

AKTUELNE METODE ISPITIVANJA MOSTOVSKIH KONSTRUKCIJA – dio 2

Asis. mr Jovo POPOVIĆ, dipl. inž. građ.¹
V. prof. dr Nebojša ĐURANOVIĆ, dipl. inž. građ.



3.2.3. Ispitivanje na konstrukcijama od prethodno napregnutog betona

Prethodno napregnuti mostovi mogu biti jako oštećeni, čak i kada se na njima naizgled ne mogu uočiti značajni spoljni znakovi degradacije. Iz tog razloga vizuelni pregled površine mora biti detaljniji i još pažljivije sproveden nego za ostale tipove betonskih konstrukcija.

Sa tačke gledišta trajnosti materijala, korozija i njene posljedice na eksploatacioni život prethodno napregnute mostovske konstrukcije mogu imati veoma negativne posledice. O efektima i ispitivanju korozije armature, koju je, kako smo prethodno vidjeli, moguće i relativno lako otkriti, ovdje nećemo više govoriti. Međutim, obično dublje ugrađeni kablovi za prethodno naprezanje i njihove zaštitne cijevi, često, u cilju pregleda i kontrole, iziskuju direktni vizuelni pristup - korišćenjem destruktivnih ili parcijalno destruktivnih metoda.

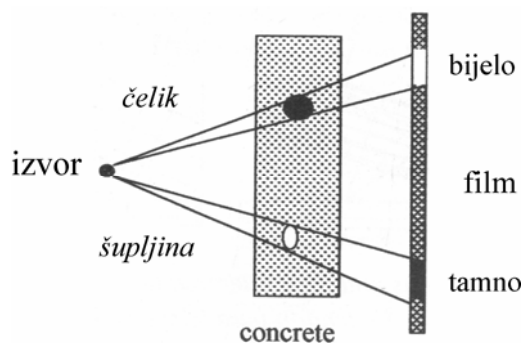
Kod takvih ispitivanja, uobičajeno je da se proučavanjem dostupnih crteža, tehničkih specifikacija i dokumentacije, definišu lokacije najosetljivijih djelova konstrukcije - mjesta gdje eventualni napad hlorida može izazvati najteže posledice. Takva mjesta su obično kotve, sa svojim različitim pozicijama i konfiguracijama, mjesta između pojedinih segmenata kablova (kotve za nastavljjanje), tačke na konstrukciji gdje je bilo propusta pri izvođenju, najniže i/ili najviše tačke duž profila zaštitnih cijevi, tačke koje su suviše blizu gornje ploče mosta i u kojima je moguće da budu u dodiru sa vodom, i tome slično.

Za periodičnu kontrolu ovakvih mostova i bolju identifikaciju eventualnih problema uobičajene nedestruktivne metode koje se primjenjuju su: radiografija, radioskopija, eventualno metoda magnetnog fluksa i druge jednostavnije, ali i manje efikasne metode (kao što su, recimo, one prethodno već opisane - koje služe dominantno za otkrivanje nedostataka čelika: metoda eho udara, metoda penetrirajućeg radara i t. sl.).

A. Radiografija i radioskopija

Osnovni princip radiografije ogleda se u sljedećem: ako snop γ ili x zraka pogađa jednu stranu posmatranog betonskog elementa prethodno napregnute mostovske konstrukcije - pri tome prolazeći kroz njega, izlazna radiaciona energija će, na osjetljivoj (fotografskoj) ploči postavljenoj sa suprotne strane ispitivanog elementa (sl. 14) pokazati različite nivoe slabljenja (zasjenčenja), zavisno od prepreka na koje nailazi.

¹Adresa oba autora: Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, Cetinjski put bb, 81.000 Podgorica



Slika 14. Princip radiografije: gušći element, svjetlija slika

Čelik, armatura i slično, gušći su od betona, pa će zbog toga ostavljati svjetlije tragove od samog betona – više će sprečavati prodor zraka. Pri tome treba voditi računa da će se zasjenčenja otiska javiti i usljed eventualnih šupljina i oštećenja u ispitivanom elementu.

Ova tehnika je ranije uglavnom primjenjivana u oblasti čeličnih konstrukcija - prvenstveno za provjeru kvaliteta varova, ali se danas veoma uspješno primjenjuje i za prethodno napregnute mostovske konstrukcije.

Gamaradiografija za potreba prozračivanja koristi radioaktivne izotope, iridijum (^{192}Ir) ili kobalt (^{60}Co). Efikasno se upotrebljava za prethodno napregnute betonske elemente debljine do 0.5m. Njenom primjenom mogu se detektovati:

- nepravilna pozicija kablova, cijevi i šipki meke armature,
- slomljene ili otpuštene žice ili užad,
- šupljine u cijevima nastale usljed slabog zapunjavanja injekcionom smjesom (što vodi povećanju opasnosti od korozije kablova),
- neispravne zaštitne cijevi kablova,
- kvalitet betonske veze sa kablovima,
- razni diskontinuiteti u betonu, kao što su šupljine, defektni konstrukcioni spojevi, ili čak i promjena gustine ugrađenog betona - kao indikator slabijih mehaničkih karakteristika.

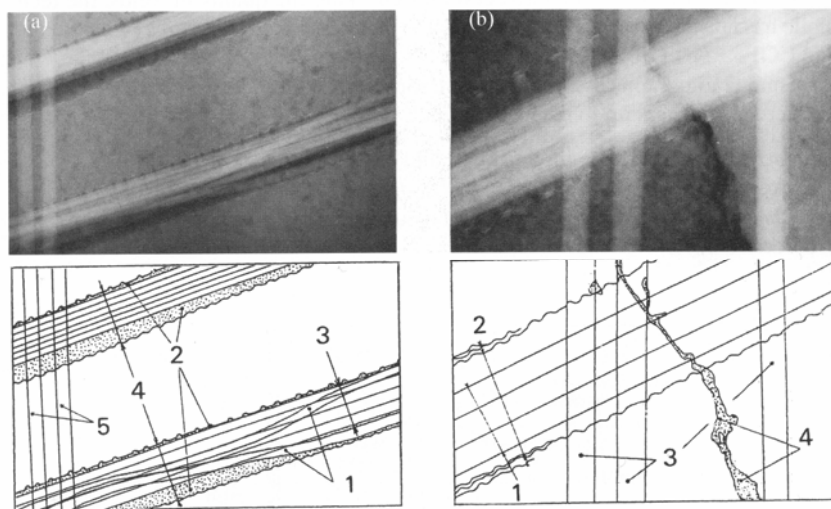
Najnoviji razvoj opreme za primjenu radiografije dopušta nam i kontinualni pregled elementa duž čitave dužine kablova, sa promjenljivim uglovima u 3 pravca - za lakšu interpretaciju rezultata, pa čak i *real-time* zapis slika na videorekorderima [7].

