prikazan je jednadžbom :

$$\Delta t_{max} \approx \frac{1}{10f} \tag{14}$$

Jedan ciklus od 80 kHz ima vremensku duljinu od $\frac{1}{(8x104)} = 1.25x10 - 5$ sekundi ili 12,5 μs. Minimalni interval uzorkovanja od 1 μs je osiguran sustavom za prikupljanje podataka od 1 MHz, stoga osigurava 12,5 uzoraka po ciklusu.
U većini ispitivanja Impact-Echa, maksimalna učestalost rijetko prelazi 50 kHz. Na toj frekvenciji interval uzorkovanja je 2 μs koji daje deset uzorka po ciklusu.



Slika br. 3.17. Prikaz intervala uzorkovanja

3.6.2. Broj uzoraka i duljina zapisa

U ispitivanju Impact-Echa, broj uzoraka, n, zabilježenih u svakom testu, obično se bira kao potencijal od 2 (512, 1024, 2048, itd.) A logoritmi Fourier transformacije izvršavaju se brže s tim brojevima. Produkt broja uzoraka, n, i interval uzorkovanja, Δt, je duljina zapisa, odnosno ukupna duljina vremena tijekom kojega se zapisuje valni oblik. Prilikom odabira duljine zapisa u ispitivanjima Impact-Echa treba uzeti u obzir nekoliko čimbenika.

Prvo, veličina pomaka čestica u P-valu raspada s vremenom zbog divergencije i slabljenja. Vremenski raspon ovog propadanja obično je nekoliko tisućinki sekunde. Ako je duljina zapisa preduga, uzorci će se uzeti izvan vremena u kojem signal pretvornika sadrži korisne informacije o strukturi. Drugo i važnije razmatranje je izbjegavanje učinaka valnih refleksija s bočnih granica ploče ili strukture ploče.

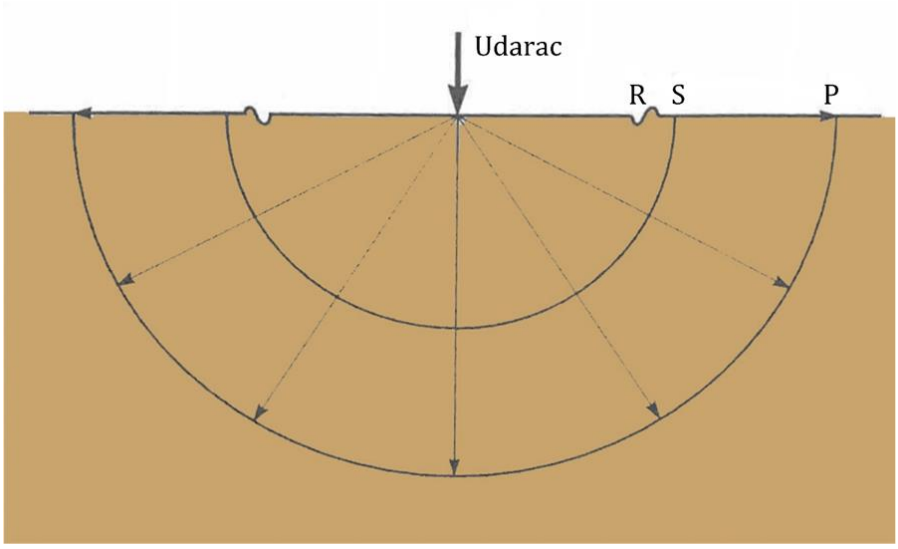
3.7. Izravno mjerenje brzine valova pomoću dva pretvornika

Brzina P vala može se odrediti izravnim mjerenjem [7]

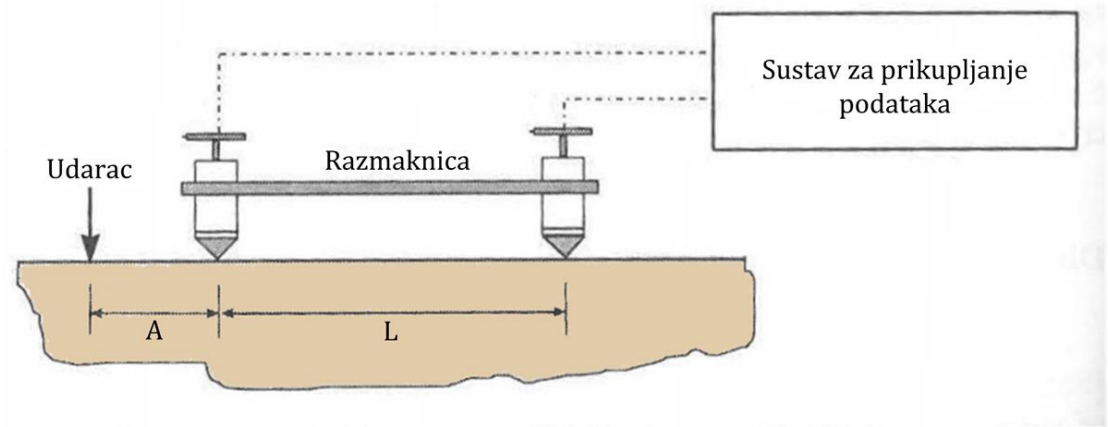
Slika 3.18. je shematski dijagram valova generiranih od Impact-Echa. Mjerne jedinice pretvarača su čvrsto stegnute na razdjelnoj šipki koja ih drži na fiksnoj udaljenosti, L, odvojeno (obično 300 mm), a cilj je izmjeriti što točnije vrijeme dolaska sfernog P vala na dva pretvornika.

Ukoliko imamo vrijeme t_1 i t_2 tada je brzina P vala Cp dana jednadžbom:

$$C_p = \frac{L}{t_2 - t_1} \tag{15}$$



Slika br.3.18. Shematski dijagram valova generiranih od Impact-Echa



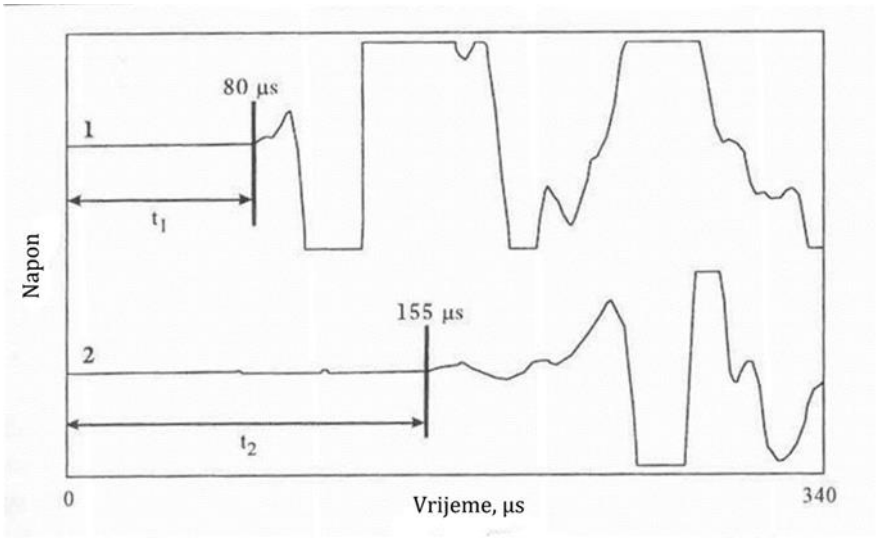
Slika br.3.19. Prikaz mjerenja pomoću dva pretvorika

Dva osjetilna elementa u ovom pretvorniku kontroliraju isti sat u sustavu za prikupljanje podataka, što omogućuje mjerenje proteklog vremena između dolaska i naprezanja na jednom kraju i njegovog odlaska na drugi kraj.

Prilikom postavljanja instrumenta za ispitivanje brzine valova, element sonde koji je najbliži udarcu povezan je s kanalom A na kartici za prikupljanje podataka, a drugi element je spojen na kanal B. (Priključci su izvedeni u BNC kabelskim priključcima.)

