

Dr Mladen Ćosić¹
Mr Kristina Božić-Tomić²
Dr Nenad Šušić³

STANDARDIZACIJA, ISPITIVANJE I ANALIZA INTEGRITETA ŠIPOVA

0352-2733, 51 (2019), p. 34-68

UDK: 624.154
PREGLEDNI RAD

Apstrakt

U radu su prikazani aspekti standardizacije i karakteristični primeri ispitivanja integriteta šipova sa analizom rezultata, pri čemu se metodologija ispitivanja oslanja na postojeće ASTM i sopstvene standarde, ali i na metodologiju ispitivanja prikazanu u naučnim radovima *Pile Integrity and Load Testing: Methodology and Classification* i *Pile Integrity Testing: Testing and Results Analysis*. Ispitivanja šipova sprovedena su primenom licenciranih oprema za test integriteta šipa sa senzorom (SIT) i test integriteta šipa sa sondama (CSL). Ispitivanjima su prikazane korektne i problematične situacije, koje se pojavljuju prilikom analize integriteta šipova. Ukazano je na aspekte primene talasne teorije, ali i na procesiranje signala. Takođe, posebno je skrenuta pažnja na potrebu izrade plana ispitivanja integriteta šipova kod objekata s velikim brojem šipova.

Ključne reči: šip, ispitivanje, standardi, integritet, SIT, CSL

1. UVOD

Problematika ispitivanja integriteta šipova u poslednjih dvadesetak godina doživela je ekspanziju u pogledu metodologije ispitivanja, tehnike i instrumentalizacije ispitivanja, raznovrsnosti tipova testova ispitivanja, softversko-hardverske podrške ispitivanju i teorije i obrade signala. Pored standardnih naučnih disciplina, kao što su teorija elastičnosti, mehanika tla, dinamika tla, mehanika stena, fundiranje, ispitivanje konstrukcija,

¹ Institut za ispitivanje materijala IMS, Beograd, Srbija, mladen.cosic@institutims.rs

² Institut za ispitivanje materijala IMS, Beograd, Srbija, kristina.tomic@institutims.rs

³ Institut za ispitivanje materijala IMS, Beograd, Srbija, nenad.susic@institutims.rs

zahteva se i dobro poznavanje naučne tematike interakcije konstrukcija-tlo, ali i drugih naučnih tematika (koje se primarno ne izučavaju u građevinarstvu ili u geotehnici), kao što su: talasna teorija, metoda karakteristika, teorija i obrada signala i slično. Iskustva autora ovog rada pokazuju da se neretko nailazi na neadekvatnu interpretaciju standarda ispitivanja šipova, pa i kompletne metodologije ispitivanja. U tom smislu, težišta ovog rada jesu da se predstave određena iskustva autora rada i da se ukaže na potrebu za doslednošću u primeni metodologije ispitivanja šipova, koja je prikazana u radovima [6] i [7].

Upoređivanje rešenja koja se dobijaju analizama reflektograma u vremenskom i frekventnom domenu prikazano je u radu [23], dok su u radovima [22] i [3] prikazane osnove ispitivanja integriteta šipova i procedure za procenu stanja integriteta šipova. U radu [10], razmatrana je analiza propagacije talasa prilikom testa integriteta šipa, dok se u radu [20], primenom teorije talasića, analizira integritet šipa. Numerička analiza defektnih šipova razmatrana je u istraživanjima [29] i [9], a numerička analiza integriteta šipa s promenljivim modulom elastičnosti u radu [27]. Analize 3D efekata, prilikom testa integriteta šipa, prikazane su u radovima [31] i [30]. Interpretacija rezultata testova integriteta šipova sa simuliranim defektima prikazana je u istraživanju [21], dok je interpretacija rezultata ispitivanja integriteta šipova, primenom metode mašinskog učenja, prikazana u istraživanju [5]. Razvoj sveobuhvatne metodologije za analizu integriteta i nosivosti šipova prezentovana je radu [8]. U odnosu na istraživanja koja se sprovode testom integriteta šipa sa senzorom (SIT), primenom testa integriteta šipa sa sondama (CSL) dobija se znatno bolji uvid o stanju integralnosti šipa [4], [26]. Pouzdanost testa integriteta šipa sa sondama (CSL), između ostalog, razmatrana je u radu [17].

Tim inženjera i tehničara Centra za puteve i geotehniku Instituta IMS sproveo je nekoliko hiljada ispitivanja testova integriteta šipa sa senzorom (SIT) i više od stotinu ispitivanja testova integriteta šipa sa sondama (CSL) za zgrade, industrijske objekte, mostove, vijadukte, obaloutvrde, vetroparkove i slično. U ovom radu, u skraćenom obimu, prikazani su standardi o ispitivanjima integriteta šipova i analizirani su neki rezultati autorskih ispitivanja integriteta šipova sprovedeni na velikim i značajnim objektima u Srbiji i u regionu.

2. STANDARDIZACIJA ISPITIVANJA INTEGRITETA ŠIPOVA - TEST INTEGRITETA ŠIPA SA SENZOROM (SIT)

Test integriteta šipa sa senzorom (SIT - *Sonic Integrity Test* ili PIT - *Pile Integrity Test*) pripada grupi niskodilatacionih testova (LST - *Low Strain Test*) [1]. Test integriteta šipa sa senzorom (SIT) se zasniva na teoriji propagacije talasa kroz šip u cilju utvrđivanja defekata/diskontinuiteta i dužine šipa. Ovaj test se realizuje na principima indukovanja, propagacije, refleksije, refrakcije i recepcije talasa u šipu. Indukcija talasa se inicira preko spoljašnje pobude, udarom čekića, tako da je spoljašnji transmitovani signal, u opštem slučaju, impulsnog karaktera. Propagacija talasa kroz šip se sprovodi nakon iniciranja talasa, od glave do baze šipa i suprotno. Efekat refleksije se javlja na mestu kontakta dva različita medijuma, u konkretnom slučaju, na mestu baze šipa i tla, gde talas propagira ka glavi šipa. Refrakcija talasa je efekat prelamanja talasa na kontaktu dva medijuma, kao što je kontakt baze i omotača šipa sa tlom. Bazni uslov, koji treba da je ispunjen kako bi se mogao efikasno razmatrati integritet šipa ovim testom, jeste da dužina talasa, koji se inicira, bude veća od prečnika šipa, tako da se propagacija talasa u šipu može razmatrati primenom jednodimenzionalne teorije rasprostiranja talasa u čvrstom medijumu. Zapis promene brzine propagacije talasa u vremenu, mereno na mestu glave šipa, prikazuje se preko reflektograma. Generalno razmatrajući, promene na reflektogramu se javljaju usled promene u bazi šipa, promene u prečniku duž stabla šipa, delimičnom inkluzijom tla u domen šipa, prslinama (većim, značajnijim), varijacijom kvaliteta materijala šipa, varijacijom slojeva tla i uticajem armaturnog čelika u šipu (jako armirani šip). Pod terminom ispitivanje integriteta šipa podrazumeva se utvrđivanje diskontinuiteta, konzistencije materijala šipa, dužine šipa i promene poprečnog preseka duž stabla šipa.

Test integriteta šipa sa senzorom (SIT) se zasniva na teorijama: dinamika kretanja krutog tela, talasna teorija, metoda karakteristika, teorija elastičnosti, dinamika konstrukcija, interakcija konstrukcija-tlo i teorija i obrada signala. Prema dinamici kretanja krutog tela razmatra se apliciranje spoljašnje pobude udarom idealno krutog tela (čekića) o glavu šipa. Prema talasnoj teoriji razmatraju se aspekti propagacije talasa kroz šip i tlo. Prema metodi karakteristika razmatraju se aspekti kretanja odlazećih (*downward*) i dolazećih (*upward*) talasa sa identifikacijom defekata i diskontinuiteta u šipu. Prema teoriji elastičnosti uzima se u obzir da je konstitutivni model ponašanja šipa i tla linearno-elastičan. Prema dinamici konstrukcija razmatraju se oscilacije šipa u interakciji sa

tlom u vremenskom domenu. Prema interakciji konstrukcija-tlo razmatraju se spregnut problem statičke i dinamičke interakcije i reakcije dva medijuma (šip i tlo), bitno različitih fizičko-mehaničkih karakteristika. Prema teoriji i obradi signala razmatraju se digitalizacija i procesiranje signala u cilju dobijanja odgovarajućih konačnih rezultata primenljivih u građevinskoj inženjerskoj praksi, a pomoću kojih se donose odluke o stanju integriteta šipa.

U cilju pravilnog sprovođenja testa integriteta šipa sa senzorom (SIT) potrebno je ispuniti sledeće kriterijume:

- potrebno je obezbediti adekvatan pristup šipu koji se ispituje (suva temeljna jama i prohodnost za ispitivača koji nosi sa sobom opremu za ispitivanje),
- potrebno je efekat dejstva rada građevinskih mašina minimalizovati, s obzirom da vibracije, koje se generišu njihovim radom, mogu nepovoljno uticati na ispitivanje,
- ispitivanje se može sprovesti u intervalu temperaturnih vremenskih uslova od +5°C do +40°C.

Oprema za sprovođenje testa integriteta šipa sa senzorom (SIT) se sastoji iz:

- čekića: klasičnog mehaničkog ili mehaničkog povezanog električnim kablom za merenje karakteristika indukovanog signala, čije vreme trajanja ne sme biti duže od 1ms i ne sme prouzrokovati defekat šipa (za šipove prečnika manjeg od 1m koriste se čekići težine 0.5kg, 1.5kg i 3.5kg, a za šipove prečnika većeg od 1m koriste se čekići težine 1.5kg, 3.5kg i 6kg),
- senzora (akcelerometra) za prijem signala (opsega akceleracija minimalno 50g, rezonantne frekvencije minimalno 30kHz),
- uređaja za akviziciju, memorisanje, obradu i vizuelizaciju podataka.

Pre sprovođenja testa integriteta šipa sa senzorom (SIT) potrebno je imati kalibrisanu (baždarenu) opremu: mehanički čekić povezan električnim kablom, senzor (akcelerometar) i uređaj za akviziciju, memorisanje, obradu i vizuelizaciju podataka. Kalibracija senzora (akcelerometra) i mehaničkog čekića povezanog električnim kablom se sprovodi jednom u dve godine.

Test integriteta šipa sa senzorom (SIT) se sprovodi u nekoliko koraka:

- analiziraju se svi relevantni podaci u pasošu šipa i geotehničkom elaboratu,
- setuju se oprema, podaci i parametri za šip koji se ispituje,

- na prethodno pripremljenu površinu glave šipa se postavi senzor (akcelerometar), pri čemu treba da je udaljenost pozicije senzora od mesta aplikacije udarca maksimalno 300mm,
- aplicira se udarac čekića u zoni centra ose šipa,
- postupak se ponavlja nekoliko puta (minimalno 3 puta), a ukoliko se pokaže potrebnim koriguju se parametri skaliranja i filtriranja (za šipove prečnika većeg od 500mm primenjuju se četiri merenja - u dva ortogonalna pravca),
- konstruiše se reprezentativni reflektogram na osnovu merenja dobijenih za 3 reflektograma,
- naknadno se sprovodi obrada podataka dobijenih reflektograma.