S druge strane, radiografija ne može direktno detektovati koroziju čelika - ali može njene značajnije posljedice: ozbiljnije redukovanje površine poprečnog presjeka profila ili eventualne lomove kablova.

Međutim, ovaj metod isitivanja mostovskih konstrukcija ima i nekoliko ozbiljnih ograničenja:

- Upotreba radioaktivnih izvora (izotopa) podrazumijeva upotrebu striktnih pravila zaštite, ne samo za osoblje koje radi sa njima, već i za sve ljude prisutne u okolini. Tokom sprovođenja ispitivanja, ulazak unutar zone od 20-100 metara u radijusu od izvora radijacije - zavisno od tipa opreme i uslova upotrebe – obično je strogo zabranjen,
- Otežan pristup objema stranama elementa konstrukcije može uticati na kvalitet rezultata,
- Određene konfiguracije i raspored kablova ponekad komplikuju interpretaciju radiografa, posebno kod nagomilanih ili horizontalno paralelnih kablova.
- Radiografija je relativno skupa.

Naprednija verzija radioskopije, upotrebljava **X-zrake** generisane linearnim akceleratorom postavljenim na pokretnoj platformi. Visoka energija X-zraka dobijena iz linearnog akceleratora omogućava ispitivanje debljih betonskih, prethodno napregnutih elemenata mosta, i to sa većom sigurnošću po učesnike u procesu ispitivanja. Njen glavne prednosti su odsustvo kontaminacije ili radioaktivnog hazarda, kraće vrijeme ekspozicije, prodiranje zraka čak do 1.2 m debljine betonskog elementa i dobijanje slika obično veoma visokog kvaliteta, slika 15.



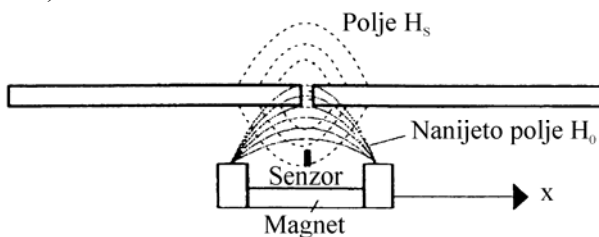
Slika 15. Dva radiografa i interpretacija njihovih rezultata: (LIJEVO): 1- prekinute ili oštećene žice; 2- nepostojanje injekcione smješe; 3 - paralelne žice u kablovima; 4 - zaštitna cijev kablova; 5 - armaturne šipke. (DESNO) 1 - cijev; 2 - kablovi; 3 - armaturne šipke; 4 – nastavak betoniranja [8]

Radiografija i radioskopija ostaju, za sada, najbolje nedestruktivne metode ispitivanja za prethodno napregnute mostove, ali i konstrukcije uopšte.

B. Metod difuznog magnetnog polja

Najnoviji značajni napredak u oblasti analize signala omogućava nam kvalitetniju upotrebu ove metode – prvenstveno za detekciju pukotina na kablovima za prethodno naprezanje mostovske konstrukcije.

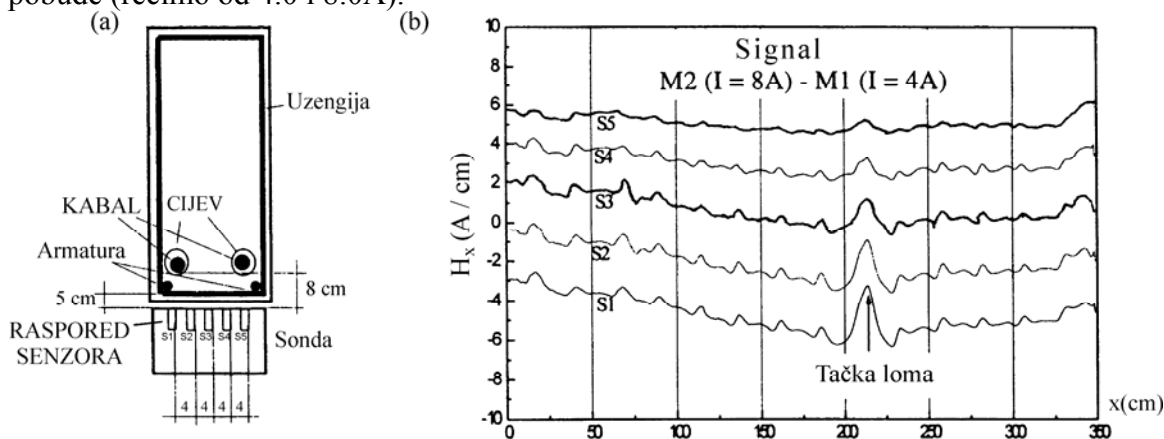
Postupak ispitivanja se sprovodi tako što je ispitivani, prethodno napregnuti betonski element izloži magnetnom polju H_0 - cijelom svojom dužinom. Defekti, kao što su eventualno pucanje kabla ili redukcija njegovog poprečnog presjeka, lokalno narušavaju distribuciju magnetnog fluksa i kreiraju korespondentno, difuzno magnetno polje H_s . Ono se detektuje pokretnom sondom koja se kreće na podužnoj šini, paralelno ispitivanom mostovskom elementu (sl. 16).



Slika 16. Princip difuznog magnetnog polja [9]

Detekcija defekata na kablovima je bazirana na poređenju oblika signala sa različitim H_0 vrijednostima. Kroz kvantitativnu analizu, uzimajući u obzir razlike ovih signala dobijenih za različite vrijednosti H_0 , uočava se da povećanje postojeće pukotine na kablovima daje povećanje magnetnog polja, što je i prikazano na slici 17. Pri sprovođenju analize ove vrste treba eliminisati maskirajući efekat - koji može biti posledica, recimo, postojanja profila meke armature, koji se mogu nalaziti blizu površine ispitivanog elementa.

