



GEOTEHNIČKI ASPEKTI GRAĐEVINARSTVA I ZEMLJOTRESNO
INŽENJERSTVO - Vrnjačka Banja, 01-03. novembar 2023.

Mladen Ćosić¹, Nenad Šušić², Marko Prica³, Nikola Božović⁴, Ksenija Đoković⁵

RAZVOJ MODELA UPRAVLJANJA KVALITETOM ISPITIVANJA ŠIPOVA

Rezime: U radu je ukazano na postojeće probleme koji se pojavljuju prilikom planiranja, u toku i nakon ispitivanja šipova. U tom smislu, na osnovu iskustava autora rada, predloženi su modeli upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova kojima se efikasnije planiraju i rešavaju sve aktivnosti ispitivanja šipova i utiče na donošenje odluka koje se u praksi neadekvatno rešavaju. Posebno je naglašeno uvođenje i primena Elaborata ispitivanja šipova kao nova forma dokumenta u kojem bi se celokupna aktivnost planiranja, ispitivanja i donošenja odluka nakon ispitivanja adekvatno ispratili.

Ključne reči: šipovi, integritet, nosivost, ispitivanje, model upravljanja, elaborat ispitivanja šipova

QUALITY MANAGEMENT MODEL OF PILES TESTING – DEVELOPMENT

Summary: The paper points out the existing problems that appear during planning, in progress and after testing the piles. In this sense, based on the experiences of the authors of the paper, quality management models of piles testing are proposed, which more efficiently plan and resolve all activities of pile testing and influence decision-making, which are inadequately resolved in practice. The introduction and application of the Report of pile testing as a new form of document in which the entire activity of planning, testing and decision-making after testing would be adequately monitored was particularly emphasized.

Keywords: piles, integrity, capacity, testing, management model, report of pile testing

¹ dr, naučni saradnik, Institut za ispitivanje materijala IMS, mladen.cosic@institutims.rs

² dr, naučni savetnik, Institut za ispitivanje materijala IMS, nenad.susic@institutims.rs

³ stručni savetnik, Institut za ispitivanje materijala IMS, marko.prica@institutims.rs

⁴ istraživač saradnik, Institut za ispitivanje materijala IMS, nikola.bozovic@institutims.rs

⁵ dr, naučni saradnik, Institut za ispitivanje materijala IMS, ksenija.djokovic@institutims.rs

1. UVOD

Problematika ispitivanja šipova, kao novija naučna disciplina u okviru metodologije ispitivanja konstrukcija, razvijena je u poslednjih tridesetak godina, a intenzivnim razvojem modernih tehnologija ispitivanja sa primenom matematičko-inženjerskih modela omogućeno je da se dobije kvalitetniji uvid u stanje i ponašanje šipova izgrađenih u tlu. Faktor stanja je u korelaciji sa kriterijumom integriteta šipova, dok je faktor ponašanja u korelaciji sa kriterijumom nosivosti šipova.

Kriterijum integriteta šipova podrazumeva utvrđivanje [8]: stvarne dužine šipa izgrađenog u tlu, postojanja defekata, postojanja diskontinuiteta (proširenja i redukcije poprečnog preseka), promene impedance duž stabla šipa, promene signala u domenu glave šipa, kvaliteta odziva signala u bazi šipa i promene slojeva tla u kojima je šip izgrađen. Utvrđivanje integriteta šipova sprovodi se primenom: testa integriteta šipa sa senzorom (SIT – *Sonic Integrity Test*) i testa integriteta šipa sa sondama (CSL – *Cross-Hole Sonic Logging*), uvažavajući preporuke američkih standarda ASTM D5882 [1] i ASTM D6760 [2], respektivno. Kriterijum nosivosti šipova podrazumeva utvrđivanje [9]: kumulativne (ukupne) nosivosti šipa, komponentalnih (omotačem i bazom) nosivosti šipa, potencijalnih defekata šipa, kontrole naponskih stanja pritiska i zatezanja u šipu, kumulativnog, elastičnog i plastičnog sleganja šipa, ponašanja šipa u vremenskom domenu, ponašanja šipa u kapacitativnom domenu, mobilisane i granične nosivosti. Utvrđivanje aksijalne i lateralne nosivosti šipova sprovodi se primenom: testa statičkog opterećenja šipa (SLT – *Static Load Test*), testa dinamičkog opterećenja šipa (DLT – *Dynamic Load Test*), testa aksijalnog zatezanja šipa (ATT – *Axial Tension Test*) i testa lateralnog opterećenja šipa (LLT – *Lateral Load Test*), uvažavajući preporuke američkih standarda ASTM D1143 [3], ASTM D4945 [4], ASTM D3689 [5] i ASTM D3966 [6], respektivno. Takođe, prilikom ispitivanja nosivosti šipova SLT i DLT mogu se koristiti preporuke međunarodnih-evropskih standarda EN ISO 22477-1 [12] i EN ISO 22477-4 [13], respektivno. U prethodno nabrojanim standardima definisane su procedure ispitivanja integriteta i nosivosti šipova, ali ne postoji standard kojim se definiše model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova i koji bi objedinio i funkcionalno povezao glavne smernice svih stanarada za ispitivanja integriteta i nosivosti šipova. U postojećim standardima prikazan je značajan broj alternativnih faza ispitivanja šipova koje, u određenoj meri, mogu biti zbunjujuće, dvosmislene, tehnološki prevaziđene ili čak u određenom stepenu nepotrebne. U tom smislu stvara se i određeni prostor u kojem se mogu dogoditi nesuglasice prilikom postavke i interpretacije rezultata ispitivanja šipova. Ključni faktori koji nedostaju i koji bi trebali biti definisani standardom za model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova su: planiranje ispitivanja, količine ispitivanja, detaljnije (određenije) preporuke za tumačenje rezultata ispitivanja i preporuke za situacije u kojima postoje izvesni defekti integriteta ili redukcije nosivosti šipova.