Test integriteta šipa sa senzorom (SIT), za bušene i bušene/zabušene (CFA) šipove, sprovodi se nakon dostizanja 75% projektovane čvrstoće betona ili minimalno nakon 7 dana, a za pobijene šipove ispitivanje se može sprovoditi nakon 2 dana. Signal koji se generiše prilikom udarca čekića o glavu šipa, u opštem slučaju, polutalasna je sinusna funkcija impulsnog karaktera. Primenom akcelerometra sprovodi se merenje promene ubrzanja glave šipa u vremenu, a naknadnom integracijom ubrzanja dobija se promena brzine glave šipa u vremenu (reflektogram), gde se vizuelno identifikuju amplitude i elongacije brzina. Ukupno vreme promene brzine glave šipa, koje se prikazuje reflektogramom, treba da je veće od $2L/c + 5ms$, pri čemu je L dužina šipa, a c brzina propagacije talasa u materijalu od kojeg je napravljen šip. Generalizovani modeli reflektograma šipova dobijeni testom integriteta šipa sa senzorom (SIT) su:

- reflektogram na kojem se identifikuje da je šip bez diskontinuiteta i/ili defekata,
- reflektogram na kojem se identifikuje da je šip sa diskontinuitetima i/ili defektima,
- reflektogram na kojem se identifikuje da je krutost tla u zoni baze šipa visoka,
- reflektogram na kojem se identifikuje da je krutost tla u zoni baze šipa niska,
- reflektogram relativno mekih tla,
- reflektogram tla veoma visoke krutosti.

Detaljnija klasifikacija reflektograma može se sprovesti prema [18]:

- AA - ispravan šip sa pozitivnim refleksijama ili kod koga se pre refleksije od baze šipa identifikuju manje promene brzine i

odstupanja brzine propagacije talasa ne veće od 5% od prosečne brzine propagacije talasa,

- AB - refleksija od baze se jasno ne identifikuje, ali i nema značajnijih smanjenja impedance, pri čemu je moguć razlog za nepostojanje refleksije od baze velika krutost tla,
- PF - postoji jedna ili više negativnih refleksija i/ili postoji bar jedno smanjenje impedance, a s obzirom da je refleksija od baze smanjena, impedanca je manja nego kod defekta kod koga nema refleksije od baze,
- PD - brzina propagacije talasa odstupa više od 5% od prosečne brzine propagacije talasa, a što ukazuje na moguć defekat šipa, pri čemu postoji jedna ili više refleksija koje maskiraju refleksiju od baze šipa,
- IR - znatno kompleksan signal (odgovor), a što, između ostalog, ukazuje na loš kvalitet betona pri vrhu šipa i/ili je ispitivanje sprovedeno suviše rano da bi beton dostigao potrebnu čvrstoću.

Šipovi klasifikovani kao AA i AB ne zahtevaju dodatna ispitivanja, dok se za šipove klasifikovane kao PF i PD zahtevaju dodatne analize.

Postupak naknadne analize integriteta šipa se sprovodi prema metodama:

- paralelna seizmička metoda (PSM - *Parallel Seismic Method*) za analizu integriteta šipa,
- bušenje šipa u cilju detaljnije analize defekata,
- uzorkovanje (kernovanje) šipa u cilju analize fizičko-mehaničkih karakteristika materijala šipa,
- analizira se mogućnost otkopavanja šipa (delimično ili u celosti),
- analiziraju se signali dobijeni dinamičkim testom opterećenja šipa pri pobijanju (PDT - *Pile Driving Test*), ukoliko je korišćena tehnologija izgradnje šipa pobijanjem i utvrđuju se svi elementi integriteta šipa.

Dodatno se mogu predlagati mere kojima se:

- proračunava kolika je adekvatna nosivost kraćeg šipa i/ili šipa sa uslovno prihvatljivim stepenom deficijencije integriteta, sa nižim faktorom sigurnosti,
- razmatraju aspekti sprovođenja ispitivanja nosivosti statičkim ili dinamičkim testovima,
- analiziraju ekonomski efekti izgradnje novog šipa.
- Šipove klasifikovane kao IR potrebno je ponovo ispitati nakon nove pripreme i korekcije glave, pa ukoliko se naknadno klasifikuju kao

PF ili PD, tada dodatne analize sprovoditi kao što je prethodno objašnjeno.

Kompletna obrada (procesiranje) signala (reflektograma) se sprovodi primenom teorije i obrade signala, pri čemu se zapis signala prikazuje u digitalizovanom formatu, a sam signal prikazuje u vremenskom domenu. Signal se konvertuje iz analognog u digitalni primenom konvertera sa minimalnom 16-bitnom ili 24-bitnom rezolucijom, pri čemu frekvencija smplovanja mora biti veća od 25kHz, a stepen greške frekvencije smplovanja signala manji od 0.01%. Generalno razmatrajući, procesiranje signala se sprovodi:

- direktno u vremenskom domenu (TDA - *Time Domain Analysis*),
- kompatibilizacijom (*signal matching*) u vremenskom domenu,
- transformacijom u frekventan domen (FDA - *Frequency Domain Analysis*).

U vremenskom domenu se sprovode skaliranje i filtriranje signala, pri čemu se za skaliranje, u najvećem broju slučajeva, koristi eksponencijalna funkcija, mada se može primeniti i polinomska, logaritamska ili stepena funkcija. Ovo skaliranje je poznato i kao filter-skaliranje, s obzirom da je njegova primena u cilju jasnije identifikacije refleksije od baze šipa. Sa druge strane, pravo filtriranje se sprovodi u cilju eliminacije manje bitnih refleksija i isticanje onih koje su više bitnije, pa se u tom smislu najčešće koristi višestruki (iterativni) težinski filter za filtriranje u vremenskom domenu. Kompatibilizacija (*signal matching*) se sprovodi u vremenskom domenu u cilju dobijanja promene oblika (poprečnog preseka) duž stabla šipa. Ovaj postupak je poznat kao *signal matching*, gde se kroz iteracije uspostavlja kompatibilizacija (usklađivanje) reflektograma numeričkog linearno-elastičnog modela interakcije šip-tlo i reflektograma *in-situ* SIT ispitanog šipa. Za bazne polazne parametre kompatibilizacije koriste se krutost i prigušenje tla (ili interakcije šip-tlo, u zavisnosti od primenjenog matematičkog modela), koji se, između ostalog, dobijaju primenom:

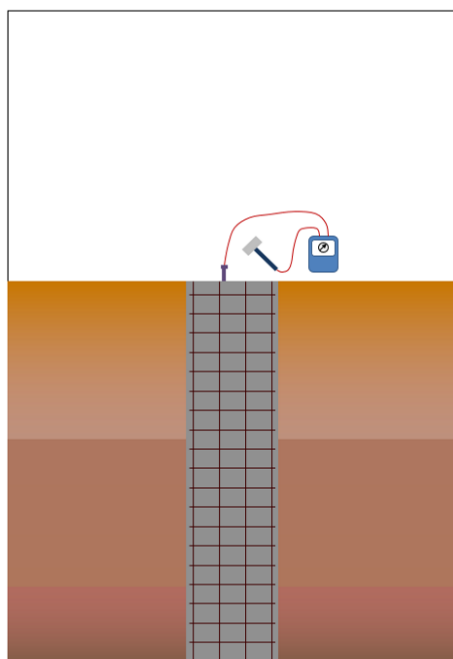
- testa statičke penetracije (CPT - *Cone Penetration Test*): q_c otpor prodiranja konusa i q_s trenje omotača,
- testa standardne penetracije (SPT - *Standard Penetration Test*): N broj udaraca ili N_{60} broj udaraca,
- testa presiometrom (PMT - *Pressuremeter Test*): P_{lm} pritisak,
- testa dilatometrom (DMT - *Dilatometer Test*): p pritisak.
- laboratorijske analize: C_u nedrenirana kohezija.

U frekventnom domenu se sprovodi analiza promena amplituda u funkciji frekvencija odgovarajućeg signala (reflektograma). Postupak se

zasniva na primeni diskretne *Fourier*-ove transformacije (DFT - *Discrete Fourier Transform*) ili brze *Fourier*-ove transformacije (FFT - *Fast Fourier Transform*) kompleksnom analizom, tako da se na dobijenom *Fourier*-ovom amplitudnom spektru (FAS - *Fourier Amplitude Spectra*) razmatranja svode na:

- filtriranje niskopropusnim filterom (LPF - *lowpass filter*), visokopropusnim filterom (HPF - *highpass filter*), pojasnopropusnim filterom (BPF - *bandpass filter*) i filterom pojasna brana (BSF - *bandstop filter*),
- analizu stepena periodičnosti signala i amplituda brzina.

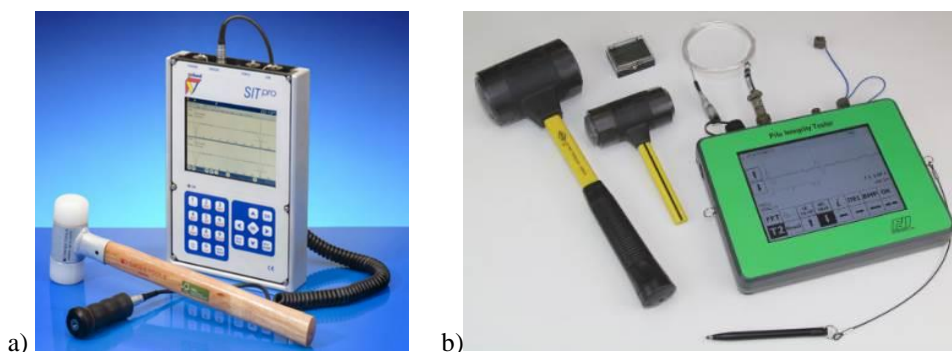
Filtriranje reflektograma u frekventnom domenu sprovodi se i u cilju eliminacije intervala nebitnih frekvencijskih opsega i zadržavanja intervala bitnih frekvencijskih opsega. Ukoliko se sprovodi i merenje signala sile, tada je potrebno da postoji mogućnost i za korekciju ovako dobijenog signala primenom tehnika skaliranja i filtriranja, pri čemu signali brzine i sile treba da imaju jednake frekvencije, da se ne bi pojavili fazni otkloni i amplitudne razlike. Na slici 1 dat je opšti šematski prikaz testa integriteta šipa sa senzorom (SIT).