Točnost mjerenja brzine P-vala ovisi o razmaku između pretvornika, vremenskoj razlici (ili brzini valova) i brzini digitalnog uzorkovanja.

Na primjer, interval uzorkovanja od 2 µs na svakom od dva odvojena kanala, dovodi do nesigurnosti od 2 µs u vremenskom intervalu između dolazaka P-vala na dva pretvornika.



Slika br.3.20. Interval uzorkovanja od 2 µs

3.7.1. Brzina P-vala nakon testa Impact-Echa na ploči poznate debljine

Osnovna jednadžba Impact-Echo je :

$$f = \frac{C_p}{2T} \tag{16}$$

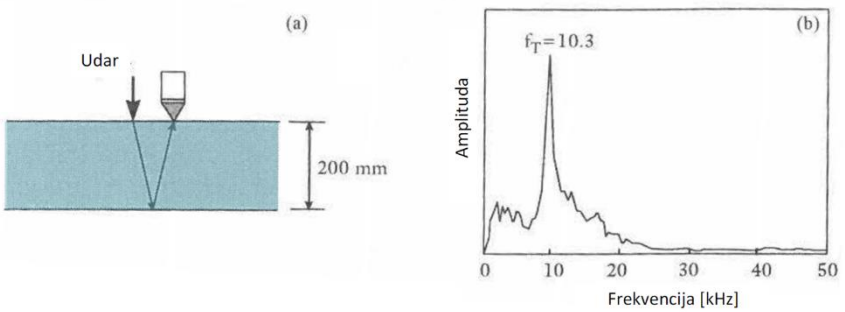
$$f = \frac{\beta C_p}{2A} \tag{17}$$

Za strukture ploča β=0.96 i frekvenciju - nazvanu "učestalost debljine" - frekvencija vibracije je inducirana višestrukim refleksijama P vala između gornje i donje površine.

β=0.96 – faktor oblika (ovisi o geometriji ploče, nepravilnostima)

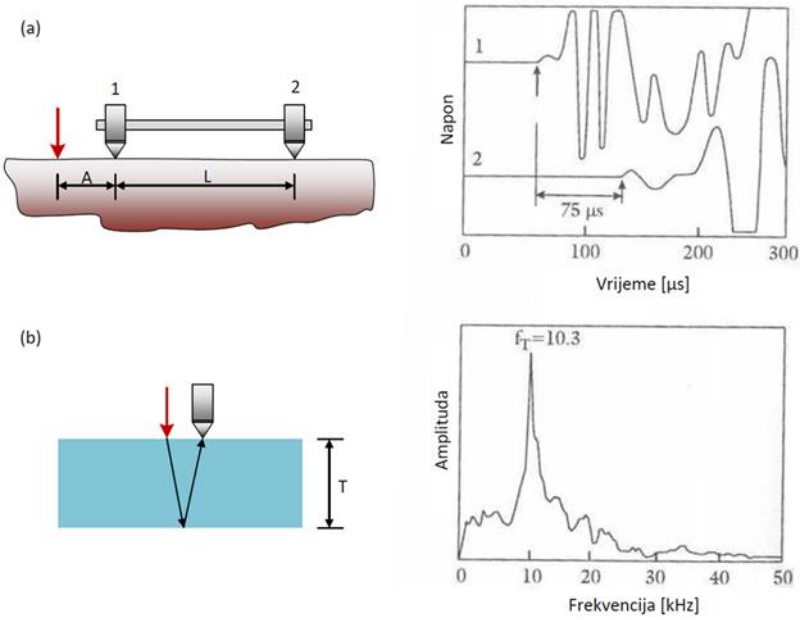
T- debljina ploče

Brzina P-vala nakon testa Impact-Echa na ploči poznate debljine



Slika br.3.21. Impact - Echo test na ploči debljine 200 mm

$$f = \frac{0.96C_p}{2T} \rightarrow C_p = \frac{2Tf}{0.96} \tag{18}$$



Slika br.3.22. Determinirana brzina P-vala

Dobivena frekvencija f mjerena na istom mjestu gdje i brzina vala:

$$f = \frac{0.96C_p}{2T} \rightarrow C_p = \frac{2Tf}{0.96} \tag{18}$$

Determinacija debljine ploče iskazana je jednadžbom 19 i 20. :

$$t_2 - t_1 = 75\mu s \tag{19}$$

$$C_p = \frac{L}{t_2 - t_1} = \frac{0{,}3}{0{,}000075} = 4000\, m/s$$

$$f_{T(očitano)} = 10{,}3kHz \tag{20}$$

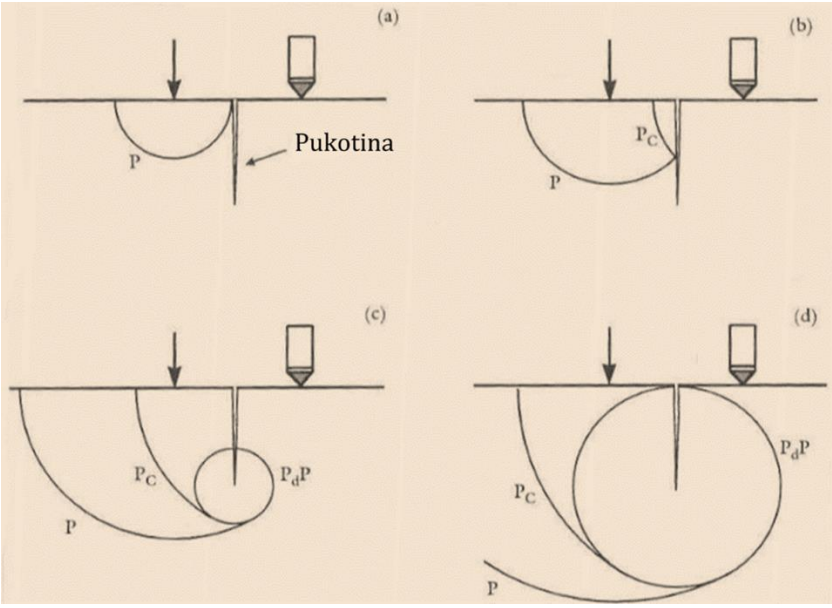
$$T = \frac{0{,}96C_P}{2f} = 186mm$$

3.8. Ispitivanje pukotina koje se nalaze na površini

Pukotina koja je otvorena na površini je bilo koja pukotina koja je vidljiva na površini. Takve pukotine mogu biti okomite, nagnute prema površini, ili zakrivljene, kao što je prikazano na slici 32. Kada se udarni valovi generiraju Impact-Echom na površinu betona u blizini površinske pukotine, kao što je prikazano na slici (a), uzorak širenja valova značajno se razlikuje od uzorka u čvrstom betonu.

Budući da je pukotina konkretizator ili, u nekim slučajevima, beton/voda, ona odražava naprezanje koji se širi prema van od mjesta udara, kao što je prikazano na slici (b).

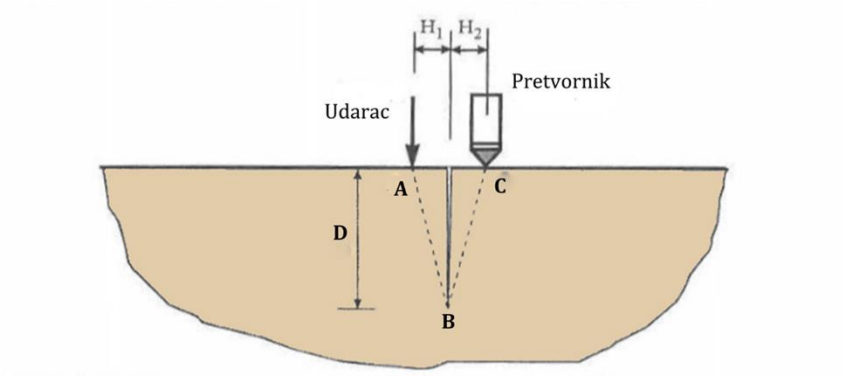
Kad P val dosegne donji rub pukotine, on stvara difrakcijski P-val, obilježen na slici (c,d) kao P_dP koji putuje prema van duž cilindričnog oblik, centriran na donjem rubu pukotine. Ovo je prvi udarni val koji dopire do sonde.



