

KONTINUIRANO MOTRENJE MOSTOVA

Mladen Šarić

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, student

Filip Kaluđer

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, student

Hrvoje Draganić

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, asistent

Sažetak: Mostovi su važne infrastrukturne građevine i zbog toga ih je potrebno održavati. Održavanje obuhvaća preglede i popravak uočenih oštećenja. U radu je dan pregled nekih od metoda za kontinuirano motrenje i primjeri njihove primjene na izgrađenim mostovima. Metode koriste: GPS (Global Positioning System; satelitski Sustav globalnog pozicioniranja), akcelerometre, optička vlakna, anemometre, tenzometre. Iako je postavljanje opreme za kontinuirano motrenje mostova isprva skuplje od uobičajenih metoda, ono omogućuje uvid u stanje mosta u bilo kojem trenutku te pravodobno reagiranje.

Ključne riječi: održavanje, kontinuirano motrenje, GPS, akcelerometri, optička vlakna

REAL-TIME BRIDGE MONITORING

Abstract: Bridges are important infrastructural objects and they must be maintained. Maintenance includes inspection and repair of identified damages. Paper gives a review of several methods for real-time monitoring. Methods use: GPS (Global Positioning System), accelerometers, optical fibers, anemometers, strain gages. Although the installation of equipment for real-time monitoring is initially more expensive than for conventional methods it enables an insight into a condition of the bridge in any given time and reaction in timely manner.

Key words: maintenance, real-time monitoring, GPS, accelerometers, optical fibers

1 Uvod

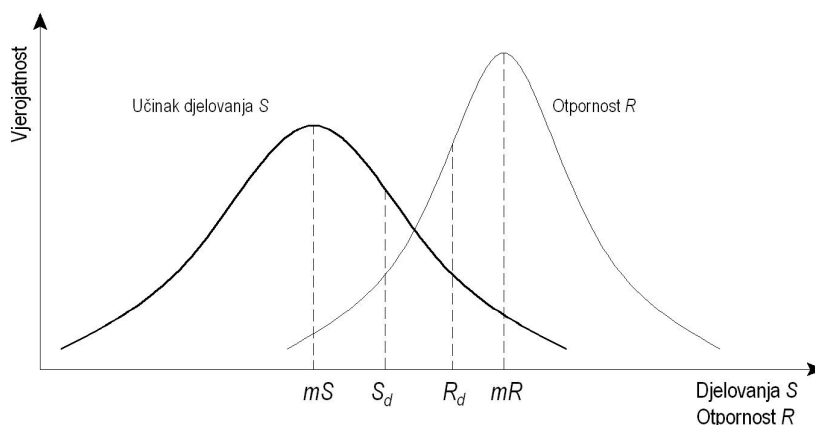
Mostovi su važne infrastrukturne građevine za svaku državu. Njihova uloga u cestovnom prometu je presudna. Zbog te uloge mostovi moraju biti sigurni za korištenje. Prema suvremenim principima, neophodno je osigurati da mostovi za određeni nivo pouzdanosti ispune određene zahtjeve. Osnovni zahtjevi koje most mora osigurati su: sigurnost, uporabljivost i trajnost. Konstrukcija se smatra sigurnom (zahtjev sigurnosti) ako je učinak djelovanja, pomnožen s faktorom sigurnosti, manji od otpornosti same konstrukcije, odnosno ako konstrukcija može prihvatiti sva djelovanja koja se mogu pojaviti (slika 1). Uvjet sigurnosti izražava se jednostavnom nejednakošću:

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

gdje je:

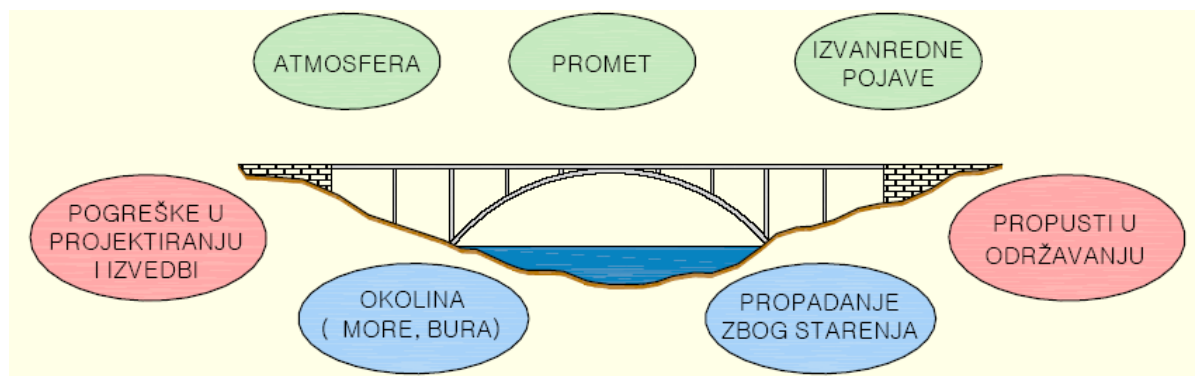
S_d – proračunska rezna sila od mjerodavne kombinacije djelovanja

R_d – proračunska otpornost najugroženijeg presjeka rasponskog sklopa.



Slika 1 – Odnos djelovanja i otpornosti

Uporabljivost mosta se očituje u zadržavanju ponašanja konstrukcije unutar granica koje bitno ne utječu na korištenje konstrukcije, odnosno deformacije i vibracije se zadržavaju unutar granica koje su definirane s obzirom na udobnost prometovanja i sigurnost konstrukcije. Trajnošću mostova zovemo njihovu sposobnost održavanja zahtijevane razine sigurnosti i uporabljivosti u predviđenom vijeku trajanja (tablica 1). Trajnost mosta ovisi o: ugrozivosti okoliša, zaštitnom sloju betona, hrđanju armature, širini pukotina, propadanju s vremenom, količini prometa, pravilnoj izvedbi zavera i spojeva, nepravilnostima u strukturi čelika, itd. (slika 2).