Slika 17.a prikazuje tipični poprečni presjek prethodno napregnutog elementa (sa postavljenom opremom i instrumentima za ispitivanje) koji se može ispitivati ovom metodom (obično u segmentima dužine od oko 350 cm). Slika 17.b predstavlja primjere profila detektovanog signala, za dva nezavisna mjerenja, dobijenih različitim jačinama strujne pobude (recimo od 4.0 i 8.0A).



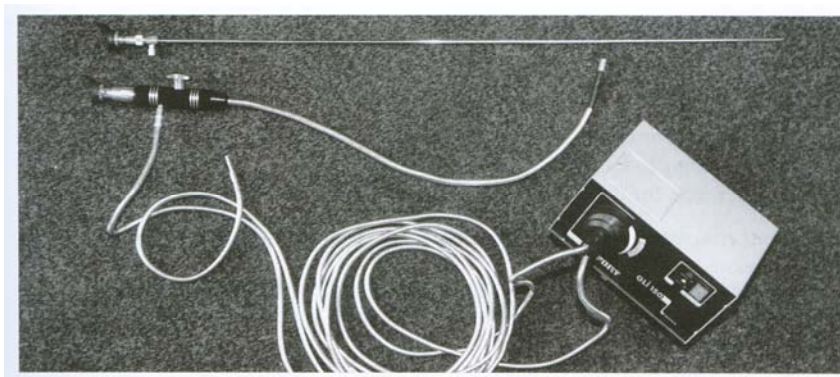
Slika 17. (a) Poprečni presjek prednapregnutog elementa, (b) Tipični signal difuznog magnetnog polja za jedan prekinuti kabal [4]

Profil detektovanog signala za magnetno polje S_1 pokazuje oblik na kome se jasno uočava lokacija pika signala - mjesto diskontinuiteta neke od žica kabl. Postepeno smanjenje pomenutog pika na krivima prema magnetnom polju S_5 pokazuje da je drugi ispitivani kabl neoštećen.

C. Direktni vizuelni pregled kablova

Noviji postupci pregleda kablova predhodno napregnute mostovske konstrukcije obuhvataju kontrolu njihovog stanja korišćenjem skenera i monitora za pregled slike. Pri tome kablovi i armature mogu biti kontrolisani selektivnim pristupom, na različitim dubinama. Ove metode ispitivanja po svojoj prirodi su destruktivne ili poludestruktivne.

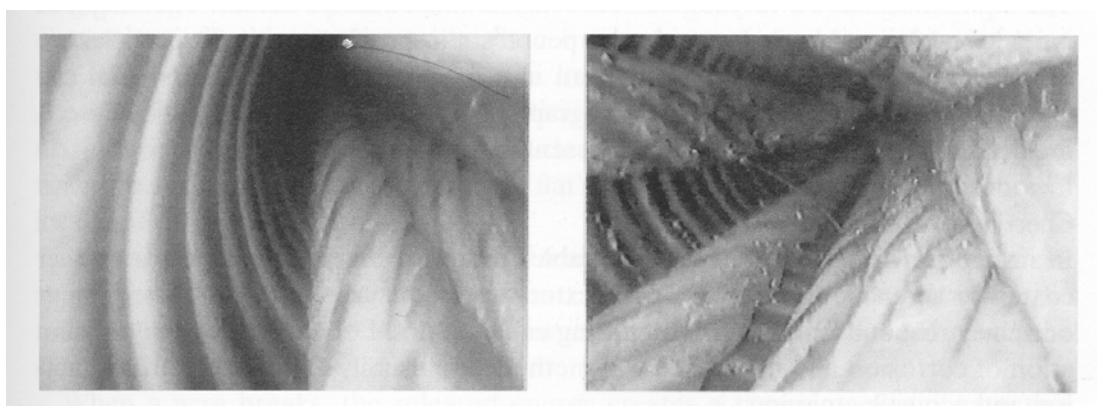
Unutrašnji vizuelni pregled se primjenjuje obično u nekoliko tačaka, pažljivo odbranih još u fazi prethodne analize konstrukcije, tj. na osnovu rezultata dobijenih nedestruktivnim metodama. To su uglavnom mjesta gdje su otkrivene šupljine u zaštitnim cijevima kablova, mjesta defekata druge vrste, ili uopšte mjesta za koja se sumnja da će se u njima naići na defekte – kada metoda postaje selektivno destruktivna.



Slika 18. Fleksibilni videoskop i kruti endoskop za unutrašnji pregled [11]

Pregled je moguć ukoliko nam dimenzije šupljine dopuštaju da ispitna sonda - fleksibilni optički videoskop (sl.18) u nju uđe i po njoj se nesmetano kreće. Kada na samoj konstrukciji mosta ne postoji pogodan otvor za potrebe ovakvog ispitivanja, potrebno je formirati posebnu bušotinu (otvor), obično oko 25mm u prečniku, koja je najčešće dovoljna za pristup potrebnom opremom za ispitivanje. Kasnije, ako je potrebno, otvor se može eventualno i proširiti. Kroz takvu, postojeću ili izbušenu rupu tokom eksperimenta se ubacuje sonda. Na taj način se ispituju kablovi, zaštitne cijevi i injekciona smješa, sve u potrazi za korozijom čelika, oštećenjima, prekinutim žicama ili defektima u samim injekcionim smješama (sl. 19). Jasno je da je upotrebom ovakvih instrumenata s lakoćom moguće otkriti i lokacije koje uopšte nisu zapunjene injekcionom smješom.

Iako se upotrebljavaju i za pregled unutrašnjih zaštitnih cijevi, kruti optički endoskopi više se preporučuju za spoljašnje kablove, i to za pregled spojnih tačaka, kao i oslonačkih ležišnih sistema.



Slika 19. Pregled kablova za prednaprezanje u dvije nezapunjene čelične cijevi: jedan potpuno ispravan (lijevi) i drugi lagano korodiran (desni) [11]

Formiranje ovakvih otvora na konstruktivnim elementima mosta kasnije može efikasno poslužiti i za uzimanje uzoraka za potrebna ispitivanja ugrađenih materijala. Takvi postupci sprovode se tek poslije kompletno obavljenog ostalog ispitivanja *in situ*, na neoštećenom materijalu.

Obično za kasnije analize su korisni uzorci koji se uzimaju iz :

- injekcione smješu – recimo za ispitivanje sadržaja hlorida,
- zarobljene (nevezane) vode - takođe za određivanje prisustva hlorida, korozivnih jona, pH nivoa i tome slično,

- čelika – recimo za utvrđivanje efekata eventualne korozije čelika,
- prekinutih žica – recimo za dijagnostiku i određivanje povredljivosti od korozije ili trenutnog stanja mehaničko-deformacijskih karakteristika kabla.

