

Primljen / Received: 5.4.2020.

Ispravljen / Corrected: 31.7.2020.

Prihvaćen / Accepted: 1.9.2020.

Dostupno online / Available online: 10.7.2021.

Pregled integriranog sustava za praćenje stanja ovješnog mosta i preliminarna analiza rezultata

Autor:

Izv.prof.dr.sc. **Chao Wang**, dipl.ing.grad.

Sveučilište tehničkih znanosti pokrajine Hubei, Wuhan, Kina

Fakultet građevinarstva, arhitekture i ekologije, cwang@hbut.edu.cn

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Chao Wang

Pregled integriranog sustava za praćenje stanja ovješnog mosta i preliminarna analiza rezultata

Most Junshan preko rijeke Jangce, izgrađen u kineskom gradu Wuhanu 2001. godine, po svojoj je konstrukciji čelični sandučasti ovješni most, a dužina glavnog raspona mu iznosi 460 m. Desetljeća korištenja dovela su do postupnog propadanja mosta, a zabilježena su i određena oštećenja. Danas se diljem svijeta velika pažnja posvećuje monitoringu stanja konstrukcija jer omogućuje praćenje oštećenja na konstrukciji, pomaže u održavanju i upravljanju, te omogućuje sigurno korištenje mosta. Kako bi se omogućilo praćenje stanja mosta, te pravodobno upozorilo na probleme vezane za sigurnost, na ovom je mostu ugrađen integrirani sustav praćenja stanja ove građevine. U radu se detaljno opisuje sustav praćenja koji se primjenjuje na Mostu Junshan preko rijeke Jangce. Postupak uglavnom uključuje odabir varijabli praćenja i raspoređivanje senzora na određenim točkama, primjenu sustava za prikupljanje i prijenos podataka, strategiju pohranjivanja podataka i upravljanja podacima, te sustav korisničkog sučelja. Analiziraju se sve vrste podataka prikupljene tijekom svakodnevnog korištenja, kao što su npr. opterećenje vozila, progib, pomak i napetost kabela. Također se analiziraju i podaci dobiveni praćenjem u ekstremnim uvjetima, prolaz preko mosta dva kamiona od 178 tona. Rezultati pokazuju da sustav praćenja dobro funkcionira te da se na nekim zavarenim spojevima mogu očekivati oštećenja uslijed zamora.

Ključne riječi:

praćenje stanja, ovješni most, otkrivanje oštećenja, održavanje mosta

Research Paper

Chao Wang

Overview of integrated health monitoring system installed on cable-stayed bridge and preliminary analysis of results

The Junshan Yangtze River Bridge, built in Wuhan, China in 2001, is a steel box girder cable-stayed bridge with a main span of 460m. Due to decades of service, the bridge suffered gradual degradation and some damage. Structural health monitoring has attracted worldwide attention due to its capacity of monitoring structural damage, assisting maintenance and management, and ensuring safe operation of bridges. To monitor the performance status of bridges and generate a timely safety alarm, an integrated health monitoring system has been designed and implemented on bridges. This paper provides a thorough account of the monitoring system used at the Junshan Yangtze River Bridge. It mainly focuses on the selection of monitoring variables and arrangement of sensor points, the data collection and transmission system, the data storage and management strategy, and the user interface system. All kinds of monitoring data collected under daily operation, such as vehicle load, deflection, displacement, and cable tension, are analysed. Monitoring data for an extreme condition, which involves two heavy trucks of 178 tons moving across the bridge, are also analysed. The results indicate that the monitoring system works well and that some local welded joints may experience fatigue damage.

Key words:

health monitoring, cable-stayed bridge, damage detection, bridge maintenance

1. Uvod

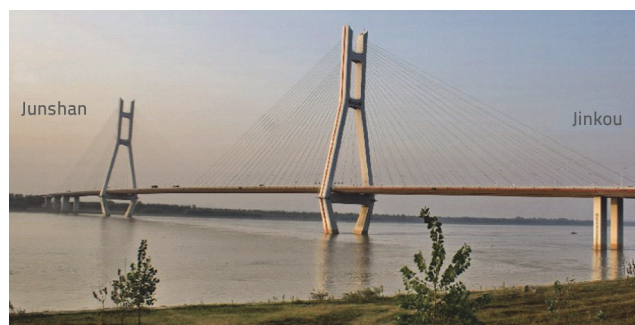
Zahvaljujući razvoju novih materijala i usavršavanju tehnologija projektiranja i građenja, danas se diljem svijeta grade brojni složeni mostovi velikog raspona. Iako razumno projektiranje i kvalitetno građenje uvelike povećavaju sigurnost građevine, nepovoljni faktori, kao što su npr. korozija zbog utjecaja okoline, starenje materijala i oštećenja uslijed zamora, štetno djeluju na most i mogu čak uzrokovati i njegovo rušenje. U nekoliko prethodnih desetljeća u svijetu su zabilježeni brojni slučajevi katastrofalnog rušenja mostova. Postupci koji se tradicionalno primjenjuju za pregled mostova imaju određene nedostatke, među kojima su pretjerano dugo trajanje i nepravodobnost postupka te privremeno obustavljanje prometa na mostu, što upućuje na potrebu definiranja sustava djelotvornog praćenja (monitoringa) koje će omogućiti identificiranje i otkrivanje mogućih oštećenja. Posljednjih se godina provode brojna istraživanja u području praćenja stanja konstrukcija (eng. *structural health monitoring* - SHM) [1-4]. Kako bi se osigurala sigurnost konstrukcije tijekom predviđenog trajanja građevina, sustavi SHM (SHMS) projektiraju se i ugrađuju na mnogim značajnim mostovima u SAD-u [5-7], Europi [8-12], Kanadi [13-14], Koreji [15-17] i Japanu [18-20]. U Kini se sustav SHMS koristi na brojnim mostovima velikog raspona [21-24]. U današnje se vrijeme uočava porast trenda primjene SHMS-a za praćenja uvjeta korištenja, otkrivanja oštećenja, procjene učinkovitosti i definiranja radnji održavanja [25-28]. Zato je pitanje načina na koji se trebaju projektirati sustavi SHMS, te analizirati podaci dobiveni praćenjem, postalo itekako značajno u istraživanjima koja se provode u području praćenja stanja konstrukcija.