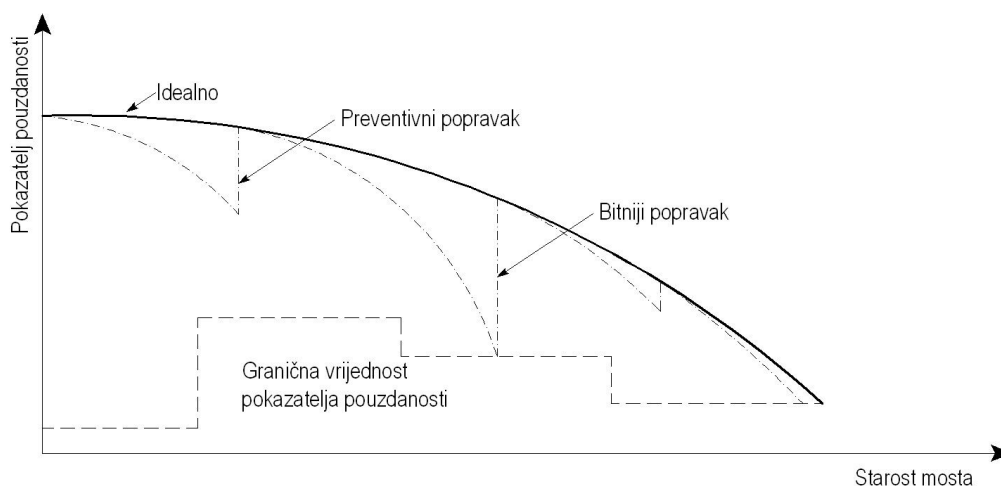


Slika 2 – Utjecaji na trajnost mosta

Tablica 1 – Zahtijevana trajnost prema vrsti mosta

VRSTA MOSTA	TRAJNOST (godine)
Pomoćni mostovi	5
Drveni mostovi na drvenim ležajevima	15
Drveni mostovi na kamenim ili betonskim ležajevima	30
Propusti od kamena, betona, armiranog betona	50
Čelični mostovi na kamenim ili betonskim ležajevima	70
Masivni mostovi	100

Da bi se ispunili zahtjevi trajnosti, potrebno je most održavati. Održavanje mostova obuhvaća preglede mostova i sanaciju uočenih oštećenja. Osobe koje su zadužene za gospodarenje mostom obavljaju preglede u točno određenim vremenskim intervalima i bilježe sva oštećenja te potrebne popravke (slika 3). Ponašanje mosta i djelovanja na most tijekom njegovog vijeka trajanja su daleko od predvidljivog i monotonog. Razvoj oštećenja na mostu i vijek trajanja mosta ovise o više događaja od kojih su neki i nepredvidljivi. Nepredvidljivi događaji koji se mogu javiti tijekom izgradnje i uporabe mosta često nisu uzeti u obzir tijekom projektiranja i dimenzioniranja mosta. Djelovanja na most često nisu istog tipa i intenziteta kao u proračunu. Uzevši u obzir sve ove nepoznanice koje nastaju tijekom projektiranja, izgradnje i uporabe mosta, inženjeri zaduženi za održavanje stavljeni su pred veliki izazov. Redovita i periodična ispitivanja mogu dati podatke o stanju mosta, ali ta ispitivanja često se rade nakon duljih vremenskih perioda. Stoga inženjeri raspolažu s limitiranim brojem i vrstom podataka. Instaliranjem odgovarajućih uređaja na most, moguće je kontinuirano pratiti stanje mosta u svakome trenutku i reagirati kada za to dođe potreba. Razvojem tehnologije, prvenstveno optičkih vlakana i GPS-a (Global Positioning System; Sustav globalnog pozicioniranja), omogućeno je praćenje stanja mosta svakodnevno, u svakome trenutku.



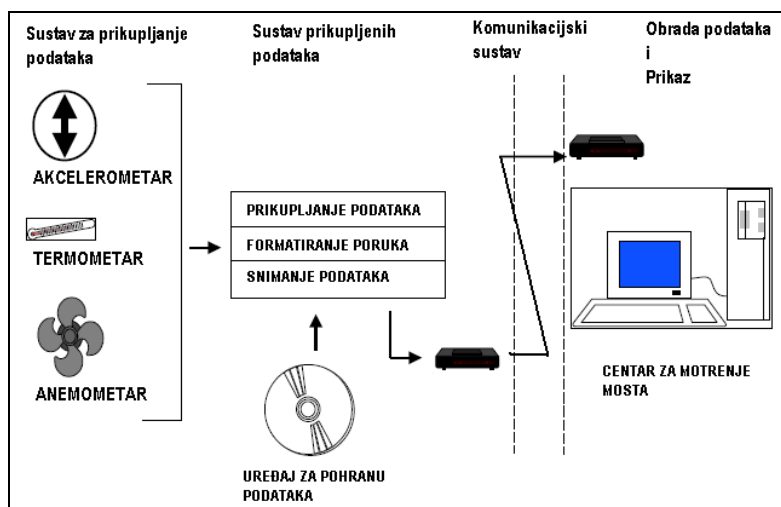
Slika 3 – Graf strategije uzdržavanja mosta

2 Općenito o kontinuiranom motrenju mostova

Razlozi za motrenje mostova su različiti, ali najčešći razlog je prikupljanje podataka na temelju kojih se utvrđuje ponaša li se most u skladu s pretpostavkama prema kojima je projektiran. Najčešće se kontinuirano motrenje koristi kod novih mostova, ali se sve više koristi i kod mostova koji su već dulje u upotrebi radi procjene stanja mosta i odlučivanja o popravcima dijelova mosta.