Poslije izvršenog pregleda, svi ovako formirani otvori moraju biti u potpunosti zatvoreni.

3.2.4 Ispitivanje na konstrukcijama od čelika

Na mostovima koji su dominantno napravljeni od čelika, ispitivanja se uglavnom obavljaju na uzorcima uzetim iz same konstrukcije. Laboratorijski testovi, koji se kasnije sprovode na tako obezbijeđenim uzorcima, su veoma korisni za određivanje stanja materijala glavnih konstruktivnih elemenata. Smatra se da je ovaj pristup ispitivanju, kad god su metalni mostovi u pitanju, imperativan [10].

Ispitivanje mehaničkih karakteristika, posebno čvrstoće materijala posebno je značajno na starim mostovskim konstrukcijama. S druge strane, dobro obrađene i od korozije zaštićene površine, kod in-situ ispitivanja ne omogućavaju baš jednostavno određivanje (pa ni procjenu), kako kvaliteta ugrađenog metala tako ni stvarne debljine nosećeg elementa. Kao napomena, problem određivanja debljine konstruktivnih elemenata najjednostavnije se rješava primjenom ultrazvučnih metoda.

A. Prethodna provjera čeličnih elemenata i varenih spojeva

Za otkrivanje pukotina ili drugih diskontinuiteta u zavarenim spojevima mostovskih konstrukcija, u principu upotrebljava se nekoliko popularnih tehnika. Takve su pregled penetracionim bojama, ispitivanje magnetnim česticama, radiografija i ultrazvučna eho metoda.

Pregled penetracionim bojama je najjednostavniji i nejefikasniji - posebno efikasan za potrebe preliminarne analize. On se obavlja primjenom posebnog tečnog premaza koji ima mogućnost prodora u eventualne diskontinuitete. Ovakvi premazi moraju imati veoma malu čvrstoću na zatezanje i karakterističnu markirnu boju, tako da jasno i pregledno označavaju mjesto eventualnih defekata na konstrukciji.

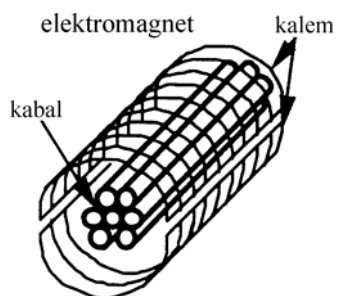
Ispitivanje magnetnim česticama je metod veoma sličan prethodnom: magnetne čestice se raspršuju po površini ispitivanog elementa i njihov raspored u magnetnom polju odslikava materijalne diskontinuitete ispitivanog konstruktivnog elementa mostovske konstrukcije.

Upotreba radiografije i ultrazvučne eho metode za detekciju defekata su metode koje su slične sa već opisanim postupcima vezanim za ispitivanje betona, a u literaturi iz ove oblasti obije su detaljno dokumentovane, pa o njima ovom prilikom neće biti više riječi.

B. Provjera postojanja korozije u spoljnim kablovima

U visećim ili *cable-stayed* mostovima, kablovi se obično obmotani koncentričnim slojevima žice, koje prekrivaju kabl, ili su nanizani na sami kabl. Dok spoljne žice kablova mogu biti jednostavno pregledane, unutrašnje, koje je zato teže pregledati, mogu, zbog rđanja ili pucanja, eventualno prouzrokovati i lom kabla.

Za precizniju ocjenu korozije i njenih efekata kod ovakvih mostovskih konstrukcija danas se najčešće upotrebljavaju dvije metode: metode primjene fenomena elektromagnetizma i metoda akustične emisije.



Slika 20. Grafički prikaz elektromagnetne metode [6]

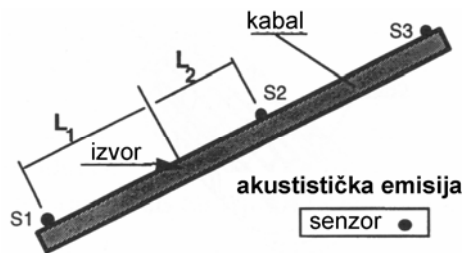
Metoda elektro-magnetnog pregleda efikasno se koristi za pregled kablova koje čini jedno uže (engleski: *single-stayed*). Za procjenu korozije i njenog efekta na redukciju površine poprečnog presjeka u tu svrhu koristi se oprema prikazana na slici 20. Nju čine dva polu-cilindrična kalema postavljena oko ispitivanog kabla i međusobno povezana u kontinualni kalem. Tokom ispitivanja kroz njih se pušta jednosmjerna struja, učestanosti od oko 10 kHz. Rezultujuće promjenjivo magnetno polje stvara vrtložnu struju u kablju, sa korespondentnom samoindukcijom struje, suprotnom od one u samom kalemu. Izmjerena samoindukovana struja intenziteta L , zavisi od stepena korozije kabla koji se ispituje. Veći nivo prisustva korozije stvara veću vrijednost električnog otpora između žica i shodno, tome, dopušta manji intezitet struje, tako da izaziva porast samoindukcije - a samim tim i mjenjenog otpora u kalemu.

Primijenjeno u praksi, aktivni kalem se pokreće duž cijelog ispitivanog kabla mostovske konstrukcije, i pri tome se mjere varijacije registrovanog otpora. U cilju što bolje procjene dostignutog nivoa korodiranosti ispitivanog elementa mosta preporučljivo je prethodno izvršiti laboratorijski test inteziteta promjene. U tom cilju, za svaku ispitivanu konfiguraciju (tip i vrstu kabla) uspostavlja se veza (kalibracijom) između koeficijenta oksidacije i varijacije (promjene) električnog otpora izraženo u procentima - pri tome kao referentnu vrijednost uzimajući vrijednosti dobijene sa potpuno ispravnog, neoštećenog, kabla, istog tipa i vrste kao onaj koji se ispituje na samom mostu.