Poznavanje matematičko-inženjerskih metoda proračuna šipova, *in-situ* ispitivanja šipova i poznavanje standarda potreban je, ali ne i dovoljan uslov. Ova dva uslova (potrebnost i dovoljnost) ispunjavaju se tek uvođenjem nove tehničke regulative, praćeno sistemom i mehanizmima upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova. U nastavku ovog rada definisan je *Elaborat ispitivanja šipova* kao nova forma dokumenta u kojem bi se celokupna aktivnost planiranja, ispitivanja i donošenja odluka nakon ispitivanja šipova adekvatno ispratili. U radu *Analiza modela upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova* prikazan je deo sadržaja ovog elaborata sa praktičnim primerom razmatranja i donošenja odluka prilikom planiranja i sprovođenja ispitivanja šipova.

2. MODEL UPRAVLJANJA KVALITETOM ISPITIVANJA ŠIPOVA

2.1. Identifikacija i analiza ključnih elemenata kod ispitivanja šipova

Postojeća metodologija ispitivanja šipova zasniva se na nezavisnom razmatranju samog procesa ispitivanja, u odnosu na kompletan proces projektovanja i izgradnje objekata. Kao posledice ovako postavljene metodologije ispitivanja šipova pojavljuju se značajni problemi u praksi. Uloga aktera u procesu projektovanja, izgradnje, ispitivanja i nadzora je vrlo diferentna, pri čemu bi i sam projektant morao biti znatno više upućen u metodologiju ispitivanja šipova. Izvođač radova morao bi, takođe, da bude više upućen u procese ispitivanja, dok bi nadzor trebao da znatno detaljnije kontroliše i kritički analizira sve faze ispitivanja šipova. U radu [7] prikazan je dijagram toka postojeće metodologije ispitivanja šipova u kontekstu projektovanja i izgradnje objekata, a ovde se u skraćenoj formi navode ključni elementi:

- ispitivanja tla (laboratorijska i istražna *in-situ* ispitivanja tla prikazana u formi geotehničkog elaborata),
- projektovanje objekta (modeliranje konstrukcije i analitičko–numerički proračuni prikazani u formi projektno–tehničke dokumentacije),
- izgradnja objekta (tehnologija gradnje objekta prikazana u formi projekta tehnologije gradnje objekta i fundamenata – šipova),
- ispitivanje konstrukcije (tehnologija ispitivanja konstrukcije prikazana u formi izveštaja o tehnologiji ispitivanja i rezultatima ispitivanja konstrukcije),
- ispitivanje šipova (tehnologija ispitivanja šipova prikazana u formi izveštaja o tehnologiji ispitivanja i rezultatima ispitivanja šipova).

Svaka faza, od ispitivanja tla, preko projektovanja i izgradnje, pa sve do ispitivanja konstrukcije i šipova usmerena je procedurama definisanim u standardima o: ispitivanju tla, projektovanju objekata, izgradnji objekata, ispitivanju konstrukcija i ispitivanju šipova. Usled nedostatka sopstvenih standarda o ispitivanjima šipova primenjuju se ASTM, ISO i EN standardi. U praksi, najčešće, nejasno definisane preporuke u standardima iskustveno se interpretiraju, dok se nedefinisane (nedostajuće) preporuke, takođe, iskustveno usvajaju i primenjuju. Jedan od najvećih problema predstavlja definisanje potrebne količine ispitivanja šipova. Ovaj faktor, između ostalog, u korelaciji je sa spektrom faktora definisanih kroz: inženjersko–geološki profil terena, laboratorijska i *in-situ* ispitivanja tla, tip konstrukcije i projektno rešenje objekta, tehnološki model šipova i tehnološki postupak izgradnje šipova, proračunski geotehnički model šipova, proračunski numerički model šipova, metodologiju i tehnologiju ispitivanja integriteta i nosivosti šipova.

Formiranje inženjersko–geološkog profila terena usko je povezano sa laboratorijskim i *in-situ* ispitivanjima tla. Međutim, najčešće se i minimalna potrebna količina istražnih radova, iskazana kroz minimalan potreban broj bušotina, sondažnih jama, CPT i SPT, a takođe i minimalna potrebna količina laboratorijskih ispitivanja uzoraka tla za utvrđivanje fizičko–mehaničkih svojstava, identifikaciju i klasifikaciju tla, redukuje. Standardom EN 1997–2:2004 [11] propisane su potrebne količine istražnih radova. Kvalitetno formiran inženjersko–geološki profil terena, kroz odgovarajući obim laboratorijskih i *in-situ* ispitivanja tla, direktno je u korelaciji sa modelom upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova. Prostorna promena geologije i promena geologije po dubini tla (stratifikacija slojeva tla) direktno utiču na utvrđivanje potrebnih količina ispitivanja šipova. Ukoliko su kvalitetno identifikovani slojevi tla i kvalitetno formiran

inženjersko–geološki profil terena, tada se može reći da će i nivo pouzdanosti rešenja integriteta i nosivosti šipova biti visok. Takođe, na taj način jasnije se utvrđuje minimalna potrebna količina ispitivanja šipova, kvalitetnije se definiše tehnologija ispitivanja šipova i precizniji su faktori sigurnosti.

