

Dr Mladen Ćosić¹
Mr Kristina Božić-Tomić²
Dr Nenad Šušić³

STANDARDIZACIJA, ISPITIVANJE I ANALIZA NOSIVOSTI ŠIPOVA

0352-2733, 51 (2019), p. 69-104

UDK: 624.154.046.2
PREGLEDNI RAD

Apstrakt

U radu su prikazani aspekti standardizacije i karakteristični primeri ispitivanja nosivosti šipova sa određenom analizom rezultata, pri čemu se metodologija ispitivanja oslanja na postojeće ASTM i sopstvene standarde, sopstvena znanja i iskustva, ali i na metodologiju ispitivanja prikazanu u naučnom radu *Pile Integrity and Load Testing: Methodology and Classification*. Ispitivanja šipova su sprovedena primenom sopstvene opreme sa licenciranim hardverima i softverima za test statičkog opterećenja šipa (SLT - *Static Load Test*) i test dinamičkog opterećenja šipa (DLT - *Dynamic Load Test*). Ukazano je na aspekte primene različitih oprema i metodologija ispitivanja u različitim situacijama. Takođe, ukazano je na potrebu izrade plana ispitivanja nosivosti šipova kada su u pitanju veliki i značajniji objekti.

Ključne reči: šip, ispitivanje, standardi, nosivost, SLT, DLT

1. UVOD

Ispitivanje nosivosti šipova datira iz vremena od kada su se počeli i koristiti inženjersko-tehnološko-konstruktivni pristupi u analizi šipova velikih objekata, koji su i izgrađeni na poziciji lokacije gde se gradi objekat. Vremenom su razvijane različite tehnike ispitivanja šipova, a razvojem elektronskih instrumenata, hardverskih komponenti i softverskog inženjerstva omogućena je digitalizacija i monitoring ponašanja šipova u realnom vremenu i naknadnom obradom podataka. Međutim, pitanje merodavnosti nosivosti pojedinačnog šipa, dobijeno

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

ispitivanjem, za analizu grupe šipova, još uvek ostavlja niz nedoumica i pitanja. Takođe, u velikom broju slučajeva, geološki uslovi predmetne lokacije, gde se gradi objekat, mogu biti značajno neuniformni po pitanju fizičko-mehaničkih karakteristika tla i stratifikacije slojeva tla po dubini. Sve to povećava nivo nepouzdanosti u analizi nosivosti šipova, čak i nakon ispitivanja šipova izgrađenih na predmetnoj lokaciji. Posebnu ulogu ima izrada plana ispitivanja šipova, još u fazi projektovanja konstrukcije i šipova, pri čemu se posebno vidi računa o tipovima ispitivanja, selekciji i poziciji šipova za ispitivanje, količini testova koji će se sprovesti na probnim i/ili radnim šipovima i sl.

Značajniji doprinos u izučavanju analize nosivosti šipova primenom teorijskih i terenskih metoda prikazan je u radu [17], dok je u radovima [6] i [10] prikazana detaljna sistematizacija metoda ispitivanja šipova. Analiza nosivosti šipova izgrađenih tehnologijom bušenja u pesku različite kompaktnosti prikazana je u radovima [20] i [19], dok je u radu [3] prikazano ispitivanje nosivosti šipova fundiranih u stenskoj masi. Problematika ispitivanja šipova velikog prečnika za mostovsku konstrukciju prezentovana je u radu [21]. Nakon sprovednog ispitivanja nosivosti šipa potrebno je odrediti graničnu i dozvoljenu nosivost šipa, pri čemu je bitno pravilno utvrditi koeficijent sigurnosti [22]. Takođe, u zavisnosti od procene parametara koju figuriraju u analizi nosivosti šipa, dobijaju se rešenja sa manjim ili većim stepenom pouzdanosti [23]. Sa druge strane, paralelno sa ispitivanjem šipova sprovode se i analitičko-numeričke procedure nosivosti šipova [9], [11], [8]. U radu [24] je prikazano ocenjivanje metoda za predikciju granične nosivosti pojedinačnih šipova na bazi rezultata testa statičke penetracije (CPT - *Cone Penetration Test*) i na analizama efektivnog i ukupnog naprezanja. Istraživanje je sprovedeno na MEGA i *Franki* šipovima različitih dužina. Dobiveni rezultati pokazuju da se najbolje rešenje dobija primenom *Bustamante-Gianeselli* (LCPC) metode. U radu [16] su analizirani nosivost i sleganje šipova izgrađenih tehnologijom bušenja u mekim tlima, pri čemu je pokazano da empirijske metode procene nosivosti iz geotehničkih parametara tla uvode niz određenih pojednostavljenja, tako da se izostavljaju pojedini elementi složene interakcije šip-tlo. Rezultati terenskih ispitivanja šipova su, zapravo, zbirna posledica složenih ukupnih uslova pri kontaktu tla i šipa.

Tim inženjera i tehničara Centra za puteve i geotehniku Instituta IMS sproveo je nekoliko stotina ispitivanja testova statičkog opterećenja šipa (SLT - *Static Load Test*) i testova dinamičkog opterećenja šipa (DLT - *Dynamic Load Test*) za zgrade, industrijske objekte, mostove, vijadukte, obaloutvrde, vetroparkove i slično. U ovom radu, u skraćenom obimu,

prikazani su standardi o ispitivanjima nosivosti šipova i analizirani su neki rezultati autorskih ispitivanja nosivosti šipova sprovedeni na velikim i značajnim objektima u Srbiji i u regionu.

2. STANDARDIZACIJA ISPITIVANJA NOSIVOSTI ŠIPOVA - TEST STATIČKOG OPTEREĆENJA ŠIPA (SLT)

Test statičkog opterećenja šipa (SLT - *Static Load Test*) pripada grupi najpouzdanijih visokodilatacionih testova (HST - *High Strain Test*) za utvrđivanje nosivosti šipova, ali u pogledu pripreme i toka ispitivanja ovo je najzahtevniji test [1]. Generalno razmatrajući, postoje dve varijante prema kojima se može ovaj test izvoditi: test sa kontrateretom i test sa reaktivnim šipovima. U prvom slučaju je potrebno, pre sprovođenja testa, dopremiti i geometrijski pravilno složiti kontrateret koji, u zavisnosti od nosivosti šipa, može biti težine od nekoliko stotina do nekoliko hiljada tona. U drugom slučaju se koriste reaktivni šipovi, koji su u toku ispitivanja opterećeni na zatezanje. Na glavu šipa se postavlja hidraulična presa preko koje se, pod inkrementalnim priraštajem pritiska ulja, istiskuje klip. Usled istiskivanja klipa i suprostavljanja težine kontratereta ili sila reaktivnih šipova, ispitivani šip se utiskuje u tlo. Primenom komparatera prati se sleganje glave šipa. Takođe, primenom geodetskih uređaja prati se sleganje šipa preko mernih letvi, tako da se komparacijom i naknadnom korekcijom merenja komparaterima utvrđuju krajnje vrednosti rezultata sleganja. Na osnovu sprovedenog testa se uspostavlja relacija sila-sleganje preko krive probnog opterećenja, a zatim se određuje nosivost šipa nekom od matematičkih metoda. Test statičkog opterećenja šipa (SLT) se može sprovoditi primenom dva varijantna rešenja:

- test sa kontrateretom (dejstvo pritiska se realizuje usled odupiranja prese o dejstvo sopstvene težine kontratereta),
- test sa reaktivnim šipovima (dejstvo pritiska se realizuje usled odupiranja prese o poprečnu čeličnu gredu/traverzu koja je povezana sa reaktivnim šipovima).

Pod terminom ispitivanje nosivosti šipa se podrazumeva utvrđivanje intenziteta reaktivnih sila šipa u kumulativnoj formi (po omotaču i bazi). Testom statičkog opterećenja šipa (SLT) se utvrđuje aksijalna vertikalna nosivost šipa (bazom i omotačem) na statičku silu pritiska (vertikalno naniže), a koja se aplicira na glavu šipa, pri čemu postoje dve opcije:

- da se šip ispituje na opterećenje pritiskom do dostizanja granične nosivosti (probni šip), a koja je prethodno određena u funkciji

faktorisanе vrednosti zahtevane projektne nosivosti (faktor sigurnosti je od 2 do 3),

- da se šip ispituje na opterećenje pritiskom do dostizanja projektne nosivosti (radni šip), a koja je prethodno određena u funkciji faktorisanе vrednosti zahtevane projektne nosivosti i čija je uloga samo da dokaže nivo projektne nosivosti šipa i ponašanje šipa pri nivou projektne nosivosti (faktor sigurnosti minimalno 1.1).

Test statičkog opterećenja šipa (SLT) zasniva se na: nelinearnoj teoriji, interakciji konstrukcija-tlo i teoriji i obradi signala. Prema nelinearnoj teoriji uzima se u obzir da je konstitutivni model ponašanja šipa i tla nelinearno-plastičan. Prema interakciji konstrukcija-tlo razmatra se spregnut problem statičke 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 nosivosti šipa. U cilju pravilnog sprovođenja testa statičkog opterećenja šipa (SLT) potrebno je ispuniti sledeće kriterijume:

- teren oko šipa, koji se ispituje, opreme za ispitivanje, kontratereta ili reaktivnih šipova treba da je uređen, tako da bude horizontalan ili približno horizontalan,
- kompletan prostor oko šipa, koji se ispituje, opreme za ispitivanje, kontratereta ili reaktivnih šipova treba da je uređen, tako da je omogućen nesmetan pristup i da je uklonjen građevinski materijal, oprema i mašine,
- analiziraju se svi relevantni podaci u pasošu šipa i geotehničkom elaboratu, utvrđuje i proverava verodostojnost podataka sa stanjem na terenu.

Kontrateret se formira slaganjem betonskih prizmatičnih tela dizalicom, pri čemu posebno treba voditi računa:

- o pravilnom geometrijskom slaganju, tako da ne nastupi krivljenje kontratereta,
- prvo se slažu prizmatične (betonske) stope većih dimenzija, a zatim čelične grede o koje će se odupirati presa, pa nakon toga betonska prizmatična tela (teret),
- prizmatične (betonske) stope (2 stope) treba da su postavljane na minimalno 1.5m čiste udaljenosti od ivice šipa koji se ispituje,
- čelične grede treba da su dimenzionisane tako da je razvoj lokalnih deformacija i izbočavanja čeličnih limova na mestu apliciranja prese

- onemogućen, a takođe da je i razvoj globalnih deformacija i globalnog izvijanja (bočnog i celog nosača) onemogućen,
- prostor između donje ivice čeličnih greda i kote terena treba da je minimalno 1.8m, radi lakšeg pristupa i pregleda prese/a, i postavljanja i očitavanja komparatera (ukoliko se vrednosti vizuelno očitavaju),
 - ukupna težina kontratereta treba da je veća za minimalno 10% od maksimalne sile koja je definisana programom ispitivanja,
 - prilikom sprovođenja testa potrebno je kontinualno osmatrati deformacije i eventualnu pojavu zakrivljenja kontratereta, kako bi se blagovremeno reagovalo na nepredviđene situacije.