Slika 1. Opšti šematski prikaz testa integriteta šipa sa senzorom (SIT) [6]

3. ISPITIVANJE INTEGRITETA ŠIPOVA - TEST INTEGRITETA ŠIPA SA SENZOROM (SIT)

Test integriteta šipa sa senzorom (SIT) zasniva se na teoriji jednodimenzionalne propagacije talasa kroz šip, s ciljem utvrđivanja: stvarne dužine šipa, postojanje defekata i diskontinuiteta i redukcije poprečnog preseka šipa [6]. Takođe, analiziraju se: promena signala u domenu glave šipa, kvalitet odziva signala u bazi šipa, promena impedance duž stabla šipa, promena slojeva tla u kojima je šip izgrađen i postojanje proširenja poprečnog preseka duž stabla šipa. Ovaj test, zapravo, jeste indirektna metoda analize integriteta šipa, s obzirom na to što se ispitivanje sprovodi analizirajući propagaciju talasa duž šipa, ali indukcijom talasa sa glave šipa. Test je brz, efikasan, sofisticiran i dovoljno pouzdan za praktičnu primenu. Ovim testom se ispituju integriteti svih tipova armiranobetonskih šipova: bušeni, CFA i pobijeni. Takođe, ispituju se i radni (eksploatacioni) i probni (testni) šipovi. Centar za puteve i geotehniku Instituta IMS poseduje licencirane opreme za test integriteta šipa sa senzorom (SIT) holandske firme *Profound* i američke firme *Pile Dynamics*. Obe opreme omogućavaju analizu reflektograma u vremenskom (TDA) i frekventnom domenu (FDA). Takođe, obe opreme imaju integrisane softverske module za: procesiranje, skaliranje (eksponencijalnu amplifikaciju) i filtriranje signala. Oprema SIT⁺ [16] za test integriteta šipa sa senzorom (SIT), holandske firme *Profound*, sastoji se iz: mehaničkog čekića, senzora (akcelerometra), hardverskog sistema za konvertovanje i akviziciju podataka i softverskog sistema (SIT i SITWAVE) za procesiranje i vizuelizaciju podataka. Akcelerometar je linearan u opsegu $\pm 50g$, rezonantne frekvencije 32kHz i nominalne osetljivosti 10mV/g. Konverzija AD signala se sprovodi primenom 24-bitnog konvertera ($>48.6kHz$). Oprema PIT-QFV [13] za test integriteta šipa sa senzorom (SIT), američke firme *Pile Dynamics*, sastoji se iz: mehaničkog čekića povezanog električnim kablom za merenje karakteristika indukovanog signala, senzora (akcelerometra), hardverskog sistema za konvertovanje i akviziciju podataka i softverskog sistema (PIT-W *professional* i PIT-S) za procesiranje i vizuelizaciju podataka. Akcelerometar je linearan u opsegu $\pm 100g$, rezonantne frekvencije 40kHz i nominalne osetljivosti 50mV/g. Konverzija AD signala se sprovodi primenom 24-bitnog konvertera ($>32kHz$). Na slici 2 prikazane su opreme za ispitivanje integriteta šipova testom integriteta šipa sa senzorom (SIT): SIT⁺ oprema holandske firme *Profound* i PIT-QFV oprema američke firme *Pile Dynamics*.



Slika 2. Opreme za ispitivanje integriteta šipova testom integriteta šipa sa senzorom (SIT): a) SIT⁺ oprema holandske firme Profound [16], b) PIT-QFV oprema američke firme Pile Dynamics [13]

Institut IMS sproveo je nekoliko hiljada ispitivanja testova integriteta šipa sa senzorom (SIT) na različitim tipovima šipova izgrađenih u različitim geološkim uslovima, tako da poseduje sopstvenu bazu znanja, iskustva i bazu podataka ispitivanja. S obzirom na ovako veliki broj sprovedenih ispitivanja, vremenom su se definisale karakteristične situacije u kojima su razmatrani aspekti dobijenih reflektograma. U tom smislu, generalno se mogu izdvojiti tri grupe reflektograma: klasični ili standardni reflektogrami koji ukazuju na dobar kvalitet integriteta šipa, reflektogrami koji ukazuju na moguću redukciju integriteta šipa, pa zahtevaju dodatne analize i reflektogrami koji jasno ukazuju na značajniji problem integriteta šipa.

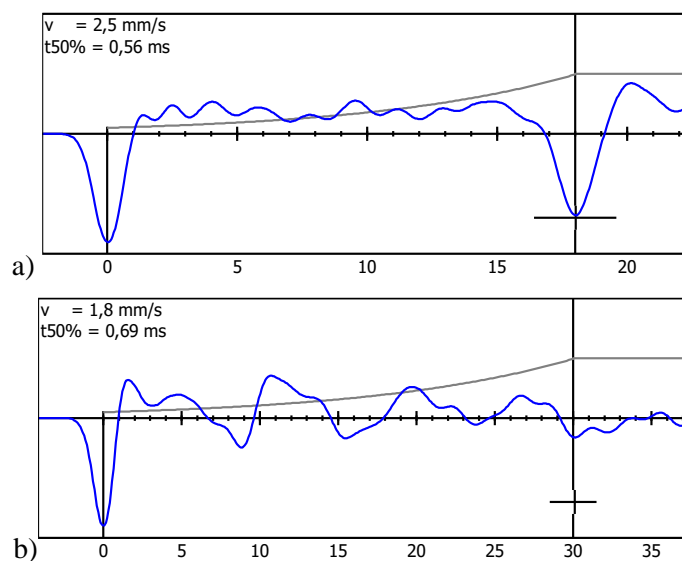
Pre sprovođenja testa, okrajcuje se beton i glava šipa se očisti od prašine i ostataka odlomljenih delova betona. Na slici 3 su prikazani šipovi (glave šipova) pripremljeni za ispitivanje testom integriteta šipa sa senzorom (SIT): adekvatna priprema, neadekvatna priprema, adekvatna priprema, međutim rezultati SIT na ovako pripremljenim glavama šipa sa hidroizolacijom mogu biti diskutabilni i nastavci glava šipova koji mogu biti problematični u smislu interpretacije signala SIT.

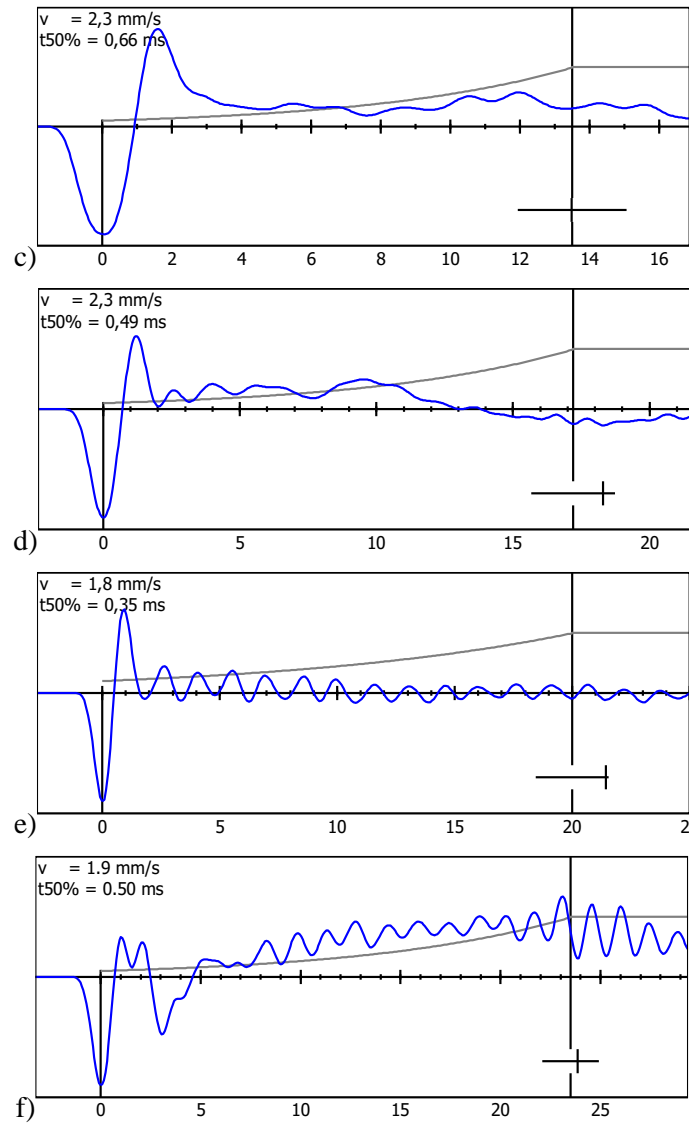




Slika 3. Šipovi (glave šipova) pripremljeni za ispitivanje testom integriteta šipa sa senzorom (SIT): a) adekvatna priprema, b) neadekvatna priprema, c) adekvatna priprema, međutim rezultati SIT na ovako pripremljenim glavama šipa sa hidroizolacijom mogu biti diskutabilni, d) nastavci glava šipova koji mogu biti problematični u smislu interpretacije signala SIT [7]

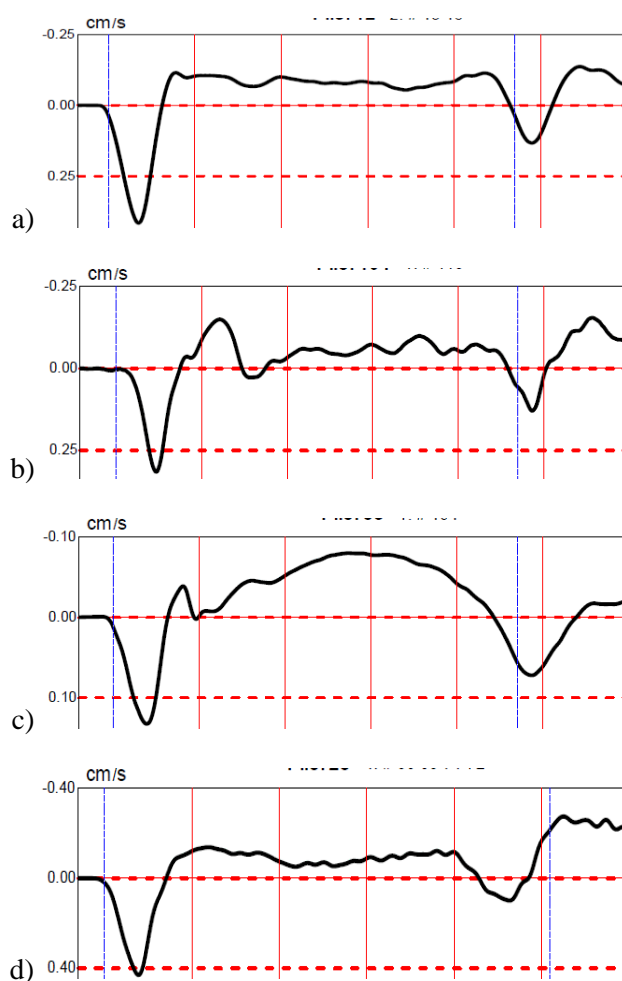
Na slici 4 prikazani su reflektogrami SIT integriteta šipova dobijeni SIT⁺ holandskom opremom: regularan šip, šip sa značajnijim redukcijama impedance u određenim presecima, nejasan odziv baze šipa i nakon primene eksponencijalnog filtera, redukcija impedance znatnije pre baze šipa, varijacija signala iz pozitivne u negativnu vrednost - posledica niskog modula elastičnosti glave šipa i značajna redukcija impedance u početnom delu šipa - defekat/diskontinuitet.





Slika 4. Reflektogrami SIT integriteta šipova dobijeni SIT⁺ holandskom opremom: a) regularan šip, b) šip sa značajnijim redukcijama impedance u određenim presecima, c) nejasan odziv baze šipa i nakon primene eksponencijalnog filtera, d) redukcija impedance znatnije pre baze šipa, e) varijacija signala iz pozitivne u negativnu vrednost - posledica niskog modula elastičnosti glave šipa, f) značajna redukcija impedance u početnom delu šipa - defekat/diskontinuitet [7]

Na slici 5 prikazani su reflektogrami SIT integriteta šipova dobijeni PIT-QFV američkom opremom: regularan šip, šip sa redukcijom impedance u početnom delu, efekat povećanja impedance i krutosti tla i šip izgrađen kraći nego što je projektom predviđeno.