Slika br.3.23. Vrste pukotina koje se nalaze na površini

Pri određivanju dubine pukotine, koriste se dva pretvarača, kao što je prikazano na slici 3.24. Pretvarač na istoj strani pukotine kao udar koristi se za određivanje vremena udara, a drugi

pretvarač mjeri vrijeme potrebno da udarni val od točke A (točke udara) dođe do točke B (vrha pukotine), te do C (pretvornika).



Slika br.3.24. Udaljenost između darca i pretvornika

Dva pretvarača i točka udara smješteni su na ravnoj liniji okomitoj na crtu pukotine na površini.

Ako se zna brzina vala i udaljenosti H_1, H_2, H_3, i vrijeme dolaska valova naprezanja na dva pretvarača, može se izračunati dubina pukotine.

$$D = \sqrt{\frac{(c_p \cdot \Delta t)^2}{4} - H^2} \tag{21}$$

Ako je $H_1 = H_2$; tada je AB=BC

Ova metoda nazvana je tehnikom prolaska kroz vrijeme. Ona se može koristiti za dobivanje dobrih aproksimacija dubina, mjerenih okomito na površinu, ili pukotina koje su okomite na površinu, nagnute ili zakrivljene.

Za izvođenje ovog ispitivanja potrebna su dva pretvarača. Pretvarač brzine valova s dvostrukom glavom ne može se koristiti samo zbog njegove geometrije. Ako dvostruki odvojeni pretvornici nisu dostupni, onda se jedan kraj sonde s dvostrukom glavom može koristiti zajedno s cilindričnim ili sondom na pištolj.

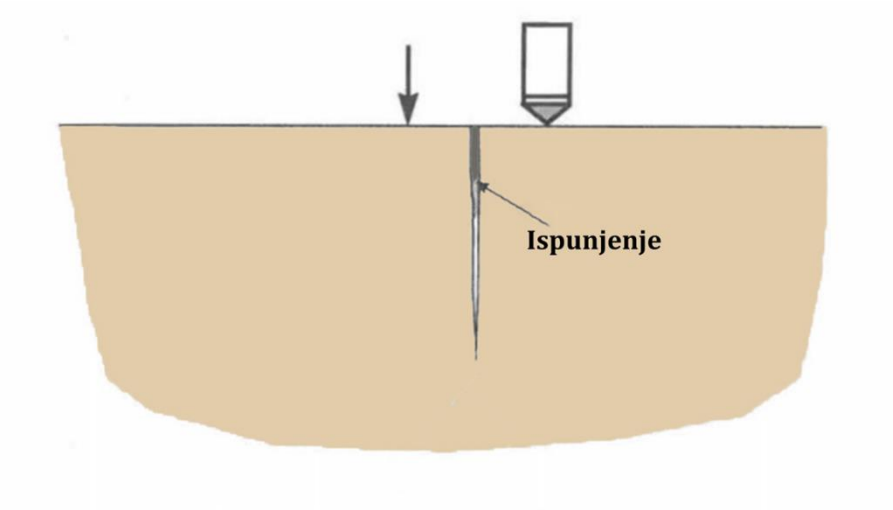
Obično su potrebne dvije osobe kako bi držale sonde na mjestu, izvršile udar i pratile signale na računalu.

3.8.1. Djelomice ispunjene pukotine

Često postoji interes za određivanje pukotina koje se ubrizgavaju s punjenjem.

Međutim, ako je prostor blizu i na ušću pukotine ispunjen, kao što je prikazano na slici 34, ukoliko se i dopusti prolaz P, S i R valova generiranih udarcem, ne mogu se dobiti informacije o opsegu

ispunjenja u ostatku pukotine. Pomaci uzrokovani P valom koji se odvaja od sučelja beton/zrak na granici injektiranja i/ili s prednje strane pukotine, teško ga je indentificirati.



Slika br.3.25. Ispunjene pukotine

Podne ploče na kontaktu sa tlom

Zbog velike debljine sloja tla uzima se u obzir refleksija P-vala sa granice slojeva beton-tlo.

$$A_{reflektirano} = A_i \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \tag{22}$$

$$A_{refraktirano} = A_i \frac{(2Z_2)}{(Z_2 + Z_1)} \tag{23}$$

Z_1 – akustična impedencija sloja u kojem se val približava granici slojeva

Z_2 – akustična impedencija sloja iza granice

A_i – amplituda kretanja čestica u iniciranom valu

Omjer $A_{refketirano}$/Ai predstavlja koeficijent refleksije R:

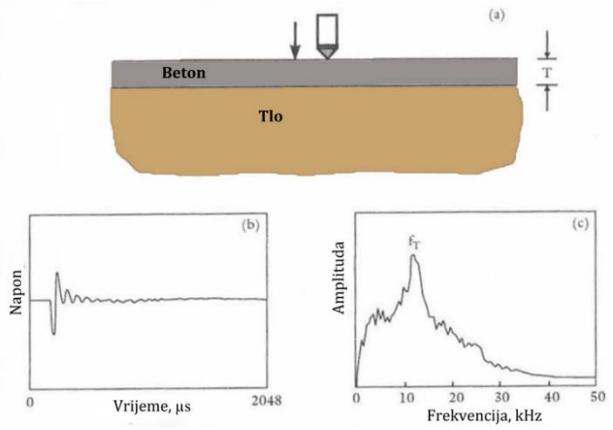
$$R = \frac{A_{refraktirano}}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{24}$$

$$Z_2 \ll Z_1 \rightarrow A_{reflektirano} \cong -A_i \rightarrow A_{refraktirano} \cong 0 \tag{25}$$

Amplituda reflektiranog vala približava se onoj iniciranog vala. Promjena predznaka nam pokazuje da je val promijenio fazu zbog refleksije! To se događa na granici beton/zrak te nam pokazuje na pojavu pukotine!

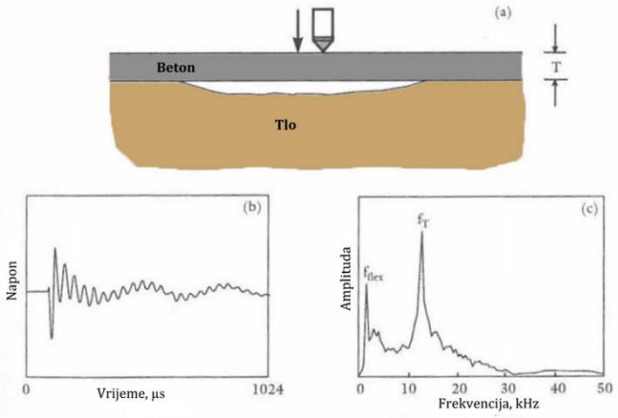
Valni oblik pokazuje povremena pomicanja uzrokovana refleksijom P-vala unutar betonske ploče, ali zbog toga što se energija gubi u tlu svaki put kad P-val udari na granicu betona sa tlom, amplituda pomaka (napon signala) brzo propada.

Odgovarajući spektar pokazuje jedan vrh (f_T) koji odgovara frekvenciji refleksije P-vala od granice slojeva beton/tlo. Vrh je donekle zaobljen i širi od onih dobivenih iz ploča u dodiru s zrakom. Na slici 3.26. je zabilježeno samo nekoliko refleksija valova prije nego što je signal pao na nezamjetljivu razinu.



Slika br.3.26. Nekoliko zabilježenih refleksija valova

Za usporedbu, na sljedećoj je slici prikazan tipičan rezultat dobiven ispitivanjem Impact-Echa na istoj ploči na mjestu gdje postoji praznina u tlu točno ispod.



Slika br.3.27. Ploča sa prazninom u tlu

U tom slučaju refleksije P-vala nastaju iz sučelja beton/zrak na dnu ploče.