Reaktivni šipovi se nalaze u neposrednoj blizini šipa koji se ispituje i izloženi su sili zatezanja, pri čemu posebno treba voditi računa o:

- kompletnom dimenzionisanju sistema (grupa reaktivnih šipova), tako da nosivost ovih šipova na aksijalno zatezanje bude uvećana odgovarajućim faktorom sigurnosti (minimalno 1.2) u odnosu na nosivost šipa koji se ispituje na aksijalni pritisak, odnosno na maksimalnu silu koja je definisana programom ispitivanja,
- poprečna čelična greda/traverza koja je povezana sa reaktivnim šipovima, treba (povoljnije je) da je dimenzionisana uzimajući u obzir optimizaciju poprečnog preseka sa aspekta apliciranja koncentrisane sile,
- minimalno (čisto) rastojanje između šipa koji se ispituje i reaktivnih šipova treba da je jednako 5 vrednosti najveće maksimalne dimenzije poprečnog preseka svih šipova (šipa koji se ispituje i reaktivnih), ali ne manje od 2.5m.

Sistem za aplikaciju sile pritiska se sastoji iz: hidraulične pumpe, motora-agregata, creva za prenos ulja po pritiskom, prese/a, čeličnih ploča (podmetača), instrumenata za monitoring pritiska. Hidraulična pumpa i motor-agregat treba da su postavljeni na dovoljnoj distanci (minimalno 6m) kako svojim vibracijama ne bi uticali na merenja sleganja koja se očitavaju na komparaterima i na vibracije referentnih greda. Kompletan sistem treba da se pre ispitivanja baždari, a izbor prese treba da je adekvatan sa zahtevima u pogledu maksimalnog pritiska, koji treba da se realizuje prilikom ispitivanja. Ispod prese (na glavu šipa) i iznad prese (na kontaktu sa čeličnom gredom) postavljaju se čelične ploče (minimalno po jedna) radi ravnomernijeg prenošenja koncentrisane sile u glavu šipa i bolje raspodele napona. Debljine ploča treba da su minimalno 25mm, a preporučena (optimalna) debljina donje ploče je 50mm. U cilju kvalitetnijeg prenošenja sile od kontratereta na presu, pa na glavu šipa,

potrebno je koristiti čelične kalote (jedna konvexna, a druga konkavna), čime se dodatno redukuje ekscentričnost dejstva sile. Za ispitivanje se koristi minimalno jedna presa, a dozvoljava se i veći broj presa kada je potrebno realizovati veće sile koje se apliciraju na glavu šipa, pri čemu prese treba da su centrično postavljene u odnosu na težišnu osu šipa. Instrumenti za monitoring pritiska su standardni analogni manometri ili digitalizovani manometri, koji imaju veću preciznost i opciju definisanja fiksne vrednosti pritiska za odgovarajući inkrement opterećenja. Ukoliko se test sprovodi za opterećenje veće od 1000kN, poželjno je koristiti ćelije za merenje opterećenja (*load cell*).

Naglavna kapa se formira nakon izgradnje ili pobijanja betonskih šipova sidreći i povezujući ispuštenu armaturu iz šipa u prostor naglavne kape, a koja se dodatno armira i dimenzioniše na uticaje dejstva koncentrisane sile za trodimenzionalno naponsko stanje, analizirajući trajektorije glavnih napona i napone smicanja. Naglavna kapa treba da je kvadratnog ili eventualno kružnog oblika u osnovi, pri čemu je njena maksimalna dužina stranice nešto veća od dužine stranice šipa (kvadratni oblik) ili prečnika šipa (kružni oblik). Ova dužina stranice naglavne kape, između ostalog, uslovljena je prečnikom ploče koja se postavlja ispod prese i mogućnošću pozicioniranja komparatera, tako da njena dimenzija ne treba da bude veća od dužine stranice šipa ili prečnika šipa uvećano za 10%, jer bi se usled većih dimenzija stranice naglavne kape stvarao i dodatni otpor tla prilikom ispitivanja, a što bi moglo da ukaže na veću nosivost šipa, nego što je ona realno moguća. Preporučena opcija je da se teren oko naglavne kape otkopa do njene debljine uvećano za minimalno 10%, čime bi se otklonili ovi negativni efekti. U slučaju pobijenih čeličnih šipova, naglavna kapa se formira nakon pobijanja i dimenzioniše se na dejstvo lokalne koncentrisane sile koja potiče od dejstva prese. Ova naglavna kapa (čelična ploča) se zavaruje za glavu čeličnog šipa.

Referentne grede se koriste kao pomoćno sredstvo za pozicioniranje komparatera i bar-kod letvi za geodetsko osmatranje. One treba da su oslonjene na tlo nezavisno od šipa koji se ispituje, kontratereta ili reaktivnih šipova, pri čemu oslonci referentnih greda treba da su na čistoj udaljenosti jednako 5 vrednosti najveće maksimalne dimenzije poprečnog preseka svih šipova (šipa koji se ispituje i reaktivnih), ali ne manje od 2.5m. Fundiraju se u dubini od minimalno 60cm. Potrebno je da imaju dovoljnu krutost i čvrstoću, tako da uticaj njihove deformacije bude minimalan na merenje sleganja šipa, a takođe, treba da su adekvatno ukrućene (u poprečnom i podužnom pravcu), kako ne bi postojale dodatne vibracije i da bi se uticaji temperaturnih promena sveli na minimum.

Pre svakog sprovođenja testa statičkog opterećenja šipa (SLT) potrebno je kalibrisati (baždariti) hidrauličnu pumpu, creva za prenos ulja do prese, veze i presu. Uslov koji kalibracijom (baždarenjem) treba ispuniti je da ceo sistem ima odstupanje manje od 5% od maksimalne sile definisane programom ispitivanja, dok pojedinačni elementi hidraulične opreme za ispitivanje treba da imaju odstupanje manje od 2% od maksimalne sile definisane programom ispitivanja. Komparateri treba da su kalibrisani (najviše) svake 3 godine. Kalibracija ćelija za merenje opterećenja (*load cell*) se sprovodi svakih 6 meseci.

Potiskivanjem klipa iz cilindra prese, na glavu šipa, aplicira se sila čiji se intenzitet inkrementalno povećava i dekrementalno smanjuje kroz:

- ciklus samo jednog opterećenja i jednog rasterećenja,
- veći broj ciklusa opterećenja i rasterećenja, koji mogu biti različitih maksimalnih intenziteta.

Za probni šip opterećenje se aplicira inkrementalno do maksimalne sile definisane programom ispitivanja, a koja treba da je jednaka 200% vrednosti projektne nosivosti šipa. Za radni šip opterećenje se aplicira inkrementalno do maksimalne sile definisane programom ispitivanja, a koja treba da je jednaka faktorisanoj vrednosti projektne nosivosti šipa. Vrednost inkrementa opterećenja treba da je jednaka 25% vrednosti ukupnog opterećenja. Nakon potpunog apliciranja opterećenja sprovodi se potpuno rasterećenje. Naredni ciklus opterećenja, takođe, može se sprovoditi do maksimalne sile definisane programom ispitivanja. Vrednosti svakog inkrementa aplicirane sile treba održavati na konstantnim vrednostima uz postizanje uslova da sleganje bude manje od 0.25mm za vreme od 1 sata, ali ne duže od 2 sata. Vrednosti apliciranih sila koje odgovaraju projektnoj nosivosti i maksimalnoj nosivosti šipa definisanoj programom ispitivanja treba održavati na konstantnim vrednostima, uz postizanje uslova da sleganje bude manje od 0.25mm za vreme od 2 sata, ali ne duže od 4 sata.

Test statičkog opterećenja šipa (SLT), za bušene i bušene/zabušene (CFA) šipove, sprovodi se nakon dostizanja projektovane čvrstoće betona (minimalno nakon 28 dana), a za pobijene šipove ispitivanje se može sprovoditi nakon 2 dana. Posebno treba obratiti pažnju na naknadno formiranje naglavne kape, tako da se minimalno potrebno vreme ispitivanja dodatno prolongirava, dok se i za naglavnu kapu ne dostigne projektovana čvrstoća betona.

U cilju preduzimanja svih potrebnih bezbednosnih mera, kako bi se nesmetano sproveo test statičkog opterećenja šipa (SLT), potrebno je poštovati propise o bezbednosti na radu uz dodatno uvažavanje preporuka:

- adekvatna primena bezbednosnih mera i tehnologije montaže opreme i elemenata kontratereta,
- pravilno formiranje kontratereta stroge geometrijske forme bez inklinacije,
- pravilno održavanje i monitoring hidrauličnog sistema i pritiska, kako ne bi nastupila znatnija varijacija i fluktuacija u pritiscima po apliciranim inkrementima opterećenja,
- provera svih čeličnih elemenata i veza, posebno na pojavu korozije, krivljenje, izbočavanje, izvijanje, uvijanje i savijanje,
- maksimalna redukcija ekscentričnosti svih elemenata koji utiču na apliciranje sile na glavu šipa, kako bi se uticaj parazitnih momenata sveo na minimum,
- preporuka je da se očitavanje sleganja sprovodi kontinualnim monitoringom podataka, koji se zapisuju i prikazuju direktno na računaru, bezbedno udaljen od pozicije šipa koji se ispituje.

Procedure merenja fizičkih veličina sleganja šipa se zasnivaju na primeni mernih uređaja:

- komparaterima, kojima se sprovodi merenje sleganja glave šipa,
- geodetskim instrumentima, od kojih se za geodetska osmatranja najčešće koristi laserski nivelman,
- ugrađenim senzorima ili meračima deformacija u telo šipa (merenje deformacijskih veličina koje potiču od pritisaka duž stabla šipa),
- mernim naponskim pločama-ćelijama za merenje opterećenja (*load cell*) postavljenim ispod ili iznad prese (merenja naponskih veličina pri apliciranju sile).

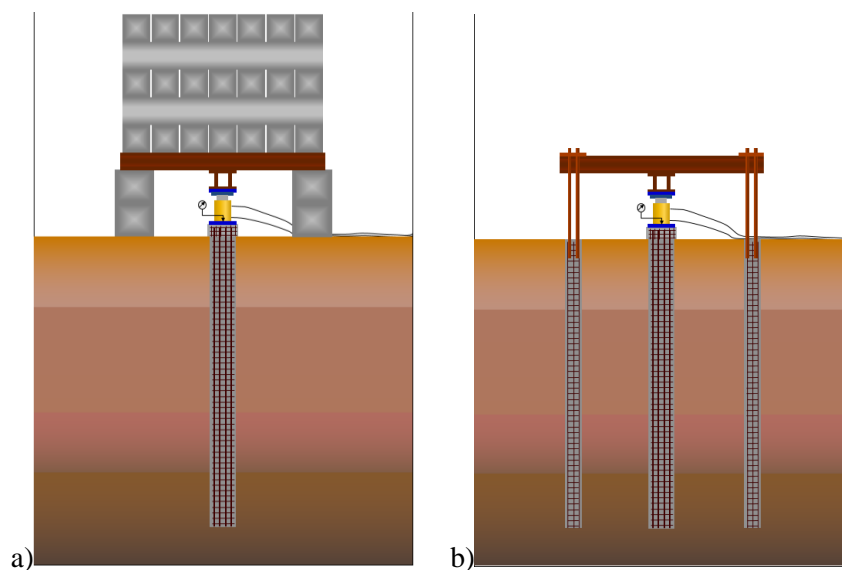
Prilikom merenja sleganja glave šipa igla komparatera treba da dodiruje (da se oslanja) pločicu od čvrstog materijala glatke površine, a koja se prethodno zalepi za glavu šipa, odnosno naglavnu kapu. Rezolucija merenja komparatera treba da je manja od 1% adekvatnog pomeranja za maksimalnu silu definisanu programom ispitivanja. Maksimalan hod komparatera treba da je minimalno 50mm, a preporuka je da to bude od 100mm do 150mm. Inkrement priraštaja merenja treba da je maksimalno 0.1mm ili finija vrednost. Finalna vrednost sleganja, koja se očitava na nivelmanu, dobija se kao srednja vrednost iz trostrukog očitavanja podataka za svako merno mesto (bar-kod letve). Koriste se 2 bar-kod letve koje se fiksiraju za referentne grede i 1 mobilna bar-kod letva kojom se sprovodi merenje sleganja glave šipa na dve naspramne dijagonalne/radijalne strane naglavne kape. Prikupljanje (akvizicija) podataka se sprovodi: očitavanjem komparatera, očitavanjem podataka na geodetskim

instrumentima i/ili kontinualnim digitalizovanim zapisom fizičkih veličina u memoriju računara sa vizuelizacijom u vremenskom domenu (TDA - *Time Domain Analysis*). Merenje vremena se sprovodi za 0, 1, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 i 240 minuta.