Tip konstrukcije i projektno rešenje objekta, takođe, značajno utiče na model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova. Generalno razmatrajući, može se reći da postoji izvesna razlika u pristupu kada se definišu tehnologija ispitivanja i količine ispitivanja šipova za zgrade, u odnosu na mostovske konstrukcije. Sa druge strane, utvrđivanje količine šipova koji se ispituju zavisi i od statičko–dinamičkih uticaja u samom objektu, tako da se mogu razlikovati situacije, odnosno pozicije šipova na dispoziciji fundiranja objekta: šipovi središnjeg (interiornog) dela, šipovi u obodnom delu (ivični šipovi), šipovi u uglovima, individualne grupe šipova, znatno udaljeni delovi ili nezavisne celine objekta i šipovi stubnih mesta mostova. Generalno se može reći da postoji izvesna razlika u pristupu definisanja ispitivanja šipova kod objekata koji imaju: koncentrisanu dispoziciju šipova, razuđenu formu dispozicije šipova i veći broj individualnih grupa šipova.

Razvijen je značajan broj tehnoloških modela šipova i tehnoloških postupaka izgradnje šipova, međutim generalno se mogu identifikovati tri tehnološka modela šipa: bušeni, CFA i pobijeni. Izbor tipa tehnološkog modela šipa značajno utiče na nivo kvaliteta rezultata ispitivanja, ali i na izbor tehnologije ispitivanja šipova, odnosno na model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova. Šipovi izgrađeni tehnologijom pobijanja imaju značajniji stepen integralnosti i nosivosti u odnosu na ostale tehnološke modele šipova, ali sa druge strane, u zavisnosti od tehnološkog postupka pobijanja isti mogu biti oštećeni u toku pobijanja ili imati razvijene mikroprslinje usled pojave napona zatezanja prilikom pobijanja. Kod šipova izgrađenih tehnologijom bušenja tla ili CFA, ovo nije moguće, ali je moguće da se prilikom ispitivanja šipova isti oštete usled razvoja napona zatezanja u njima. U tom smislu potrebno je voditi računa da se kod tehnoloških modela šipova izgrađenih pobijanjem ne razviju defekti pre sprovođenja ispitivanja. Sa druge strane, kod tehnoloških modela šipova izgrađenih tehnologijom bušenja moguća je značajna varijacija promene poprečnog preseka duž stabla šipa, što zahteva pažljivu analizu reflektograma prilikom ispitivanja šipova. Takođe, prilikom izgradnje ovih šipova, ali i tehnoloških modela CFA šipova mogući su problemi u formiranju geometrije baze ili baze sa nižim mehaničkim karakteristikama.

Filozofija proračuna nosivosti šipova prema standardu EN 1997–1:2004 [10] zasniva se na primeni analitičko–numeričke procedure i proceduri verifikacije nosivosti šipova. U tom smislu treba razlikovati proračunski geotehnički model šipova koji se prikazuje u geotehničkom elaboratu i analitičko–numerički model šipova koji se formuliše u metematičko–inženjerskom modelu interakcije tlo–šipovi–konstrukcija i prikazuje u projektnoj dokumentaciji objekta. Za proračunski geotehnički model šipova koriste se parcijalni i globalni faktor otpornosti koji su u direktnoj korelaciji sa tehnološkim modelom šipa. Najviši stepen pouzdanosti nosivosti se dobija za tehnološke modele pobijenih šipova, nešto niži za tehnološke modele CFA šipova i najniži za tehnološke modele bušenih šipova. Nosivost šipova se određuje primenom metoda koje se zasnivaju na laboratorijskim analizama parametara tla i rezultatima CPT. Nedovoljno kvalitetno određena nosivost šipova direktno je u korelaciji sa vrednosti mobilisane nosivosti koja se ispituje i utvrđuje na šipovima, s obzirom da se može dogoditi situacija da projektant zahteva da se dokaže nosivost koja je znatno veće od realno moguće. Jedan od aspekata upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova u ovakvim situacijama je i kontrola

upotrebljivosti šipova, što se prati preko inkrementalnog priraštaja sleganja kod SLT ili parcijalnog i totalnog sleganja kod DLT.

Filozofija koncepcije proračunskih numeričkih modela šipova bazira se na primeni metode konačnih elemenata (FEM). U zavisnosti od primenjene diskretizacije, tipa konačnog elementa i modeliranja interakcije šip–tlo dobijaju se rezultati sa većim ili manjim stepenom pouzdanosti. Vrednosti statičkih uticaja koji se dobijaju u šipu, na osnovu u proračuna konstrukcije za merodavnu kombinaciju opterećenja, ključni su za analizu projektne, mobilisane i granične nosivosti. Takođe, sleganja koja se dobiju po šipu, na osnovu u proračuna konstrukcije za merodavnu kombinaciju opterećenja, ključna su za analizu kriterijuma upotrebljivosti. Svi ovi parametri se prate i analiziraju u toku ispitivanja šipova, te na taj način utiču direktno na model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova.