Budući da se gotovo sva energija valova reflektira na sučelje beton/zrak, površinska pomicanja uzrokovana dolaskom reflektiranih P valova sporije padaju u usporedbi s onima koji se reflektiraju na sučelju beton/tlo. Odgovor je u suštini isti kao i onaj dobiven iz jednostavne betonske ploče u dodiru s zrakom. Spektar pokazuje vrlo oštar vrh visoke amplitude koji odgovara frekvenciji debljine P vala.

Ako je betonska ploča relativno tanka (oko 150 mm ili manje) tada je niža frekvencija i niži amplitudni vrh, kao što je i naznačeno. Na slici 3.27. (c), kao rezultat savijanja je vibracija nepodržanog dijela ploče iznad praznine. Do pojave fleksibilnih vibracija dolazi zbog toga što je nepodržani dio iznad šupljine sputan na njegovim rubovima gdje dodiruje tlo.

3.8.2. Ispitivanje betonskih ploča s asfaltnim slojevima

Kada betonske ploče, kao što su palube mostova, imaju asfaltne presvlake, problem je dvoslojni dio u kojem je gornji sloj - sloj asfalta - akustički mekši od donjeg sloja betona.
Koeficijent refleksije na sučelju asfalta/betona je oko 0,20, što znači da je odbijanje valova zbog akustičke neusklađenosti preslabo da bi ga se moglo detektirati.
Dakle, ako postoji savršena veza između asfalta i betona, odgovor slojevite strukture će dominirati punom reakcijom debljine. Iskustvo je, međutim, pokazalo da je udio nevezanog područja na sučelju između asfalta i betona obično dovoljan da se uzrokovani P-valovi reflektiraju.

Tako se osnovni odziv betonske palube sa slojem asfalta tipično sastoji od dvije komponente:
(l) relativno slabog odziva uzrokovanog višestrukim P valnim refleksijama između udarne površine (vrh sloja) i djelomično spojenog preklopnog/betonskog sučelja;
(2) dominantan puni odziv debljine uzrokovan višestrukim refleksijama P vala između udarne površine i donje površine betona.
Frekvencija odziva iz sučelja daje se jednadžbom:

$$f_i = \frac{C_{P1}}{2T_1} \tag{26}$$

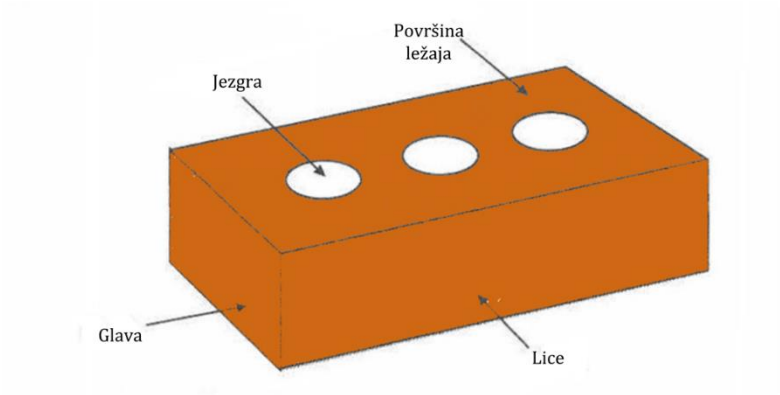
Frekvencija odziva dna izražena je jednadžbom:

$$f_b = \frac{1}{\frac{2T_1}{0.96C_{P1}} + \frac{2T_2}{0.96C_{P2}}} \tag{27}$$

3.9. Ispitivanje zidanih konstrukcija

U ovom poglavlju objašnjeni su važni aspekti primjene Impact-Echa na zidane konstrukcije, uključujući kako akustička svojstva opeke, bloka, morta i injektora utječu na odziv, učinci na signale odjeka jezgre od opeke, i učinci na reakciju uzrokovani pukotinama na sučeljima između cigle i morta.

Objašnjava se odziv zidanih konstrukcija i upotreba Impact-Echa za otkrivanje šupljina u zidovima, uključujući praznine u višestrukim zidovima i šupljinama u betonskim zidanim konstrukcijama.



Slika br.3.28.

Da bismo razumjeli kako se Impact-Echo može upotrijebiti za ispitivanje zidanih konstrukcija, prvo moramo primjetiti da su dijelovi zidane cigle, morta, maltera, blokova akustički slični tako da su konstrukcijski elementi sastavljeni od opeke ili blokova spojenih zajedno žbuka reagiraju kao jedna jedinica kada su podvrgnuti ispitivanju Impact-Echa.

Drugim riječima, moramo pokazati da zid odgovara kao jedna, kontinuirana ploča, a ne kao skup malih pravokutnih jedinica. Na slici 3.29. prikazan je zidani zid koji se sastoji od vanjskog dijela opeke i unutarnjeg dijela betonskog bloka i ispunjen je mortom.

Značajne refleksije udarnih valova od mnogih sučelja između opeke, žbuke, bloka i injektora učinile bi tumačenje signala i detekciju iznimno teškim, ako ne i nemogućom.

Slika br. 3.29. Zidani zid koji se sastoji od vanjskog dijela opeke i unutarnjeg dijela betonskog bloka [7]

Stoga se osnovne jednadžbe koje utječu na ispitivanje Impact-Echom, betona na ploče mogu koristiti za predviđanje odziva odjeka zidnog zida:

$$f = \frac{0.96C_p}{2T} \tag{28}$$

Gdje je T debljina, 0,96 je faktor oblika (β) za ploču, Cp je brzina P vala, a f je frekvencija P vala. Približni rasponi brzina P-vala dobivenih iz ispitivanja tipičnih komponenata zidanih konstrukcija navedeni su u tablici. Brzine valova mogu se dobiti iz prijenosa, mjerenja brzine impulsa na pojedinačnim čvrstim blokovima i cilindričnim ispitnim uzorcima od morta ili taloga.

Tablica br.2. Rasponi brzina P valova

Materijal	Brzina P vala (m/sec)
Cigla	3400-4050
Malter	2700-3250
Blok	3200-3500
Talog	3700-4100

4. Praktična primjena Impact - Echo metode

4.1. Eksploatacijsko ispitivanje mosta Mozdernjak

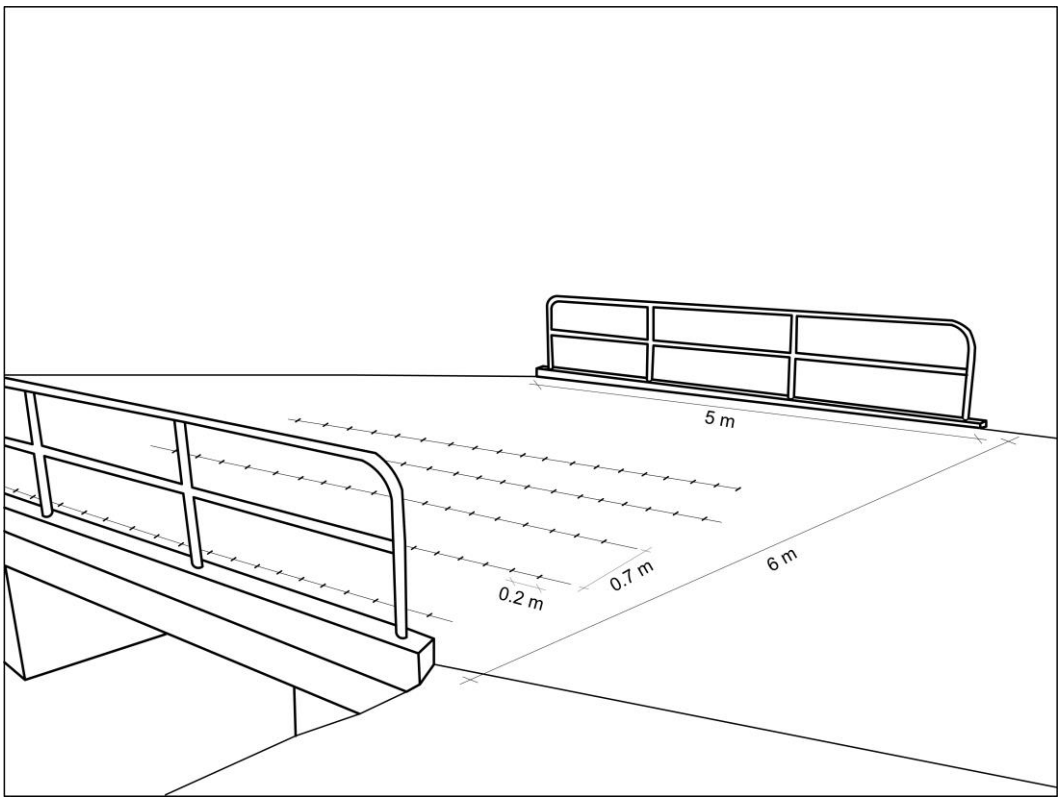
U lipnju 2017. godine radilo se na proširenju mosta (slika 4.1.) na potoku Mozdernjak u općini Kneginec. Nakon vidljivih oštećenja unaprijed dvije godine, zatraženo je ispitivanje metodom Impact-echa (slika 4.2.).