Nakon sprovedenog testa statičkog opterećenja šipa (SLT) obrađuju se podaci merenja i konstruiše finalna kriva sila-sleganje, a zatim se određuje granična nosivost šipa. Najčešće korišćene metode za određivanje granične nosivosti šipa, iz testa statičkog opterećenja šipa (SLT), su: metoda *Van der Veen*, metoda *Mazurkiewicz*, metoda *Décourt*, metoda *Chin-Kondner*, metoda *Hansen*, hiperboličke ekstrapolacije i regresione analize. U opštem slučaju (preliminarno razmatrajući) granična nosivost se definiše:

- kao ubrzano ili progresivno sleganje šipa,
- kao pomeranje veće od 10% najveće dimenzije poprečnog preseka šipa,
- kada tangenta krive sila-sleganje asimptotski se približava ili poklapa sa ovom krivom.

Dozvoljava se primena koeficijenata korelacije u analizi karakteristične granične kompresione nosivosti šipa (ekvivalentna graničnoj nosivosti šipa) na osnovu maksimalne merene kompresione nosivosti šipa, dobijene testom statičkog opterećenja šipa (SLT). Na slici 1 dat je opšti šematski prikaz testa statičkog opterećenja šipa (SLT).

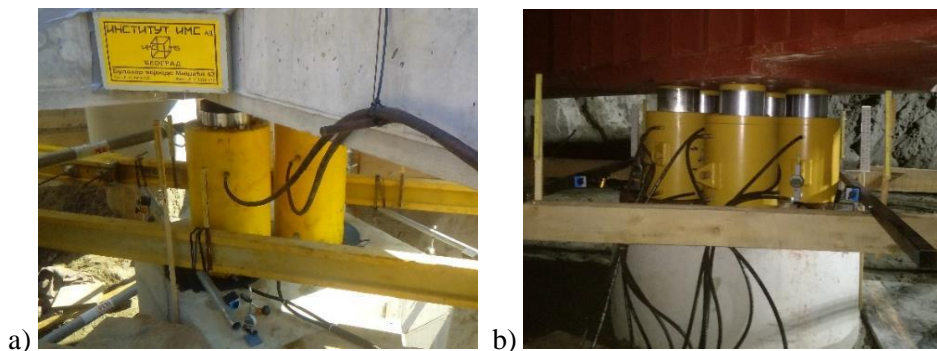


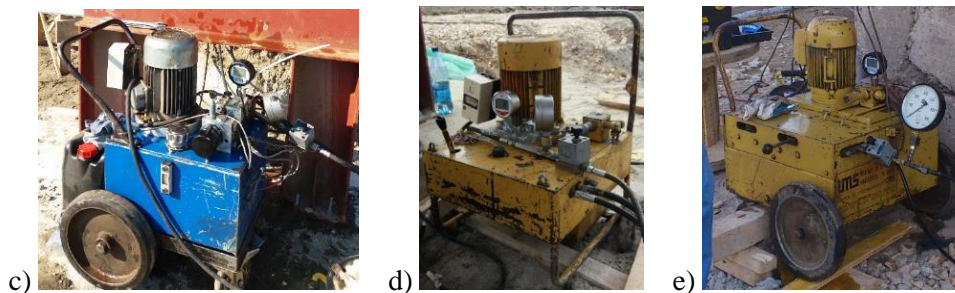
Slika 1. Opšti šematski prikaz testa statičkog opterećenja šipa (SLT):
a) sa kontrateretom, b) reaktivnim šipovima [6]

3. ISPITIVANJE NOSIVOSTI ŠIPOVA - TEST STATIČKOG OPTEREĆENJA ŠIPA (SLT)

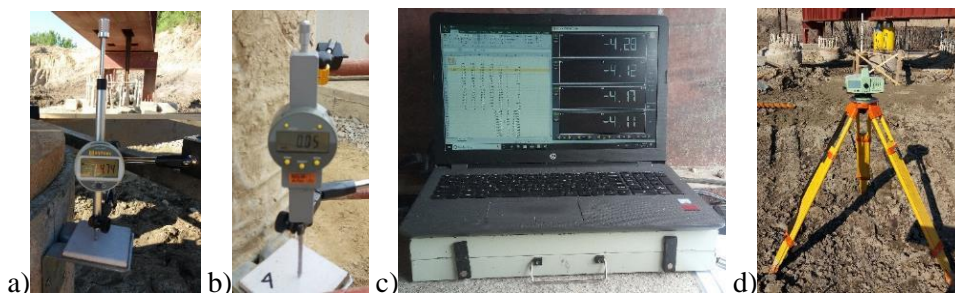
Test statičkog opterećenja šipa (SLT - *Static Load Test*) je najtačniji, najpouzdaniji i najmerodavniji u određivanju nosivosti bušenih, CFA i pobijenih šipova. Centar za puteve i geotehniku Instituta IMS poseduje licenciranu opremu za test statičkog opterećenja šipa (SLT): prese firmi *Prva petoletka* - IMS, softver i digitalne komparatere švajcarske firme *Sylvac*. Tačnost komparatera je 0.01mm. Sa ovom opremom moguće je sprovesti ispitivanje nosivosti šipa i prikupljati podatke u realnom vremenu i/ili u diskretnim intervalima vremena. Kompletan sistem za test statičkog opterećenja šipa (SLT) se sastoji iz: hidrauličnih presa kapaciteta 2x600t i 6x250t, hidrauličnog sistema (pumpe) i motora - agregata, čeličnih kalota, ploča, distancera, referentnog sistema, analognih i digitalnih komparatera, hardverskog sistema za konvertovanje i akviziciju podataka, softverskog sistema za procesiranje i vizuelizaciju podataka i geodetskog sistema (nivelmana *Leica* i bar-kod letvi) za osmatranje deformacija. Pre svakog ispitivanja sprovodi se interaktivno etaloniranje presa i pumpe. Na slici 2 je prikazana oprema za ispitivanje nosivosti šipova testom statičkog opterećenja šipa (SLT): prese *Prva petoletka* - IMS i hidraulični sistemi (pumpe) - nekoliko verzija.

Na slici 3, takođe, prikazana je oprema za ispitivanje nosivosti šipova testom statičkog opterećenja šipa (SLT): digitalni komparater *Sylvac*, hardversko-softverski sistem za akviziciju i monitoring podataka i geodetski sistem (nivelman *Leica* i bar-kod letva). Komparaterima se očitavaju i/ili memorišu podaci o sleganjima šipa, dok se geodetskim instrumentima sprovodi kontrola sleganja šipa i korekcija sleganja referentnih greda.





Slika 2. Oprema za ispitivanje nosivosti šipova testom statičkog opterećenja šipa (SLT): a) prese Prva petoletka - IMS kapaciteta 2x600t, b) prese Prva petoletka - IMS kapaciteta 6x250t, c) hidraulični sistem (pumpa) - verzija 1, d) hidraulični sistem (pumpa) - verzija 2, e) hidraulični sistem (pumpa) - verzija 3 [7]



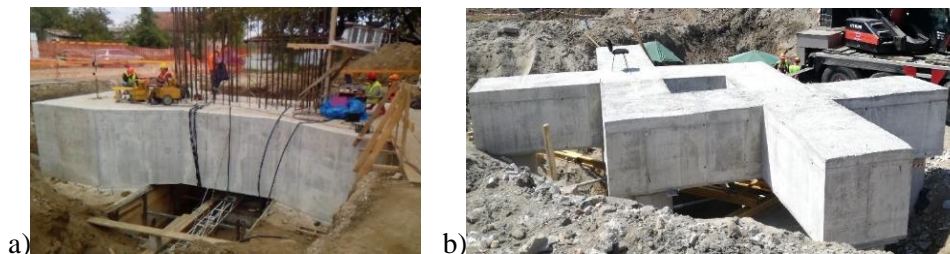
Slika 3. Oprema za ispitivanje nosivosti šipova testom statičkog opterećenja šipa (SLT): a) digitalni komparater Sylvac, b) digitalni komparater, c) hardversko - softverski sistem za akviziciju i monitoring podataka, d) geodetski sistem (nivelman Leica i bar-kod letva) [7]

Ispitivanja nosivosti šipova testom statičkog opterećenja šipa (SLT) sa kontrateretom prikazana su na slici 4: most *Mihajla Pupina* u Zemunu-Borči u Srbiji (kontrateret formiran od armiranobetonskih ploča) i vetropark *Malbunar* u Srbiji (kontrateret formiran od armiranobetonskih blokova). U prvom slučaju kontrateret se slaže na armiranobeotnske nosače koji su međusobno orotogonalno prednapregnuti, dok se u drugom slučaju kontrateret slaže na čelične nosače.



Slika 4. Test statičkog opterećenja šipa (SLT) - kontrateret: a) most Mihajla Pupina u Zemun-Borči u Srbiji (kontrateret formiran od armiranobetonskih ploča), b) vetropark Malbunar u Srbiji (kontrateret formiran od armiranobetonskih blokova) [7]

Ispitivanja nosivosti šipova testom statičkog opterećenja šipa (SLT) sa reaktivnim sistemom su prikazana na slici 5: most kod Ostružnice nad Savom u Srbiji (reaktivni sistem formiran od armiranobetonske grede-traverze i četiri armiranobetonska šipa) i poslovno-komercijalna zgrada-kula Ušće u Srbiji (reaktivni sistem formiran od armiranobetonskog XX nosača i šest armiranobetonskih šipova). U ovom slučaju formirani su privremeni reaktivni armiranobetonski sistemi koji su nakon sprovedenih ispitivanja uklonjeni.



Slika 5. Test statičkog opterećenja šipa (SLT) - reaktivni sistem: a) most kod Ostružnice nad Savom u Srbiji (reaktivni sistem formiran od armiranobetonske grede-traverze i četiri armiranobetonska šipa), b) poslovno-komercijalna zgrada-kula Ušće u Srbiji (reaktivni sistem formiran od armiranobetonskog XX nosača i šest armiranobetonskih šipova) [7]

Primene čeličnih nosača za formiranje reaktivnog konstruktivnog sistema za ispitivanje nosivosti šipova testom statičkog opterećenja šipa (SLT) prikazane su na slici 6: most na koridoru XI (Surčin-Obrenovac) u Srbiji (reaktivni sistem formiran od zavarenog čeličnog nosača i četiri armiranobetonska šipa), silos pepela u *TE Kostolac B* u Srbiji (reaktivni sistem formiran od dodatno ojačanih udvojenih čeličnih nosača i dva armiranobetonska šipa) i vijadukti za brze pruge u Čortanovcima u Srbiji (reaktivni sistem formiran od udvojenih-ukrštenih čeličnih profila i četiri armiranobetonska šipa). Takođe, ovde su primenjeni privremeni (montažni) reaktivni čelični sistemi koji se nakon sprovedenih ispitivanja uklanjaju, ali i koriste za dalja ispitivanja.