U ovom se radu prikazuje projektiranje i primjena integriranog sustava SHMS na Mostu Junshan preko rijeke Jangce u Kini. Različiti izmjereni podaci pohranjuju se u SHMS i detaljno se analiziraju kako bi se ocijenila uporabivost građevine te predložile odgovarajuće mjere održavanja. U radu se također analizira i razmatra praćenje odziva konstrukcije u ekstremnim uvjetima. U završnom se dijelu daju odgovarajući zaključci.

2. Projektiranje i postavljanje SHMS-a

2.1. Opće postavke o projektiranju SHMS-a na Mostu Junshan

Most Junshan na rijeci Jangce, smješten u Wuhanu, glavnom gradu pokrajine Hubei u Kini, po izvedbi je poluplutajući kontinuirani ovješeni most s pet raspona (vidi sliku 1.). Most je dio autoceste koja prelazi rijeku Jangce i spaja gradove Jinkou i Junshan, a pritom uzvodna strana služi za prometovanje od Junshana do Jinkoua. Dužina raspona je 48 m + 204 m + 460 m + 204 m + 48 m. Glavni nosač je čelični sandučasti nosač visine 3,024 m i širine 38,3 m. Neto širina ploče koja nosi šest prometnih trakova je 33,5 m. Visina pilona od naglavnice pilota do vrha iznosi 163,5 m. Između nosača i pilona instalirana su ukupno 72 para kabela. Most je dovršen i pušten u promet 15. prosinca 2001. godine. Nekoliko fotografija građenja i komponenata ovog mosta prikazano je na slici 2. S obzirom na ekonomski razvoj, promet preko mosta vrlo je gust, a većinom je zastupljen kamionski promet. Zbog prometa vozila prevelike nosivosti, korozije zbog utjecaja okoline, starenja materijala i zamora, na mostu su tijekom periodičnih pregleda ustanovljena određena oštećenja, kao što je pojava pukotina u čeličnom sandučastom nosaču i na stijenci pilona, te lom nekih dijelova prigušivača na zategama. Iako su ta oštećenja sanirana, moguće je da će se opet pojaviti. Na Mostu Junshan projektirano je i postavljeno više od 300 senzora kako bi se omogućilo pravodobno utvrđivanje stanja te poduzimanje odgovarajućih mjera održavanja mosta.



Slika 1. Most Junshan preko rijeke Jangce u Wuhanu



Slika 2. Detalji Mosta Junshan preko rijeke Jangce u Wuhanu: a) podizanje čeličnog sandučastog nosača; b) zavareni detalj u čeličnom sandučastom nosaču; c) ploča mosta; d) kabel

Uspostavljanje monitoringa može se podijeliti na nekoliko etapa. Najprije se određuju parametri praćenja i raspored mjernih točaka na temelju analize konstrukcije pomoću metode konačnih elemenata, podataka o postojećim oštećenjima i zahtjeva u vezi s održavanjem. Zatim se biraju različite vrste senzora i uređaja koji se tada postavljaju na odabrane pozicije na mostu. Nakon toga se pomoću lokalnog sustava za prikupljanje podataka prikupljaju sve vrste signala, poput analognih, digitalnih i optičkih signala, nakon čega se pomoću optičke mreže ti signali prebacuju u središnju bazu podataka. Tada se razvija sustav baze podataka i metodologija pohranjivanja i upravljanja izmjerenim podacima. U konačnici se razvija sustav korisničkog sučelja kako bi upravitelj mogao jednostavno pratiti funkcioniranje mosta, te na temelju informacija o sigurnosti reagirati u hitnim slučajevima.

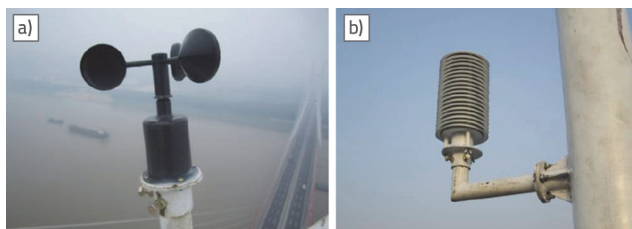
2.2. Raspored mjernih točaka

Praćeni su parametri koji se odnose na uvjete okoliša, opterećenje i odziv konstrukcije kako bi se udovoljilo zahtjevima u pogledu sigurnosti, uporabivosti, trajnosti i održavanja građevine. Raspored senzora određen je na temelju rezultata analize konačnih elemenata (FEA) i analize oštećenja i rizika provedenih na sličnim mostovima kao što je to npr. cestovni most Shandong Binzhou preko Žute rijeke [29].

Vjetar je značajan izvor pobude koji može uzrokovati velike deformacije i vibracije građevine. Prema projektnoj dokumentaciji, projektirana maksimalna brzina vjetra na lokaciji mosta iznosi 27,6 m/s, a to je brzina pri kojoj ovješeni mostovi poput Mosta Junshan postaju osjetljivi. S obzirom na velik raspon mjerenja (brzina vjetra: 0-70 m/s, smjer vjetra: 0-360 stupnjeva), povoljnu linearnost (0,1 %) te visoku razinu pouzdanosti i ekonomičnosti, na vrhove pilona postavljena su dva mehanička anemometra. Na osnovi mjerenja brzine i smjera vjetra dobivaju se kvalitetne informacije o opterećenju vjetrom. Vлага ne samo da dovodi do korozije i starenja materijala već i utječe na mjerne podatke koji se dobivaju s automatskog senzorskog sustava. Zbog toga su na vrhove pilona postavljena četiri higrometra, i to na središnjem dijelu ploče te u unutrašnjosti čeličnog sandučastog nosača. Na mostu su postavljeni digitalni higrometri LTM9901M proizvedeni u Kini, s rasponom mjerenja od 0 % do 100 % relativne vlage (RH), preciznosti ± 3 % RH i rezolucije 1 % RH.