a) b)

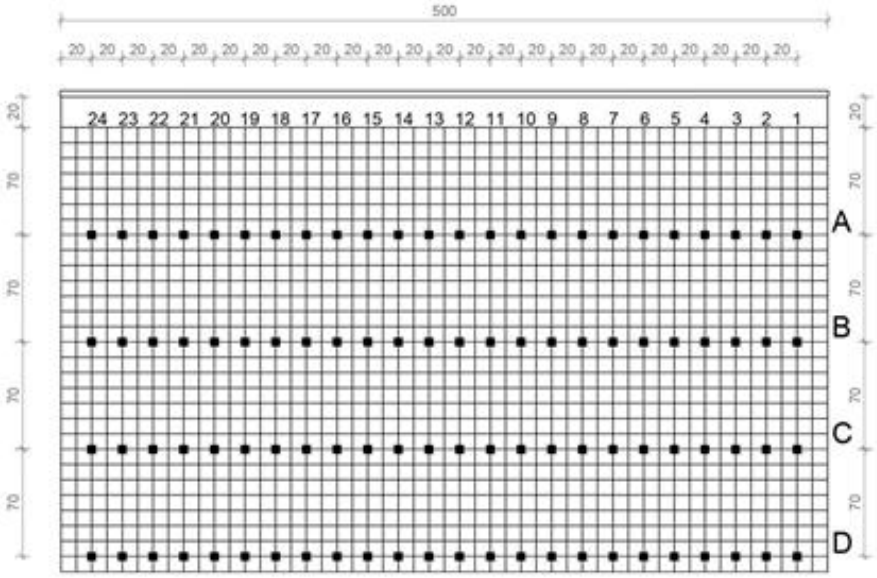
Slika br.4.1. a),b) Radovi na proširenju mosta Mozdernjak [9]

Slika br.4.2. Priprema za ispitivanje metodom Impact-Echa

Most je bočno proširen i njegove su dimenzije 5,0 m i 6,0 m (slika 4.3.). Metodom impact-echa napravljena je provjera konstrukcije starog dijela mosta, te provjera spoja starog dijela sa novim dijelom. Istraživanje se podijelilo na dvije strane mosta, gdje je raster točaka 4x24 (slika 4.4.).

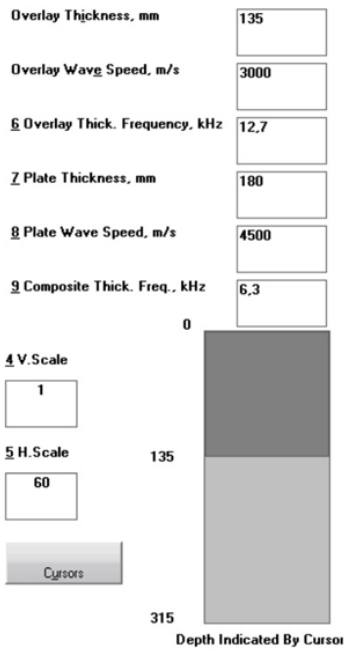


Slika br. 4.3. Bočno proširenje mosta Mozdernjak i njegove dimenzije



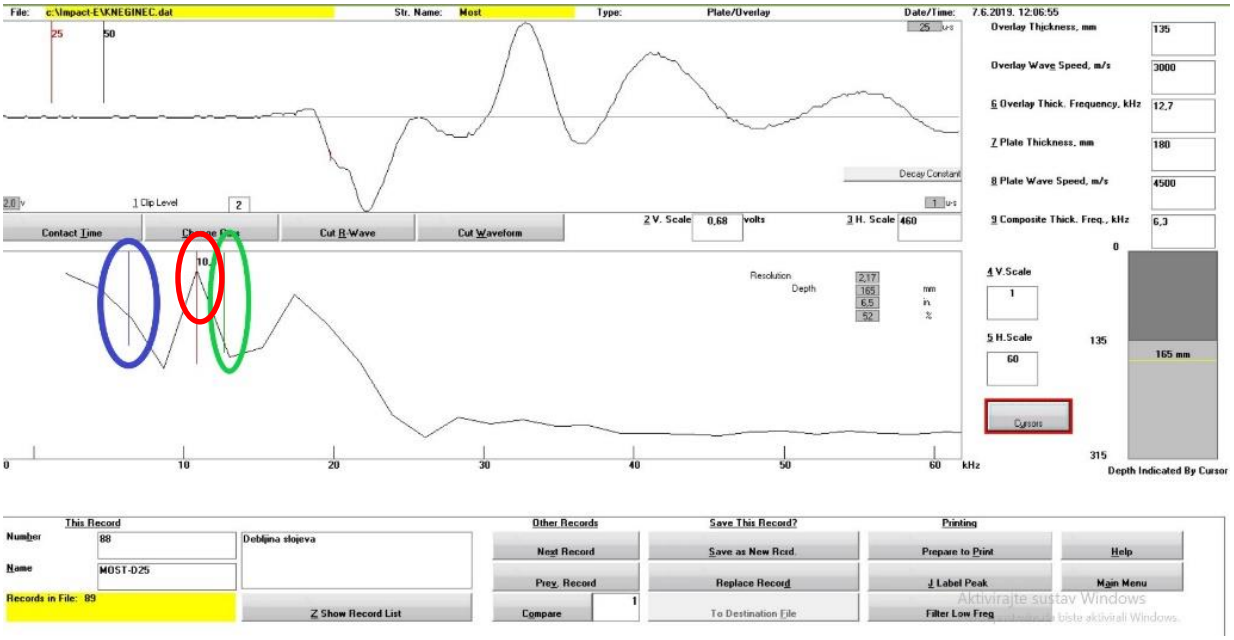
Slika br.4.4. Raster točaka

Nakon iscrtavanja rastera točaka, prije postavljanja samog uređaja na ispitivanu plohu, postavljene su postavke programa Impact-echa. U programu je definirana pretpostavljena debljina asfaltnog i betonskog sloja. Namještena je brzina vala na ploču, i frekvencija od 6,3 kHz kao frekvencija sloja betona.



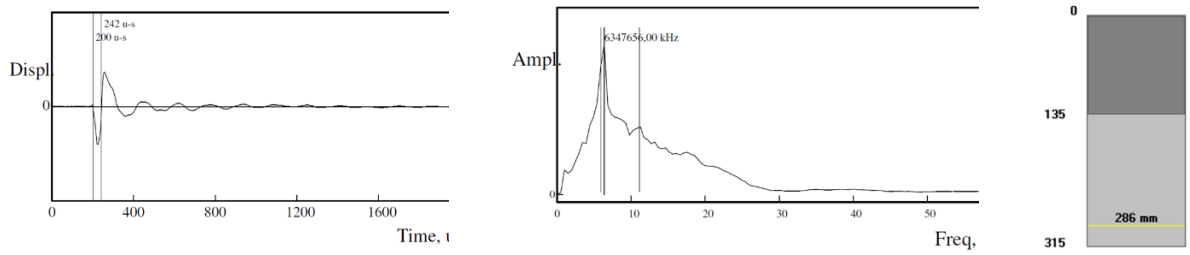
Slika br.4.5. Postavke programa Impact-Echo

Promatraju se frekvencije između dviju linija (zelene i plave) na 6,3 kHz i 12,7 kHz (slika 4.6.). Crveno na slici 14 označava dominantan vrh. Frekvencije između te dvije linije predstavljaju odraz P-vala u betonskom sloju, dok frekvencije desno od zelene linije predstavljaju reflekciju P-vala unutar asfaltnog sloja.