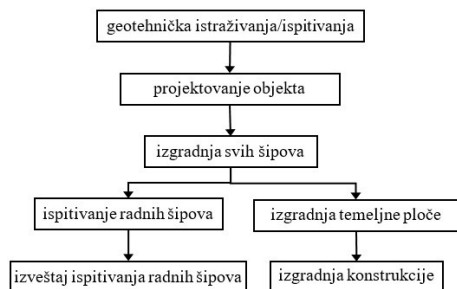
Metodologija i tehnologija ispitivanja integriteta šipova tematike su koje bi trebalo, da pored ispitivača, tiču se i samog projektanta, tačnije da sam projektant bude upućen u problematiku metodologije i tehnologije ispitivanja integriteta šipova. U praksi, na primer, pojavljuju se situacije u kojima projektant zahteva da se za jedan most sprovede simboličan broj ispitivanja ili samo jedno ispitivanje šipa SIT. Čak i nakon asistencije u razjašnjenju SIT metodologije ispitivanja šipa od strane ispitivača, ispitivanje se sprovede prema insistiranju projektanta. U takvim situacijama, može se reći, da postoji potpuno odsustvo kontrole kvaliteta ispitivanja šipova, jer i nije moguće sprovesti generalizaciju stanja i ponašanja, ako ne svih šipova mosta, onda čak ni grupe šipova jednog stubnog mesta mosta na osnovu samo jednog ispitivanja šipa SIT. Detaljnija i preciznija ispitivanja CSL znatno ređe se primenjuju, i ako su za konstrukcije fundirane u geološkim medijumima nižih fizičko–mehaničkih karakteristika ovakva ispitivanja gotovo nezamenljiva.

Metodologija i tehnologija ispitivanja nosivosti šipova, takođe, tematike su koje bi trebalo da, pored ispitivača, tiču se i samog projektanta, tačnije da sam projektant bude upućen u problematiku metodologije i tehnologije ispitivanja nosivosti šipova. Najčešći problem koji se javlja u praksi po pitanju kontrole kvaliteta ispitivanja šipova je određivanje potrebne količine ispitivanja šipova i tipova testova. U tom smislu, ispitivanja se sprovode u što manjem obimu, tako da troškovi ispitivanja budu svedeni na minimum. Neretko se sprovodi samo jedan SLT, i pored toga što analiza parametara iz geotehničkog elaborata i projektno rešenje objekta ukazuje na potrebu za većim brojem ispitivanja šipova. Takođe, u praksi se više primenjuje zamena SLT testom DLT, a čak se i povećava broj DLT testova, s obzirom da su ovi testovi znatno manje zahtevni u pogledu vremena montaže opreme i ispitivanja. Međutim, nisu sva dinamička svojstva tla i aspekti viskoznog i histerezisnog prigušenja tla adekvatni za ispitivanje DLT.

2.2. Analiza postojećih situacija kod ispitivanja šipova kroz dijagram toka

Na osnovu prethodno identifikovanih i analiziranih ključnih elemenata kod ispitivanja šipova, konstruisani su dijagrami tokova metodologije ispitivanja šipova u kontekstu projektovanja i izgradnje objekta za situacije koje se pojavljuju u uobičajenoj inženjerskoj praksi. Šipovi su klasifikovani u dve grupe, prema ulozi koju imaju prilikom ispitivanja i njihove nosivosti za koje se analiziraju: probni (ispitni) šip (ne koristi se kao primarni noseći element konstrukcije – samo u funkciji ispitivanja) i radni (eksploatacioni) šip (koristi se kao primarni noseći element konstrukcije). U dijagramima

tokova su prikazane samo najbitnije aktivnosti koje su u korelaciji sa ispitivanjima šipova, kao što su: istražni radovi, projektovanje i izgradnja objekta. Na slikama 1–5 prikazani su dijagrami tokova metodologije ispitivanja šipova u kontekstu projektovanja i izgradnje objekta za situacije koje se pojavljuju u uobičajenoj inženjerskoj praksi. Varijanta 1 (slika 1) jeste situacija da se nakon sprovednih istražnih radova i projektovanja objekta, izgrade (gotovo) svi šipovi objekta, pa se zatim pristupa ispitivanju radnih šipova. U ovom slučaju gotovo da se eliminiše sloboda kritičkog inženjerskog rasuđivanja u ispitivanju šipova, tako da je uloga ispitivanja samo da potvrdi da su šipovi kvalitetno isprojektovani i izgrađeni u tlu. Takođe, kao dokaz tome je i činjenica da se u toku ili čak pre ispitivanja izgradi i temeljna ploča i postavi hidroizolacija, a ostavi se samo nekoliko šipova za ispitivanje nosivosti. Neretko se zahteva i ispitivanje radnih šipova na granično stanje nosivosti, što je nedopustivo.