Kako bi se pratila temperaturna polja, na građevini su ugrađena 132 termometra koja su smještena na različitim dijelovima pilona, duž rasponske konstrukcije, te na nekim zategama. Termistori i termopar termometri imaju prilično loše karakteristike u pogledu točnosti, interferencija i trajnosti, a nisu ni pogodni za distribuirani monitoring. Instalacija termometara na principu Braggove rešetke (FBG) nije jednostavna, a uz to dugoročno održavanje i zamjena tih uređaja poprilično je složeno. Zato su na ovom projektu odabrani u Kini proizvedeni digitalni termometri LTM8877 koji su izuzetno precizni, pouzdani, pogodni za distribuirano praćenje, a održavanje im

je jednostavno. Raspon mjerenja prilično je velik, tj. od -55 °C do 125 °C, preciznost mjerenja im iznosi $0,5$ °C, a rezolucija je $0,0625$ °C.



Slika 3. a) Anemometar; b) higrometar nakon postavljanja

Za praćenje prometnog opterećenja na mostu, na ploči mosta instaliran je sustav za mjerenje prometa u pokretu (eng. *weight in motion* - WIM) na šest voznih traka. Za postavljanje ploča za vaganje baziranih na senzoru za mjerenje deformacija potrebno je izvođenje većih ureza na kolniku, a senzori se vrlo teško mogu održavati i mijenjati. Sustav za detekciju i prepoznavanje vozila baziran na mikrovalnim i radarskim postupcima ne omogućuje određivanje težine vozila. Zato je u okviru sustava praćenja SHM usvojen sustav WIM baziran na senzoru s piezoelektričnim filmom. Prilagođeni sustav WIM odlikuje se visokom razinom točnosti i trajnosti, senzori se lako održavaju i mijenjaju te vrlo malo oštećuju kolnik. Na slici 4. prikazan je WIM senzor i demodulator koji je postavljen na ovom mostu.



Slika 4. Sustav WIM instaliran na mostu: a) WIM; b) Demodulator

Iako se neka nagla opterećenja poput potresa i sudara brodova događaju vrlo rijetko, energija koja se pritom razvija vrlo je velika i može dovesti do oštećenja građevina. Na dno pilona postavljen je troosni servoakcelerometar GT41 kineske proizvodnje. Podaci dobiveni tim uređajem mogu se koristiti za ocjenjivanje stanja mosta nakon nekog katastrofalnog događaja. Spomenuti akcelerometar odlikuje se širokim rasponom frekvencije DC od 120 Hz, te velikim rasponom od $\pm 19,6$ m/s², a osjetljivost mu je vrlo visoka i iznosi 2,5 V/g, gdje je g ubrzanje sile teže. Prostorna deformacija konstrukcije odraz je njenih mehaničkih karakteristika, te je značajan pokazatelj koji utječe na normalno funkcioniranje mosta. Metodom konačnih elemenata izračunana su sljedeća četiri slučaja opterećenja:

1. prvi slučaj je opterećenje vozilom klase I prema kineskom zakonu o projektiranju
2. drugi slučaj odnosi se slijeganje pilona od 5 cm
3. treći je slučaj smanjenje temperature konstrukcije s 20 °C na -9 °C za čeličnu gredu, tj. s 20 °C na -3 °C za betonske pilone

4. zadnji je slučaj povećanje temperature konstrukcije s 20 °C na 46 °C za čeličnu gredu, tj. s 20 °C na 34 °C za betonske pilone

Anvelopa rezultata za četiri slučaja opterećenja prikazana je u tablici 1.

Tablica 1. Deformacija mosta izračunana metodom konačnih elemenata

Slučaj	Maksimalni [m]	Minimalni [m]
Vertikalni progib nosača na sredini raspona	0,465 (gore)	-0,876 (dolje)
Uzdužni pomak na vrhu pilona	0,282 (pomak prema bočnom rasponu)	0,391 (pomak prema sredini raspona)
Uzdužni pomak ležaja	0,361 (daleko od sredine raspona)	0,388 (blizu sredine raspona)

Laserski mjerači i totalne stanice nisu pogodni za dugoročno praćenje stanja mostova velikih raspona. Sustavi bazirani na mjerenju pritiska u cijevi ispunjenoj vodom izuzetno su precizni, imaju velik domet, dugoročno su stabilni i trajni, te su stoga odabrani za mjerenje vertikalnih deformacija na gredi. Na glavnom nosaču postavljeno je ukupno šesnaest senzora za mjerenje progiba, pri čemu su dva senzora instalirana uzvodno i nizvodno u glavnom rasponu kako bi se mogao pratiti torzijski progib grede.

Spomenuti senzori za mjerenje pomaka mogu se koristiti samo za određivanje relativnog pomaka. Za mjerenje apsolutnog pomaka mosta postavljena su tri senzora globalnog položajnog sustava (GPS) na vrhove pilona i na sredinu raspona grede kako bi se mogla pratiti prostorna deformacija mosta. Jedan GPS senzor postavljen je u glavnu prostoriju da posluži kao referentna točka. Nagib pilona također je odraz mehaničkih karakteristika mosta. Četiri servo inklinometra LCF-100 postavljena su na vrhove dvaju pilona i služe za mjerenje uzdužnog i poprečnog nagiba pilona. Ovaj tip senzora dugoročno je stabilan, ima široki raspon ($\pm 1^\circ \text{C}$ do $\pm 90^\circ \text{C}$), visoku rezoluciju ($1 \mu \text{rad}$), velik raspon radne temperature (-18°C do 70°C) te izvrsnu kontrolu protoka temperature.