Motrenje se provodi uređajima koji su instalirani na mostu te kontinuirano mjere određene podatke. Ti podatci se dobivaju u analognom obliku pa ih je potrebno pretvoriti u digitalni kako bi ih osobe zadužene za

održavanje mosta mogle koristiti na računalima. Mjerni uređaj šalje podatke do prijarnika, prijarnik te podatke pretvara u digitalne signale i šalje do kontrolnog računala u centru za motrenje mosta (slika 4).



Slika 4 – Kontinuirano motrenje, prikupljanje i obrada podataka

Kontinuirano motrenje je metoda praćenja mostova kojom se cijelo vrijeme na mostu mjere utjecaji koji djeluju na most i posljedice koje oni uzrokuju. Za kontinuirano motrenje, bitni elementi koje mjerimo su pomaci tijekom dužeg vremena i ubrzanja, te brzine ili pomaci u kratkom vremenu. Pomake tijekom dužeg vremena najčešće uzrokuju slijeganje tla ispod temelja upornjaka i stupova, puzanje betona i preraspodjela naprezanja tijekom vremena. Kratkotrajna dinamička opterećenja koja djeluju na most uzrokovana su vjetrom, promjenom temperature, djelovanjem prometa, potresom, djelovanjem vode i sl. Za razliku od dugotrajnih opterećenja koja uzrokuju nepovratne deformacije, deformacije od kratkotrajnih opterećenja vratit će se u prvobitno stanje s prestankom opterećenja, osim ako pod ekstremnim opterećenjem nije došlo do trajnih oštećenja. Konvencionalni instrumenti i analize korištene u motrenju mostova ne mogu služiti kao prikladan alat za mjerenje te dvije vrste deformiranja konstrukcije istovremeno. Kao alternativa pojavio se GPS (satelitski Sustav globalnog pozicioniranja) koji se pokazao kao korisnije rješenje jer je mnogo precizniji i točniji. Kako bi se smanjile pogreške uzrokovane mjerenjem pomoću GPS-a, potrebno je na mostu ugraditi i druge neovisne sustave za mjerenje, kao na primjer akcelerometre i druge. Prednost kontinuiranog motrenja je u mogućnosti motrenja i mjerenja na mostu bez potrebe za zatvaranjem prometa, čime je to dugoročno isplativa metoda.

3 GPS metoda motrenja mostova

Razvojem tehnologije, prije svega satelita, omogućeno je korištenje GPS metode. Koristeći GPS moguće je kontinuirano pratiti geometriju mosta u svim vremenskim uvjetima. Može se direktno pratiti trodimenzionalno deformiranje pilona, rasponske konstrukcije i vješaljki. GPS uređaj može mjeriti s frekvencijom od 20 Hz, s odstupanjem od maksimalno 5 do 10 mm. Ti zahtjevi su sasvim dovoljni za velike mostove. Kako bi se smanjila pogreška u mjerenju (uzrokovana putanjom satelita i stanjem atmosfere), potrebno je postaviti antene prijarnika blizu mosta koji promatramo. Prva antena mora biti stabilna i na njoj se nalazi uređaj za prikupljanje podataka. U njezinoj blizini ne bi se smjeli nalaziti veći objekti koji bi mogli reflektirati signale. Druga antena GPS-a treba biti postavljena na samom mostu koji promatramo. Kako se često radi o ovješanim mostovima, antene se najčešće nalaze na sredini mosta, u četvrtinama mosta i na samome pilonu. Da bi mjerenje bilo uspješno, potrebno je istovremeno primiti signal s minimalno pet satelita u isto vrijeme (od ožujka 2008. orbitira 31 aktivan satelit). Sustav koristi mrežu referentnih točaka za točan proračun pozicije na tlu. Zapravo, princip rada GPS-a se temelji na triangulaciji lokacije koristeći radio signale satelita koji predstavljaju referentne točke.

Uređaj za skupljanje podataka šalje podatke računalu na kojemu se prikupljaju podatci o provedenim motrenjima mosta i taj prijenos se naziva „prijenosno stanje“. Pomoću GPS-a možemo dobiti podatke o horizontalnim i vertikalnim pomacima mosta. Frekvencije glavnih vibracija također je moguće odrediti spektralnom analizom pomoću Fourierovog transformacijskog algoritma (FFT).

Prednosti GPS sustava u odnosu na klasične metode motrenja:

- sustav je neovisan o vremenskim uvjetima koji mogu uzrokovati prekid prikupljanja podataka
- ima mogućnost mjerenja na velikim udaljenostima
- neograničena je udaljenost između stanice za mjerenje podataka i stanice koja prikuplja podatke
- kratko vrijeme kašnjenja signala i kontinuirano praćenje omogućuju sinkronizirano mjerenje.

3.1 Primjer korištenja GPS-a kod Tsing-ma mosta u Hong Kongu

Tsing-ma je sedmi najveći ovješeni most u svijetu, raspona 1377 m, širine 41 m, s kolnikom na dvije razine. Na gornjoj razini kolničke konstrukcije je cesta sa 6 trakova za cestovni promet, na donjoj razini je dvotračna željeznica i 2 traka ceste za cestovni promet. (slika 5).



Slika 5 – Most Tsing-ma, Hong Kong

Osnovni period vibracija mosta je 8 s (0,125 Hz). Uzorak frekvencije je oko 1 Hz kod mjerenja na djelovanje tajfuna, odnosno 4 Hz nakon prestanka djelovanja tajfuna. Preciznost mjerenja je 1 do 2 cm. Podatci se šalju u kontrolnu sobu bežičnim putem. Podatci uključuju:

- pomake u vremenu
- dijagrame vrijeme-pomak (t-x, t-y, t-z)
- dvodimenzionalnu sliku deformiranja
- rotaciju pilona
- zapise dinamičkih djelovanja
- spektralnu analizu signala.