Kad se govori o primjeni ovog fenomena u cilju ispitivanja mostovskih konstrukcija valja napomenuti da su sprovedeni i pokušaji da se elektromagnetizam upotrijebi i za detektovanje lokalnih defekata, posebno pucanja žica u kablovima. Jedna od isprobanih procedura zasniva se na pojavi lokalnog magnetizma u kablju, koji je posledica prolaska jednosmjerne struje (učestanosti reda veličine 100Hz) kroz kalema, pri čemu se kao mjera kvaliteta detektuje promjena fluksa, koja je posledica postojanja lokalnih defekata. Pik na tako registrovanom dijagramu može ukazivati na diskontinuitet, ali i na geometrijske nepravilnosti, ili eventualno jaku oksidaciju. Iz tog razloga je, za otkrivanje loma žica, potrebno imati veoma jasno izražen pik. Ravan dijagram (bez pikova) potvrđuje potpuno odsustvo lokalnih defekata u ispitivanom kablju predmetnog mosta.

Druga metoda kontrole kablova mostovske konstrukcije zasnovana je na korišćenju efekata **akustične emisije**.

Jasno je da u korodiranom zategnutom kablju mosta žice mogu pući spontano, u proizvoljnom trenutku vremena. U trenutku loma, oslobođena energija stvara kratkotrajni elastični talas (akustičnu emisiju) koji se prostire kroz kabal sa nepoznatom amplitudom, ali i sa praktično konstantnom brzinom (oko 4.700m/s). Pomoću nekoliko prethodno postavljenih senzora S_i ($i = 1, 2, \dots$), postavljenih duž kabla, moguće je odrediti tačno vrijeme dolaska t_{Si} elastičnog talasa koji praktično neometano putuje do svakog od njih. Koristeći podatke o ostvarenim vremenima dolaska signala određuje se tačan položaj tačke prekida - koja je ustvari izvor putujućeg talasa. Pri tome se uzima da je referentno vrijeme - "nula" - trenutak kada proizvedeni talas stiže u senzor koji je najbliži izvoru.



Slika 21. Princip primjene metode akustične emisije [6]

Na slici 21, koja daje šematski prikaz načina primjene ove metode, prikazane su pozicije senzora S_i , kojima odgovaraju dolazna vremena signala, t_{Si} . Rastojanje $S_2 - S_3$ i razlika dolaznog vremena $t_{S3} - t_{S2}$ određuju brzinu prostiranja talasa v . Jasno je da je pristizanje talasa prvo registrovano u sensorima S_1 i S_2 kao i da se položaj izvora akustične emisije (mjesto oštećenja kabla) - koji se nalazi na rastojanjima L_1 i L_2 od S_1 i S_2 - može jednostavno odrediti na osnovu poznatih brzina i vremena prispjeća talasa do posmatranih senzora.

Senzori su obično akcelerometrijski, i postavljaju se na svakih 15-ak m dužine kabla koji se kontroliše. Oni mogu biti postavljeni i na samoj površini betona prethodno napregnutih mostova, ako je tako pogodnije. Tada se postavljaju na rastojanju do oko 5 m od posmatranih kablova.

4. NEKE AKTUELNE METODE ZA ISPITIVANJE GLOBALNOG STANJA KONSTRUKCIJA

Metoda ispitivanja globalnog stanja konstrukcije se obično bira na osnovu njene usklađenosti sa statičkim sistemom posmatranog tipa konstrukcije, ugrađenih materijala i pretpostavljenog tipa oštećenja ili nedostataka [15].

Većina od uobičajnih metoda ispitivanja globalnog stanja konstrukcije u tom pravcu angažuju klasične pristupe, primjenom deflektometrije i inklinometrije, tj. metode moment-krivina. One prvenstveno služe za mjerenje (definisanje) deformacionih linija konstrukcije mosta pod opterećenjem. Sve ove metode su uveliko poznate i u literaturi detaljno objašnjene.

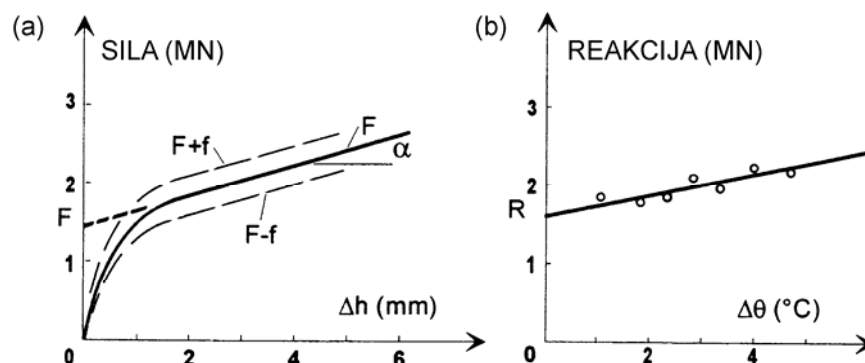
Iz tog razloga, u ovom radu će biti prikazano nekoliko drugih, specifičnih, a danas aktuelnih metoda - posebno onih koje se odnose na mjerenje inteziteta sila koje djeluju na most i na određivanje dinamičkih karakteristika mosta.

4.1. Mjerenje sila koje djeluju na most

Reakcije oslonaca i sile u kablovima kod visećih ili *cable-stayed* mostova dobijaju se iz jednačina ravnoteže konstrukcije mosta. Sile, koje djeluju na svaki od ovih konstruktivnih elemenata imaju svoju specifičnu metodologiju mjerenja.

4.1.1 Mjerenje reakcije oslonaca

U mostovskim konstrukcijama dominiraju statički sistemi koji se mogu okarakterisati kao statički neodređeni. Kod takvih objekata veoma je značajno periodično mjerenje reakcije oslonaca, kako radi određivanja sila tokom izgradnje tako i za određivanje distribucije nanijetih sila tokom eksploatacionog trajanja konstrukcije.



slika.22.(a) Dijagram sila-pomjeranje, koji daje preliminarne vrijednosti oslončkih reakcija, (b) Konačne vrijednosti, dobijene poslije korekcije za temperaturni gradijent [7]