Slika 6. Test statičkog opterećenja šipa (SLT) - reaktivni sistem: a) most na koridoru XI (Surčin-Obrenovac) u Srbiji (reaktivni sistem formiran od zavarenog čeličnog nosača i četiri armiranobetonska šipa), b) silos pepela u *TE Kostolac B* u Srbiji (reaktivni sistem formiran od dodatno ojačanih udvojenih čeličnih nosača i dva armiranobetonska šipa), c) vijadukti za brze pruge u Čortanovcima u Srbiji (reaktivnim sistem formiran od udvojenih-ukrštenih čeličnih profila i četiri armiranobetonska šipa) [7]

U odnosu na prethodno prikazane privremene sisteme za ispitivanje nosivosti šipova (kontrateret i reaktivni sistem), na slici 7 je prikazan konstruktivni reaktivni sistem: vijadukti za brze pruge u Čortanovcima u Srbiji (reaktivni sistem formiran od armiranobetonske stope - naglavne

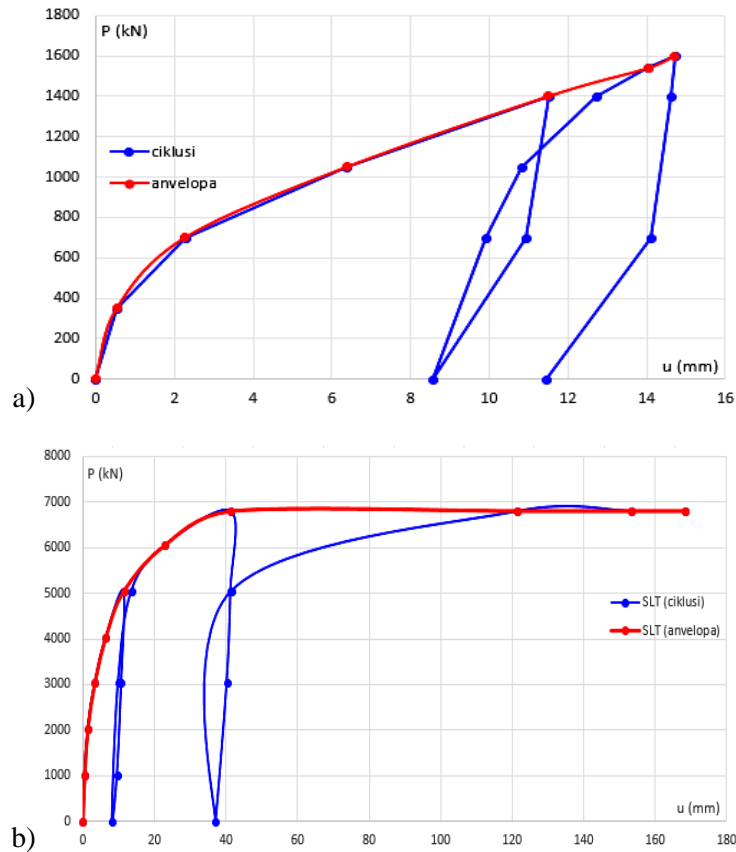
temeljne ploče za šipove) i poslovni centar *MFC Ušće* u Srbiji (reaktivni sistem formiran odupiranjem presa o noseću konstrukciju). Nakon sprovedenih ispitivanja konstruktivni reaktivni sistemi se koriste kao deo fundamenata i noseće konstrukcije.



Slika 7. Test statičkog opterećenja šipa (SLT) - reaktivni sistem: a) vijadukti za brze pruge u Čortanovcima u Srbiji (reaktivni sistem formiran od armirano-betonske stope - naglavne temeljne ploče za šipove), b) poslovni centar *MFC Ušće* u Srbiji (reaktivni sistem formiran odupiranjem presa o noseću konstrukciju) [7]

Nakon sprovedenog testa statičkog opterećenja šipa (SLT) kriva probnog opterećenja (opterećenje-sleganje), dobijena merenjem sleganja komparaterima i apliciranjem opterećenja preko klipova presa, dodatno se koriguje uzimajući u obzir sleganje referentnih greda. Na slici 8 su prikazane krive probnog opterećenja za: radni šip objekta u Pančevu u Srbiji (dva ciklusa opterećenja-sleganja) i probni šip mosta na obilaznici oko Beograda (tri ciklusa opterećenja-sleganja). Generalno razmatrajući, mogu se izdvojiti dve grupe ponašanja šipa u interakciji sa tlom:

- kriva probnog opterećenja je takvog karaktera gde postoji linearni i nelinearni deo, ali se tangenta krutost u nelinearnom delu značajnije ne smanjuje sa povećanjem deformacija - merodavni je kriterijum nosivosti (slika 8a),
- kriva probnog opterećenja je takvog karaktera gde postoji jasno izražen nelinearni deo i rano se razvija nelinearnost sa značajnim plastičnim deformacijama - merodavni je kriterijum upotrebljivosti (slika 8b).



Slika 8. Krive probnog opterećenja - test statičkog opterećenja šipa (SLT):
 a) radni šip objekta u Pančevu u Srbiji (dva ciklusa opterećenja-sleganja i
 anvelopa), b) probni šip mosta na obilaznici oko Beograda (tri ciklusa
 opterećenja-sleganja i anvelopa) [7]

Da bi se utvrdila granična nosivost šipa nakon sprovedenog testa statičkog opterećenja šipa (SLT), za dobijenu krivu probnog opterećenja, sprovodi se ekstrapolacija metodom *Chin-Kondner* [5]:

$$P = \frac{u}{c_1 u + c_2}, \quad (1)$$

gde je P sila, u sleganje, C_1 i C_2 koeficijenti krive, ili primenom metode *Hansen* [14]:

$$P = \frac{\sqrt{u}}{c_1 u + c_2}, \quad (2)$$

ili primenom metode *Decourt* [13]:

$$P = \frac{c_2 u}{1 - c_1 u}. \quad (3)$$

Ekstrapolacija krive probnog opterećenja racionalnom funkcijom se sprovodi primenom *Levenberg-Marquardt*-ovog algoritma [12]. Racionalna funkcija predstavlja količnik dva polinoma različitog stepena n i m u formi:

$$P = \frac{a_0 + a_1 u + \dots + a_n u^n}{b_0 + b_1 u + \dots + b_m u^m}, \quad (4)$$

gde su $a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m$ koeficijenti polinoma. Na slici 9 dodatno su prikazani testovi statičkih opterećenja (SLT) sprovedeni za objekte: termoelektrana i toplana TE-TO Pančevo, vetropark *Alibunar*, vetropark *Izbište*, vetropark *Kovačica* i most na autoputu E-763.



Slika 9. Test statičkog opterećenja šipa (SLT): a) termoelektrana i toplana TE-TO Pančevo, b) vetropark *Alibunar*, c) vetropark *Izbište*, d) vetropark *Kovačica*, e) most na autoputu E-763

4. STANDARDIZACIJA ISPITIVANJA NOSIVOSTI ŠIPOVA - TEST DINAMIČKOG OPTEREĆENJA ŠIPA (DLT)

Test dinamičkog opterećenja šipa (DLT - *Dynamic Load Test*) pripada grupi visokodilatacionih testova (HST) za utvrđivanje nosivosti šipova, pa je, s obzirom na vreme pripreme i toka ispitivanja, ovo dosta brži test u poređenju sa testom statičkog opterećenja šipa (SLT) [2]. S obzirom da postoji nekoliko varijanti opreme i načina ispitivanja testa dinamičkog opterećenja šipa, ali se ovde razmatraju ispitivanja sprovedena sa sopstvenim sistemom za podizanje tega. Test dinamičkog opterećenja šipa (DLT) se zasniva na utvrđivanju statičke nosivosti šipa pri dinamičkom dejstvu spoljašnje pobude. Teg se izlaže slobodnom padu sa određene visine, tako da se, usled udara tega o glavu šipa, izazove dinamička pobuda u šipu. Pod terminom ispitivanje nosivosti šipa se podrazumeva utvrđivanje intenziteta reaktivnih sila šipa:

- u kumulativnoj formi (po omotaču i bazi),
- u nezavisnoj formi (posebno po omotaču i posebno po bazi).

Testom dinamičkog opterećenja šipa (DLT) se utvrđuje aksijalna vertikalna nosivost šipa na dinamičku silu pritiska (vertikalno naniže), a koja se aplicira na glavu šipa, pri čemu postoje dve opcije:

- da se šip ispituje na opterećenje do dostizanja granične nosivosti (probni šip), a koja je prethodno određena u funkciji faktorisane vrednosti zahtevane projektne nosivosti (faktor sigurnosti je od 2 do 3),
- da se šip ispituje na opterećenje do dostizanja projektne nosivosti (radni šip), a koja je prethodno određena u funkciji faktorisane vrednosti zahtevane projektne nosivosti i čija je uloga samo da dokaže nivo projektne nosivosti šipa i ponašanje šipa pri nivou projektne nosivosti (faktor sigurnosti minimalno 1.1).

Test dinamičkog opterećenja šipa (DLT) zasniva se na teorijama: dinamika kretanja krutog tela, talasna teorija, metoda karakteristika, nelinearna teorija, dinamika konstrukcija, interakcija konstrukcija-tlo i teorija i obrada signala. Prema dinamici kretanja krutog tela razmatra se apliciranje spoljašnje pobude udarom idealno krutog tela (tega) 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 u šipu. Prema nelinearnoj teoriji uzima se u obzir da je konstitutivni model ponašanja šipa i tla nelinearno-plastičan. 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, procesiranje i kompatibilizacija (*signal matching*) signala u cilju dobijanja odgovarajućih konačnih rezultata primenljivih u građevinskoj inženjerskoj praksi, a pomoću kojih se donose odluke o nosivosti šipa.

U cilju pravilnog sprovođenja testa dinamičkog opterećenja šipa (DLT) potrebno je ispuniti sledeće kriterijume:

- teren oko šipa, koji se ispituje, opreme za ispitivanje i tegova treba da je uređen, tako da bude horizontalan ili približno horizontalan,
- kompletan prostor oko šipa, koji se ispituje, opreme za ispitivanje i tegova treba da je uređen, tako da je omogućen nesmetan pristup autodizalici ili mašini za pobijanje šipa i da je uklonjen građevinski materijal, oprema i mašine,
- analiziraju se svi relevantni podaci u pasošu šipa i geotehničkom elaboratu, utvrđuje i proverava verodostojnost podataka sa stanjem na terenu.

Apliciranje dinamičke pobude o glavu šipa se može sprovesti direktnim udarom tega koji pada sa određene visine (težina tega treba da je minimalno 1% do 2% maksimalne sile koja se dokazuje ispitivanjem). Sistem za podizanje tega se sastoji iz elemenata: modularna noseća čelična konstrukcija koja se montira i povezuje na glavu šipa, modularni teg, hidraulični sistem za podizanje tega na određenu visinu, sistem za zaustavljanje tega (kočioni sistem) na određenu visinu, pre pada tega, motor-agregat i podloške od drveta ili plastike. Prilikom sprovođenja ispitivanja potrebno je kontrolisati:

- geometriju (vertikalnost) modularne noseće čelične konstrukcije,
- postaviti motor-agregat na dovoljnoj udaljenosti od šipa koji se ispituje (minimalno 6m),
- kontinualno osmatrati deformacije i eventualnu pojavu inklinacije sistema, kako bi se blagovremeno reagovalo na nepredviđene situacije.