Slika 5. Reflektogrami SIT integriteta šipova dobijeni PIT-QFV američkom opremom: a) regularan šip, b) šip sa redukcijom impedance u početnom delu, c) efekat povećanja impedance i krutosti tla, d) šip izgrađen kraći nego što je projektom predviđeno [7]

Prilikom sprovođenja SIT integriteta šipa, kod određenih reflektograma, mogu se pojaviti značajnije redukcije impedance, što može biti jedan od pokazatelja defekta i/ili diskontinuiteta šipa. Da bi se

detaljnije analizirao stepen defekta i/ili diskontinuiteta, sprovodi se dodatna analiza koja se zasniva na talasnoj teoriji i metodi karakteristika. Softver SITWAVE ima mogućnost analize promene impedance duž stabla šipa, tako da se efikasno može dobiti oblik šipa izgrađen u tlu, dok softver PIT-S ima mogućnost analize oblika šipa primenom β metode. S obzirom na veću pouzdanost rešenja koje se dobija primenom SITWAVE softvera, jer je, između ostalog, matematička analiza promene impedance kompleksnija i naučno utemeljenija, ovaj softver se i češće koristi za ovakve situacije. Jednačina propagacije talasa kroz elastični medijum, u opštem slučaju, jeste hiperbolična parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda [24]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 u, \quad (1)$$

gde je v brzina talasa, u pomeranje, t vreme. Ukoliko je dužina talasa veća ili jednaka prečniku šipa, tada se propagacija talasa u šipu može razmatrati primenom jednodimenzionalne teorije rasprostiranja talasa u čvrstom medijumu [12]. Jednodimenzionalna talasna jednačina (po x) predstavlja specijalan slučaj jednačine (1):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2)$$

a opšte rešenje ove jednačine glasi:

$$u(x, t) = u_1(x - vt) + u_2(x + vt), \quad (3)$$

Brzina propagacije longitudinalnih talasa u čvrstom medijumu v jeste funkcija karakteristika materijala tog medijuma i određuje se prema:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4)$$

gde je E Young-ov modul elastičnosti, ρ zapreminska težina. Sada se jednačina (2) može pisati kao:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad (5)$$

pri čemu se rešenje traži tako da su vreme i pomeranje nezavisne promenljive:

$$u(x, t) = \Psi(x)g(t), \quad (6)$$

a zatim zamenom izraza (6) u (2) dobija se:

$$\Psi(x) = Ae^{i\alpha x} \quad \text{i} \quad (7)$$

Rešenje problema (7) moguće je dobiti za jednostavnije sisteme i konturne uslove u zatvorenom obliku, međutim kod kompleksnijeg modeliranja šipa sa diskontinuitetima i defektima potrebno je primeniti metodu konačnih elemenata. Sa druge strane, ukoliko se problem propagacije talasa u šipu razmatra u diskretnim segmentima, tada je rešenje jednačine (2) moguće odrediti metodom karakteristika, pri čemu se izraz (3) može pisati kao [25], [19]:

$$u(x, t) = u_{\downarrow}(x - vt) + u'_{\uparrow}(x + vt), \quad (8)$$

gde je \downarrow oznaka za talas koji se kreće od glave ka bazi šipa, a \uparrow oznaka za talas koji se kreće od baze ka glavi šipa. Odgovarajuća brzina talasa v_p i sila F koja se indukuje u šipu, za diskretn element šipa, određuju se iz:

$$v_p = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u_{\downarrow}}{\partial(x - vt)}(-v) + \frac{\partial u'_{\uparrow}}{\partial(x + vt)}(+v) = v_{p\downarrow} + v'_{p\uparrow}, \quad (9)$$

$$F = -EA \frac{\partial u}{\partial x} = -EA \frac{\partial u_{\downarrow}}{\partial(x - vt)} + \frac{\partial u'_{\uparrow}}{\partial(x + vt)} = F_{\downarrow} + F'_{\uparrow}, \quad (10)$$

gde je A površina poprečnog preseka šipa. Pošto su $v_{p\downarrow}$ i F_{\downarrow} samo funkcije od $(x-vt)$ i $v'_{p\uparrow}$ i F'_{\uparrow} samo funkcije od $(x+vt)$, brzina i sila mogu se pisati kao:

$$F_{\downarrow} = Zv_{p\downarrow} \quad \text{i} \quad F'_{\uparrow} = -Zv'_{p\uparrow}, \quad (11)$$

gde je Z impedanca šipa:

$$Z = \frac{EA}{v} = A\sqrt{E\rho}. \quad (12)$$

Bilo koja promena A , E ili ρ parametra generiše promenu u odzivu brzina na reflektogramu. U slučaju diskontinuiteta, kada je na jednom delu prečnik šipa manji, jednačine ravnoteže za granicu dva medijuma glase:

$$F_{1\downarrow} + F'_{1\uparrow} = F_{2\downarrow} + F'_{2\uparrow} \quad \text{i} \quad v_{p1\downarrow} + v'_{p1\uparrow} = v_{p2\downarrow} + v'_{p2\uparrow}, \quad (13)$$

gde se indeksi 1 i 2 odnose na medijume. Zamenom (11) u (13) dobija se:

$$\frac{F_{1\downarrow}}{Z_1} - \frac{F'_{1\uparrow}}{Z_1} = \frac{F_{2\downarrow}}{Z_2} + \frac{F'_{2\uparrow}}{Z_2}. \quad (14)$$

Kada je šip pobuđen na vibracije u tlu postoji kompleksna interakcija šip-tlo, gde se sila trenja po omotaču šipa W uzima u razmatranje kao:

$$F = F_1 + F_1' = F_2 + F_2' + W, \quad (15)$$

tako da izraz (13) postaje:

$$v_p = \frac{F_1}{Z} - \frac{F_1'}{Z} = \frac{F_2}{Z} + \frac{F_2'}{Z} \quad \text{i} \quad Zv_p = F_1 - F_1' = F_2 + F_2'. \quad (16)$$

Komponente sila za medijume se sada određuju prema:

$$F_2 = F_1 - 0.5W \quad \text{i} \quad F_1' = F_2' + 0.5W. \quad (17)$$

U bazi, na kontaktu šipa i tla, jednačine ravnoteže glase:

$$F(L, t) = F(L, t) + F'(L, t) = F_g \quad \text{i} \quad (18)$$

$$v_p(L, t) = v_p(L, t) + v_p'(L, t) = \frac{2v_p - F_g}{Z},$$

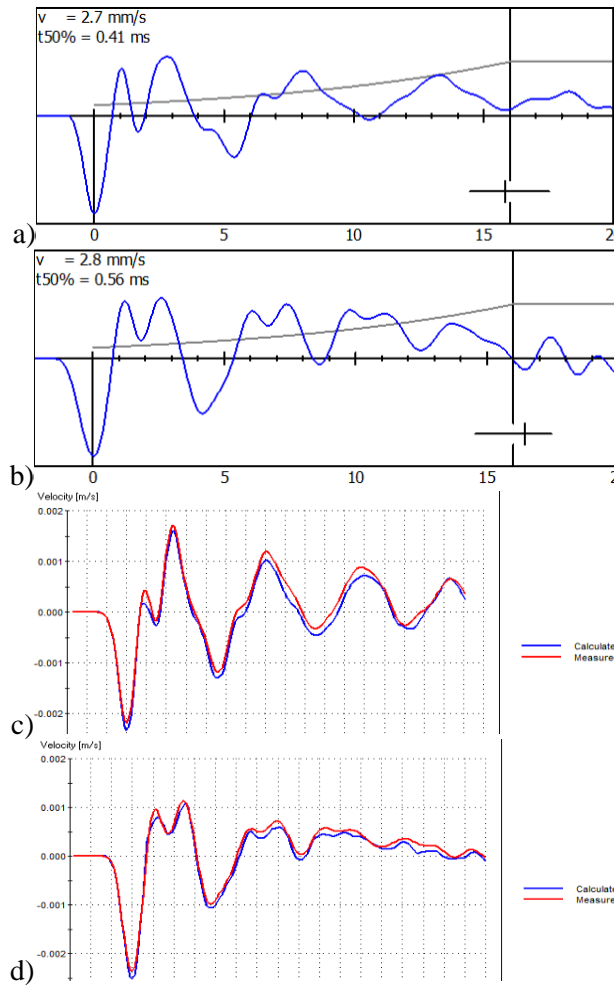
gde je L dužina šipa, a F_g sila reakcije tla. Ukoliko se šip diskretizira po dužini na n delova, pri čemu je dužina jednog diskretnog elementa $\Delta L = v\Delta t$, a vreme propagacije talasa kroz šip razmatra se u diskretnim intervalima Δt , tada se za sile u diskretnim elementima $f_{n,i}$ i $f'_{n,i}$ može pisati:

$$f_{n,i} = \left(\frac{Z_N - Z_{N+1}}{Z_N + Z_{N+1}} \right) f' + \left(\frac{Z_{N+1}}{Z_N + Z_{N+1}} \right) (2f - W_{n,i}), \quad (19)$$

$$f'_{n,i} = \left(-\frac{Z_N - Z_{N+1}}{Z_N + Z_{N+1}} \right) f + \left(\frac{Z_N}{Z_N + Z_{N+1}} \right) (2f' + W_{n,i}), \quad (20)$$

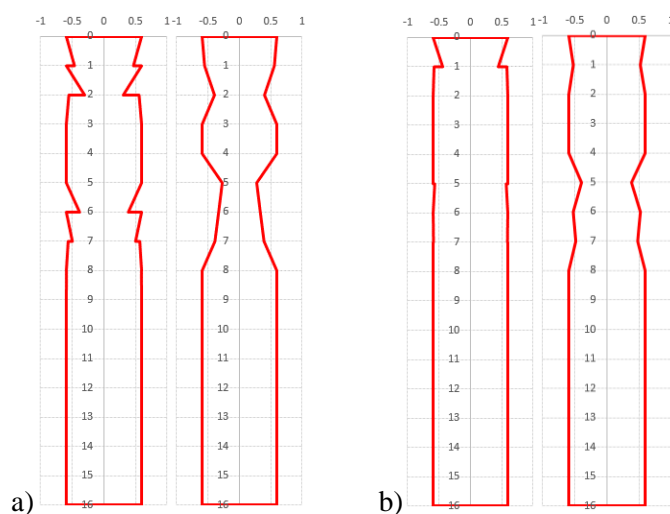
gde je Z_N impedanca diskretnog N elementa šipa, Z_{N+1} impedanca diskretnog $N+1$ elementa šipa. Model interakcije šip-tlo je jednodimenzionalni kontinualni diskretni model, kod koga se tlo modelira kontinualno raspodeljenim oprugama duž šipa i koncentrisanom oprugom u bazi šipa. Konstitutivni model ponašanja tla je linearno-elastičan, a dodatno se modelira i prigušenje tla. Usklađivanje signala (odgovora), dobijenog primenom proračunskog modela i reflektograma *in-situ* SIT ispitivanja, sprovodi se kroz iteracije, a ovaj postupak je poznat kao kompatibilizacija. Prvo se iteriraju parametri tla, a zatim, nakon postizanja konvergencije rešenja kroz ove iteracije, sprovodi se iteriranje geometrijskih parametara (poprečnog preseka) šipa. Takođe, intervencija se sprovodi i korekcijom modula elastičnosti betona. Na taj način, direktno

se utiče na promenu impedance šipa, gde se kroz iteracije utvrđuje njena senzitivnost u domenima defekata i/ili diskontinuiteta. Na osnovu prethodno izložene procedure, primenom softvera SITWAVE, naknadno su analizirani reflektogrami dva šipa (oznake 1 i 2), kod kojih je primenom softvera SIT⁺ ukazano na mogućnosti postojanja defekata i/ili diskontinuiteta. Na slici 6 prikazani su reflektogrami šipova 1 i 2: reflektogram šipa 1, reflektogram šipa 2, kompatibilizovani signal šipa 1 (finalna iteracija), kompatibilizovani signal šipa 2 (finalna iteracija).