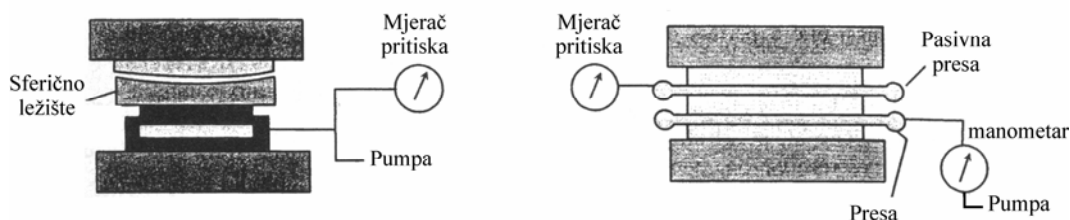
Jedna od aktuelnih metoda koje se koriste u ispitivanju mostovskih konstrukcija u cilju rješavanja ovog zahtjeva je i procedura mjerenja koja se sastoji se od umetanja potrebnog broja presa na mjestima samih oslonaca – u cilju odizanje gornje konstrukcije mosta. Kod ovakvih ispitivanja dijagram sila-pomjeranje potrebno je definisati za cijeli ciklus podizanje-spuštanje konstrukcije, slika 22.a. Rezultati se dobijaju u dvije faze. Prvi dio grafika prikazuje oslobađanje mostovske konstrukcije od njenih stvarnih oslonaca. Drugi dio, koji je obično prava linija, prikazuje ugibe mosta izmjerene od uticaja ostvarenog savijanja. Kao što je poznato nagib ove linije na dijagramu sila - pomjeranje predstavlja mjeru krutosti mosta na savijanje.

Kod ovakvih ispitivanja praktikuju se uporedna mjerenja veličina reakcija oslonaca, ali i posljedica termičkih uticaja koji mogu pratiti sprovedeno ispitivanje. Mjerenja se obično sprovode najmanje u periodu 24 sata od otpočinjanja odizanja oslonaca. Na slici 22.b prikazano je kako obično izgledaju dobijene reakcije, korigovane uticajima temperature.

Treba obratiti pažnju da temperaturno korigovanje reakcija treba sprovesti kad god je to opravdano - recimo kod analize uticaja od stalnog opterećenja, različitih slijeganja oslonaca, preraspodjele napona u konstrukciji, dalje, za potrebe određivanja tečenja pri prednaprezanju ili diferencijalnog tečenje, kao i u ostalim specifičnim situacijama, uključujući i analizu posljedica mogućih defekata konstrukcije.

U tom smislu, postupci mjerenja oslončkih reakcija mogu se upotrebljavati i kod otkrivanje nepravilne distribucije stalnog opterećenja, za potrebe analize uočenih defekte, i što je najznačajnije, za potvrdu pretpostavki i sprovedene analize u okviru izrade projekta konstrukcije.

Slika 23. šematski prikazuje dvije, od nekoliko trenutno aktuelnih garnitura koje se koriste za odizanje mosta, i to ravnu klipnu presu i dvostruku ravnu presu. I jednu i drugu moguće je instalirati još tokom izgradnje objekta - zajedno sa ležištima mosta, kako bi kasnije bilo omogućeno odizanje mosta, tj. mjerenje reakcija oslonaca.



Slika 23. Ravna klipna presa (lijevo) i dvostruka ravna presa (desno) za mjerenje oslonačkih reakcija [7]

4.1.2. Mjerenje sila u spoljnim kablovima

Kao što je poznato, tokom izgradnje visećih mostova, kao i ostalih betonskih konstrukcija kod kojih se koristi spoljne prednaprezanje (kablovi van presjeka), neophodno je da se sile u pojedinim kablovima međusobno uravnoteže, kako bi se (za nivo projektovanog stalnog opterećenja) postigla potrebna uravnoteženost napona za cio sistem, tj. vrši se preraspodjela sila u kablovima. Vremenom, iz mnoštva različitih razloga, ova dostignuta početna ravnomjernost uticaja može biti poremećena. Zbog toga je neophodna periodična provjera nivoa sila u kablovima mosta - kako bi se tražena ravnomjernost ponovo uspostavila, tj. izvršila korekcija sila unijetih u kablove. Teoretski, sile zatezanja u kablovima mogle bi se mjeriti i korišćenjem opreme i presa koje su korišćene za njihovo inicijalno unošenje. Međutim, obično to nije slučaj.

Bolja alternativa je korišćenje **vibracionog metoda** određivanja sila u kablovima mosta – brzog i efikasnog postupka sa širokim područjem mogućih aplikacija. Kod primjene ove metode kabal se posmatra kao vibrirajući konopac, dužine l i mase po jedinici dužine μ , gdje je frekvencija f povezana sa apliciranom silom zatezanja T , preko poznate relacije:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

gdje je $n = 1, 2, 3...$ konkretni red harmonika (ton oscilovanja).

Mjerenjem osnovne frekvencije i viših harmonika oscilovanja kabla direktno dolazimo do tražene sile. Ovakav analički pristup i zamjenjujući model može se smatrati tačnim jedino kada je krutost na savijanje ispitivanog kabla mosta zanemarljiva - što uglavnom i jeste slučaj.

U praksi, greška koja se ostvaruje je oko zanemarljivih 0.5% od izmjerene veličine sile, posebno ako je potvrđena linearna veza između niza uzastopnih harmonika n i odgovarajuće mjerene frekvencije f . Predhodno pomenuti zahtjev kontroliše se primjenom testa ostvarene linearnosti, koji je obavezno sprovesti za svaki kabl koji se ispituje. Ako se uzme da se dodatnih 0.5% greške kod ispitivanja ostvaruje zbog grešaka na samim mjernim instrumentima, to se smatra da, na ovaj način određenu frekvenciji oscilovanja kabla mosta, treba eventualno korigovati za oko $\pm 1\%$.

Oprema kojom se sprovode ovakva mjerenja u principu sadrži akcelerometar sa pratećom elektronikom, kao i analizator podataka - koji odmah daje vrijednosti traženog niza uzastopnih frekvencija. Prilikom upotrebe, akcelerometar se obično stavlja na sam vrh kabla. Neophodna transverzalna pomjeranja, tj. oscilacije kabla, se indukuju ili iznenadnim zatezanjem i otpuštanjem zategnutog kabla, ili laganim udaranjem savitljivim čekićem po samom kablju mosta. U oba slučaja indukovanje oscilacija se sprovodi u sredini raspona kabla, kako bi se generisao oblik tona koji što je moguće više sliči osnovnoj frekvenciji

oscilovanja. Da bi se redukovale eventualne greške, fiksne tačke (čvorovi oscilovanja) na efektivnoj dužini kabla l moraju takođe biti opremljene sa akcelometrima – u cilju provjere postojanja eventualnih oscilacije i u samim čvorovima. Mjerenje sile u kablovima na ovaj način u praksi se sprovodi veoma brzo i traje svega nekoliko minuta.