Stanje ležajeva treba se pratiti jer oni trebaju prenijeti deformacije grede pod svakim opterećenjem, a to su primjerice prometno

opterećenje, opterećenje zbog temperaturnih promjena te opterećenje uslijed skupljanja i puzanja betona. Enkoder s poteznom žicom za mjerenje pomaka nije dugotrajno stabilan, a uz to je i podložan utjecaju okolne temperature. Područje mjerenja linearno varijabilnog diferencijalnog transformatora (LVDT-a) nije veliko, a i njegovo je postavljanje prilično složeno. Konačno je odabran magnetostriktivni senzor za mjerenje pomaka zbog velikog mjernog raspona (50-7600 mm), visoke preciznosti, dugotrajne stabilnosti i jednostavnog postavljanja. Područje mjerenja i rezolucija senzora odabrani su na temelju rezultata dobivenih pomoću metode konačnih elemenata. Na slici 5. prikazani su mjerač progiba, magnetostriktivni senzor pomaka i GPS.

Naprezanje je jedna od najznačajnijih varijabli koje upozoravaju na stanje konstrukcije. Kritični poprečni presjeci odabrani za praćenje su upravo oni presjeci koji su podložni najvećim naprezanjima u uvjetima korištenja građevine. Rezultati su pokazali da se velika naprezanja javljaju na sljedećim kritičnim poprečnim presjecima: pomoćni stup, sredina drugog raspona, četvrtina i sredina središnjeg (trećeg) raspona. Maksimalna i minimalna naprezanja na vrhu grede iznose 48,6 MPa tj. -39,0 MPa, a odgovarajuća naprezanja na dnu iznose 35,7 MPa, tj. -47,8 MPa. To pokazuje da se velika naprezanja javljaju na sljedećim kritičnim poprečnim presjecima: pomoćni stup, sredina drugog raspona, četvrtina i sredina središnjeg raspona. Osim toga, kritičnim presjekom se smatra i dno pilona, pa je na svim tim kritičnim mjestima ugrađeno ukupno 130 senzora za mjerenje deformacija, tj. tenzometara.

Danas se upotrebljavaju tri vrste tenzometara: električni tenzometri, akustični tenzometri te optički tenzometri sa svjetlovodnom Braggovom rešetkom (FBG senzori). Električni tenzometri nisu dovoljno trajni i ne podnose dobro elektromagnetske interferencije, a i nisu dovoljno osjetljivi. Akustični tenzometri nisu prikladni za distribuirani i dinamički monitoring. Senzori sa svjetlovodnom Braggovom rešetkom (FBG senzori) vrlo su trajni i osjetljivi, te dobro podnose elektromagnetske interferencije. Uz to su i pogodni za distribuirano i dinamičko praćenje, te su zbog svih tih razloga uključeni u ovaj sustav SHMS. Odabran je FBG senzor kineskog proizvođača. Raspon mjerenja tog uređaja je $\pm 1500 \mu \epsilon$, preciznost mjerenja je $\pm 2-3 \mu \epsilon$, a rezolucija iznosi $1 \mu \epsilon$.

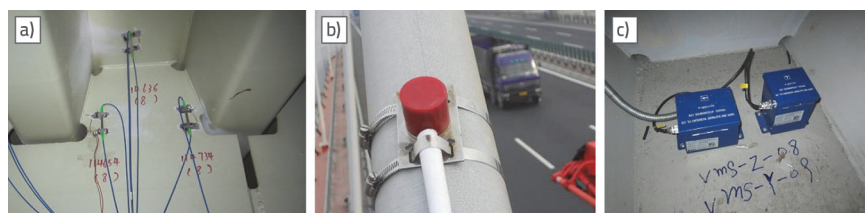
Zatege su bitne komponente za preuzimanje sile, a variranje u zategnutosti kabela bitno utječe na ponašanje konstrukcije. Osim toga, opterećenje zbog utjecaja kiše i vjetra također dovodi

do vibriranja zatega. U ovom je sustavu na odgovarajuće dijelove zatega postavljeno 36 jednoosnih servoakcelerometara u svrhu praćenja dinamičkog odziva i određivanja veličine kablskih sila na temelju metode spektra odziva.

Prema predviđanjima temeljenima na metodi konačnih elemenata, osnovna modalna frekvencija Mosta Junshan iznosi 0,31 Hz. Iskustva stečena na



Slika 5. Prikaz mjerača progiba, magnetostriktivnog i GPS-a senzora pomaka: a) mjerač progiba; b) GPS; c) magnetostriktivni senzor pomaka



Slika 6. Mjerači deformacija FBG i akcelerometri za mjerenje napetosti kabela i vibracija: a) mjerač deformacija FBG; b) akcelerometar; c) akcelerometarprogiba; b) GPS; c) magnetostriktivni senzor pomaka

Tablica 2. Varijable i senzori

Vrsta	Varijabla	Senzor	Ukupno
Okolina	vjetar	anemometar	2
	vlaga	higrometar	4
	temperatura	termometar	132
	promet	WIM	6
Opterećenje	potres, sudar brodova	troosni akcelerometar	1
Odziv	naprezanje	tenzometar FBG	130
	nagib	inklinometar	4
	progib	mjerač progiba	16
	prostorna deformacija	GPS	4
	pomak ležajeva	senzor magnetostriktivnog pomaka	2
	vibracije	akcelerometar	12
	napetost kabela	akcelerometar	36

sličnim mostovima pokazuju da su amplitude vibracija pod normalnim okolnim uvjetima pobude reda veličine cm/s^2 . Zato je za ovaj most odabran jednoosni servoakcelerometar GT02 proizveden u Kini. Taj uređaj ima širok raspon frekvencija DC do 120 Hz i dobro se ponaša pri niskim frekvencijama. Također ima veliki raspon od $\pm 19,6 m/s^2$, osjetljivost uređaja je $255 mV/m/s^2$, a protuudarno ograničenje iznosi više od $2450 m/s^2$. Odziv konstrukcije na vibracije uvjetovan je dinamičkim karakteristikama mosta. Frekvencije konstrukcije i modalni oblici mogu se odrediti analizom izmjerenog odziva, te se nakon