Slika 6. Reflektogrami šipova 1 i 2: a) reflektogram šipa 1, b) reflektogram šipa 2, c) kompatibilizovani signal šipa 1 - finalna iteracija, d) kompatibilizovani signal šipa 2 - finalna iteracija [7]

Na slici 7 prikazani su oblici defektnih šipova dobijeni primenom softvera SITWAVE: oblik šipa 1 dobijen kroz početne iteracije (slika levo) i oblik šipa 1 dobijen u poslednjoj iteraciji (slika desno), oblik šipa 2 dobijen kroz početne iteracije (slika levo) i oblik šipa 2 dobijen u poslednjoj iteraciji (slika desno). Dobijeni oblici, zapravo, funkcija su promene impedance, gde pored promene geometrijskih karakteristika učestvuju i mehaničke karakteristike šipa. To znači da se redukcija poprečnog preseka odnosi na promenu prečnika šipa i/ili na promenu modula elastičnosti betona. Na osnovu ovako sprovedenih analiza, primenom softvera SITWAVE, naknadno su izvedena bušenja i vađenja uzoraka šipova 1 i 2, tako da su ova ispitivanja potvrdila da postoje defekti u zonama koje su prethodno identifikovane kao domeni redukcije impedance šipova.



Slika 7. Oblici defektnih šipova dobijeni primenom softvera SITWAVE: a) oblik šipa 1 dobijen kroz početne iteracije (slika levo) i oblik šipa 1 dobijen u poslednjoj iteraciji (slika desno), b) oblik šipa 2 dobijen kroz početne iteracije (slika levo) i oblik šipa 2 dobijen u poslednjoj iteraciji (slika desno) [7]

4. STANDARDIZACIJA ISPITIVANJA INTEGRITETA ŠIPOVA - TEST INTEGRITETA ŠIPA SA SONDAMA (CSL)

Test integriteta šipa sa sondama (CSL - *Crosshole Sonic Logging*) pripada grupi niskodilatacionih testova (LST), pri čemu postoje varijantna rešenja s jednom sondom ili većim brojem sondi [2]. Test integriteta šipa

ili test eha zvuka sa jednom sondom (SSL - *Singlehole Sonic Logging* ili SHUT - *Singlehole Ultrasonic Test*) sprovodi se u cilju analize defekata/diskontinuiteta u šipu, a zasniva se na propagaciji talasa primenom sonde u kojoj su smešteni transponder i risiver. Talasi se emituju preko transpondera, propagiraju kroz vodu, zid cevi, šip, reflektuju na mestima kontakta sa tlom i prihvataju risiverom. S obzirom da se transponder spušta/podiže vertikalno naniže/naviše duž šipa, to se kontinualno prati signal, koji se dobija preko risivera. U tom smislu ovaj test se najviše koristi za direktnu analizu defekata u oblasti centra poprečnog preseka, pa se integracijom odgovora dobija kompletnija slika o stanju šipa. Primena testa eha zvuka, kod ispitivanja sa jednom sondom (SSL), najzastupljenija je kod šipova manjeg prečnika ili kod šipova kod kojih, usled odgovarajućih ograničenja za ispitivanje, može se koristiti mala zona poprečnog preseka. Test integriteta šipa ili test eha zvuka sa dve ili više sonde (CSL - *Crosshole Sonic Logging* ili CHUT - *Crosshole Ultrasonic Test*), slično testu integriteta šipa sa jednom sondom (SSL), zasniva se na propagaciji talasa primenom sonde, međutim sa razdvojenim transponderom i risiverom. U jednu cev se postavlja transponder, a u drugu risiver, tako da se postepenim spuštanjem/podizanjem transpondera i risivera vertikalno naniže/naviše prati stanje šipa po poprečnim presecima duž stabla šipa. Integracijom dobijenih analiza duž šipa dobija se kompletna slika o mogućim defektima/diskontinuitetima, pri čemu se mogu detektovati i manji defekti, prsline (veće, značajnije), šupljine, intruzija vodom/tlom i betonska gnezda. Najveći broj defekata se identifikuje u okolini cevi, međutim za veće prečnike šipova može se koristiti veći broj cevi za sprovođenje testa. Na taj način dobija se kvalitetnija slika stanja integriteta šipa. 2D ili 3D tomografija integriteta šipa (CSLT - *Crosshole Sonic Logging Tomography*) je dodatno unapređena verzija testa integriteta šipa sa dve ili više sonde (CSL). Kod ovog testa se beleže emitovani signali pod različitim uglovima i pravcima, a ne samo direktno horizontalno između transpondera i risivera, tako da se naknadnim procesiranjem i rekonstrukcijom dobija 2D i 3D prikaz stanja u šipu, pri čemu se vizuelno volumenski mogu jasno uočiti i izdvojiti defekti/diskontinuiteti kao nezavisne celine. Takođe, ovi defekti i kompletan šip se mogu prikazati u 4D. Pod terminom ispitivanje integriteta šipa se podrazumeva utvrđivanje diskontinuiteta, konzistencije materijala šipa, dužine šipa i promene poprečnog preseka duž stabla šipa.

Test integriteta šipa sa sondama (CSL) se zasniva na teorijama: talasna teorija, teorija elastičnosti i teorija obrada signala. Prema talasnoj teoriji razmatraju se aspekti propagacije talasa kroz šip, vodu i cevi. Prema teoriji

elastičnosti uzima se u obzir da je konstitutivni model ponašanja šipa linearno-elastičan. Prema teoriji i obradi signala razmatraju se digitalizacija i procesiranje signala u cilju dobijanja odgovarajućih konačnih rezultata primenljivih u građevinskoj inženjerskoj praksi, a pomoću kojih se donose odluke o stanju integriteta šipa.

U cilju pravilnog sprovođenja testa integriteta šipa sa sondama (CSL) potrebno je ispuniti sledeće kriterijume:

- potrebno je obezbediti adekvatan pristup šipu koji se ispituje (suva temeljna jama i prohodnost za ispitivača koji nosi sa sobom opremu za ispitivanje),
- potrebno je efekat dejstva rada građevinskih mašina minimalizovati, s obzirom da vibracije, koje se generišu njihovim radom, mogu nepovoljno uticati na ispitivanje,
- ispitivanje se može sprovesti u intervalu temperaturnih vremenskih uslova od +5°C do +40°C.

Pre sprovođenja testa integriteta šipa sa sondama (CSL) potrebno je:

- cevi povezati za unutrašnju stranu armaturnog koša i ugraditi ih u telo šipa, a vrh cevi zatvoriti zaštitnom kapom,
- sprovesti betoniranje šipa tako da zaštitni sloj betona oko cevi bude minimalno jednak prečniku cevi (ovakvo ispitivanje, u najvećem broju slučajeva, sprovodi se kod bušenih šipova),
- nakon betoniranja, ukoliko je potrebno, okrajcuje se glava šipa, ali se maksimalno vodi računa da se cevi ne oštete (preporuka je da se krajcovanje naknadno sprovede nakon ispitivanja).

U cilju pravilnog sprovođenja ovog testa, potrebno je koristiti:

- plastične cevi za test integriteta šipa sa jednom sondom (SSL), koje, ukoliko se nastavljaju, termotehnički se zavaruju,
- metalne cevi za test integriteta šipa sa dve ili više sonde (CSL), koje, ukoliko se nastavljaju, elektrolučno se zavaruju.

Unutrašnji prečnik cevi treba da je od 38mm do 50mm. Potreban broj cevi se određuje u funkciji prečnika šipa:

- 1 cev na prečnik od 25cm do 30cm,
- 3 cevi za prečnik šipa manji od 100cm,
- 4 cevi za prečnik šipa od 100cm do 140cm,
- 6 cevi za prečnik šipa od 140cm do 210cm,

pri čemu se za CSL koristi minimalno 3 cevi. Maksimalan preporučljiv broj cevi je 8, s obzirom da se pri većem broju cevi ne postižu dodatni efekti ispitivanja.

Oprema za sprovođenje testa integriteta šipa sa sondama (CSL) se sastoji iz:

- metra sa tegom za preliminarnu proveru dužine i nezapušenosti instaliranih cevi,
- transmitera (generiše ultrazvučni signal frekvencije od 30kHz do 100kHz),
- risivera (frekvencije do 50kHz),
- kablova za povezivanje transmitera i risivera sa uređajem za akviziciju podataka,
- tripoda za kablove sa sensorima za pozicioniranje sonde,
- uređaja za akviziciju, memorisanje, obradu i vizuelizaciju podataka.

Pre sprovođenja testa integriteta šipa sa sondama (CSL) potrebno je imati kalibrisanu (baždarenu) opremu: transmitser, risiver i uređaj za akviziciju, memorisanje, obradu i vizuelizaciju podataka. Kalibracija se sprovodi jednom u dve godine, međutim, u zavisnosti od tipa opreme koja se koristi za ispitivanje, postoji mogućnost primene samokalibracije.

Test integriteta šipa sa sondama (CSL) se sprovodi u nekoliko koraka:

- analiziraju se svi relevantni podaci u pasošu šipa i geotehničkom elaboratu,
- definiše se orijentacija cevi u šipu, u odnosu na pozicije ostalih šipova i naglavnu ili temeljnu ploču,
- cevi se ispune vodom pre ili sat vremena nakon betoniranja šipa,
- setuju se oprema, podaci i parametri za šip koji se ispituje,
- u cev se paralelno spuštaju/podižu transmitser i risiver, a za SSL test transmitser pa risiver, mada su zajedno povezani istim kablom,
- transmitser i risiver se spuštaju približno do 50mm od kraja cevi, a zatim započinje proces snimanja signala uz postepeno (polako) podizanje transmitera i risivera,
- kada se ispitivanje sprovodi u cilju 2D ili 3D tomografskog prikaza integriteta šipa (CSLT), preporuka je da vertikalna visinska razlika između transmitera i risivera bude do 300mm (najviše do 500mm),
- konstruišu se adekvatni dijagrami, odnosno ultrazvučni profili,
- naknadno se sprovodi obrada podataka dobijenih ispitivanjem.

Test integriteta šipa sa sondama (CSL) se može sprovoditi najranije od 3 do 7 dana nakon betoniranja šipa, uzimajući u obzir trenutnu čvrstoću betona.

Transmitserom se emituju talasi kroz telo šipa, a s obzirom da su transverzalni talasi znatno sporiji, to su od interesa za ispitivanje samo

longitudinalni talasi, koji su dosta brži i nose u sebi informaciju o stanju šipa. Merenje, zapravo, zasniva se na analizama promene:

- vremena (FAT - *first arrival time*) ili brzine propagacije talasa (ultrazvučne frekvencije $>20\text{kHz}$) od transmitera do risivera, a za poznato rastojanje između cevi po dubini šipa,
- količine relativne energije po dubini šipa.

Signali primljeni risiverom se sempluju i beleže kao promena amplitude u funkciji vremena, a zatim procesiraju po dužini ispitanog šipa. Merenje se sprovodi za vertikalni interval od 2cm do 5cm. Kriterijumi za analizu oštećenja šipa definisani su prema [14]:

- zadovoljavajuće (G) (odlično): povećanje FAT od 0 do 10% (mada se može tolerisati i do 15%) i/ili redukcija energije $< 6\text{db}$ (mada se može tolerisati i do 7.5db),
- odstupanje (Q) (devijantno): povećanje FAT od 11% do 20% i/ili redukcija energije od 6db do 9db,
- prslina/pukotina (P/F) (lošije): povećanje FAT od 21% do 30% i/ili redukcija energije od 9db do 12db,
- defekat (P/D) (defekat/diskontinuitet): povećanje FAT $> 31\%$ i/ili redukcija energije $> 12\text{db}$.