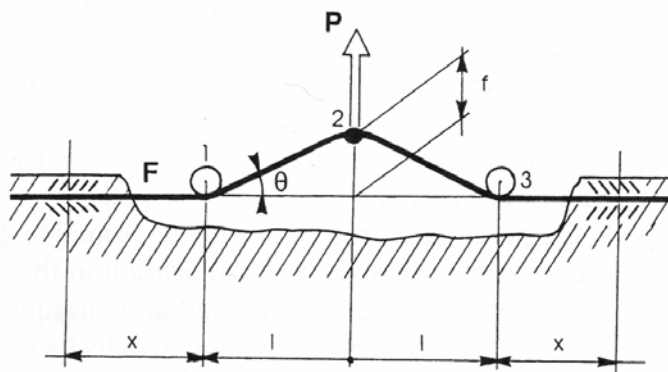
Ukupna greška koja se pravi pri određivanju sile zatezanja u kابلu ovom metodom, ne bi trebala da bude više od 5%.

4.1.3. Mjerenje sile u unutrašnjim, ugrađenim kablovima

Mjerenje sile u unutrašnjim kablovima donekle je zahtjevnije od onog koje se sprovodi za spoljašnje kablove. Danas su u principu aktuelna dva metoda za mjerenja sile u ugrađenim kablovima mosta.

Kod **metode ukrštenih lukova**, stvarna sila prethodnog naprezanja kabla mosta može biti dobijena tek neposrednim pristupom kablovima i direktnim djelovanjem na njih. Metoda je zasnovana na jednostavnoj činjenici da postoji direktna veza između sile koja je potreban da se dodatno savije (istegne) zategnuto uže i napona koji vlada u kابلu mosta prije nego mu je zadata ta dodatna sila.

Slika 24. šematski prikazuje proceduru koja se u tom cilju sprovodi - ali tek nakon pažljivog čišćenja okolnog betona, cijevi i ispune na mjestu sprovođenja samog ispitivanja.



Slika 24. Princip mjerenja sile u unutrašnjim kablovima za prednaprezanje

Dužina kabla koja ulazi u anlizu i ispitivanje na licu mjesta obično iznosi:

$$2(L + x) = 60\text{cm}$$

U cilju mjerenja trenutne sile u kابلu mosta vrši se pomjeranje f prednapregnute žice iz početnog položaja. Pri tome se potrebna sila P pažljivo aplicira i, kao i samo pomjeranje f , konstantno mjeri. Za potrebe ovakvog ispitivanja vrijednost ostvarenog pomjeranja f obično se ograničava na oko 4-5 mm.

Parazitski efekti trenja, krutosti na savijanje, prekoračenje propisanog nivoa zatezanja i slučajne greške kotvljenja kabla zahtijevaju prethodni kalibracioni test na reprezentativnom modelu, u laboratoriji - upotrebljavajući isti tip žica i istu dužinu kabla kao onaj koji se ispituje na stvarnoj konstrukciji mosta.

Nakon sprovođenja ovih laboratorijskih ispitivanja i baždarenja, sila prednaprezanja F u svakoj žici teoretski može biti dobijena direktno iz izraza:

$$P = 2(F + k)\left(\frac{f}{l}\right) + K\left(\frac{f}{L}\right)^3$$

gdje su k i K konstante koje se određuju zavisno od samih uslova ispitivanja, u prethodno pomenutim laboratoriskim testovima. Pri tome, neophodno je definisati cijelu familiju referentnih krivih $P = g(f)$ - za različite vrijednosti sile F .

Drugi način mjerenja sile na kablovima koji su ugrađeni u unutrašnjost konstrukcije je korišćenjem metode, u mašinstvu poznate kao metode za **određivanje zaostalih napona**.

U tom cilju vrši se malo inkrementalno bušenje prethodno napregnuite žica kabla mostovske konstrukcije koja se ispituje. Pri tome se formira otvor reda veličine oko 1,5mm - u prečniku, i po dubini. Kao što se vidi, metoda je djelimično destruktivna.

Oslobođene dilatacije na mjestu bušenja rupice, mjerene preko mjernih traka postavljenih sa obje strane otvora, predstavljaju u stvari dilatacije koje vladaju na mjestu bušenja. Te vrijednosti dilatacija nam u sledećem koraku, primjenom veza poznatih iz otpornosti materijala, daju vrijednost napona, a nakon toga i sila zatezanja koje vladaju u ispitivanom kablju mosta.

4.2. Neke aktuelne metode određivanja dinamičkih karakteristika mosta

4.2.1. Metoda ambijent vibracija

Ovom metodom određuje se odgovor konstrukcije mosta na vibracije izazvane prirodnim fenomenima kao što su vjetar, seizmički mikrotremori i tome slično.

Mostovska konstrukcija pobuđena vjetrom je pogođena širokim spektrom frekvencija, ali u svome odgovoru pojačava samo one koje odgovaraju njenim prirodnim frekvencijama. Pri analizi zapisa odgovora ovom metodom do izražaja dolaze matematičke metode teorije slučajnih vibracija i efikasna upotreba personalnih računara, koji mogu brzo i jednostavno sprovesti brzu Furijeovu analizu signala i neophodno osrednjavanje spektra odgovora konstrukcije [16].

Znači, korišćenjem ove metode svojstvene vrijednosti oscilovanja (tonove oscilovanja) dobijamo iz amplitudnog frekventnog spektra odgovora konstrukcije mosta na ambijentalnu pobudu. Vrhovi spektra odgovaraju ili sopstvenim frekvencijama mosta ili frekvenciji pobude. Razlučivanje između jednih i drugih se vrši na osnovu podataka odgovora dva akcelometra na različitim mjestima na konstrukciji mosta. Relativna razlika faza između ova dva zapisa za frekvencije konstrukcije je 0 ili 180 stepeni. Ostali vrhovi spektra odgovora kojima je faza van ove dvije vrijednosti ustvari pripadaju frekvencijama pobude. [17].

Izmjerene sopstvene vrijednosti su prigušene svojstvene vrijednosti. Za konstrukcije sa koeficijentom prigušenja $< 20\%$ razlika između neprigušenih i prigušenih sopstvenih vrijednost je manja od 2%. Jasno je da ukoliko se odgovor konstrukcije mjeri na više mjesta onda je moguće dobiti i svojstvene oblike vibracija.

4.2.2 Metoda tranzient pobude

Tranzient pobuda predstavlja kratku, impulsnu, pobudu obično prethodno definisanog, poznatog inteziteta.