Slika 1. Dijagram toka metodologije ispitivanja šipova – uobičajena inženjerska praksa – var. 1

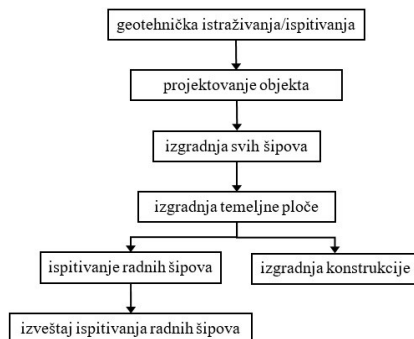
Varijanta 2 (slika 2) veoma je slična prethodnoj varijanti, s tim što se ostavi znatno manji broj šipova, tačnije selektuju se probni šipovi za ispitivanje do nivoa graničnog stanja nosivosti. U ovom slučaju projektant želi da dokaže da objekat zadovoljava i po pitanju projektne i granične nosivosti, ali i po pitanju upotrebljivosti (sleganja). Međutim, najčešće se količina (broj) šipova koji su ostavljeni za ispitivanje svodi na jedna ili dva šipa, a u poređenju sa ukupnim brojem šipova i geotehničkim uslovima to je jako mali procenat. U određenim situacijama se zahteva ovakvo ispitivanje do nivoa granične nosivosti DLT, pri čemu u neposrednoj blizini ili uz sam objekat postoje izgrađeni susedni objekti stari po nekoliko decenija, tako da im u toku i nakon DLT može biti ugrožena upotrebljivost, usled vibracija koje se generišu i propagiraju kroz tlo.



Slika 2. Dijagram toka metodologije ispitivanja šipova – uobičajena inženjerska praksa – var. 2

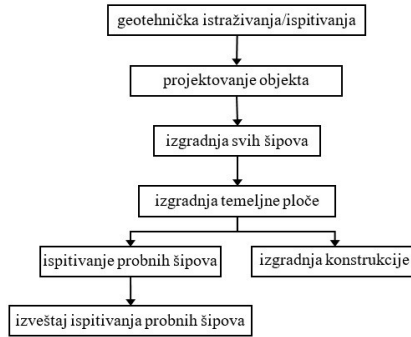
Varijanta 3 (slika 3) jeste situacija gde se izgrade svi šipovi objekta i izlije

temeljna ploča, a ostavi se samo određen broj radnih šipova za ispitivanje nosivosti. Međutim, pre izlivanja temeljne ploče se zahteva ispitivanje integriteta gotovo svih šipova objekta. Ukoliko i određeni procenat šipova ima manji integritet, dokazan ispitivanjem, tada se i dalje insistira da je to samo manji procenat, u odnosu na celokupan broj ispitanih šipova. Zato se nastavlja dalje sa radovima (izlivanjem temeljne ploče), a ostavlja se samo par radnih šipova za ispitivanje nosivosti, pa se i na osnovu dobijenih rezultata integriteta tumače i rezultati nosivosti šipova, što je nedopustivo. S obzirom da je montaža opreme za ispitivanje nosivosti šipova zahtevnija u odnosu na postupak ispitivanja SIT (koji se najčešće i koristi), to je još jedan od razloga zašto se nastavlja sa daljim izvođenjem radova, pa se paralelno sprovodi ispitivanje nosivosti šipova.



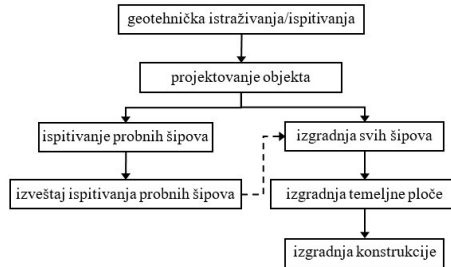
Slika 3. Dijagram toka metodologije ispitivanja šipova – uobičajena inženjerska praksa – var. 3

Varijanta 4 (slika 4) veoma je slična prethodnoj varijanti, s tim što se ostavi znatno manji broj šipova, tačnije selektuju se probni šipovi za ispitivanje do nivoa graničnog stanja nosivosti. Takođe, i ovde projektant želi da se ispitivanjem pokaže da probni šipovi zadovoljavaju kriterijum granične nosivosti, međutim događaju se situacije da se ispitivanjem to i potvrdi, ali da je znatno ranije ugrožen kriterijum upotrebljivosti. Najčešće se ispituju probni šipovi selektovani na dijametralnim pozicijama objekta, a često se usled većih dimenzija objekta i promene geoloških uslova dobijaju i drugačiji rezultati ispitivanja nosivosti, pa i integriteta. U tom smislu se mogu dogoditi situacije da na obe pozicije šipovi zadovoljavaju kriterijume graničnog stanja nosivosti, ali da jedan šip ima znatno veće odgovarajuće sleganje za nivo projektne sile, u odnosu na drugi šip. Ispitivanje nosivosti šipa ima za cilj da dokaže zahtevanu nosivost, tako da ne bude prekoračeno odgovarajuće sleganje i da su naponi pritiska i zatezanja u betonu manji od dozvoljenih, odnosno graničnih vrednosti. Takođe, razmatraju se i vrednosti maksimalnih apsolutnih akceleracija, kinetička energija, pozicija maksimalne sile pritiska i zatezanja po poprečnim presecima duž stabla šipa i drugo. Varijanta 5 (slika 5) je najpovoljnija u odnosu na sve prethodne varijante sa kojima se može susresti u praksi ispitivanja šipova, s obzirom da se nakon projektovanja objekta pristupa izgradnji probnih šipova, ali i ostalih šipova. U tom smislu postoji mogućnost da se primenom DLT, koji je dosta brži i efikasniji u odnosu na SLT, sprovede ispitivanje na nekoliko probnih šipova. Na osnovu izveštaja ispitivanja mogu se detaljnije razmatrati svi aspekti ispitivanja u konsultaciji sa nadzorom i projektantom, ukoliko se pojave problematične situacije. Ovde se prvenstveno misli na stepen redukcije faktora sigurnosti kod nosivosti šipova i uticaj stepena redukcije integralnosti šipa na nosivost šipa. Takođe, u problematičnim situacijama se razmatra i efekat redukcija integriteta šipova analizom signala sila i akceleracija koji se dobijaju primenom DLT.