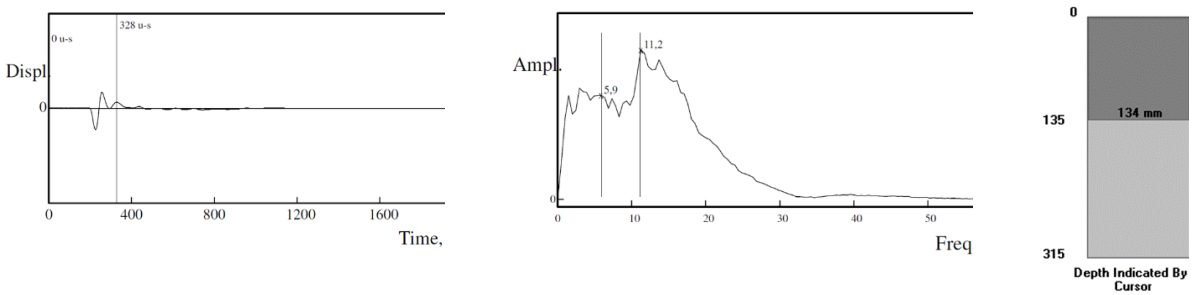
Slika br.4.6. Program Impact-echa (D25)

Namještena je frekvencija od 6,3 kHz, kao frekvencija sloja betona. Ista frekvencija je na debljini od 286 mm, dok je 315 mm predviđena debljina. Dvije su mogućnosti. Na debljini od 286 mm, nalazi se pukotina ili delaminacija, dok je druga mogućnost da je to debljina sloja na toj točki rastera (slika 4.7.).



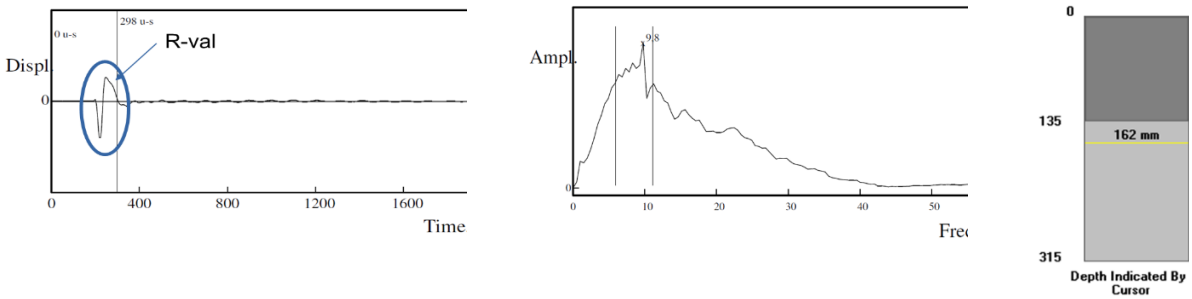
Slika br.4.7. Ispitivanje u točki rastera A3

Daljnjim ispitivanjem utvrđena su oštećenja u betonu između 5,9 kHz i 11,2 kHz. Oštećenja u asfaltnom sloju očitana su iznad 11,2 kHz. Frekvencija od 11,2 kHz zapravo je dominantni vrh točke rastera A9 (slika 4.8.). Događa se refleksija P-vala od spoja asfalta i betona što ukazuje na gubitak veze spoja. Ukoliko P-valovi nisu preneseni preko spoja, ne možemo dobiti informaije o betonskom sloju.



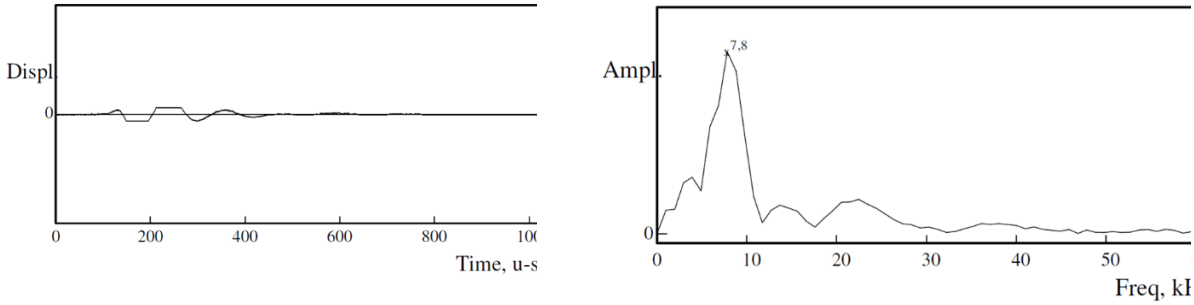
Slika br. 4.8. Ispitivanje u točki rastera A9

Očitana frekvencija od 9,8 kHz u točki rastera B12 (slika 4.9.), njen je dominantan vrh. Događa se refleksija P-vala na dubini od 162 mm, na cca 27 mm ispod spoja slojeva što je otprilike položaj gornje armature. Ukazano je na delaminaciju betona koja označava svako oštećenje ili propadanje. Oštar vrh refleksije P-vala od deliminacije potvrđuje prvotnu dubinu.



Slika br.4.9. Ispitivanje u točki rastera B12

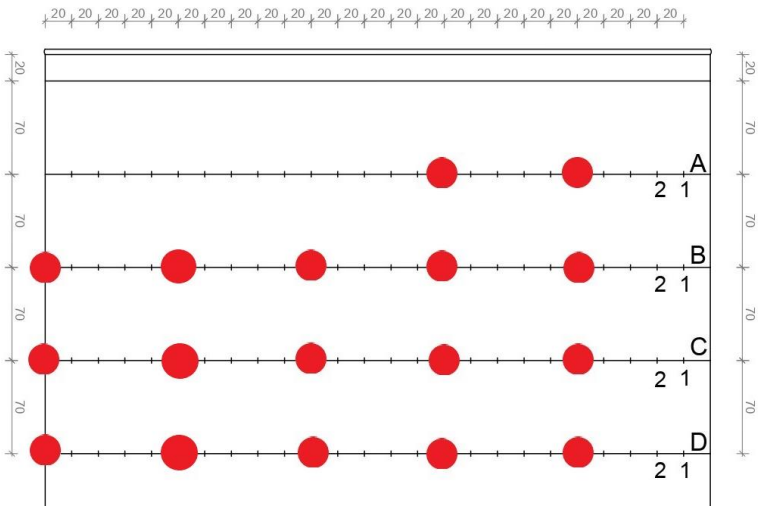
Frekvencija od 7,3 kHz dominantan je vrh u točki C18. U ovoj točki rastera prevladava R-val, ukazuje nam na delaminaciju betona i položaj područja armature. Na dubini od 96 mm, u točki D6, kod frekvencije od 15,6 kHz loš je spoj asfaltne zakrpe. U točki B20 na frekvenciji od 11,7 kHz događa se refleksija P-vala s dubine od 163 mm, ponovno je primjećena delaminacija betona. Kod frekvencije od 7,8 kHz, refleksija P-vala na dubini od 251 mm označava položaj donje armature, ali i delaminaciju betona u točki C6 (slika 4.10.).



Slika br.4.10. Ispitivanje u točki rastera C6

Točka rastera C9 ima dominantni vrh kod frekvencije od 7,8 kHz, gdije je prisutan R-val. Ova frekvencija ukazuje na dubinu od 161 mm. Mora se bolje razmotriti i analizirati, te ukloniti ili anulirati R-val, na ispravan način. Nakon smanjena voltaže sa 2 na 0,25, primijećena je pojava novog vrha. Dodatno smanjenje na 0,05, što dodstranjuje R-val, ukazuje na pojavu novog dominantnog vrha na 13,7 Khz. Na dubini od 165 mm i 285 mm vidljive su delaminacije na gornjoj i doljnjoj armaturi.