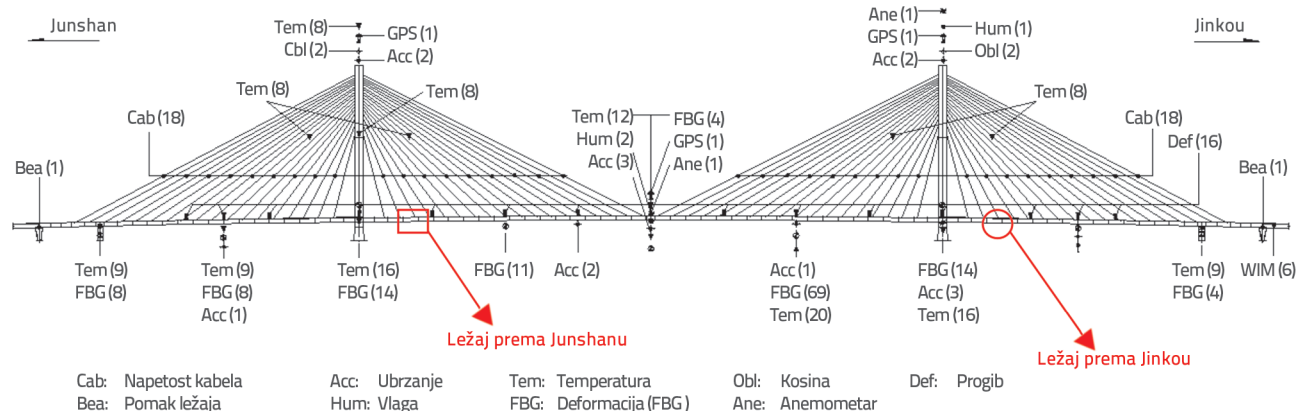
toga dobiveni rezultat može koristiti za ažuriranje modela konačnih elemenata građevine. Stoga se detaljan model konstrukcije može smatrati osnovnim modelom za statističku analizu i ocjenu stanja mostova. Osim toga, kada se most nalazi u nekim ekstremnim situacijama, kao što je potres, sudar brodova, teška prometna nesreća ili iznimno nepovoljni vremenski uvjeti, tada se postupak praćenja odziva može primjenjivati za analiziranje stanja i sigurnosti građevine. U svrhu mjerenja dinamičkog odziva, na pilone i ploču ovog mosta postavljeno je ukupno 12 jednoosnih servoakcelerometara.

Na slici 6. prikazani su senzor za mjerenje deformacija FBG, akcelerometar za mjerenje napetosti kabela i akcelerometar za praćenje vibracija mosta.

U tablici 2. prikazane su varijable i senzori korišteni u postupku praćenja. Opći raspored mjernih točaka prikazan je na slici 7.

2.3. Prikupljanje i prijenos podataka

Podaci se prikupljaju pomoću lokalne stanice za prikupljanje podataka nakon čega se prebacuju u glavnu sobu pomoću optičke mreže. Ukupna dužina mosta iznosi 964 m, a razni podaci (napon, struja, svjetlosni signali itd.) prate se pomoću odgovarajućih senzora. Uzimajući u obzir potrebni komunikacijski raspon i raspored različitih senzora, u odgovarajuće presjeke sandučastih nosača postavljeno je pet jedinica za prikupljanje podataka (engl. data acquisition unit, DAU) kako bi se mogli prikupljati signali iz okolnih senzora. Pri tome se uzima u obzir maksimalno dopuštena udaljenost između senzora i DAU-a, tj. udaljenost na kojoj ne dolazi



Slika 7. Opći raspored svih mjernih točaka na Mostu Junshan

do gubitaka/šuma u prijenosu tj. smetnji u funkcioniranju jedinica DAU. Nakon toga se podaci šalju u lokalne stanice za prikupljanje podataka. Kako bi se postiglo dugotrajno i stabilno funkcioniranje te smanjila komunikacijska udaljenost, dvije stanice za prikupljanje podataka postavljene su na donje poprečne grede pilona, tj. na pozicije na kojima se očekuju niske vrijednosti vibracija konstrukcije, te manje varijacije temperature i vlage. Pouzdan prijenos signala osigurava prikladna topologija sveukupne mreže na Mostu Junshan koja se sastoji od četiri skupine mreža za prijenos podataka:

- Prva je glavna optička mreža koja služi za prijenos podataka između dviju stanica za prikupljanje podataka i glavne sobe. Podaci kao što su informacije o vjetru, vlazi, temperaturi, nagibu, progibu i pomaku ležajeva, najprije se prikupljaju na najbližoj jedinici DAU, nakon čega se podaci prebacuju pomoću sabirnice RS-485 u stanicu za prikupljanje podataka. Signal ubrzanja prenosi se RVVP kabelom u poseban uređaj za kondicioniranje koji se nalazi u stanici za pohranjivanje podataka. Kako bi se osigurala redundancija i pouzdanost u prijenosu podataka između stanica za prikupljanje podataka i glavne sobe, lokalni serveri i serveri u centralnoj sobi spojeni su višestrukim vlaknima, a podatkovno sučelje distribuiranim vlaknima (engl. fibre distributed data interface - FDDI) bazirano na ethernetu s dvojnog petljom projektirano je i izvedeno za prijenos podataka između servera.
- Druga je mreža FBG za praćenje deformacija. Podaci izmjereni pomoću senzora deformacija su svjetlosni signali koji se trebaju demodulirati pomoću posebnog uređaja za demoduliranje. Kako je operativno okruženje u glavnoj sobi bolje od lokalnog okruženja, uređaj za demodulaciju postavljen je u glavnu sobu, a podaci o deformacijama ne prenose se u stanicu za prikupljanje podataka već u uređaj pomoću vlakana, nakon čega se demodulirani rezultat pohranjuje i prenosi u server s bazom podataka.
- Treća mreža je mreža za prijenos podataka o prometnom opterećenju. Za te se potrebe koristi sustav WIM koji se