Elektronska oprema (hardverski i softverski sistem) za test dinamičkog opterećenja šipa (DLT) sastoji se iz:

- senzora sa nezavisnim ili integrisanim akcelerometrima i mernim dilatometrima (minimalno po 2 akcelerometra i po 2 merača dilatacija),
- kabl kojim se prenosi signal do uređaja za akviziciju podataka,

- uređaj (kondicioner) za akviziciju podataka i digitalizaciju signala,
- laptop računar za upravljanje ispitivanjem,
- softver za monitoring i procesiranje signala prilikom ispitivanja,
- softver za detaljan proračun nosivosti šipa.

Senzori se postavljaju na 2 do 3 vrednosti najveće dimenzije poprečnog preseka šipa od vrha nastavka šipa ili vrha glave šipa, a kao minimalna udaljenost se može usvojiti 1.5 vrednosti najveće dimenzije poprečnog preseka šipa. Merač dilatacija treba da ima minimalan opseg merenja od -2000 mikrodilatacija do +2000 mikrodilatacija i sopstvene frekvencije veće od 2kHz. Ukoliko se primenjuje linearni akcelerometar, tada treba da je opseg akceleracija minimalno 1000g i rezonantna frekvencija minimalno 1kHz za betonske šipove, dok za čelične šipove opseg akceleracija treba da je minimalno 2000g i rezonantna frekvencija minimalno 2kHz. Ukoliko se primenjuje pijezelektrični akcelerometar, rezonantna frekvencija treba da je od 10kHz do 30kHz, a ukoliko se primenjuje pijezo otporni akcelerometar, rezonantna frekvencija treba da je minimalno 2.5kHz.

Ukoliko se ispitivanje sprovodi sa bušenim ili bušenim/zabušenim (CFA) šipovima, tada je potrebno izgraditi nastavak šipa za dinamički test nosivosti, a ukoliko se ispitivanje sprovodi sa pobijenim šipovima, u najvećem broju slučajeva, nije potrebno ovaj nastavak formirati, s obzirom da se dužina šipa može prethodno projektovati sa integralnim nastavkom. Postoje dve opcije za izgradnju nastavka šipa: betonira se zajedno sa šipom i naknadno se izgrađuje. Bolja opcija je da se nastavak šipa betonira zajedno prilikom izgradnje šipa, s obzirom da su u tom slučaju i rezultati ispitivanja pouzdaniji. Ukoliko se naknadno izgrađuje nastavak šipa, tada se sidri i povezuje (preklapa i zavaruje) ispuštena armatura iz šipa u prostor nastavka šipa i dodatno povezuje uzengijama ili spiralnom armaturom. Geometrija i dimenzije poprečnog preseka nastavka šipa treba da su identični geometriji i dimenzijama poprečnog preseka šipa na mestu glave. Dužina nastavka šipa treba da je jednaka rastojanju na kojem su postavljeni senzori plus (približno) 50cm. Kvalitet betona nastavka šipa treba da je jednak ili veći od kvaliteta betona od koga je izgrađen šip. Beton nastavka šipa potrebno je negovati kako bi se postigla minimalna projektovana čvrstoća betona.

U cilju pravilnog sprovođenja testa dinamičkog opterećenja šipa (DLT) potrebno je ispuniti sledeće kriterijume:

- obezbediti adekvatan pristup šipu koji se ispituje (suva temeljna jama i prohodnost za opremu, mašine i ispitivača koji nosi sa sobom opremu za ispitivanje),

- efekat dejstva rada građevinskih mašina minimalizovati, s obzirom da vibracije, koje se generišu njihovim radom, mogu nepovoljno uticati na ispitivanje.

Pre sprovođenja testa dinamičkog opterećenja šipa (DLT) potrebno je imati kalibrisane (baždarene) senzore i hidraulični sistem. Uslov koji kalibracijom (baždarenjem) senzora treba ispuniti je da ceo sistem ima odstupanje manje od 3%. Senzori treba da su kalibrisani (najviše) svake 2 godine. Ukoliko se prilikom ispitivanja pokaže da pojedini akcelerometar ili merač dilatacija pokazuje odstupanje od propisanog, potrebno ga je isključiti iz daljeg monitoringa ispitivanja. Pre sprovođenja testa dinamičkog opterećenja šipa (DLT) potrebno je:

- očistiti glavu šipa ili nastavak šipa od elemenata ostataka betona i prašine,
- postaviti (ugraditi) ankere, ukoliko se oprema za ispitivanje povezuje sa glavom šipa ili nastavkom šipa,
- montirati (fiksirati) senzore za glavu šipa ili nastavak šipa (na bočnim stranicama),
- ugraditi ankere-nosače za geodetsko osmatranje sleganja šipa (na bočnim stranicama).

Test dinamičkog opterećenja šipa (DLT), za bušene i bušene/zabušene (CFA) šipove, sprovodi se nakon dostizanja projektovane čvrstoće betona (minimalno nakon 28 dana), a za pobijene šipove ispitivanje se može sprovoditi nakon 2 dana. Posebno treba obratiti pažnju na naknadno formiranje nastavka šipa, tako da se minimalno potrebno vreme ispitivanja dodatno prolongirava, dok se i za nastavak šipa ne dostigne projektovana čvrstoća betona. Test dinamičkog opterećenja šipa (DLT) sprovodi se u nekoliko koraka:

- analiziraju se svi relevantni podaci u pasošu šipa i geotehničkom elaboratu,
- setuje se oprema, podaci i parametri za šip koji se ispituje,
- teg se podiže na odgovarajuću visinu i pušta da slobodno padne,
- postupak se ponavlja nekoliko puta (maksimalno 10 puta ukupno i maksimalno 2 puta za jednu istu visinu),
- analizira se: količina unete kinetičke energije, nivo napona zatezanja, nivo napona pritiska, apsolutne maksimalne vrednosti akceleracija, maksimalne vrednosti elasto-plastičnih deformacija, pojava negativnih vrednosti u dolazećem (*upward*) signalu sile u šipu i sl.,

- ukoliko se pokaže potrebnim koriguju se parametri koji su korišćeni pri inicijalnom setovanju, u cilju dobijanja što tačnijih rezultata ispitivanja,
- konstruiše se reprezentativni dijagram sila dobijenih proračunom akceleracija i dilatacija,
- naknadno se sprovodi obrada podataka dobijenih ispitivanja u cilju utvrđivanja nosivosti šipa.

U cilju preduzimanja svih potrebnih bezbednosnih mera, kako bi se nesmetano sproveo test dinamičkog opterećenja šipa (DLT), potrebno je poštovati propise o bezbednosti na radu uz dodatno uvažavanje preporuka:

- adekvatna primena bezbednosnih mera i tehnologije montaže opreme i elemenata,
- pravilno vertikalno postavljanje opreme bez inklinacije,
- pravilno održavanje i monitoring hidrauličnog sistema i pritiska,
- provera svih čeličnih elemenata i veza, posebno na pojavu korozije, krivljenje, izbočavanje, izvijanje, uvijanje i savijanje,
- maksimalna redukcija ekscentričnosti svih elemenata, kako bi se uticaj parazitnih momenata sveo na minimum.

Signal koji se generiše prilikom udarca tega o glavu šipa kontinualno se beleži u vremenu kao odgovor duž celog šipa. Primenom akcelerometara sprovodi se merenje promene ubrzanja glave šipa u vremenu, a naknadnom integracijom ubrzanja dobija se promena brzine glave šipa u vremenu. Ključan dijagram za analizu globalnog ponašanja šipa je dijagram na kojem se prikazuju sile u funkciji vremena određene iz promene:

- brzina integracijom akceleracija (multiplikacija brzine v i impedance Z),
- dilatacija (multiplikacija dilatacije ε , modula elastičnosti E i površine poprečnog preseka šipa A).

Monitoring svih ostalih relevantnih parametara ponašanja šipa se sprovodi primenom dijagrama promene:

- akceleracija u vremenu za svaki senzor posebno $a(t)$,
- brzina u vremenu za svaki senzor posebno $v(t)$,
- pomeranja u vremenu za svaki senzor posebno $u(t)$,
- ukupnih prosečnih akceleracija u vremenu $a_{ave}(t)$,
- ukupnih prosečnih brzina u vremenu $v_{ave}(t)$,
- ukupnih prosečnih pomeranja u vremenu $u_{ave}(t)$,
- napona u vremenu za svaki senzor posebno $\sigma(t)$,
- ukupnih prosečnih napona u vremenu $\sigma_{ave}(t)$,

- sila u vremenu (iz akceleracija i dilatacija) za svaki senzor posebno $F(t)$,
- ukupnih prosečnih sila u vremenu $F_{ave}(t)$,
- sile odlaznog (*downward*) talasa u šipu $F_d(t)$,
- sile dolaznog/povratnog (*upward*) talasa u šipu $F_u(t)$,
- kinetičke energije u vremenu $E_k(t)$.

Ukupno vreme, za koje se sprovodi monitoring, treba da je minimalno $4 \cdot (2L/c)$, pri čemu je L dužina šipa, a c brzina propagacije talasa u materijalu od kojeg je napravljen šip. Optimalno vreme, za koje se sprovodi monitoring, treba da je u intervalu od $4 \cdot (2L/c)$ do $8 \cdot (2L/c)$. Sa druge strane, monitoring ponašanja šipa pod dinamičkom pobudom se sprovodi i preko diskretnih vrednosti:

- maksimalno ubrzanje a_{max} , maksimalna brzina v_{max} , maksimalno pomeranje u_{max} , rezidualno pomeranje nakon sprovedenog ispitivanja u_r , maksimalan napon pritiska $\sigma_{c,max}$, maksimalan napon zatezanja $\sigma_{t,max}$, pozicija maksimalnog napona pritiska u šipu $l_{c,max}$, pozicija maksimalnog napona zatezanja u šipu $l_{t,max}$, maksimalna sila pritiska $F_{c,max}$, maksimalna sila zatezanja $F_{t,max}$, sila pobijanja F_{dr} , preliminarna statička nosivost šipa F_{stat} , transferisana kinetička energija $E_{k,tr}$ i centričnost udara e_c .

Prilikom sprovođenja testa dinamičkog opterećenja šipa (DLT), a i naknadnom obradom signala moguće je sleganje šipa posmatrati na nekoliko načina:

- kontinualnim monitoringom elasto-plastičnih deformacija šipa u vremenu,
- geodetskim sukcesivnim osmatranjem plastičnih deformacija šipa nakon svakog sprovedenog testa (sleganja treba da su reda veličine oko 2.5mm, kako bi se omogućila potpuna mobilizacija nosivosti šipa omotačem i bazom),
- analizom elasto-plastičnih deformacija u domenu kapaciteta (sila-pomeranje), a što se dobija kao rezultat naknadnih numeričkih analiza nosivosti šipa, pri čemu treba da su rezidualne deformacije, dobijene iz numeričkih analiza, ekvivalentne rezidualnim *in-situ* DLT deformacijama.