Za prikaz tabličnih rezultata odabrano je 17 točaka rastera od ukupno 89 (slika 4.11.), koje su na udaljenosti cca 1m.



Slika br. 4.11. Prikaz odabranih 17 točaka rastera

Tablica 3. Prikaz tabličnih rezultata

Broj točke rastera	Predviđena debljina asfaltnog sloja [mm]	Predviđena debljina betonskog sloja [mm]	Predviđena ukupna debljina [mm]	Dominantni vrh [kHz]	Refleksija P-vala na određenoj dubini [mm]	Udaljenost od spoja slojeva	Razmatranje mogućnosti
A5	135	180	315	11,7	150	cca 15 mm ispod spoja slojeva	Mogući položaj gornje armature / deliminacija betona
A10	135	180	315	3,9	/	/	Nemogućnost dobivanja informacija o betonskom sloju jer P-valovi nisu preneseni preko spoja
B5	135	180	315	8,7	203	cca 68 mm ispod spoja slojeva	Deliminacija betona / podučje armature
B10	135	180	315	4,3	/	/	Nemogućnost dobivanja informacija o betonskom sloju jer P-valovi nisu preneseni preko spoja
B15	135	180	315	13	131	cca 4 mm iznad spoja slojeva	Deliminacija betona / spoj dva sloja
B20	135	180	315	9,8	186	cca 51 mm ispod spoja slojeva	Deliminacija betona / područje armature
B25	135	180	315	10,7	168	cca 33 mm ispod spoja slojeva	Mogučnost položaja gornje armature
C5	135	180	315	4,3	/	/	Nemogućnost dobivanja informacija o betonskom sloju jer P-valovi nisu preneseni preko spoja
C10	135	180	315	6,5	303	cca 168 mm ispod spoja slojeva	Pukotina ili deliminacija / debljina sloja na toj točki rastera
C15	135	180	315	15,2	113	cca 13 mm iznad spoja slojeva	Loš spoj asfaltne zakrpe
C20	135	180	315	6,5	303	cca 168 mm ispod spoja slojeva	Pukotina ili deliminacija / debljina sloja na toj točki rastera
C25	135	180	315	10,9	165	cca 30 mm ispod spoja slojeva	Mogučnost položaja gornje armature

D5	135	180	315	13,0	131	cca 4 mm iznad spoja slojeva	Deliminacija betona / spoj dva sloja
D10	135	180	315	10,9	165	cca 30 mm ispod spoja slojeva	Mogučnost položaja gornje armature
D15	135	180	315	8,7	217	cca 82 mm ispod spoja slojeva	Deliminacija betona / moguče područje armature
D20	135	180	315	10,9	165	cca 30 mm ispod spoja slojeva	Mogučnost položaja gornje armature
D25	135	180	315	10,9	165	cca 30 mm ispod spoja slojeva	Mogučnost položaja gornje armature

Nakon tablične analize provedena je grafička analiza, u koju su unešeni podaci 17 točaka rastera, dubina refleksije P-vala kao i udaljenost od spoja slojeva (prilog br.1.). Zelenom linijom označene su kritične dubine refleksije P-vala, dok plavom linijom dubine koje prate sloj asfalta. Možemo zaključiti da je na kritičnim dubina refleksije P- vala zbog oštečenja u armaturi.

5. Zaključak

Nakon provedenog istraživanja o Impact-Echo metodi, možemo zaključiti da se metoda najuspješnije koristi za identifikaciju i kvantifikaciju sumnjivih problema unutar strukture, u kontroli kvalitete, kao što su mjerenje debljine novih kolnika autocesta, te u programima preventivnog održavanja, kao što su rutinske procjene paluba mostova za otkrivanje delaminacija. Sustav Impact-Echa pruža korisniku sljedeće pogodnosti: samo jedna površina mora biti dostupna za testiranje; brzo otkrivamo debljinu nepoznatog člana, bez izbočenja; otkriva nedostatke poput šupljina betona, betonskih saća, pukotina i raslojavanja; mjesto dubine defekata i točan položaj.

Što se tiće ispitivanja zidanih konstrukcija možemo iznjeti nekoliko važnih zaključka. Akustična svojstva komponenti zida (opeke, bloka, žbuke i morta) dovoljno su slična da u većini slučajeva građevinski elementi ziđa reagiraju na Impact-Echo kao na kontinuiranu jedinicu. Na primjer, jedan zid od opeke sastavljen od opeke i žbuke može se tretirati kao ploča u svrhu ispitivanja Impact-Echo. Pukotine koje se pojavljuju u zglobovima nemaju nikakvog utjecaja na efekt odziva od cigle. Pukotine koje se pojavljuju u zglobovima ležaja mogu poremetiti reakciju; ali učinci ovog odziva su visoko lokalizirani i nalik na ploču. Mogu se otkriti praznine u fugama zidova koji su ispunjeni mortom. Mogu se otkriti šupljine u injektiranim stanicama blokovske stijenke s opekom i mortom. Mogu se otkriti šupljine u spojnicama ovratnika višestrukih zidova. Odabirom dužeg vremena utjecaja (više od 30 μs), zidovi s jezgrom (gdje je područje jezgre manje od 25 % površine opeke) može se uspješno ispitati metodom Impact-Echa. Jezgre uzrokuju mjerljivi pomak u odgovoru debljine opeke, ali ne sprječavaju otkrivanje šupljina u višestrukim stijenkama. Cjelokupna debljina stijenki višestruke stijenke može se procijeniti samo kada su spojene jedna s drugom i između njih nema praznina.

Po završetku analize podataka dobivenih ispitivanjem mosta Mozdernjak metodom Impact-Echa, možemo primjetiti da je na točkama rastera A5, B25, C25, D10, D20, D25 mogući položaj gornje armature, dok je na točkama rastera B5, B15, B20, C10, C20, D5, D15 deliminacija betona. Sama delaminacija betona predstavlja svako oštećenje bez obzira na uzrok, naprimjer gubitak krutosti ili konstrukcijski nedostatak. Na točkama rastera A10, B10, C5 desila se nemogućnost dobivanja informacija o betonskom sloju jer P-valovi nisu preneseni preko spoja. Točka C15 nam ukazuje na loš spoj asfaltne zakrpe.

Sveučilište
Sjever

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, LUCIJA KUČINA _____ *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom PROVEDBA NEDESTRUKTIVNIH ISPITIVANJA POMOĆU IMPACT-ECHO METODE _____ *(upisati naslov)* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Kučina Lucija
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, LUCIJA KUČINA _____ *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom PROVEDBA NEDESTRUKTIVNIH ISPITIVANJA POMOĆU IMPACT ECHO METODE _____ *(upisati naslov)* čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Kučina Lucija

6. Literatura

[1] Cukrov I.; Betonske konstrukcije I predavanja, Zagreb 2017.

[2] HRN EN 12504 - 1: 2009 Ispitivanje betona u konstrukcijama - 1. dio: Izvađeni ispitni uzorci Uzimanje, pregled i ispitivanje tlačne čvrstoće.

[3] Građevinski fakultet Zagreb; Separati s predavanja iz kolegija Zaštita od požara, Zagreb 2014/2015.

[4] Halavanija A.; Završni rad, Zagreb 2010.

[5] Lin, Y., and Sansalone, M.: "Transient Response of Thick Circular and Square Bars Subjected to Transverse Elastic Impact," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 2., veljača,1992. pp. 885-893.

[6] Sansalone, M., Lin, J.M., and Streett, W.B. :"A Procedure Based on the Use of Direct P-waves for Determining the P-Wave Speed for Use in Impact-Echo Testing of Concrete," Materials Journal of the American Concrete Institute (in press), 1997.

[7] J. Sanslone M., B.Street W.; Impact – Echo Nondestructive Evaluation of concrete and Masonry; 1997.