3.1.1 Uređaji i softver

Korištena GPS stanica za motrenje:

- hardver: NOVATEL RT-12, 12 kanalni GPS prijamnik, preciznost 1 do 2 cm, frekvencije odašiljanja podataka 4 Hz, antena izbjegava multi-path efekt (slika 6).
- softver: razvijen od strane Tsinghua University.

Uređaj za mjerenje podataka:

- prenosi podatke bežičnim putem.

Sustav za motrenje i prikupljanje podataka:

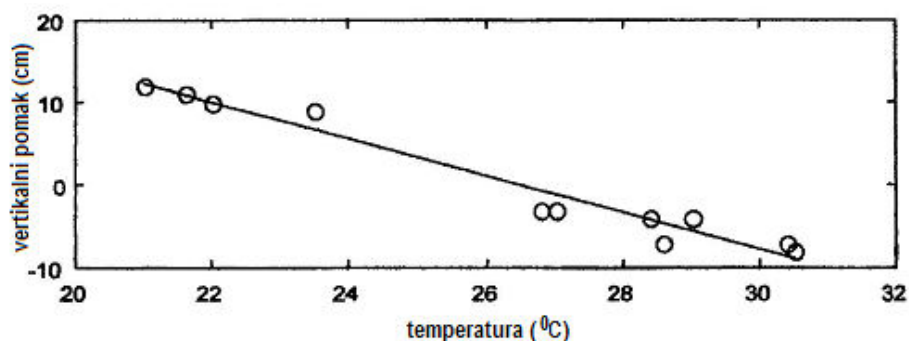
- četiri mikroročunala potrebna su za obradu podataka; sustav se sastoji od: baze podataka, softvera za pomake u vremenu, za analizu te kontrolu postupka.



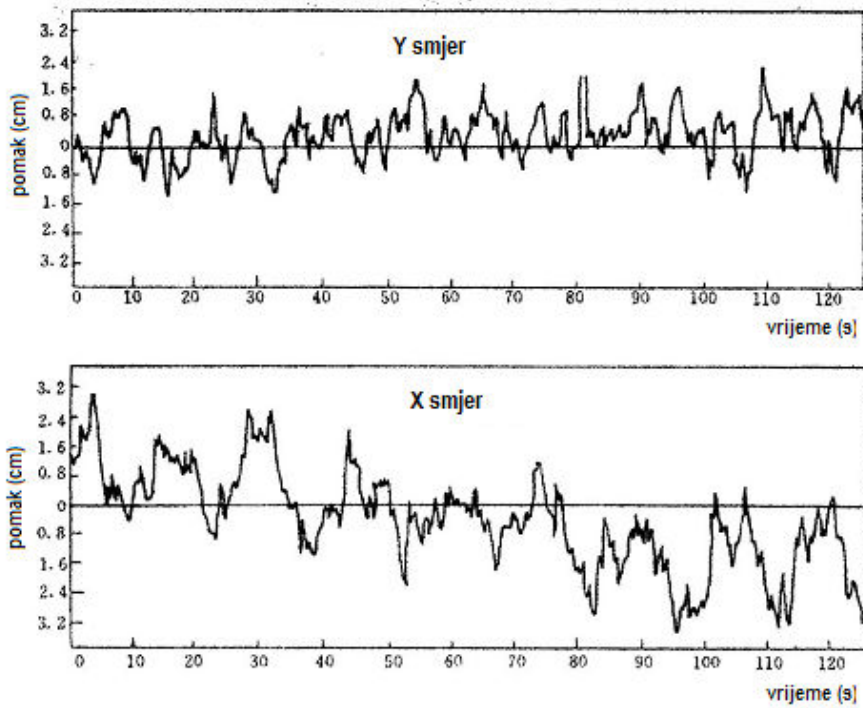
Slika 6 – GPS antena na vrhu pilona

Da bi korisniku omogućio potpuno razumijevanje i uvid u deformiranje mosta, dodan je u sustav motrenja mosta prikaz trodimenzionalnog pomaka u vremenu. Tehnički zahtjevi za prikaz trodimenzionalnog pomaka u vremenu:

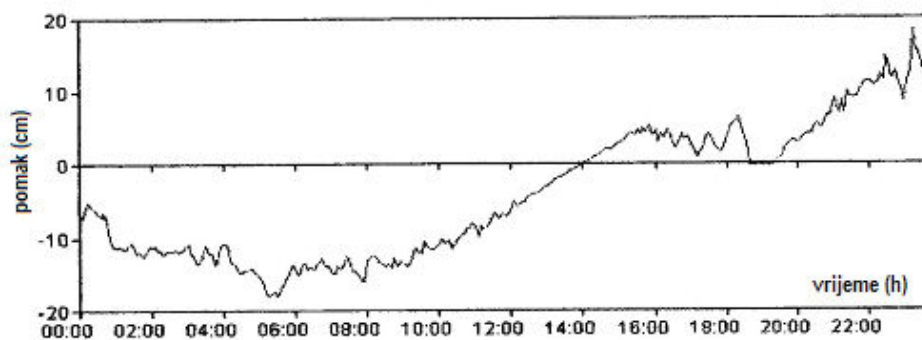
- sustav mora biti u mogućnosti komunicirati sa sustavom motrenja mosta
- sustav treba dijeliti podatke s drugim softverom korištenim na mostu
- sustav treba prikazati pomake cijeloga mosta
- sustav treba prikazati pomake u vremenu
- pomaci se moraju prikazati u 2D ili 3D, u različitim mjerilima, ovisno o željama korisnika
- sustav mora prikazivati krivulje vrijeme-pomak.