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 (TDA - *Time Domain Analysis*). Signal se konvertuje iz analognog u digitalni primenom konvertera sa minimalnom 16-bitnom ili 24-bitnom rezolucijom, pri čemu

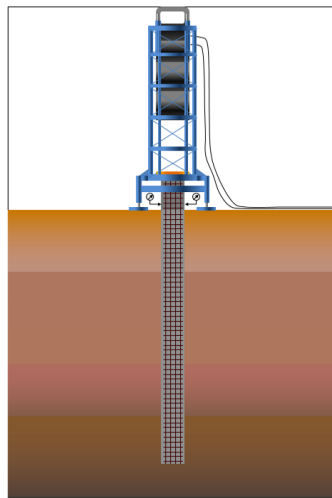
frekvencija semplovanja mora biti veća od 10kHz, a stepen greške frekvencije semplovanja signala manji od 0.01%. Generalno razmatrajući, procesiranje signala se sprovodi direktno u vremenskom domenu i kompatibilizacijom (*signal matching*) u vremenskom domenu. U vremenskom domenu se sprovode selekcija, skaliranje i eliminacija (filtriranje) jednog dela signala. Selekcija je procedura odabira adekvatnog signala za kompatibilizaciju (*signal matching*). S obzirom da se kod DLT početna ispitivanja sprovode sa manjim visinama sa kojih se teg pušta da slobodno pada, to će adekvatan signal biti pri višim visinama. Skaliranje je procedura multipliciranja amplitude signala prema određenim kriterijumima, s tom što nije dozvoljeno skaliranje kojim se simulira nosivost šipa za veće visine sa kojih se pušta da teg slobodno pada. Ukoliko se pokaže i dokaže da jedan deo signala predstavlja neverodostojan odgovor šipa u tlu, postoji mogućnost da se sprovede eliminacija (filtriranje) datog dela signala za silu, brzinu, energiju, ekscentričnost i sl. Kompatibilizacija (*signal matching*) se sprovodi u vremenskom domenu u cilju dobijanja statičke nosivosti šipa. Ovaj postupak je poznat kao *signal matching*, gde se kroz iteracije uspostavlja kompatibilizacija (usklađivanje) odgovora numeričkog nelinearnog histerezisnog modela interakcije šip-tlo i signala dobijenog *in-situ* DLT ispitivanjem šipa.

Proračun nosivosti šipa se sprovodi primenom indirektnih metoda, a koje se zasnivaju na iterativnoj kompatibilizaciji (*signal matching*) numeričkog nelinearnog histerezisnog modela interakcije šip-tlo prema *in-situ* merenom signalu dinamičkog testa, tako što se ekstrahuje dinamička komponenta nosivosti šipa i zadržava statička komponenta nosivosti šipa. Analiza kvaliteta sprovedenog postupka kompatibilizacije se sprovodi razmatrajući procentualna odstupanja kompatibilizovanog *in-situ* signala u domenima: duž stabla šipa, ulaska talasa u bazu, u samoj bazi, odlaska talasa iz baze i kumulativno (globalno). Kao finalne vrednosti dobijaju se ukupna nosivost i parcijalne (komponentalne) nosivosti šipa (bazom i omotačem). Iteriranje se sprovodi prema fizičko-mehaničkim parametrima tla, a u izuzetnim slučajevima je dozvoljeno i prema geometrijskim parametrima šipa. Definisane (modeliranje) parametara tla za analizu kompatibilizacije (*signal matching*) numeričkog nelinearnog histerezisnog modela se sprovodi primenom *in-situ* rezultata ispitivanja tla za lokaciju gde se šip ispituje, i to iz:

- 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_{tm} pritisak,
- testa dilatometrom (DMT - *Dilatometer Test*): p pritisak.
- laboratorijske analize: C_u nedrenirana kohezija.

Konstitutivni model ponašanja tla može biti: TNO model, *Smith*-ov model, *Randolph*-ov model i slično. U procesu donošenja finalne odluke o nosivosti šipa ne bi trebalo primenjivati metode direktne analize, kao što je *Case*, *MaxCase*, *Impedance*, *MaxImpedance* i slične metode. Ove metode mogu samo poslužiti u fazi monitoringa rezultata *in-situ* DLT ispitivanja i u preliminarnoj analizi nosivosti šipa. Dozvoljava se primena koeficijentna korelacije u analizi karakteristične granične kompresione nosivosti šipa na osnovu proračunate kompresione nosivosti šipa, dobijene testom dinamičkog opterećenja šipa (DLT). Na slici 10 dat je opšti šematski prikaz testa dinamičkog opterećenja šipa (DLT).

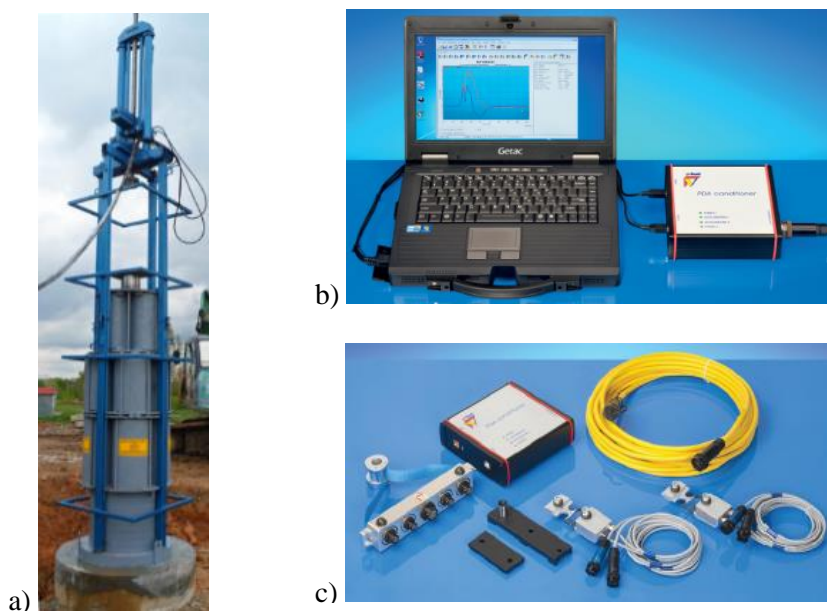


Slika 10. Opšti šematski prikaz testa dinamičkog opterećenja šipa (DLT) [6]

5. ISPITIVANJE NOSIVOSTI ŠIPOVA - TEST DINAMIČKOG OPTEREĆENJA ŠIPA (DLT)

U najvećem broju slučajeva, testom dinamičkog opterećenja šipa (DLT) utvrđuje se mobilisana statička nosivost šipa, kojom se dokazuje maksimalna projektna nosivost šipa. Centar za puteve i geotehniku Instituta IMS poseduje sopstveni originalni sistem i licenciranu opremu za test dinamičkog opterećenja šipa (DLT): softvere i hardvere holandske firme *Profound*. Sa ovom opremom moguće je sprovoditi ispitivanje nosivosti šipa i prikupljati podatke u realnom vremenu i naknadnom

obradom podataka. Kompletan sistem za test dinamičkog opterećenja šipa (DLT) se sastoji iz: čelične noseće konstrukcije koja se montira i povezuje na nastavak glave šipa, modularnih tegova, hidrauličnog sistema za podizanje tegova na određenu visinu, sistema za zaustavljanje tegova (kočioni sistem), motora sa agregatom, senzora (akcelerometri i merači dilatacija), hardverskog sistema za konvertovanje i akviziciju podataka, softverskog sistema za procesiranje i vizuelizaciju podataka i geodetskog sistema (nivelmana *Leica* i bar-kod letvi) za osmatranje deformacija. Merač dilatacija ima opseg merenja od -2000 mikrodilatacija do +2000 mikrodilatacija i sopstvene frekvencije veće od 2kHz [15]. Za merenje akceleracija se koristi pijezootporni akcelerometar čiji je opseg merenja od -5000g do +5000g i rezonantne frekvencije veće od 8kHz. Na slici 11 su prikazane opreme za ispitivanje nosivosti šipova testom dinamičkog opterećenja šipa (DLT) Centra za puteve i geotehniku Instituta IMS i holandske firme *Profound*.



Slika 11. Opreme za ispitivanje nosivosti šipova testom dinamičkog opterećenja šipa Centra za puteve i geotehniku Instituta IMS [7] i oprema holandske firme *Profound* [15]

Za analizu nosivosti šipova se koriste dva softvera: softver PDA-DLT za monitoring prilikom *in-situ* DLT ispitivanja šipa i softver DLT-WAVE za procesiranje signala, gde se kompatibilizuje signal (*signal matching*)

nelinearnog numeričkog histerezisnog modela interakcije šip-tlo i signal dobijen *in-situ* DLT ispitivanjem.

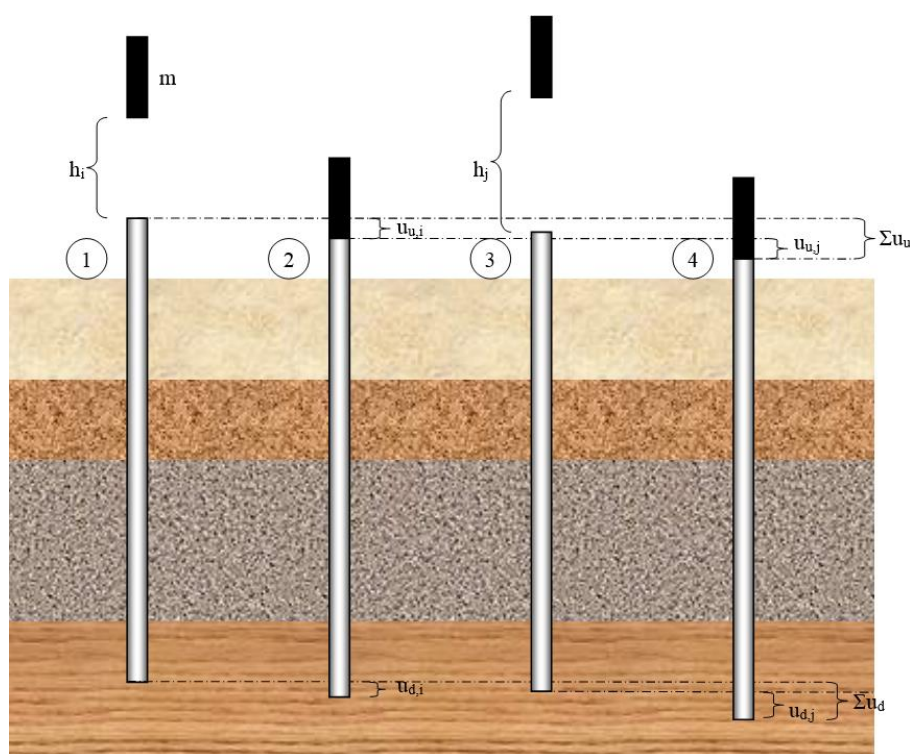
U zavisnosti od vrednosti maksimalne projektne nosivosti šipa i dozvoljenih sleganja, pre sprovođenja ispitivanja, pravi se plan ispitivanja u kojem se definišu odgovarajuća težina tega i preliminarne visine pada tega. S obzirom na opciju modularnosti tega i mogućnost podizanja tega na zahtevane visine, za svako DLT ispitivanje je moguće kreirati odgovarajuće kombinacije tega i visina. Na taj način se dobija spektar vrednosti nosivosti šipa koje je moguće realizovati ispitivanjem sa prethodnim setovanjem opreme. Na slici 12 prikazane su opcije setovanja opreme za



Slika 12. Test dinamičkog opterećenja šipa (DLT) - setovana oprema za ispitivanja: a) Savska promenada, b) vetropark Malibunar, c) Aviv Park u Beogradu, d) pristupna saobraćajnica za most na Adi, e) poslovno-komercijalna zgrada-kula Ušće 2, f) mostovi na trasi ekspresnog puta Gradsko-Prilep u Makedoniji, g) mostovi na koridoru X i XI, h) vijadukti na trasi autoputa E 70/E 75 [7]

test dinamičkog opterećenja šipa (DLT): *Savska promenada*, vetropark *Malibunar*, *Aviv Park* u Beogradu, pristupna saobraćajnica za most na Adi, poslovno-komercijalna zgrada-kula *Ušće 2*, mostovi na trasi ekspresnog puta *Gradsko-Prilep* u Makedoniji, mostovi na koridoru X i XI i vijadukti na trasi autoputa E 70/E 75.