Dobijeni podaci se koriste za potvrdu kvaliteta betona ili za identifikaciju zona lošeg kvaliteta. Ukoliko se uspostavi sumnja u kvalitet integriteta šipa ili identifikuju defekti u šipu, definišu se preporuke za dodatna ispitivanja. Postupak naknadne analize integriteta šipa se sprovodi prema metodama:

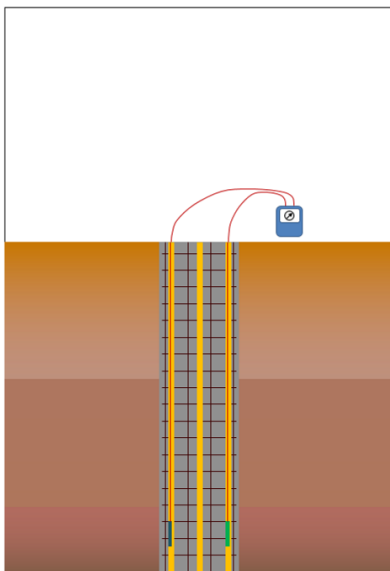
- uzorkovanje (kernovanje) šipa u cilju analize fizičko-mehaničkih karakteristika materijala šipa,
- analizira se mogućnost otkopavanja šipa (delimično ili u celosti).

Dodatno se mogu predlagati mere kojima se:

- proračunava kolika je adekvatna nosivost kraćeg šipa i/ili šipa sa uslovno prihvatljivim stepenom deficijencije integriteta, sa nižim faktorom sigurnosti,
- razmatraju aspekti sprovođenja ispitivanja nosivosti statičkim ili dinamičkim testovima,
- analiziraju ekonomski efekti izgradnje novog šipa.

Kompletna obrada (procesiranje) signala se sprovodi primenom teorije i obrade signala, pri čemu se zapis signala prikazuje u digitalizovanom formatu, a sam signal prikazuje u vremenskom domenu. Signal se konvertuje iz analognog u digitalni primenom konvertera sa minimalnom 12-bitnom, 16-bitnom ili 24-bitnom rezolucijom, pri čemu frekvencija

semplovanja mora biti veća od 250kHz (preporučljivo je 2MHz), a stepen greške frekvencije semplovanja signala manji od 0.01%. Generalno razmatrajući, procesiranje signala se sprovodi direktno u vremenskom domenu (TDA - *Time Domain Analysis*). U vremenskom domenu se može dodatno sprovoditi interpolacija i filtriranje signala, ali je potrebno posebno vodi računa da se ne eliminišu bitne amplitude koje mogu ukazati na značajnije promene u šipu. Na slici 8 dat je opšti šematski prikaz testa integriteta šipa sa dve ili više sondi (CSL).



Slika 8. Opšti šematski prikaz testa integriteta šipa sa dve ili više sondi (CSL) [6]

5. ISPITIVANJE INTEGRITETA ŠIPOVA - TEST INTEGRITETA ŠIPA SA SONDAMA (CSL)

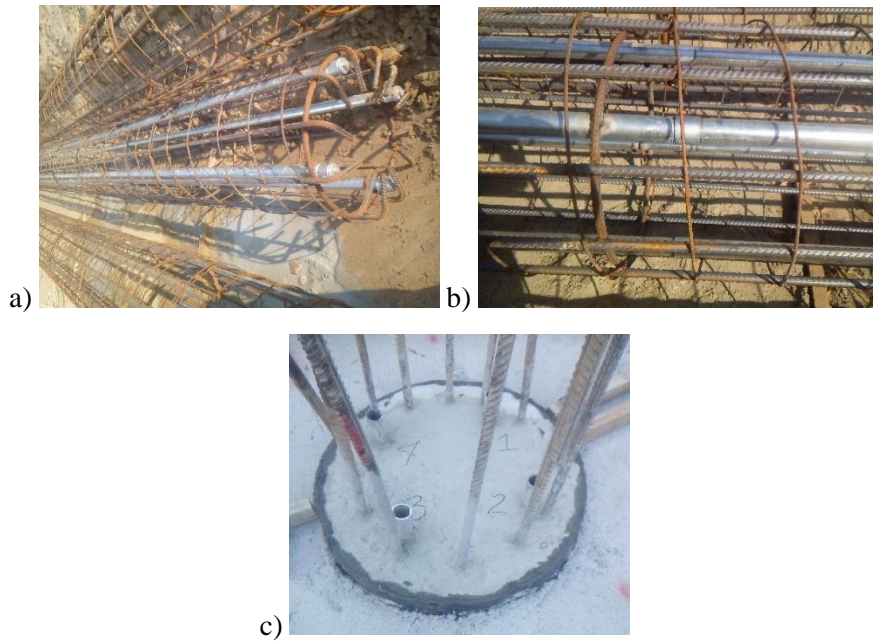
Test integriteta šipa sa sondama (CSL) zasniva se na propagaciji talasa, primenom sondi sa razdvojenim transponderom i receiverom. Ovim testom se interaktivno i simultano, između instaliranih cevi u šipu, detaljno može ispitati integritet šipa celom dužinom po svim poprečnim preseccima [6]. Ispitivanje integriteta sprovodi se kod svih tipova armiranobetonskih bušenih šipova. Centar za puteve i geotehniku Instituta IMS poseduje licenciranu opremu za test integriteta šipa sa sondama američke firme *Pile Dynamics*. Korišćenjem ove opreme moguće je sprovesti analizu ultrazvučnih profila u vremenskom domenu (TDA), ali i dodatnu

tomografsku analizu integriteta šipa (CSLT). Oprema poseduje integrisane softverske module za: procesiranje, skaliranje, korekciju i filtriranje signala. CHAMP-Q oprema [15] za test integriteta šipa sa sondama (CSL), američke firme *Pile Dynamics*, sastoji se iz: metra sa tegom za preliminarnu proveru dužine i nezapušenosti instaliranih cevi, sonde - transmitera (generišu ultrazvučni signal nominalne frekvencije 45kHz), sonde - risivera (nominalne frekvencije 45kHz), 4 seta kablova za povezivanje 4 sonde, tripoda za kablove sa sensorima za analizu pozicije sonde u cevima, hardverskog sistema za akviziciju, memorisanje, procesiranje i vizuelizaciju podataka i softvera CHA-S, CHA-W i PDI-Tomo. Konverzija AD signala sprovodi se primenom 12-bitnog konvertera (frekvencija smplovanja je od 500kHz do 2MHz). Na slici 9 prikazana je CHAMP-Q oprema za ispitivanje integriteta šipova testom integriteta šipa sa sondama (CSL) američke firme *Pile Dynamics*.



Slika 9. CHAMP-Q oprema za ispitivanje integriteta šipova testom integriteta šipa sa sondama (CSL) američke firme *Pile Dynamics* [15]

Pravilno sprovođenje testa integriteta šipa sa sondama (CSL) zahteva prethodnu pripremu cevi u koje se spuštaju sonde za ispitivanje. Ove cevi se ugrađuju u telo šipa, a naknadno se mogu injektirati nakon sprovedenog ispitivanja. Na slici 10 prikazane su čelične cevi spojene i zavarene za unutrašnju stranu armaturnog koša šipa i krajevi cevi koji vire nakon betoniranja.



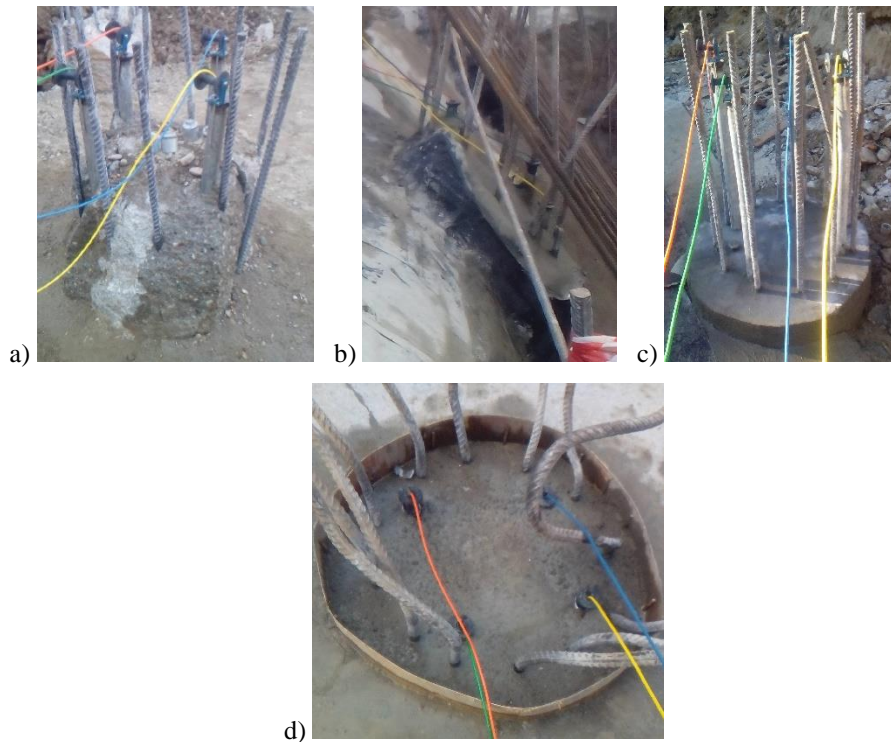
Slika 10. a) i b) čelične cevi spojene i zavarene za unutrašnju stranu armaturnog koša šipa, c) krajevi cevi koji vire nakon betoniranja [7]

Na slici 11 prikazani su: tripod za kablove sa senzorima, uređaj za akviziciju, memorisanje, procesiranje i vizuelizaciju podataka i povezane i postavljene sonde u cevima. Sonde na svojim krajevima imaju tegove, tako da je ukupna dužina sondi i tegova nešto veća od 30cm. U tom smislu, da bi se adekvatno sprovela analiza integriteta glave šipa, potrebno je ispustiti cevi dovoljno izvan glave šipa, kako bi se i sonde izvukle izvan glave šipa, a ostale u cevima. Budući da prilikom krajcovanja glave šipa vrlo često nastupi oštećenje cevi za ispitivanje integriteta šipa sa sondama (CSL), to je gotovo nemoguće sprovesti adekvatnu analizu integriteta glave šipa.