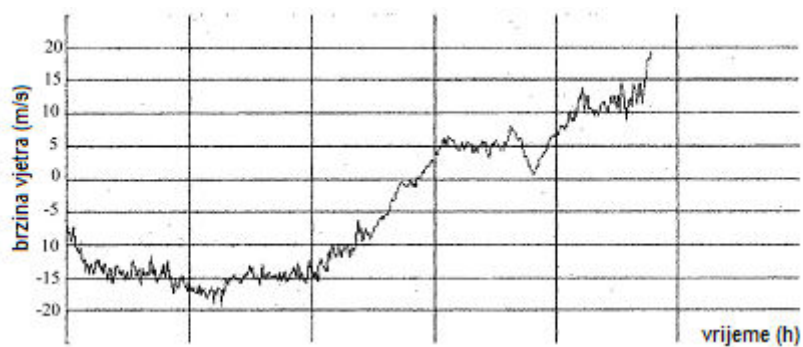
Slika 7 – Dijagram ovisnosti temperature i pomaka



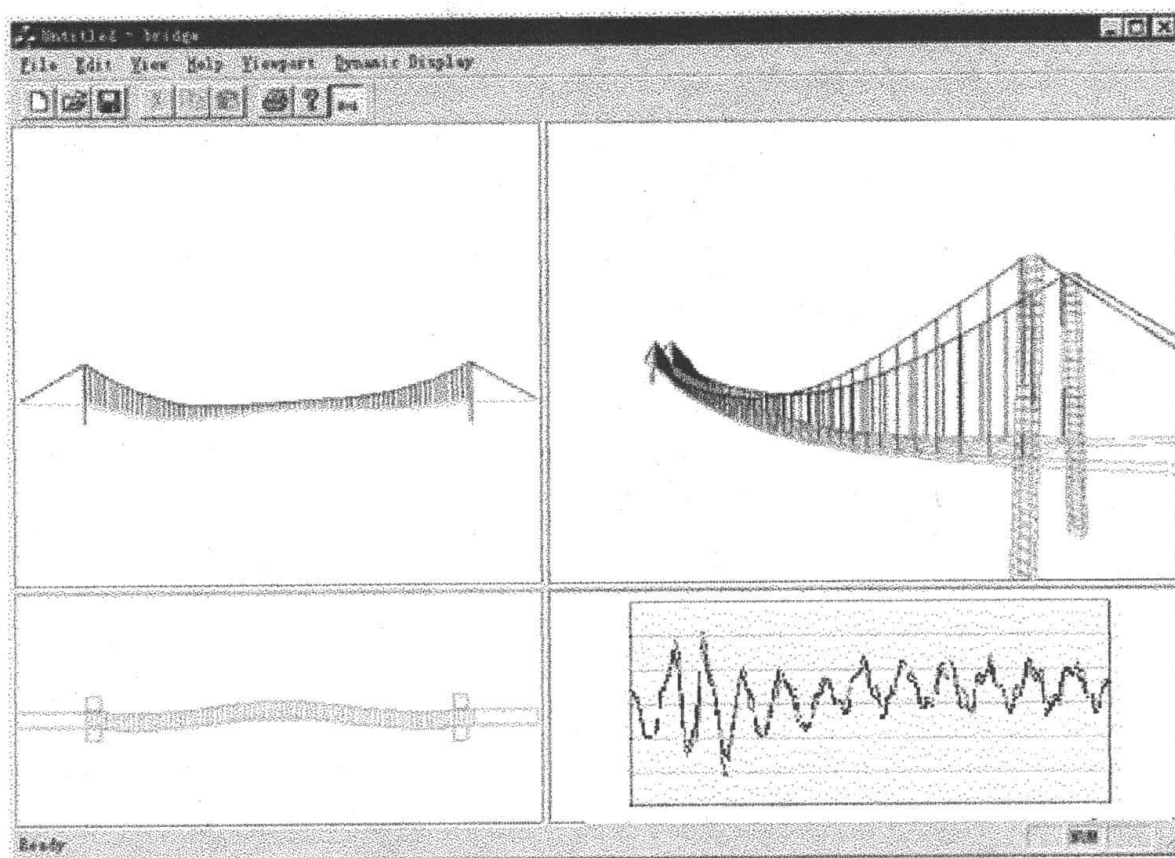
Slika 8 – Dijagram pomak-vrijeme



Slika 9 – Pomak mosta pod naletom tajfuna



Slika 10 – Dijagram brzine vjetra



Slika 11 – Izgled korisničkog sučelja na kontrolnom računalu

3.1.2 Usporedba troškova korištenja GPS-a i tradicionalnih metoda motrenja mostova

Usporedba dviju metoda prikazana je u tablici 2 i odnosi se na razdoblje od dvije godine. Iz tablice je vidljivo da su troškovi postavljanja opreme veliki, ali za postavljanje opreme nije bilo potrebno zaustaviti promet i oprema ne utječe na korištenje mosta. Na GPS ne utječu vremenski uvjeti kao što su magla, kiša, tajfuni i sl. Korištenje GPS-a ima dugoročnu korist za most.