[9] Lin Y. and Su, W.C.: „ The Use of Stress Waves for Determining the Depth of Surface-Opening Cracks in Concrete Strucmres, Materials Journal of the American Concrete Institute, Vol. 93, No. 5.; 1996

[10] Sansalone, M., Carino, N.J., and Hsu, N.: "A Finite Element Smdy of Transient Stress Wave Propagation in Plates," National Bureau of Standards Journal ofR£search, July -August, pp. 267- 278; 1987.

[11] Sansalone, M., and Carino, N.J.: "Finite Element Smdies of the ImpactEcho Response of Layered Plates Containing Flaws," in International Advances in Nondestructive Testing, 15'hed., W.G. McGonnagk, Ed., Gordon & Breach Science Publishers, New York, pp. 313-336.; 1990.

[12] Orešković M., Klymenko I., Aniskin A., Kozina G: Analysis of Damaged Concrete Columns of Circular Cross-Section. - Tehnički vjesnik. 2018, 25 (2), pp. 337-343.

[13] Orešković M. Stress -strain state and strength of damaged compressed reinforced-concrete elements of circular cross section. Dis. cand. tech. sc. Speciality 05.23.01 - building constructions, building and structure. - Odesa State Academy of Civil Engineering. - Odesa, 2015, 214 p.

Internet izvori:

[14] https://hr.wikipedia.org/wiki/Poissonov_omjer

[15] https://hr.wikipedia.org/wiki/Akusti%C4%8Dka_impedancija

[16] https://hr.wikipedia.org/wiki/Amplituda

[17] https://hr.wikipedia.org/wiki/Frekvencija

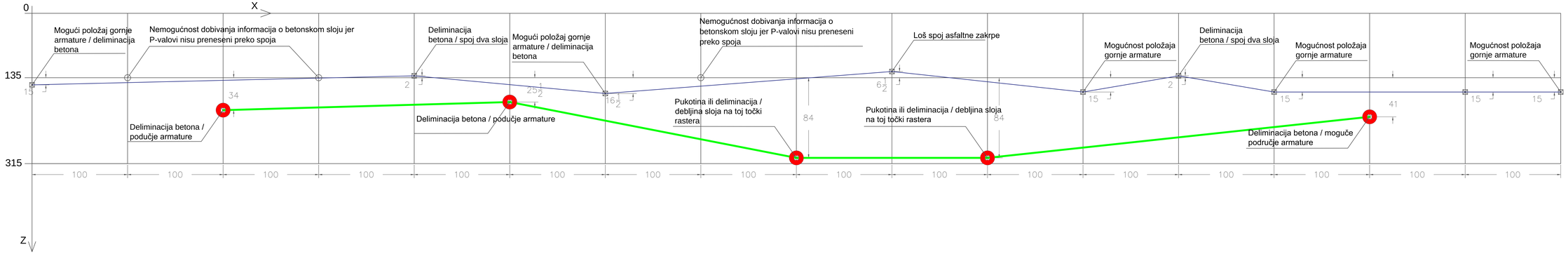
Popis slika

Slika br.2.1. Armiranobetonska greda u kojoj je beton naprezan na tlak, a čelik na vlak.....4
Slika br. 2.2. Razvoj deformacija betona s vremenom uz konstantno opterećenje i nakon rasterećenja 4
Slika br. 2.3. Promjenjivo djelovanje ima četiri reprezentativne vrijednosti 5
Slika br. 2.4. Odnos pouzdanosti konstrukcije i uporabni vijek konstrukcije 8
Slika br. 2.5. Sinkronijska i dijakronijska procjena.....9
Slika br. 2.6. Proces dijagnostike 11
Slika br. 2.7. Shema puls-echo tehnike primijenjene na ispitivanje betona. 14
Slika br. 2.8. Pojednostavljeni dijagram metode Impact - Echo 15
Slika br. 2.9. Prior za ispitivanje Impact – Echa 6 16
Slika br. 3.1. Piezoelektrični pretvornik 19
Slika br. 3.2. Polu-sinusna krivulja odnosa funkcije sile i vremena.....19
Slika br. 3.3. Raspodjela amplitude i frekvencije u udarnim valovima.....20
Slika br.3.4. Odnos vremena i sile.....21
Sika br. 3.5. Prikaz maksimalne korisne frekvencije koju proizvodi udar.....22
Slika br. 3.6. Usporedba krivulja sile i vremena i raspodjele frekvencija za dva impact ispitivanja sa istom kuglom, a s različitim brzinama sudara. 22
Slika br. 3.7. Seizmogramski prikaz nailaska P-vala a potom i S-vala do neke seizmološke postaje 24
Slika br. 3.8. Shematski prikaz udarnih valova uzrokovanih udarom 24
Slika br. 3.9. Prikaz smjera valnog rasprostiranja i smjerova titranja 25
Slika br. 3.10. Raspodjela amplitude i frekvencije u udarnim valovima.....26
Slika br. 3.11. Promjene u reflektiranim P valovima: (a) promjena faze na oba sučelja; (b) promjena faze samo na gornjem sučelju.....31
Slika br. 3.12. Impact-Echo na ploči. Shematski prikazi: (a) refleksije P valova i (b) valnog oblika. 33
Slika br. 3.13. Valni oblik koji se sastoji od jednostavnog sinusnog vala i odgovarajućeg amplitudnog spektra. 36
Slika br. 3.14. Valni oblik koji se sastoji od dva sinusna vala različitih amplituda i frekvencija i odgovarajućeg amplitudnog spektra. 36
Slika br. 3.15. Valni oblik koji se sastoji od triju sinusnih valova različitih amplituda, frekvencije i odgovarajućeg amplitudnog spektra. 37

Slika br. 3.16. Prikaz jednog ciklusa sinusnog vala (a) koji je predstavljen intervalima uzorkovanja 38
Slika br. 3.17. Prikaz intervala uzorkovanja 39
Slika br. 3.18. Shematski dijagram valova generiranih od Impact-Echa 40
Slika br. 3.19. Prikaz mjerenja pomoću dva pretvorika 40
Slika br. 3.20. Interval uzorkovanja od 2 μs 41
Slika br. 3.21. Impact - Echo test na ploči debljine 200 mm 42
Slika br. 3.22. Determinirana brzina P-vala 42
Slika br. 3.23. Vrste pukotina koje se nalaze na površini 43
Slika br. 3.24. Udaljenost između darca i pretvornika 44
Slika br. 3.25. Ispunjene pukotine 45
Slika br. 3.26. Nekoliko zabilježenih refleksija valova 46
Slika br. 3.27. Ploča sa prazninom u tlu 46
Slika br. 3.28. 48
Slika br. 3.29. Zidani zid koji se sastoji od vanjskog dijela opeke i unutarnjeg dijela betonskog bloka 49
Slika br. 4.1. a),b) Radovi na proširenju mosta Mozdernjak 9 50
Slika br. 4.2. Priprema za ispitivanje metodom Impact-Echa 50
Slika br. 4.3. Bočno proširenje mosta Mozdernjak i njegove dimenzije 51
Slika br. 4.4. Raster točaka 51
Slika br. 4.5. Postavke programa Impact-Echo 52
Slika br. 4.6. Program Impact-echa (D25) 52
Slika br. 4.7. Ispitivanje u točki rastera A3 53
Slika br. 4.8. Ispitivanje u točki rastera A9 53
Slika br. 4.9. Ispitivanje u točki rastera B12 53
Slika br. 4.10. Ispitivanje u točki rastera C6 54
Slika br. 4.11. Prikaz odabranih 17 točaka rastera 54

Prilozi

Prilog br.1 Grafička analiza rezultata ispitivanja metodom Impact-Echa



GRAFIČKA ANALIZA REZULTATA
ISPITIVANJA IMPACT-ECHO METODOM

NAZIV PROJEKTA	
GRAFIČKA ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA IMPACT-ECHO METODOM	
MENTOR:	IZRADILA:
doc.dr.sc.Matija Orešković, dipl.ing.građ.	Lucija Kučina