Slika 4. Dijagram toka metodologije ispitivanja šipova – uobičajena inženjerska praksa – var. 4

Ukoliko se nosivost sprovodi SLT, tada se radi dodatna ekstrapolacija u cilju analiza sleganja u nelinearnom i postnelinearnom domenu ponašanja šipa i utvrđivanje granične nosivosti šipa.

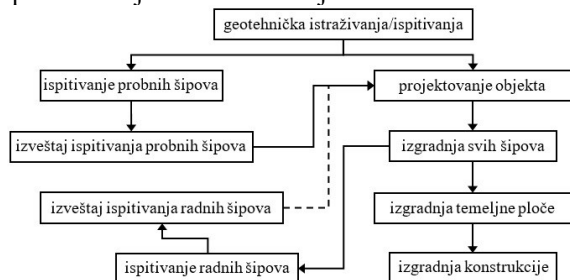


Slika 5. Dijagram toka metodologije ispitivanja šipova – uobičajena inženjerska praksa – var. 5

2.3. Konstrukcija modela upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova kroz dijagram toka

U prethodno prikazanim dijagramima tokova i objašnjenjima metodologije ispitivanja šipova u kontekstu projektovanja i izgradnje objekta, za situacije koje se pojavljuju u uobičajenoj inženjerskoj praksi, kritički su analizirani i prikazani određeni nedostaci koje treba unaprediti. Kao što se može videti uloga ispitivača je minorizovana u donošenje odluka po pitanju plana ispitivanja šipova u kontekstu projektovanja i izgradnje, u odnosu na projektanta i izvođača radova, a trebalo bi da bude na znatno višem nivou, odnosno da postoji ravnoteža, kritičko sagledavanje i uvažavanje mišljenja i stavova svih strana. U suštini, treba napraviti razliku u pristupu projektovanja i izgradnji objekata pod zemljom (geotehničkih objekata) i objekata nad zemljom, ali najčešće se događa da projektanti imaju potpuno izgrađen isti pristup u projektovanju. Konstitutivni modeli ponašanja tla i geomaterijala su znatno složeniji u odnosu na konstitutivne modele ponašanja betona i čelika, pa u tom smislu nije opravdan isti pristup u projektovanju konstrukcije nad zemljom i konstrukcije pod zemljom. Stepen unifikacije i pouzdanosti u utvrđivanju raspodele fizičko–mehaničkih karakteristika betona i čelika je mnogo lakše statističko–stohastički opisati u odnosu na fizičko–mehaničke karakteristike tla. Takođe, matematički modeli getehničkih konstrukcija se znatno više razlikuju u odnosu na ove

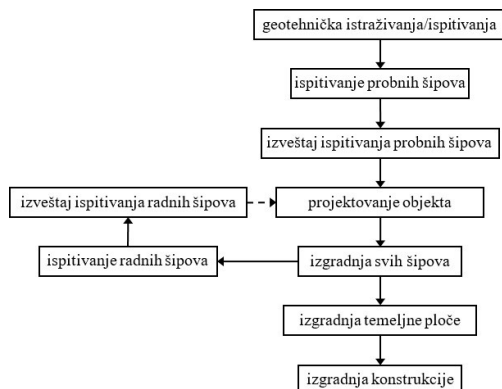
modele konstrukcije nad zemljom. Posledica prethodno rečenog je da se kod geotehničkih konstrukcija i geotehničkih konstruktivnih elemenata mora posvetiti posebna pažnja pri ispitivanju integriteta i nosivosti, ali tako da se ti rezultati moraju uzeti u obzir kao dodatna verifikacija projekta geotehnike, pa i projekta celog objekta. Na slikama 6–9 prikazani su dijagrami tokova metodologije ispitivanja šipova u kontekstu projektovanja i izgradnje objekta, a u cilju unapređenja upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova. Predlog 1 (slika 6) jeste model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova kod koga se nakon sprovedenih istražnih radova i izrade geotehničkog elaborata pristupa izgradnji i ispitivanju probnih šipova. Na osnovu rezultata *in-situ* i laboratorijskih ispitivanja tla određuju se nosivosti šipova za različite tehnološke modele, prečnike i dužine šipova, tako da projektantu stoji na raspolaganju spektar opcija za izbor tipa i geometrije šipova koje će koristiti prilikom numeričkog proračuna konstrukcije u interakciji sa tlom. Paralelno sa projektovanjem objekta sprovodi se i ispitivanje selektovanih modela probnih šipova do granične nosivosti, s tim što se pre ispitivanja nosivosti utvrđuje integritet probnih šipova. Na osnovu rezultata ispitivanja probnih šipova projektant ima jasan uvid u ponašanje šipova za kriterijume nosivosti, upotrebljivosti i trajnosti. Uzimajući u obzir rezultate ispitivanja probnih šipova i numeričke analize pri interakciji konstrukcija–tlo, projektant ima mogućnost da utvrdi da li rezultati numeričkih analiza zadovoljavaju kriterijume dobijene ispitivanjem šipova. Nakon izdane projektne dokumentacije izgrađuju se svi radni šipovi objekta, pri čemu se sprovodi ispitivanje integriteta šipova i selektuje se određeni broj šipova za sprovođenje testova nosivosti. Izveštaj ispitivanja radnih šipova dodatni je dokaz o kvalitetu projektovanih i izgrađenih šipova po pitanju nosivosti, upotrebljivosti i trajnosti. Takođe, ovaj izveštaj je i potvrda da je izabran optimalan tehnološki i geometrijski model šipova. S obzirom na poštovanje dinamike projektovanja i građenja objekta, ovaj predloženi model, moglo bi se reći, jeste najefikasniji, ali i sa najnižim stepenom kvaliteta ispitivanja šipova u kontekstu projektovanja kompleksnih objekata u interakciji sa tlom.