Odgovor konstrukcije mosta na ovu pobudu je kratkotrajan, a u sebi sadrži dinamičke karakteristike konstruktivnog sistema, ali i druge komponente koja unosi sama vrsta i, posebno, frekvencija pobude. Pri upotrebi ove metode možemo razlikovati dvije mogućnosti pobuđivanja konstrukcije:

- sa poznatom pobudom, recimo sa udarnim čekićem - gdje je moguće snimiti funkciju pobude i odgovora sistema, pa dinamičke karakteristike sistema dobijamo upotrebom prenosne, transfer, funkcije [18].
- sa nepoznatom pobudom - mjerenjem recimo, odgovora konstrukcije pri prolasku vozila. U tom slučaju, vozila svojim prolaskom pobuđuju oscilacije konstrukcije mosta - koje su obično loše definisane, kratko traju i nijesu oscilacije u samo jednoj ravni. Sve ovo komplikuje odgovor konstrukcije mosta, pa se može zaključiti da je prvi postupak mnogo pouzdaniji. Jedina prava prednost ovog postupka je njegova upotrebljivost i mogućnost mjerenja uz neometanje saobraćaja na samom mostu. Za kvalitetniju upotrebu ove metode neophodno je definisati pogodan način uprosječivanja odgovora konstrukcije mosta, kako bi on postao nezavisan od inteziteta sile pobuđivanja - koju ne možemo dovoljno precizno utvrditi [19].

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu aktuelni metode ispitivanja materijala, koje se odnose kako na uzorke uzete iz konstrukcije mosta tako i na one koje su još ugrađene u objekat, su prikazane odvojeno. Može se zaključiti da podjednaku pažnju prilikom ispitivanja treba posvetiti kvalitetu i karakteristikama materijala od koga je napravljena ispitivana konstrukcija, kao i ukupnom odgovoru konstrukcije na opterećenje.

Opisane metode, u cilju njihove najefikasnije primjene, za primjenu na konkretnom objektu moraju biti izabrane prvenstveno oslanjanjem na prethodno iskustvo. Pri tome, jasno je da će mnoge od pomenutih metoda biti upotrijebljene na neopterećenim mostovima, jer se često defekti ne otkrivaju u fazi samog ispitivanja, već i mnogo ranije.

Samom ispitivanju objekta treba prići kritički, razmatrajući i doprinos ugrađenog materijala i globalnog odgovora na ukupno stanje ispitivane mostovske konstrukcije. Aktuelne metode, koje obuhvataju kako tradicionalne načine ispitivanja tako i moderne postupke zasnovane na primjenjivoj opremi, treba koristiti u mjeri koja zadovoljava potrebe samog ispitivanja, znajući da ponekad prevelika količina informacija dobijenih tokom ispitivanja može i da oteža identifikaciju problema.

Može se zaključiti da aktuelne metode ispitivanja mostova traže interdisciplinarni pristup građevinskog inženjera, koji mora biti opremljen i određenim znanjima iz oblasti koje tradicionalno ne pripadaju građevinskom konstrukterstvu, kao što su hemija, elektrotehnika, mašinstvo, primjena računara i tome slično.

Konstantan napredak ove oblasti zahtjeva permanentno, kritičko praćenje novih dostignuća, posebno onih koja dolaze iz visoko razvijenih zemalja - kao i njihovu adekvatnu primjenu u lokalnim uslovima.

6. LITERATURA

1. Abdunur C. Stress monitoring and re-adjustment in concrete structures. *1st European Conference on Smart Structures and Materials*, Glasgow, 1992.
2. Abdunur C. Direct access to stresses in concrete and masonry. *2nd International Conference on Bridge Management*, Guildford, 1993.
3. Abdunur C. Direct assessment and monitoring of stresses and mechanical properties of masonry arch bridges. *First International Arch Bridge Conference*, Bolton, 1995.

4. Abdunur C. Stress redistribution and structural reserves in prestressed concrete bridges. *3rd International Conference on Bridge Management*, Guildford, 1996.
5. ASTM. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM Designation C876-91. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Material, Philadelphia, PA, pp. 434-439, 1991.
6. Brevet P. Application et interpretation des mesures de potentiel d'electrode des aciers enrobes de beton. *Bulletin de liaison des LPC* no. 125, pp. 125-128, 1983.
7. Brevet P and Siegert D. Fretting fatigue of seven wire strands, axially loaded, in free bending fatigue tests. *International Organisation of Studies on Endurance of Wire Ropes*, Bulletin no. 71, pp. 23-48, 1996.
8. Calgaro JA. Chocs de bateaux contre les piles de ponts. *Annales des Ponts et Chaussees*, no. 59-60, 1991.
9. Calgaro JA and Lacroix R. *Maintenance et reparation des ponts*. Chapters 1, 2, 3 and 12. Presses Ponts et Chaussees, Paris, 1997.
10. Chabert A and Ambrosino R. Pesées des reactions d'appui. *Association Française des Ponts et Charpentes*, National Conference, theme no. 3, pp. 31-46, Paris, 1983.
11. Chatelain J, Godart B and Duchene JL. Detection, diagnosis and monitoring of cracked prestressed concrete bridges. *2nd NATO Workshop*, Baltimore, MD, 1990.
12. Nebojša Đuranović, Ispitivanje konstrukcija, Skripta I, GF Podgorica, 2002.
13. R. Vukotić, Ispitivanje konstrukcija, Naučna knjiga, 1990.
14. Nebojša Đuranović, predavanja na poslijediplomskim studijama na Građevinskom fakultetu u Podgorici, 1999/2000.
15. M.J.Ryall, G.A.R. Parke and J.E. Harding, Manual of bridge engineering, Thomas Telford, 2000.
16. Borislav D. Zakić, Vibracije kao sredstvo otkrivanja oštećenja kod dugotrajnog osmatranja betonskih mostova, SDGKJ, VIII kongres, Cavtat 1987
17. Stane Terčelj, Alan Sodnik, Ponašanje cestovnih mostova pod utjecajem dinamičkih opterećenja, SDGKJ, VIII kongres, Cavtat 1987
18. Jovan Marucić, Mjerenja dinamičkih naprezanja novog Savskog mosta u Beogradu. Naše Građevinarstvo, 1958.
19. Pero Vujović, Jovo Popović, Projekat ispitivanja mosta »Union bridge« u Podgorici, Građevinski fakultet, Podgorica, 2003.