nalazi na ploči pristupnog mosta. Demodulacijsko računalo, podešeno na komunikacijsko polje podataka koji se mjere pomoću sustava WIM, nalazi se u sandučastom nosaču u blizini sustava. Rezultat dobiven demodulacijom izravno se prenosi vlaknima u glavnu sobu.

- I na kraju slijedi GPS mreža. Podaci o praćenju prenose se kabelom RS232 do GPS prijavnika. Kako je udaljenost koja se prelazi pomoću kabela RS232 vrlo mala, elektronski se signal pretvara u svjetlosni signal, nakon čega se isti mrežom vlakana prenosi do demodulacijskog računala u glavnoj sobi.

Korisnik može istraživati i koristiti sve izmjerene podatke i analizirati rezultate bilo u glavnoj sobi ili na nekoj drugoj lokaciji putem interneta.

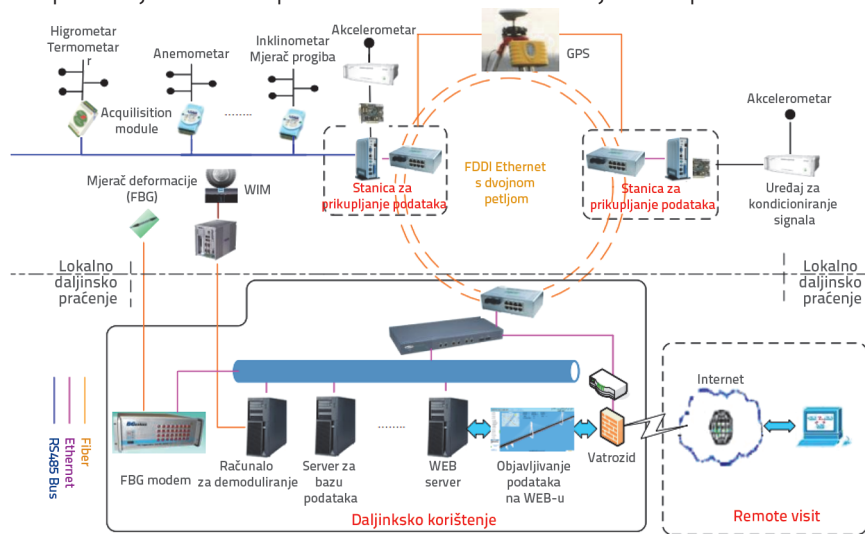
2.4. Pohranjivanje i korištenje podataka

Podaci se pohranjuju i koriste putem sustava baze podataka. Kako bi se udovoljilo zahtjevima za pravilno pohranjivanje i korištenje tako raznolikih i opsežnih podataka, izrađena je odgovarajuća baza podataka za praćenje ponašanja građevine pomoću servera Microsoft SQL. Kako je količina podataka koji se generiraju tijekom dugotrajnog praćenja iznimno velika, odlučeno je da se za statične i dinamične podatke primjenjuju različite strategije skladištenja. Statički podaci, poput temperature i progiba, mijenjaju se sporo pa se oni i ne prikupljaju tako često. Takvi se podaci u potpunosti prikupljaju i pohranjuju u serveru baze podataka. S druge strane, dinamički podaci, kao npr. podaci o naprezanju i ubrzanju, prikupljaju se kontinuirano i pohranjuju u lokalnoj stanici za prikupljanje podataka. Samo jedan dio podataka i rezultata statističkih analiza pohranjuje se u bazu podataka koja se nalazi u glavnoj sobi. Stariji se podaci povremeno brišu, a samo podaci prikupljeni u posljednja dva tjedna pohranjuju se u lokalnoj stanici za prikupljanje podataka. Kada se na mostu zabilježi događaj ekstremnog karaktera, kao što je npr. potres, prometna nesreća, sudar brodova ili jaka vremenska nepogoda,

odmah se aktivira strategija maksimalnog prikupljanja podataka, tj. tijekom takovog događaja prikupljaju se svi podaci te se pohranjuju radi kasnije analize stanja i procjene sigurnosti građevine.

2.5. Sustav korisničkog sučelja

Sustav korisničkog sučelja razvijen je kako bi se omogućila prikladna kontrola i analiza rezultata monitoringa. Obično se koriste dva oblika sustava korisničkog sučelja. Prvi oblik, postupak klijent/server (C/S), omogućuje brzo rješavanje svih vrsta složenih zahtjeva, ali zahtijeva instaliranje velikog broja različitih programa na računalima korisnika. Taj oblik nije prikladan za razvoj i održavanje softverskog sustava.