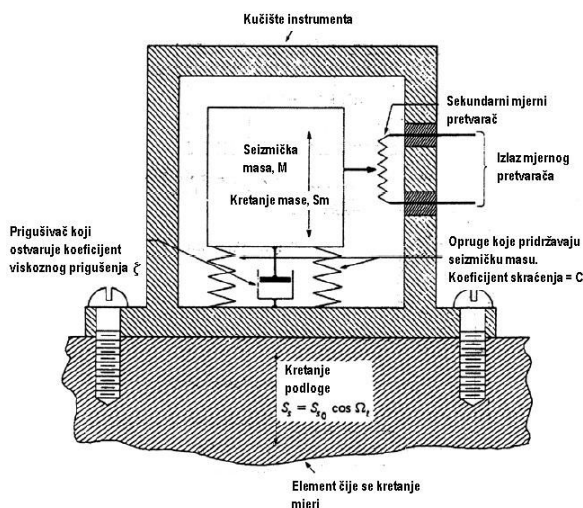
Tablica 2 – Usporedba cijena GPS metode i tradicionalnih metoda pregleda mostova [Kn]

	<i>GPS metoda</i>	<i>Tradicionalna metoda</i>
Oprema	1 672 000	190 000
Rad	15 200	45 600
Zaustavljanje prometa	0	3 040 000 (8 noćnih smjena)

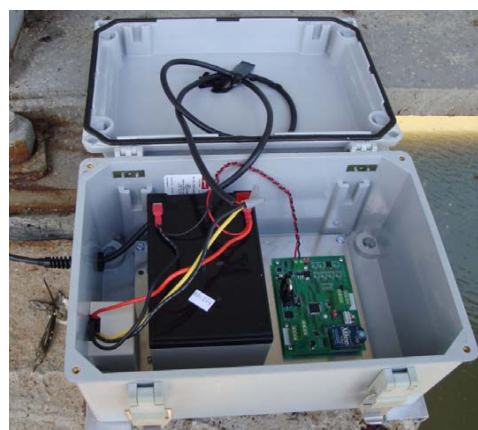
4 Korištenje akcelerometra za motrenje

Akcelerometar je uređaj koji mjeri ubrzanja konstrukcije ili njezinog elementa. Pričvršćuje se na most, najčešće na glavni nosač ili na vješaljke ako je most ovješeni. Može mjeriti ubrzanja u jednoj, dvije ili sve tri osi uzrokovana prometom, vjetrom, udarom ili potresom. Kod motrenja mostova najčešće se koristi troosni akcelerometar, upravo zbog sposobnosti mjerenja ubrzanja u sve tri osi. Princip rada akcelerometra je na pomaku mase utega koji se nalazi u samome uređaju (slika 12). Vibracije konstrukcije uzrokuju pomake utega unutar akcelerometra te se ubrzanja utega bilježe u vremenu. Iz dijagrama ubrzanje–vrijeme moguće je jednostrukom integracijom dobiti

dijagram brzina–vrijeme, a dvostrukom integracijom dijagram pomak–vrijeme. Naravno, taj posao obavlja računalo te kao rezultat daje pomake mosta i vrijednosti brzine pomaka mosta. Prednost akcelerometra je jednostavno postavljanje na mostu i jednostavna upotreba (slika 13). Glavni nedostatak akcelerometra su potrebe za velikom količinom energije da bi bilo moguće slati velike količine podataka kontrolnome računalu. Nedostatak energije se u nekim slučajevima nadoknađuje postavljanjem solarnog panela kraj kutije akcelerometra te se tako jeftino dobiva potrebna energija.



Slika 12 – Shema akcelerometra



Slika 13 – Akcelerometar u zaštitnoj kutiji, prijenos podataka bežičan

4.1 Primjer korištenja akceleroograma na New River Suir mostu u Irskoj

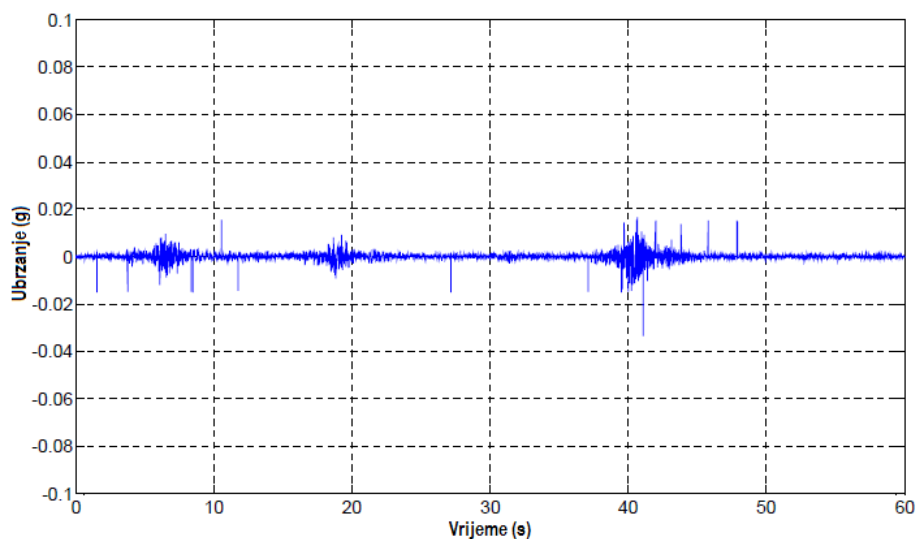
Nakon puštanja u promet, dinamičko ponašanje vješaljki na mostu New River Suir (slika 14) je bilo potrebno držati pod stalnim nadzorom (sličan slučaj sa mostom Rion-Antirion u Grčkoj). Na preporuku isporučitelja vješaljki, ustanovljeno je kako je praćenje dinamičkog ponašanja vješaljki najkorisniji faktor u točnoj procjeni stanja vješaljki. Na mostu je korišten troosni akcelerometar (slika 15) te su izvršena prva dva pokusna mjerenja da bi se dobile karakteristike vješaljki (vlastite frekvencije, prigušenje, i sl.). Time su dobiveni početni podatci prema kojima se uspoređuju podatci iz daljnjih mjerenja (slika 16).