Slika 6. Dijagram toka metodologije ispitivanja šipova – model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova – predlog 1

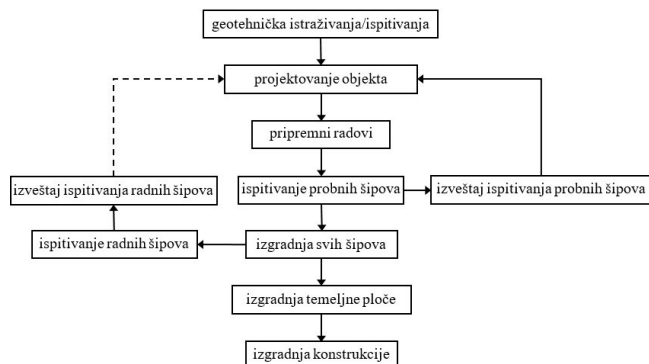
Predlog 2 (slika 7) sličan je prethodnom predlogu s tim što se ovde, s obzirom na kompleksnost geoloških uslova u kojima se duboko fundira objekat, sprovodi detaljnije ispitivanje probnih šipova, najčešće, primenom SLT ili DLT ili kombinacijom istih. Cilj je da se pored selekcije tipa tehnološkog modela i geometrije šipa utvrdi i najpovoljnija tehnologija ispitivanja šipova ili da se jasnije dobije uvid u izbor količine ispitivanja šipova. Na taj način se pravi i strategija za izbor pozicije probnih šipova (unutar dispozicije objekta ili van), ali i strategija koji probni ili radni šipovi će se ispitivati SLT, a koji probni ili radni šipovi će se ispitivati DLT. Takođe, pravi se i strategija koji tip testa će se primenjivati za ispitivanje integriteta šipova. Na osnovu sprovedenih

ispitivanja šipova i rezultata ispitivanja šipova u formi izveštaja, projektant ima potpuno jasnu sliku o: izboru tipova šipova, raspodele šipova u dispoziciji objekta, nosivostima šipova, integritetu šipova i kotama fundiranja baza šipova.



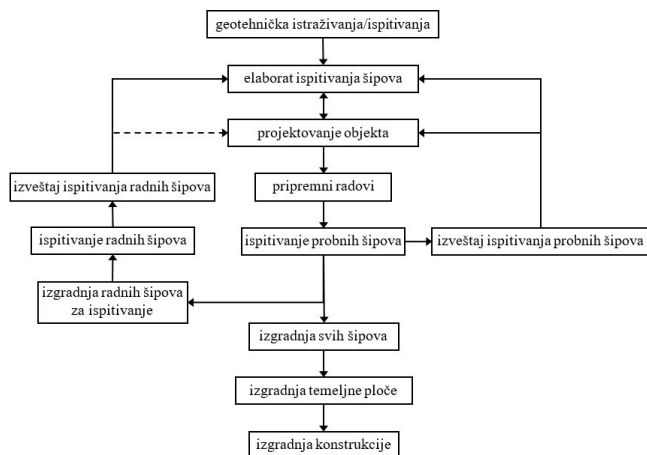
Slika 7. Dijagram toka metodologije ispitivanja šipova – model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova – predlog 2

Predlog 3 (slika 8) je nešto drugačija verzija predloga u odnosu na prethodni model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova, s obzirom da se ovde prvo sprovodi projektovanje objekta, a zatim, u fazi pripremnih radova, sprovodi se ispitivanje probnih šipova. U tom smislu postoji mogućnost donošenja odluke o reviziji projektnog rešenja dubokog fundiranja. Pripremni radovi, prema *Zakon o planiranju i izgradnji objekata* (član 2, tačka 28) [14], jesu radovi koji prethode građenju objekta, tako da se u ovoj fazi mogu sprovesti ispitivanja probnih šipova, na osnovu kojih će se doneti odluke o tehnološkom modelu i geometrijskim karakteristikama šipova. Na osnovu izveštaja ispitivanja integriteta i nosivosti šipova projektant može da verifikuje rešenje dobijeno numeričkim analizama kompletnog objekta u interakciji sa tlom. Ukoliko se pokaže nedostatak u integralnosti ili nosivosti probnih šipova, projektant može da revizijom projektne dokumentacije koriguje modele šipova ili da smanji faktor sigurnosti i dozvoli preraspodelu statičkih i dinamičkih uticaja u interakciji tlo–šipovi–temeljna ploča, ali tako da ne ugrozi nosivost, stabilnosti i upotrebljivost objekta.