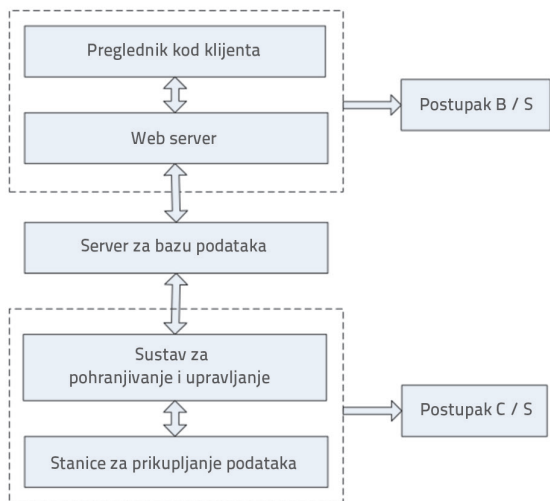


Slika 8. Opća mreža za prikupljanje i prijenos podataka izmjenjenih na Mostu Junshan

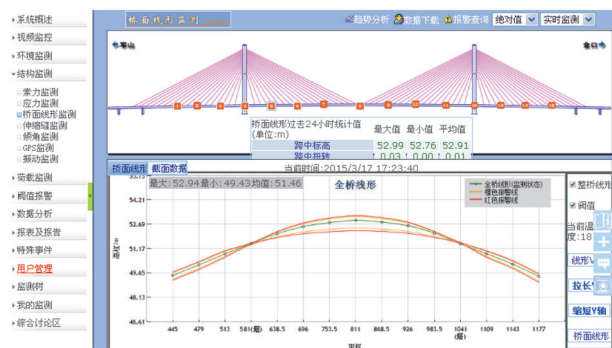
Drugi oblik je postupak preglednik/server (B/S) koji nije pogodan za složeno i brzo procesuiranje signala od strane klijenta, bez softvera na računalima korisnika. Sve funkcije omogućava server, a korisnik može koristiti i kontrolirati sustav u skladu s ovlastima koje se dodjeljuju kroz opći program preglednika.

U projektiranju korisničkog sučelja za Most Junshan usvojena je kombinacija postupaka C/S i B/S kako bi se udovoljilo zahtjevima praćenja na daljinu i u realnom vremenu. Postupak C/S primjenjuje se za komunikaciju između lokalne stanice za prikupljanje podataka, sustava za pohranjivanje i upravljanje te servera s bazom podataka. Program za prikupljanje podataka, program za izradu baze podataka, te svi ostali programi potrebni u analizi, prikladno su razvijeni i instalirani u odgovarajući server. To je omogućilo brzo prikupljanje podataka putem interneta te obradu velikog broja podataka. S druge strane, postupak B/S omogućuje komunikaciju između internetskog preglednika, servera na kojem se nalazi baza podataka i korisnika. Sve funkcije osigurava internetski server, a korisnik može jednostavno koristiti sustav putem internetskog preglednika. Na korisnička se računala ne trebaju instalirati neki drugi programi, što omogućuje jednostavno održavanje i ažuriranje sustava revidiranjem programa instaliranih na serveru.

Način korištenja korisničkog sučelja na Mostu Junshan prikazan je na slici 9., a internetsko sučelje sustava SHMS primijenjenog na tom mostu prikazano je na slici 10.



Slika 9. Izvedba korisničkog sučelja na Mostu Junshan

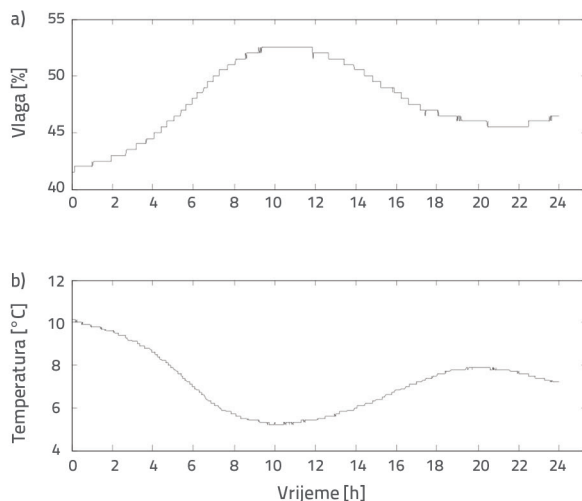


Slika 10. Internetska organizacija sustava SHMS na Mostu Junshan

3. Analiza izmjerenih podataka

3.1. Temperatura i vlaga

Vlaga okoline bitno utječe na koroziju čeličnih konstrukcija. Na ovom su mostu postavljena četiri higrometra, i to na vrhu pilona, na sredini ploče te u čeličnom sandučastom nosaču. Analizirani su podaci prikupljeni 5. ožujka 2015. na senzoru koji se nalazi u čeličnom sandučastom nosaču. Podaci su prikupljeni u vremenu od jedne minute. Krivulje vlage i temperature za različita razdoblja istog dana prikazane su na slici 11.



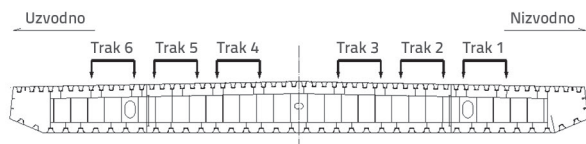
Slika 11. Krivulje vlage i temperature: (a) vlaga i (b) temperatura

Kao što se može vidjeti na slici 11., stupanj vlage u nosaču varira u jednom danu od 41,5 % do 52,5 %, dok se temperatura mijenja u intervalu od 5,2 °C do 10,1 °C. Dakle, maksimalna promjena vlage iznosi 9 %, a temperature 4,9 °C. Vlaga se smanjuje s povećanjem temperature i obratno. Kroz mjerenje vlage, sustav SHMS upozorava upravitelja mosta na potrebu poduzimanja odgovarajućih mjera održavanja tj. u ovom slučaju da otvori odvlaživač kako bi se smanjila opasnost od korozije čeličnog sandučastog nosača u uvjetima visoke razine vlage.