Prilikom dinamičkog opterećenja šipa koje se aplicira na nastavak glave šipa, usled slobodnog pada tege odgovarajuće mase m i sa odgovarajuće visine h , prenosi se energija udara i dolazi do deformacija (sleganja) šipa, pri čemu se kontrolišu dozvoljeni kompresioni i tenzioni naponi u šipu. Na slici 13 je prikazna analiza deformacija šipa pri testu dinamičkog opterećenja šipa (DLT).



Slika 13. Analiza deformacija šipa pri testu dinamičkog opterećenja šipa (DLT) [7]

Korišćenjem osnovnih principa mehanike, kroz zakon konzervacije energije, može se izvesti formulacija problema DLT šipa uspostavljajući odnos ekvivalencije potencijalne energije E_p (teg je podignut na visinu h) i kinetičke energije E_k (teg je slobodno pao na nastavak glave šipa). U tom smislu razmatrane su četiri nezavisne situacije:

- 1. teg je podignut na visinu h_i i šip je neopterećen,
- 2. teg je slobodno pao sa visine h_i na glavu šipa izazivajući deformacije $u_{u,i}$,
- 3. teg je podignut na visinu h_j i šip je neopterećen, pri čemu je $h_j > h_i$,
- 4. teg je slobodno pao sa visine h_j na glavu šipa izazivajući deformacije $u_{u,j}$.

U prvoj situaciji potencijalna $E_{p,0}$ i kinetička $E_{k,0}$ energija glase [4]:

$$E_{p,0} = \int_{y=0}^{y=h_i} mg dy = mgh_i \quad E_{k,0} = 0, \quad (5)$$

gde je g ubrzanje sile zemljine teže. U drugoj situaciji potencijalna $E_{p,i}$ i kinetička $E_{k,i}$ energija glase:

$$E_{p,i} = 0 \quad E_{k,i} = \int_0^v d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = \frac{mv^2}{2}, \quad (6)$$

gde je v brzina tega koji slobodno pada sa visine h_i , a određuje se prema:

$$v = \sqrt{2gh_i}. \quad (7)$$

Deformacija glave šipa je u_u , dok je deformacija baze šipa u_d . Treća situacija je slična prvoj, osim što je visina dodatno povećana ($h_j > h_i$), ali postoji i povratna deformacija šipa, tako da se potencijalna i kinetička energija proračunavaju prema izrazu (5). Četvrta situacija je slična drugoj situaciji, osim što je kinetička energija veća, jer teg pada sa veće visine. Ukupna deformacija glave šipa je jednaka sumi svih deformacija od DLT šipa:

$$\sum u_u = u_{u,i} - \Delta u_{u,i} + u_{u,j} - \Delta u_{u,j} + \dots \quad (8)$$

gde su Δu_u povratne deformacije glave šipa. Teg ne udara direktno o armiranobetonski nastavak glave šipa, već se na šip montira čelična ploča i konstrukcija za ispitivanje, a takođe dodatno se na čeličnu ploču postavljaju podloške od drveta. Uloga ovih podloški je da se: omogući ravnomerna raspodela napona od udarca tega po celoj površini poprečnog preseka šipa, koriguje uneta kinetička energija, produži vreme unosa energije u šip i dodatno koriguje glatkoća signala koji se beleže. Sensorima, koji se postavljaju na nastavak glave šipa ili glavu šipa, registruju se dilatacije i akceleracije šipa u vremenu. Na osnovu izmerenih dilatacija $\varepsilon(t)$, modula elastičnosti betona E i površine poprečnog preseka

šipa A proračunava se sila $F(t)$ prema:

$$F(t) = \varepsilon(t)EA \quad (9)$$

Sa druge strane, na osnovu izmerenih akceleracija, prvom numeričkom integracijom, dobija se brzina $v(t)$ i proračunava sila $F(t)$ prema:

$$F(t) = v(t) \frac{EA}{c} = v(t)Z \quad (10)$$

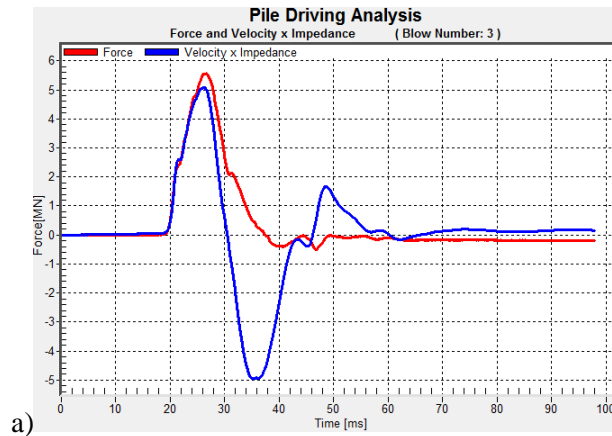
gde je c brzina propagacije talasa u betonu, Z impedanca šipa (zavisi od karakteristika materijala i geometrije poprečnog preseka šipa). Dijagrami sila dobijeni merenjem dilatacija i akceleracija u vremenu predstavljaju osnovu za interpretaciju rezultata DLT ispitivanja. Ukupna vrednost statičke R_{sta} i dinamičke R_{dyn} otpornosti R_{tot} se određuje iz sume talasa koji se kreće od glave ka bazi šipa F^\downarrow (*downward traveling wave*) i talasa koji se kreće od baze ka glavi šipa F^\uparrow (*upward traveling wave*) [18]:

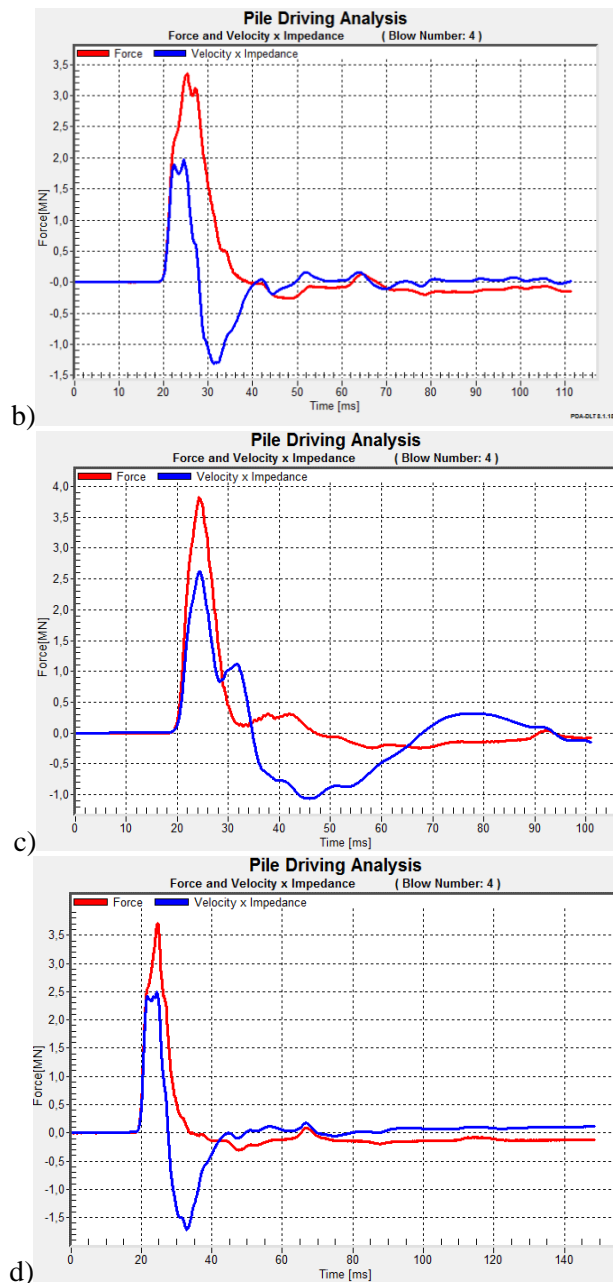
$$R_{tot} = F^\downarrow(t_{max}) + F^\uparrow\left(t_{max} + \frac{2L}{c}\right) \quad (11)$$

gde je L dužina šipa, dok se u opštem slučaju sile dobijene iz talasa proračunavaju prema:

$$F(t)^\downarrow = 0.5(F(t) + Zv(t)^\downarrow) \quad F(t)^\uparrow = 0.5(F(t) - Zv(t)^\uparrow) \quad (12)$$

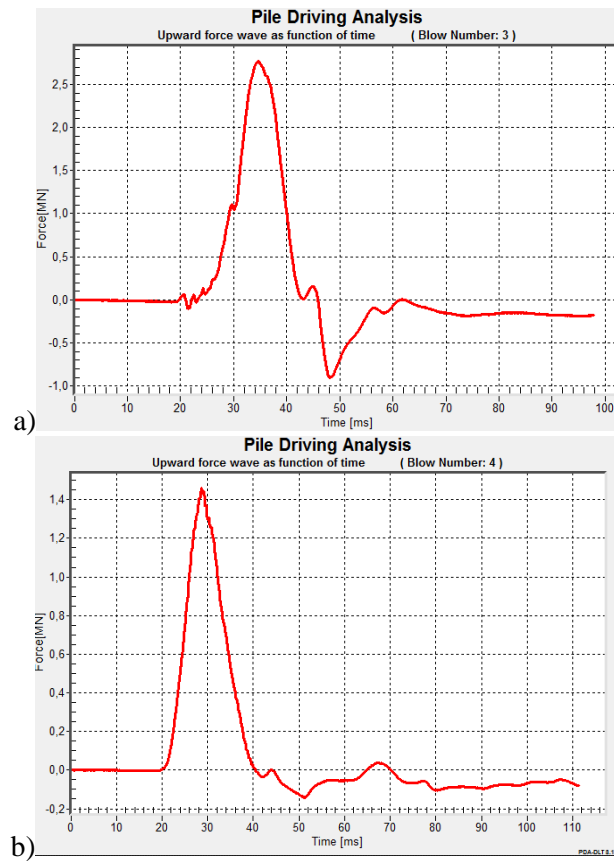
Dijagrami promena sila u vremenu, dobijeni *in-situ* DLT merenjem dilatacija i akceleracija i naknadnim proračunom, prikazani su na slici 14: radni šip vijadukta na trasi autoputa E 70/E 75, radni šip stambenog objekta u Beogradu, probni šip poslovnog objekta na Novom Beogradu i radni šip vetrogeneratora u vetroparku *Kovačica*.