Slika 11. a) tripod za kablove sa sensorima, uređaj za akviziciju, memorisanje, procesiranje i vizuelizaciju podataka povezan sa sondama, b) povezane i postavljene sonde u cevima [7]

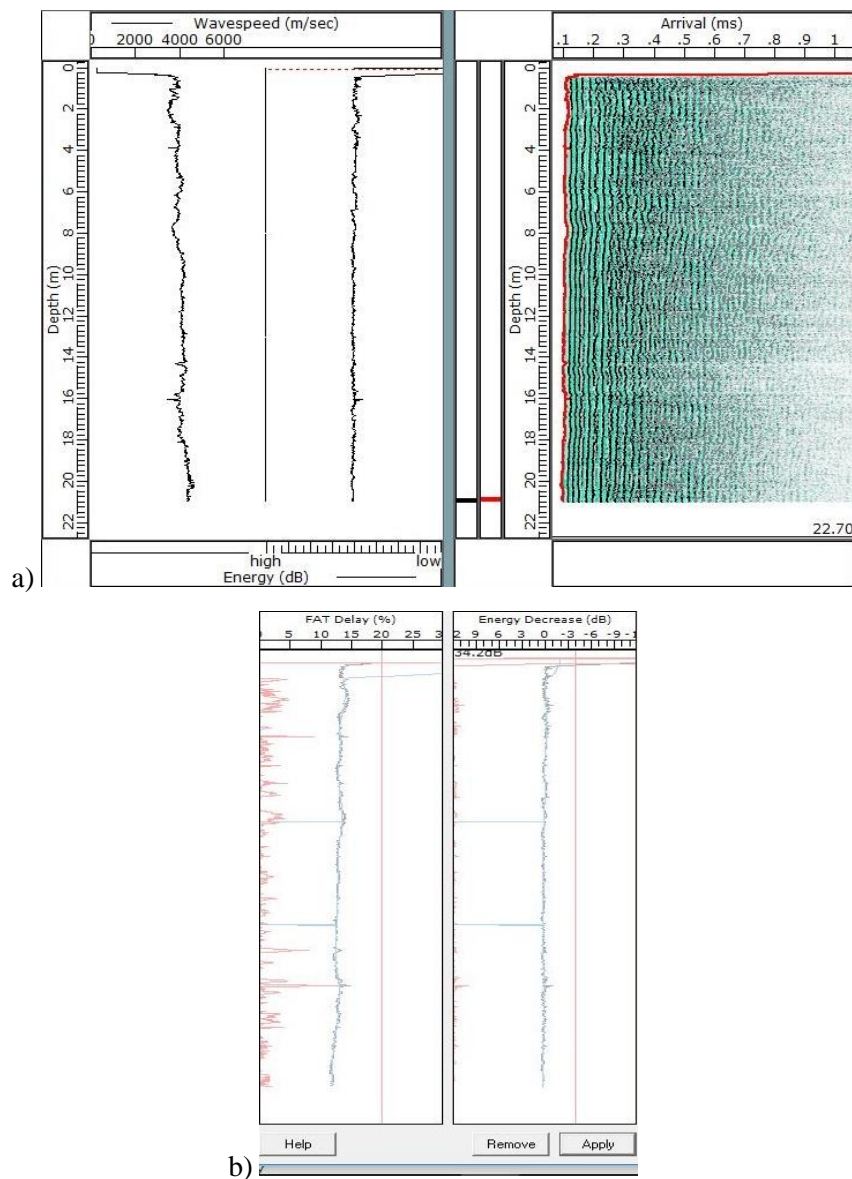
Na slici 12 prikazani su specifični slučajevi pozicija i dužina cevi izvan glave šipa: cevi su adekvatne dužine, čak je i beton nedovoljno okrajcovan, što je povoljno u smislu ispitivanja integriteta glave šipa, cevi nisu adekvatne dužine i krajevi cevi se završavaju na različitim visinama, cevi su adekvatne dužine, glava šipa je dobro okrajcovana i naknadno obrađena (najpovoljnija situacija) i krajevi cevi se završavaju u ravni glave šipa, što je nepovoljno, jer se sonde ne mogu izvući kompletno, pa se samim time ne može sprovesti adekvatna analiza integriteta glave šipa.



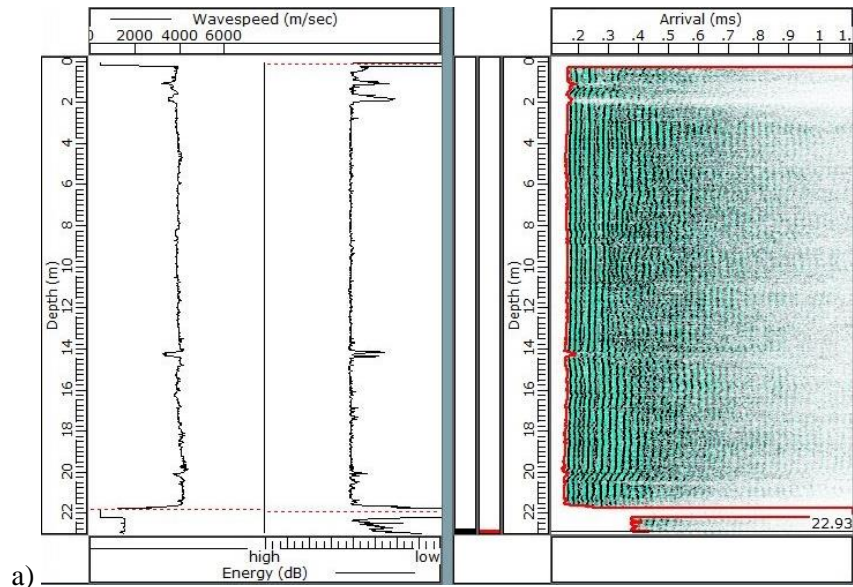
Slika 12. *Specifični slučajevi pozicija i dužina cevi izvan glave šipa: a) cevi su adekvatne dužine, čak je i beton nedovoljno okrajcovan, što je povoljno u smislu ispitivanja integriteta glave šipa, b) cevi nisu adekvatne dužine i krajevi cevi se završavaju na različitim visinama, c) cevi su adekvatne dužine, glava šipa je dobro okrajcovana i naknadno obrađena (najpovoljnija situacija), d) krajevi cevi se završavaju u ravni glave šipa, što je nepovoljno, jer se sonde ne mogu izvući kompletno, pa se samim time ne može sprovesti adekvatna analiza integriteta glave šipa [7]*

S obzirom da se ispitivanje integriteta šipova, testom integriteta šipa sa sondama (CSL), sprovodi sa 4 sonde, simultano se u 6 pravaca dobijaju ultrazvučni profili. Na slikama 13, 14 i 15, za jedan pravac, prikazani su ultrazvučni profili integralnog šipa (bez defekata), šipa sa diskontinuitetom u domenu baze i defektnog šipa - dijagrami promena: brzina propagacije talasa, relativne energije, vremena dolaska signala (FAT), povećanja vremena dolaska signala (FAT) i redukcije relativne energije duž stabla šipa, respektivno. U konkretnom slučaju, kod integralnog šipa, analizom ultrazvučnih profila za sve pravce (nisu svi prikazani, s obzirom na obimnost ispitivanja), može se konstatovati da je šip u pogledu integriteta zadovoljavajućeg kvaliteta. Kod integralnog šipa

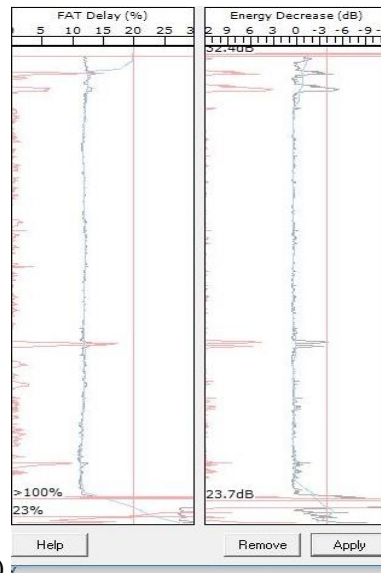
(bez defekata) nije bilo moguće detaljno snimiti bazu šipa, jer su određene cevi bile zapušene, dok su kod šipa sa diskontinuitetom u domenu baze, za sve pravce, konstatovana povećanja FAT i redukcija energije.



Slika 13. Ultrazvučni profili integralnog šipa (bez defekata): a) dijagrami promena brzina propagacije talasa, relativne energije i vremena dolaska signala (FAT), b) dijagrami povećanja vremena dolaska signala (FAT) i redukcije relativne energije duž stabla šipa [7]



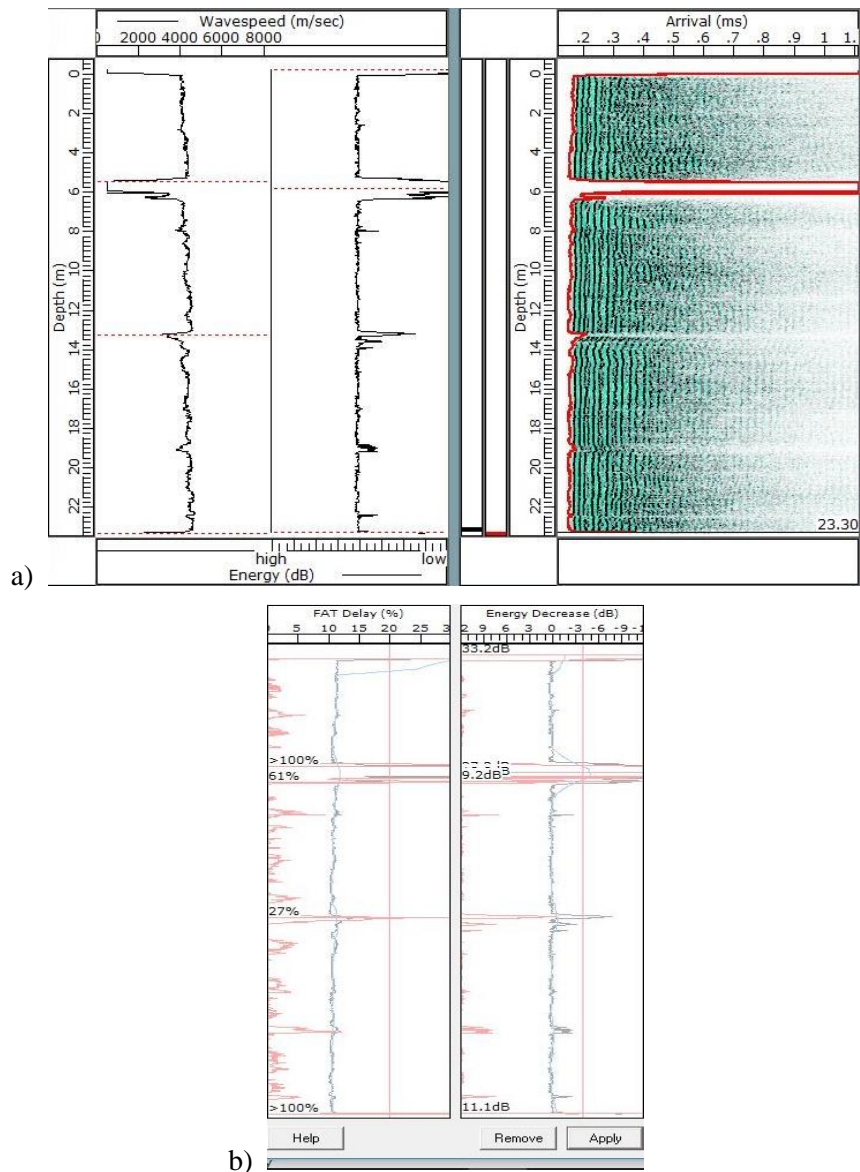
a)



b)

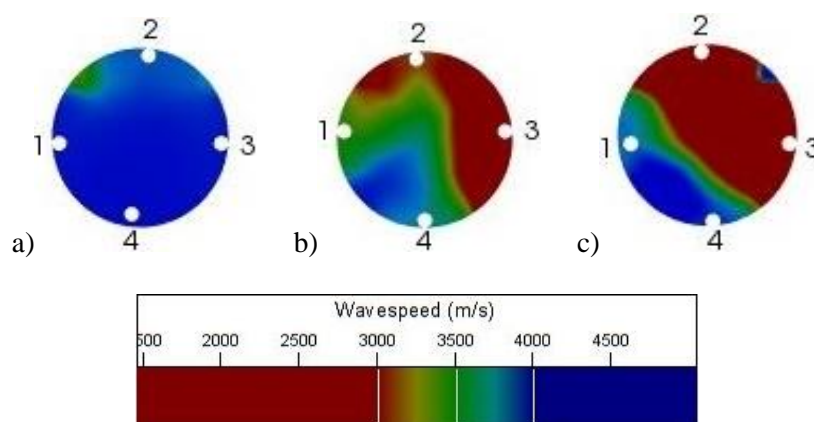
Slika 14. Ultrazvučni profili šipa sa diskontinuitetom u domenu baze:
 a) dijagrami promena brzina propagacije talasa, relativne energije i vremena dolaska signala (FAT), b) dijagrami povećanja vremena dolaska signala (FAT) i redukcije relativne energije duž stabla šipa [7]

U slučaju defektnog šipa, za sve pravce, konstatovana su značajnija povećanja FAT i redukcija energije na određenom intervalu dužine šipa. Snimanje je još dva puta ponovljeno i dobijeni su gotovo identični rezultati.