Slika 8. Dijagram toka metodologije ispitivanja šipova – model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova – predlog 3

Takođe, projektant ima na raspolaganju mogućnost povećanja broj šipova na određenom delu objekta ili u koncentrisanoj grupi šipova, ukoliko utvrdi da samo određni deo objekta, u pogledu fundiranja, ima manji stepen integriteta ili nosivosti. Nakon izgradnje radnih šipova, i paralelnim, naizmeničnim ili naknadnim ispitivanjem radnih šipova koji se izgrađuju ili su izgrađeni, projektant ima mogućnost da potvrdi izmenu u tehničkom rešenju fundiranja objekta i dispozicije šipova. Efekat povećanja dužine šipova, najčešće, pokazao se kao i najefikasniji revizioni metod, mada ima i drugih metoda i postupaka za korekcije. Predlog 4 (slika 9), u odnosu na sve prethodne predloge, najsofisticiranije je rešenje, jer se u metodologiju upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova uvodi *Elaborat ispitivanja šipova*. O detaljima forme *Elaborata ispitivanja šipova* prikazano je u narednom radu pod naslovom *Analiza modela upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova*.



Slika 9. Dijagram toka metodologije ispitivanja šipova – model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova – predlog 4

3. ZAKLJUČAK

Model upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova definisan je i razvijen, između ostalog, u cilju implementacije *Elaborata ispitivanja šipova* kao obavezujućeg dokumenta konstrukcija fundiranih na šipovima u *Zakonu o planiranju i izgradnji objekata* ili kroz odgovarajuće podzakonske akte ili tehničke propise. Na taj način bi se u potpunosti upravljalo kompletnim tokom ispitivanja šipova, ali bi se i dodatno unapredio kvalitet projektovanja i izgradnje šipova, pa samim time povećao bi se i kvalitet celog objekta. U tabeli 1 prikazana je komparativna analiza četiri predložena modela upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova, gde su razmatrani ključni aspekti koji ukazuju na prednosti i nedostatke definisanih modela. Evidentna je prednost modela u kojem se planiranje, sprovođenje i analiza rezultata ispitivanja šipova zasnivaju na primeni odgovarajućeg dokumenta – *Elaborata ispitivanja šipova*. Postoji mogućnost kreiranja i novog modela upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova koji bi u sebi sadržao odgovarajuće elemente iz ovih predloženih modela, a sve u zavisnosti od problema sa kojim bi se susreli u praksi na konkretnom projektu objekta.

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|--|---|---|--|---|
| projektovanje na osnovu ispitivanja šipova | delimično | potpuno | ne | ne |
| merodavni rezultati ispitivanja | probni šipovi (delimično) | probni šipovi (potpuno) | probni šipovi (indirektno) | probni šipovi (indirektno) |
| mogućnost revizije projekta konstrukcije na osnovu ispitivanja šipova | delimično | delimično | potpuno | potpuno |
| definisani plan ispitivanja šipova | ne | ne | delimično | potpuno |
| nivo pouzdanosti rešenja projektovanih–ispitanih–izgrađenih šipova | niži | srednji | viši | veoma visok |
| faktori sigurnosti šipova: finalne vrednosti u odnosu na rešenje iz geotehničkog elaborata | diskutabilno | relativno pouzdaniji | pouzdaniji | potpuno pouzdani |
| vreme pripreme, projektovanja i izgradnje objekta | najkraće | prolongirano (probni šipovi) | prolongirano (probni šipovi) | prolongirano (probni šipovi uz mogućnost revizije projekta) |
| aktivnost – ispitivanje šipova u kontekstu upravljanja projektom objekta | nejasno definisano | definisano (nepotpuno) | definisano (potpunije) | definisano (potpuno) |
| implementiran sistem upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova | ne | ne | delimično | u potpunosti |
| mogućnost oštećenja radnih šipova prilikom ispitivanja nosivosti | visoka | umerena | niska | veoma niska |
| primena | dominantno za objekte sa koncentrisanom dispozicijom šipovima | dominantno za objekte sa koncentrisanom dispozicijom šipovima | gotovo za sve tipove objekata – konstrukcija | za sve tipove objekata – konstrukcija |

Tabela 1. Komparativna analiza četiri predložena modela upravljanja kvalitetom ispitivanja šipova

Zahvalnost

Ovaj rad je deo istraživanja u okviru projekta 451-03-47/2023-02/200012 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Srbije.

4. REFERENCE

- [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] ASTM D1143, *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2013.
- [4] ASTM D4945, *Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2017.
- [5] ASTM D3689, *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2013.
- [6] ASTM D3966, *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Lateral Load*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2013.
- [7] 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.
- [8] Ćosić 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.

- [9] Ćosić M., Šušić N., Prica M., Đoković K.: *Proc. for Correction of Bearing Capacity of Piles Examined by the DLT According to the SLT*, Str. Integrity and Life, Vol. 23, Special issue, 2023, pp. 53-68.
- [10] EN 1997-1:2004, *Geotech. Design – Part 1: General Rules*, Eur. Comm. for Stand., Brussels, 2004.
- [11] EN 1997-2:2004, *Geotechnical Design – Part 2: Ground Investigation and Testing*, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, 2004.
- [12] EN ISO 22477-1, *Geotechnical Investigation and Testing – Testing of Geotechnical Str. – Part 1: Testing of Piles: Static Compression Load Testing*, European Committee for Stand., Brussels, 2018.
- [13] EN ISO 22477-4, *Geotechnical Investigation and Testing – Testing of Geotechnical Str. – Part 4: Testing of Piles: Dynamic Load Testing*, European Committee for Stand., Brussels, 2018.
- [14] *Zakon o planiranju i izgradnji objekata*, Službeni glasnik, Republika Srbija, 2023.