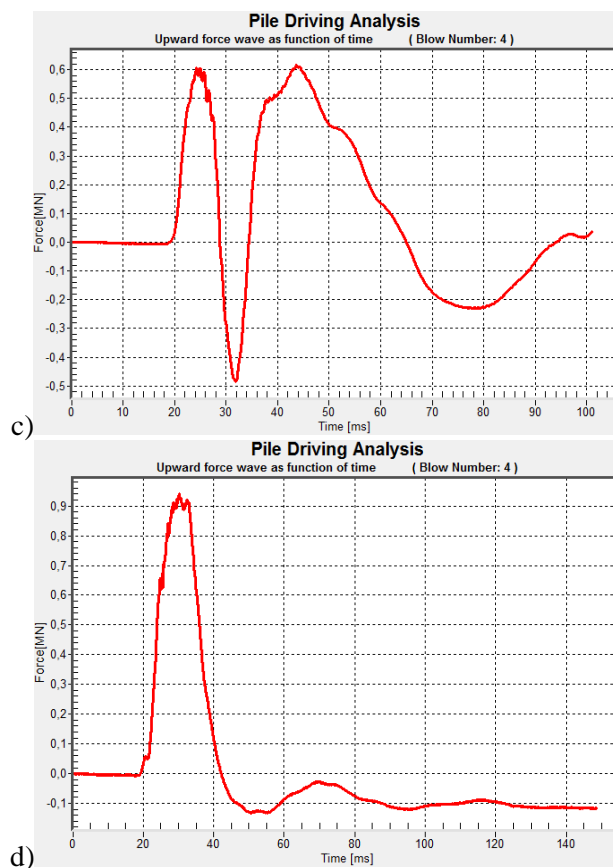




Slika 14. Dijagrami promena sila u vremenu dobijeni in-situ DLT merenjem dilatacija i akceleracija i naknadnim proračunom: a) radni šip vijadukta na trasi autoputa E 70/E 75, b) radni šip stambenog objekta u Beogradu, c) probni šip poslovnog objekta na Novom Beogradu, d) radni šip vetrogeneratora u vetroparku Kovačica [7]

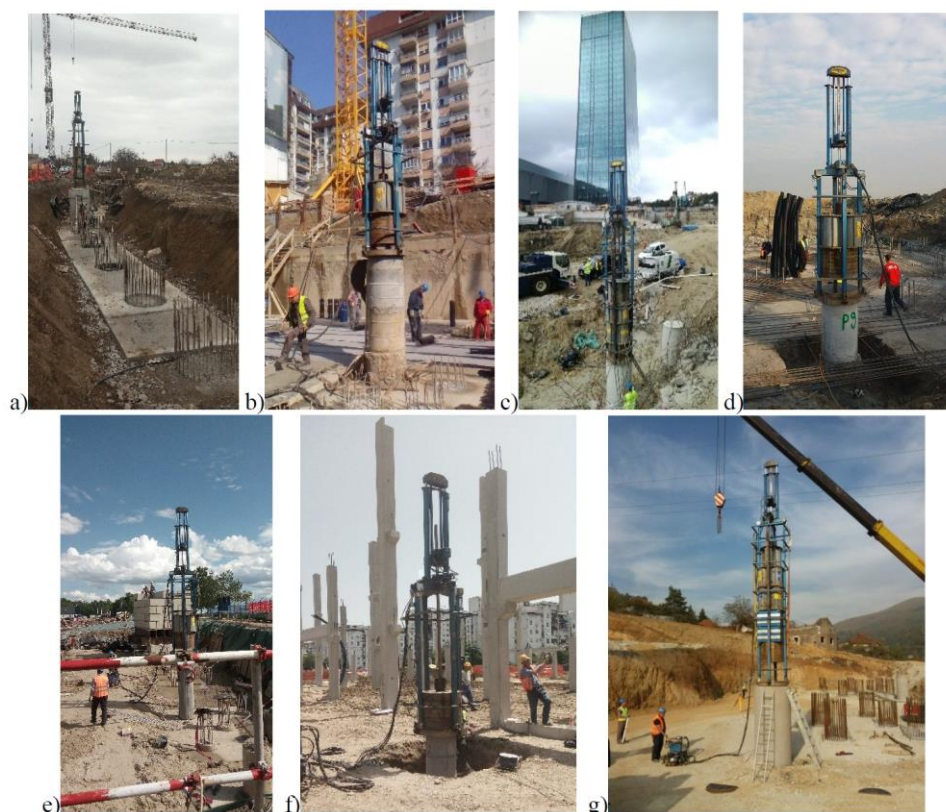
Dijagrami promena povratnih talasa sile (*upward traveling wave*) u vremenu, dobijeni *in-situ* DLT merenjem dilatacija i akceleracija i naknadnim proračunom, prikazani su na slici 15: radni šip vijadukta na trasi autoputa E 70/E 75, radni šip stambenog objekta u Beogradu, probni šip poslovnog objekta na Novom Beogradu i radni šip vetrogeneratora u vetroparku *Kovačica*.





Slika 15. Dijagrami promena povratnih talasa sile (upward traveling wave) u vremenu dobijeni in-situ DLT merenjem dilatacija i akceleracija i naknadnim proračunom za objekte u Srbiji: a) radni šip vijadukta na trasi autoputa E 70/E 75, b) radni šip stambenog objekta u Beogradu, c) probni šip poslovnog objekta na Novom Beogradu, d) radni šip vetroparku Kovačica [7]

Na slici 16 dodatno su prikazani testovi dinamičkih opterećenja (DLT) sprovedeni za objekte: most na *Koridoru XI*, hotel *Mona plaza* u Beogradu, poslovna zgrada *Ušće 2* u Beogradu, vetropark *Kovačica*, termoelektrana i toplana *TE-TO Pančevo*, *Lidl* Novi Beograd i vijadukt *Donja Gračanica* u Bosni i Hercegovini.



Slika 16. Test dinamičkog opterećenja šipa (DLT): a) most na Koridoru XI, b) hotel Mona plaza u Beogradu, c) poslovna zgrada Ušće 2 u Beogradu, d) vetropark Kovačica, e) termoelektrana i toplana TE-TO Pančevo, f) Lidl Novi Beograd, g) vijadukt Donja Gračanica u Bosni i Hercegovini

6. ZAVRŠNE NAPOMENE I ZAKLJUČCI

Ispitivanje nosivosti šipova metodološki se može prikazati u nekoliko faza: priprema ispitivanja, kontrola opreme za ispitivanje, *in-situ* ispitivanje šipova na gradilištu, analiza i odlučivanje tokom ispitivanja, analiza, interpretacija i prezentacija rezultata ispitivanja, analiza granične nosivosti, dodatne numeričke analize nosivosti, donošenje odluke o nosivosti šipa i pisanje izveštaja nosivosti šipa. S obzirom na troškove ispitivanja, u poslednje vreme se najčešće, za ispitivanje vertikalne nosivosti šipova, koristi test dinamičkog opterećenja šipa (DLT). Takođe, u velikoj meri se ispitivanja sprovode na radnim (eksploatacionim) šipovima, a sve manje na probnim (testnim) šipovima. Pored svega toga,

primenjuje se princip minimizacije količine ispitivanja, čime se direktno smanjuju nivoi pouzdanosti nosivosti, stabilnosti i upotrebljivosti određenih celina ili kompletnog sistema fundiranja objekta. Kada je u pitanju veliki broj šipova objekta pouzdanije je napraviti plan ispitivanja pre izgradnje šipova. Kvalitetnim planom ispitivanja mogu se predefinisati probni šipovi na kojima će se sprovesti test statičkog opterećenja šipa (SLT) i/ili test dinamičkog opterećenja šipa (DLT), i time uticati na korekciju tehnologije izgradnje i/ili dispozicije i/ili broja šipova. Naknadno se određeni radni šipovi mogu ispitati testom dinamičkog opterećenja šipa (DLT). Najveći problem se pojavljuje kada se izgrade svi šipovi objekta, pa se nakon toga zahteva sprovođenje ispitivanja nosivosti šipova, jer se na taj način stvara ograničen prostor za korekcije, kako na konstruktivnom nivou, tako i na nivou dinamičkog plana izgradnje objekta.

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 D1143, *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2013.
- [2] ASTM D4945, *Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2017.
- [3] Barbalić I., Galjan B., Bandić M., Ivandić K.: *Ispitivanje probnih pilota na gradilištu putničke luke Dubrovnik*, Građevinar, Vol. 59, No. 8, 2007, pp. 693-703.
- [4] Barger V., Olsson M.: *Classical Mechanics, A Modern Perspective*, McGraw-Hill, 1973.
- [5] Chin K.: *Estimation of the Ultimate Load of Piles not Carried to Failure*, 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, 1970, pp. 81-90.
- [6] Ćosić 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 Load Testing: Testing and Results Analysis*, Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, 2020, (sent for publishing)
- [8] Čosić M., Folić R., Folić B.: *Fragility and Reliability Analyses of Soil - Pile - Bridge Pier Interaction*, Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering, Vol. 16, No. 1, 2018, pp. 93-111.
- [9] Čosić M., Folić B., Sedmak S.: *Buckling Analysis of 3D Model of Slender Pile in Interaction with Soil Using Finite Element Method*, Structural Integrity and Life, Vol. 12, No. 3, 2012, pp. 221-232.
- [10] Čosić M., Folić R., Šušić N.: *Review of Scientific Insights and a Critical Analysis of Pile Capacity and Pile Integrity Tests (plenary lecture)*, The 9th International Conference on Civil Engineering Design and Construction (Science and Practice), Varna, Bulgaria, 2016, pp. 1-13.
- [11] Čosić M., Šušić N., Folić R., Bancila R.: *Probabilistic Analysis of Bearing Capacity of Piles with Variable Parameters in CPT Test and Calculation According to the Requirements of Eurocode 7 (EN 1997-1: 2004) Regulations*, Structural Integrity and Life, Vol. 16, No. 1, 2016, pp. 25-34.
- [12] Čosić M., Šušić N., Folić R., Folić B.: *Model of Probabilistic Analysis of Pile Capacity Based on the Extrapolation of Force-Settlement Curves*, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020. (accepted for publication)
- [13] Decourt L.: *A Ruptura de Fundações Avaliada com Base no Conceito de Rigidez*, SEFE III, São Paulo, Brasil, Vol. 1, 1996, pp. 215-224.
- [14] Hansen B.: *A General Formula for Bearing Capacity*, Danish geotechnical institute, Copenhagen, Denmark, 1961.
- [15] https://profound.nl/downloads/Profound_PDA_DLT_leaflet_en.pdf
- [16] Ivšić T., Bačić M., Librić L.: *Estimation of Bored Pile Capacity and Settlement in Soft Soils*, Građevinar, Vol. 65, No. 10, 2013, pp. 901-918.
- [17] Milović D.: *Bearing Capacity of Piles: Theory and field Tests*, Building Materials and Structures, Vol. 61, No. 1, 2018, pp. 15-26.
- [18] PDA-DLT software help theory
- [19] Rakić D., Čorić S., Šušić N.: *Bearing Capacity Analysis of Vertically Loaded Piles in Sandy Soil in New Belgrade*, Serbia, 3th Symposium Macedonian Association for Geotechnics, Ohrid, Macedonia, 2010.

- [20] Rakić D., Šušić N.: *Bearing Capacity Analysis of Bored Piles in Sandy Soil with Different Compactness*, 12th Danube European Conference of Geotechnical Engineering, Passau, Germany, 2002, pp. 103-106.
- [21] Rakić D., Šušić N., Basarić I., Đoković K., Berisavljević D.: *Load Test of Large Diameter Piles for the Bridge Across Danube River in Belgrade*, XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014), Vienna, Austria, 2014.
- [22] Šušić N.: *Recommendations for Choice of Coefficients in Pile Bearing Capacity*, International Deep Foundations Congress, Orlando, Florida, USA, 2002.
- [23] Šušić N., Hadži-Niković G., Đoković K.: *Bearing Capacity of Piles Estimate Differences*, International Conference of Contemporary Achievements in Civil Engineering, pp. 259-264, 2014.
- [24] Vukićević M., Marjanović M., Pujević V., Obradović N.: *Evaluation of Methods for Predicting Axial Capacity of Jacked-in and Driven Piles in Cohesive Soils*, Građevinar, Vol. 70, No. 8, 2018, pp. 685-693.