Slika 14 – Most New River Suir, Irsko



Slika 15 – Akcelerometar pričvršćen za jednu vješaljku



Slika 16 – Dijagram ubrzanje-vrijeme

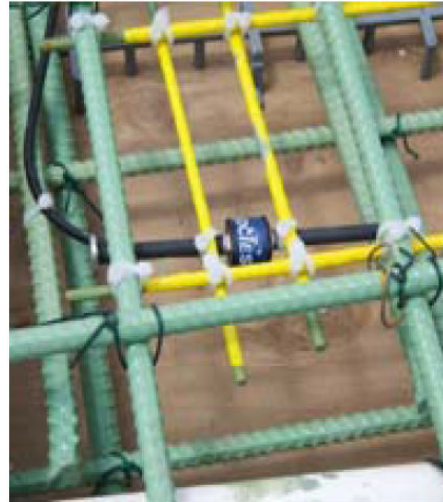
5 Ostale metode i uređaji za motrenje mostova

Razvojem optičkih žica i vlakana, razvila se i tehnologija mjernih uređaja zasnovana na optičkim vlaknima (slika 17 i 19). Uređaji su sve više u uporabi i razvijaju se iz dana u dan. Uređaji se dijele na one koji se trajno ugrađuju u most i vanjske. Uređaji koji se trajno ugrađuju u most najčešće se ugrađuju zbog mjerenja stanja armature, kakvoće betona, širine pukotina i sl. Uređaj za mjerenje se sastoji od para optičkih vlakana postavljenih na određeno mjesto na konstrukciji koja se motri. Jedno vlakno, tzv. mjerno vlakno, u kontaktu je sa samom konstrukcijom, dok je drugo, tzv. referentno vlakno, slobodno postavljeno u obližnju cijev. Deformiranje konstrukcije je tada rezultat razlike promjene duljine mjernog u odnosu na referentno vlakno. Pouzdanost funkcioniranja ugrađenih uređaja kreće se od 90% do 100%. Najčešće pogreške i kvarovi kod takvih uređaja

uzrokovani su ljudskim faktorom. Nedostatak takvih uređaja je što se ne mogu zamijeniti bez razaranja same konstrukcije na mjestu gdje se oni nalaze. Uređaji koji se nalaze na vanjskoj strani mosta kojeg motrimo najčešće se koriste uz akcelerometar, no mogu biti i samostalni u obliku optičkih traka koje mjere širine i razvoj pukotina. Kod njih je prednost što se mogu jednostavno zamijeniti kada se pokvare (slika 18 i 20).



Slika 17 – Optički senzorni kabeli



Slika 18 – Vibrožica



Slika 19 – Uređaj za prikupljanje podataka



Slika 20 – Temperaturni senzor i uređaj za prikupljanje podataka s vibrožice

Optički uređaji mjere:

- razvoj uzdužnih pukotina nekoliko dana nakon betoniranja
- deformacije tijekom pokusnog opterećenja i usporedba s predviđenim deformacijama
- temperaturne utjecaje na most
- prijanjanje između slojeva betona
- deformacije koje se javljaju zbog sezonskih promjena temperature
- ponašanje dijelova mosta nakon popravaka
- deformacije na mostu tijekom izgradnje
- pukotine i oštećenja armature
- dinamičke utjecaje na most
- pomake mosta zbog slijeganja temelja

- utjecaje izgradnje građevina u blizini mosta na sam most
- skraćanja/produljenja natega za prednapinjanje
- utjecaj prometnog opterećenja na most.



Slika 21 – Anemometar



Slika 22 - Automatsko brojilo prometa

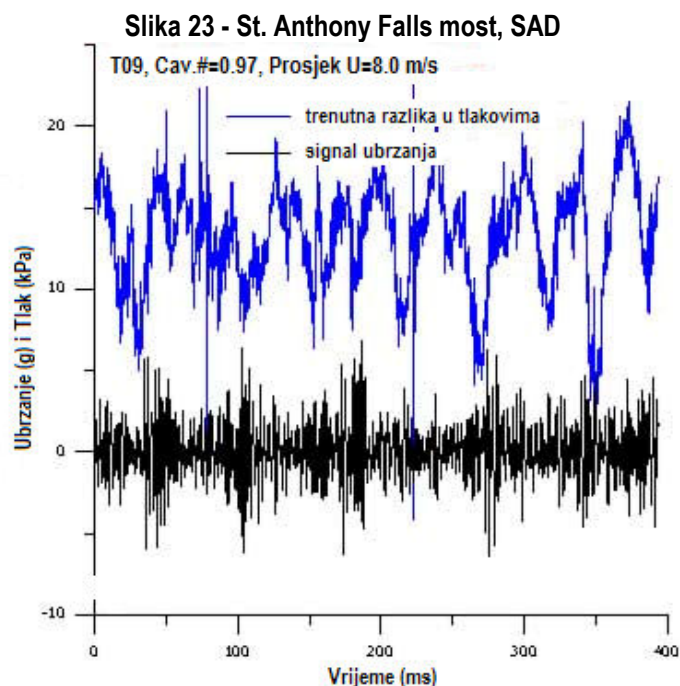
Za svaki od gore navedenih mjerenja postoji uređaj koji je zasnovan na tehnologiji optičkih vlakana. Iako nisu sva mjerenja u funkciji kontinuiranog motrenja, uređaji s optičkim vlaknima sve više ulaze u upotrebu za motrenje mostova. Osim navedenih, radi kontinuiranog motrenja mosta koriste se i sljedeći uređaji:

- klinometar, uređaj za mjerenje promjene nagiba pilona, stupova i rasponske konstrukcije mosta
- termometar, uređaj za mjerenje temperature
- piezometar, uređaj za mjerenje tlaka
- tenzometar, uređaj za mjerenje naprezanja
- anemometar, uređaj za mjerenje brzine i smjera vjetra (slika 21)
- automatsko brojilo prometa, uređaj za stalno prikupljanje podataka o prometu (slika 22).