Slika 15. *Ultrazvučni profili defektnog šipa: a) dijagrami promena brzina propagacije talasa, relativne energije i vremena dolaska signala (FAT), b) dijagrami povećanja vremena dolaska signala (FAT) i redukcije relativne energije duž stabla šipa [7]*

Na osnovu sprovedenih ispitivanja i prikazanih ultrazvučnih profila integralnog šipa (bez defekata), šipa sa diskontinuitetom u domenu baze i defektnog šipa, primenom softvera PDI-Tomo za tomografiju, dodatno su analizirane identifikovane karakteristične zone promena povećanja i smanjenja brzina propagacije talasa u betonu. Ove zone prikazane su primenom izopovrši, čije boje odgovaraju brzinama propagacije talasa u betonu. Na slici 16 prikazani su poprečni preseki za integralni šip (bez defekata), šip sa diskontinuitetom u domenu baze i defektni šip, kod kojih se najviše identifikuju povećanja FAT i redukcije energije, a takođe prikazane su i odgovarajuće proračunate efektivne površine ovih poprečnih preseka šipova. Efektivna površina poprečnog preseka proračunata je kao odgovarajući procenat površine poprečnog preseka šipa, kod kojeg je brzina propagacije talasa u betonu veća od 3600m/s.



Slika 16. Poprečni preseki kod kojih se najviše identifikuju povećanja FAT i redukcije energije, a takođe prikazane su i odgovarajuće proračunate efektivne površine ovih poprečnih preseka šipova: a) integralni šip (bez defekata) - efektivna površina je 95%, b) šip sa diskontinuitetom u domenu baze - efektivna površina je 52%, c) defektni šip - efektivna površina je 31% [7]

6. ZAVRŠNE NAPOMENE I ZAKLJUČCI

Ispitivanje integriteta šipova metodološki se može prikazati u nekoliko faza: priprema ispitivanja, *in-situ* ispitivanje šipova na gradilištu, analiza i odlučivanje tokom ispitivanja, analiza, interpretacija i prezentacija rezultata ispitivanja, dodatne numeričke analize integriteta, donošenje

odluke o integralnom stanju šipa i pisanje izveštaja o integritetu šipa. S obzirom na troškove ispitivanja, najčešće se za ispitivanje integriteta šipova koristi test integriteta šipa sa senzorom (SIT). Međutim, u zavisnosti od stepena važnosti objekta, pa i pouzdanost rešenja na raspolaganju je ispitivanje integriteta šipova testom integriteta šipa sa sondama (CSL). U praksi, za gotovo sve šipove objekata, primenjuje se test integriteta šipa sa senzorom (SIT), s obzirom na efikasnost i brzinu ispitivanja, ali se često i zanemaruje to da je ovo indirektna metoda. Istraživanjem su pokazani karakteristični modeli reflektograma, na osnovu kojih se lako mogu doneti odluke o stanju integriteta šipa. Međutim, veoma često se u praksi pojavljuju diskutabilne situacije u kojima nije moguće odmah dati odgovor o stanju integriteta šipa, pa je preporuka da se koriste dodatne metode koje se zasnivaju na talasnoj teoriji, kompatibilizaciji signala i numeričkim analizama.

Kada je u pitanju veliki broj šipova objekta, pouzdanije je napraviti plan ispitivanja pre izgradnje šipova. Kvalitetnim planom ispitivanja, mogu se definisati probni (testni) šipovi na kojima će se sprovesti testovi integriteta šipa sa sondama (CSL) i uticati na korekciju tehnologije izgradnje i/ili dispozicije i/ili broja šipova. Naknadno se svi radni (eksploatacioni) šipovi mogu ispitati testom integriteta šipa sa senzorom (SIT). Najveći problem pojavljuje se kada se svi šipovi objekta izgrade, pa se nakon toga zahteva sprovođenje ispitivanja integriteta šipova, jer se stvara ograničen prostor za korekcije, kako na konstruktivnom nivou, tako i na nivou dinamičkog plana izgradnje objekta. U velikom broju slučajeva, prilikom interpretacije rezultata ispitivanja prikazanih u izveštajima od strane naručioca ispitivanja, kriterijumi integriteta i nosivosti šipova razmatraju se nezavisno. Takođe, vrlo često se jedan kriterijum favorizuje ili se potpuno isključuje drugi kriterijum. Jedino i inženjerski ispravno rešenje jeste da se oba kriterijuma poštuju i da se uvažavaju uslovi pod kojima se ispunjavaju ovi kriterijumi. Sve to, pored znanja i iskustva, zahteva i kontinualno usavršavanje iz ove multidisciplinarnе problematike ispitivanja šipova, koje pravazilazi uobičajene domene građevinske i geotehničke prakse.

Zahvalnica

Ovaj rad je deo istraživanja u okviru projekta TR 36014 koje finansira *Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije*.

7. LITERATURA

- [1] ASTM D5882, *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2016.
- [2] ASTM D6760, *Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2016.
- [3] Berisavljević D., Šušić N.: *Basis of Pile Integrity Testing with Few Case Histories*, Building Materials and Structures, Vol. 55, No. 1, 2012, pp. 55-64.
- [4] Chan F., Tsang S.: *Quality Assurance of Concrete Foundation Elements Using an Ultrasonic Evaluation Technique*, Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 48, No. 6, 2006, pp. 360-367.
- [5] Cui D., Yan W., Wang X., Lu L.: *Towards Intelligent Interpretation of Low Strain Pile Integrity Testing Results Using Machine Learning Techniques*, Sensors, Vol. 17, No. 11, 2017, pp. 1-15.
- [6] Čosić M., Božić-Tomić K., Šušić N.: *Pile Integrity and Load Testing: Methodology and Classification*, Building Materials and Structures, Vol. 62, No. 1, 2019, pp. 43-68.
- [7] Čosić M., Božić-Tomić K., Šušić N.: *Pile Integrity Testing: Testing and Results Analysis*, Building Materials and Structures, Vol. 62, No. 3, 2019, pp. 39-59.
- [8] Čosić M., Folić B., Folić R.: *Developing a Methodology for the Integrated Numerical Evaluation and Performance Assessment of Soil - Pile - Pier*, The 13th International Science Conference VSU, Sofia, Bulgaria, 2013, pp. II-236-244.
- [9] Čosić M., Folić B., Folić R.: *Numerical Simulation of the Pile Integrity Test on Defected Piles*, Acta Geotechnica Slovenica, Vol. 11, No. 2, 2014, pp. 5-19.
- [10] Ding X., Liu H., Liu J., Chen Y.: *Wave Propagation in a Pipe Pile for Low-Strain Integrity Testing*, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 137, No. 9, 2011, pp. 598-609.
- [11] Hilber H., Hughes T., Taylor R.: *Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 5, No. 3, 1977, pp. 283-292.
- [12] Holeyman A.: *Technology of Pile Dynamic Testing*, Application of Stress-Wave Theory to Piles, F. Barends ed., Balkema, 1992, pp. 195-215.

- [13] <https://www.pile.com/download/brochure/english-pit-w.pdf>
- [14] <https://www.pile.com/download/sample-specifications/csl.pdf>
- [15] <http://www.pile.com/wp-content/uploads/2019/06/PDI-CHAMP-Q-Brochure.pdf>
- [16] https://www.profound.nl/downloads/Profound_SIT_series_leaflet_uk.pdf
- [17] Li D., Zhang L., Tang W.: *Reliability Evaluation of Cross-Hole Sonic Logging for Bored Pile Integrity*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 9, 2005, pp. 1130-1138.
- [18] Liang L., Rausche F.: *Quality Assessment Procedure and Classifications of Cast-In-Place Shaft using Low Strain Dynamic Test*, 36th Annual Conference on Deep Foundations, Deep Foundations Institute, Boston, USA, 2011, pp. 553-562.
- [19] Middendorp P.: *Thirty Years of Experience With the Wave Equation Solution Based on the Method of Characteristics*, 7th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004.
- [20] Ni S., Isenhower W., Huang Y.: *Continuous Wavelet Transform Technique for Low-Strain Integrity Testing of Deep Drilled Shafts*, Journal of GeoEngineering, Vol. 7, No. 3, 2012, pp. 97-105.
- [21] Promputthangkoon P., Swasdi S., Kuasakul T.: *Interpretation of Pile Integrity Test Results Obtained from Model Concrete Piles Having Two Defect Locations*, International Journal of GEOMATE, Vol. 15, No. 47, 2018, pp.132-138.
- [22] Rausche F., Likins G., Hussein M.: *Formalized Procedure for Quality Assessment of Cast-In-Place Shafts Using Sonic Pulse Echo Methods*, Transportation Research Record No. 1447; Design and Construction of Auger Cast Piles and Other Foundation Issues, Washington, USA, 1994, pp. 30-38.
- [23] Rausche F., Ren-Kung S., Likins G.: *Comparison of Pulse Echo and Transient Response Pile Integrity Test Methods*, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, USA, 1991, pp. 21-27.
- [24] Richart F., Hall J., Woods, R.: *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1970.
- [25] Voitus van Hamme G., Jansz J., Bommer H., Arentsen D.: *Hydroblok and Improved Pile Driving Analysis*, De Ingenieur, No 8, Vol 86, 1974, pp 345-353.

- [26] White B., Nagy M., Allin R.: *Comparing Cross-Hole Sonic Logging and Low-Strain Integrity Testing Results*, 8th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Lisbon, Portugal, 2008, pp. 471-476.
- [27] Xu J., Shen Z., Ren Q.: *Simulation Analysis of Low Strain Dynamic Testing of Pile with Inhomogeneous Elastic Modulus*, Journal of Measurements in Engineering, Vol. 5, No. 3, 2017, pp. 152-160.
- [28] Ya-lun C.: *Statistical Analysis with Business and Economic Applications*, Holt, Rinehart and Winston, USA, 1975.
- [29] Zhang L., Wu Y., Wei M.: *Detection of Defective Piles Using Analysis Tools*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 20, No. 14, 2015, pp. 6073-6082.
- [30] Zheng C., Kouretzis G., Ding X., Liu H., Poulos H.: *Three-Dimensional Effects in Low-Strain Integrity Testing of Piles: Analytical Solution*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 53, No. 2, 2017, pp. 225-235.
- [31] Zheng C., Liu H., Ding X., Kouretzis G., Sheng D.: *Three-Dimensional Effects in Low-Strain Integrity Testing of Large Diameter Pipe Piles*, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 142, No. 9, 2016.