5.1 Primjer korištenja optičkih vlakana na St. Anthony Falls mostu u SAD-u

Sustav motrenja mosta St. Anthony Falls (slika 23) sastoji se od niza senzornih uređaja koji mjere statičke i dinamičke parametre. Optičke trake mjere statička naprezanja, puzanje i skupljanje betona, dok linearni potencimetri mjere pomake na mjestu spojeva. Na međurasponima instalirani su akcelerometri koji mjere vibracije i modalne frekvencije uzrokovane prometom preko mosta (slika 24). Korozijski senzori postavljeni su oko armature i mjere otpornost armature na koroziju kao i trenutni stupanj korozije. SOFO (Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques, Motrenje konstrukcija optičkim vlaknima) optička vlakna mjere prosječna naprezanja, raspodjelu naprezanja duž glavnog nosača, deformirani oblik mosta, dinamička naprezanja, razvoj pukotina na glavnom nosaču i sl.





Slika 24 – Rezultati mjerenja akcelerometrom na St. Anthony Falls mostu

Ovaj projekt je jedan od prvih takvih uopće i objedinjuje više tehnologija za motrenje mostova. Jedna od značajki ovoga projekta je da se koristi jedan računalni sustav za podatke prikupljene sa svih uređaja.

6 Zaključak

Kontinuirano motrenje je novija metoda motrenja mostova. Primjenjuje se kod novoizgrađenih mostova, ali postoje i primjeri primjene kod saniranih mostova. Prednost metode je da se u svakome trenutku može znati stanje mosta i reagirati na vrijeme. Velika prednost očituje se pri pojavi oštećenja uzrokovanih izvanrednim opterećenjima kao što su potres, elementarne nepogode, teroristički napadi, kod kojih je tada moguće odmah uočiti i ocijeniti oštećenje te sukladno tomu djelovati. Razlika u odnosu na tradicionalne metode motrenja mostova je u korištenju uređaja koji su instalirani na most te su ujedno i oprema mosta.

Uređaji mogu biti ugrađeni u sam most ili montirani za most. Iako je u samome početku metoda skuplja od tradicionalnog pristupa motrenju mostova, dugoročno se višestruko isplati. Oprema koja se najčešće koristi je GPS sustav praćenja, kao i akcelerometri koji razvojem tehnologije optičkih vlakana i uređaja dobivaju sve važniju ulogu u motrenju mostova. Prednost metode je u neprekidnom praćenju i motrenju mosta pa nije potrebno zatvarati most za promet kako bi se izvršio pregled. Time se smanjuju troškovi koji nastaju zatvaranjem mosta i angažiranjem stručnjaka za pregled. Most se neprekidno motri iz centra za motrenje u kojemu se nalazi računalo koje prima podatke pa ljudi odgovorni za gospodarenje mostom reagiraju u skladu s tim podatcima.

Nesumnjivo je da će se ova metoda u budućnosti sve više primjenjivati i istisnuti tradicionalan pristup motrenju kod mostova koji se izdvajaju po velikim rasponima, nedovoljno poznatom ponašanju konstrukcijskog sustava te za vrlo fleksibilne konstrukcije. Jednako tako je nesumnjivo da će se razvojem tehnologije mjernih uređaja sama metoda poboljšavati i kao takva vjerojatno postati standard za motrenje mostova. Pioniri u ovoj metodi su razvijene države poput SAD-a, Japana, Kine te sve više druge države koje prepoznaju kako pravilno gospodarenje mostom produžuje njegov vijek trajanja i smanjuje troškove održavanja.

Literatura

- [1] Predavanja prof.dr.sc. Zvonimira Marića, Građevinski fakultet Osijek, Mostovi 2
- [2] Inaudi, D.; Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects, SMARTEC SA, Switzerland, IBC 09-45
- [3] Jianjing, J.; Xinzheng, L.; Jingjun, G.; 2002.: Study for Real-time Monitoring of Large-Span Bridge Using GPS, Proc. ISSST 2002 „Progress in Safety Science and Technology“, Beijing/New York: Science Press
- [4] Meng, X.; Real-time Deformation Monitoring of Bridges Using GPS/Accelerometers, Ph. D. Thesis, The University of Nottingham, May 2002
- [5] Meng, X., Roberts, G.W., Cosser, E., Dodson, A.H.; 2003.: Real-Time Bridge Deflection and Vibration Monitoring using an Integrated GPS/Accelerometer/Pseudolite System, Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece
- [6] Wang, Y., Gao, W.; A GPS Bridge 3D-Monitoring System, Implement on Donghai Bridge, pages 1–11, 2008.
- [7] Choo, T.M.; Attributes of Smart Bridge Monitoring Technologies, Master of Engineering Thesis, Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, June 2009.
- [8] Nigbor, R.L.; Instrumentation Systems for Dynamic Monitoring of Bridges, Workshop on Instrumental Systems for Diagnostics of Seismic Response of Bridges and Dams – New Operational Systems, October 2000.
- [9] Barnes, J.; Rizos, C.; Wang, J.; Meng, X.; Cosser, E.; Dodson, A.H.; Roberts, G.W.; 2003.: The Monitoring of Bridge Movements using GPS and Pseudolites, Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece
- [10] Leica Geosystems TruStory, Jingyin Bridge, China: Monitoring with GPS RTK technology
- [11] Radić, J.; Mandić, A.; Puž, G.; 2005. Konstruiranje mostova, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb
- [12] Vurpillot, S.; Inaudi, D.; Ducret, J.-M.; 1996.: Bridge Monitoring by Fiber Optic Deformation Sensors: Design, Emplacement and Results, SPIE, Smart Structures and Materials, San Diego, USA