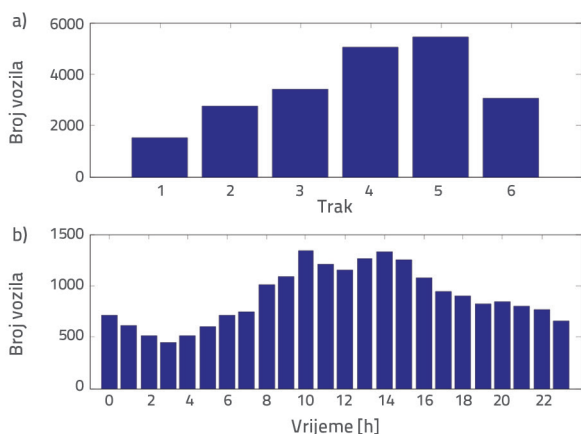
3.2. Prometno opterećenje

Na ploči mosta, na šest je prometnih trakova postavljen sustav WIM koji služi za praćenje prometnog opterećenja. Trakovi su označeni brojevima 1, 2, ... 6. Vozila se kreću nizvodno iz smjera grada Jinkoua i prelaze preko mosta u smjeru grada Junshana. U drugom smjeru, vozila iz Junshan-a kreću se uzvodno prema gradu Jinkou. Raspored šest prometnih trakova prikazan je na slici 12. Sustavom WIM određuje se osovinsko opterećenje, brzina vozila, vrsta vozila i broj vozila u svakom traku. Podaci prikupljeni pomoću sustava WIM mogu se koristiti za izradu modela mosta radi ocjene stanja konstrukcije. U ovom su slučaju podaci prikupljeni 7. ožujka 2015. godine za potrebe statističke analize. Prometni trakovi označeni su brojevima od 1

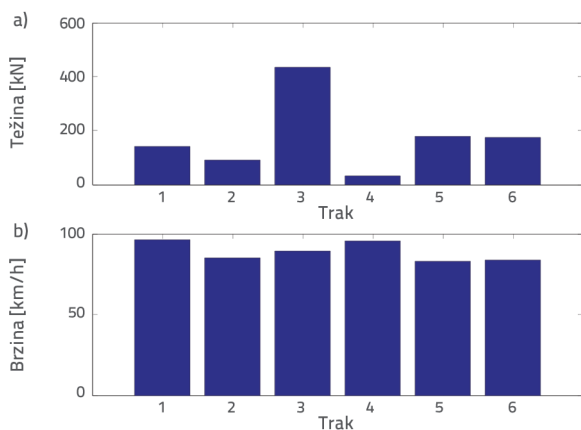
do 6 računajući od uzvodne strane prema nizvodnoj. Na slici 13. prikazan je raspored broja vozila po prometnom traku isto kao i raspored vozila u vremenu od 24 sata. Srednja vrijednost težine i brzine vozila u svim trakovima prikazana je na slici 14.



Slika 12. Shematski prikaz šest prometnih trakova



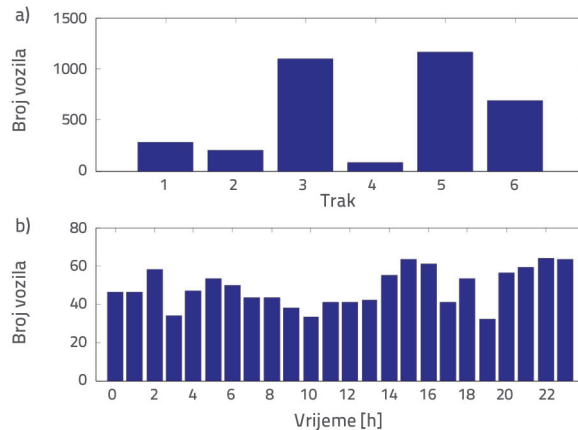
Slika 13. a) Raspored vozila po trakovima; b) raspored vozila u vremenu od 24 sata



Slika 14. a) Srednja težina vozila po trakovima; b) prosječna brzina po trakovima

Kao što možemo vidjeti na slici 13., ukupno 21279 vozila je prešlo preko mosta u jednom danu, pri čemu je najveći broj vozila, čak 5440, koristio prometni trak 5, dok je najmanji broj vozila koristio trak 1. Na slici 14. vidimo da je srednja težina vozila najveća na prometnom traku 3. Tijekom dana promet je po ovom mostu vrlo gust, naročito u razdoblju od 8 ujutro do 4 popodne. Kako se most nalazi na autocesti, prosječna brzina vozila u svakom traku varira od 80 km/h do 100 km/h, pri čemu je

najveća brzina od 95,9 km/h zabilježena na prometnom traku 1. Iznimno je značajno pratiti promet teretnih vozila preko mosta, jer takav promet može dovesti do oštećenja uslijed zamora konstrukcije. Na slici 15. vidimo raspored vozila od preko 300 kN po prometnim trakovima, te raspored preopterećenih vozila u prometnom traku 5 u satnim intervalima.

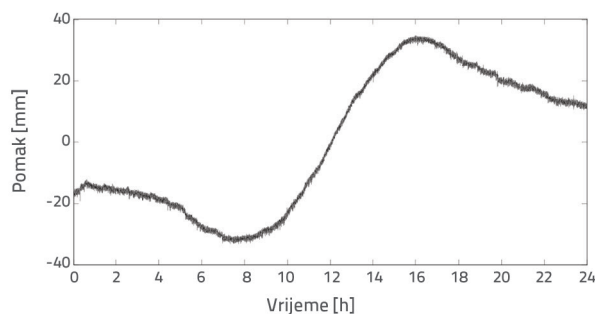


Slika 15. a) Raspored vozila od preko 300kN po trakovima; b) raspored preopterećenih vozila u prometnom traku 5 u satnim intervalima

Na slici 15.a možemo vidjeti da je broj preopterećenih vozila u trakovima 5 i 3 veći od odgovarajućeg broja vozila u drugim trakovima, pri čemu je maksimalan broj od 1162 vozila zabilježen u traku 5. Zbog toga se više treba usmjeriti na održavanje čeličnog sandučastog nosača u blizini prometnih trakova 5 i 3. Na slici 15.b vidimo da je broj preopterećenih vozila koja prometuju po traku 5 poprilično neujednačen u vremenu tj. da nema jasnih razdoblja prometnih špica.

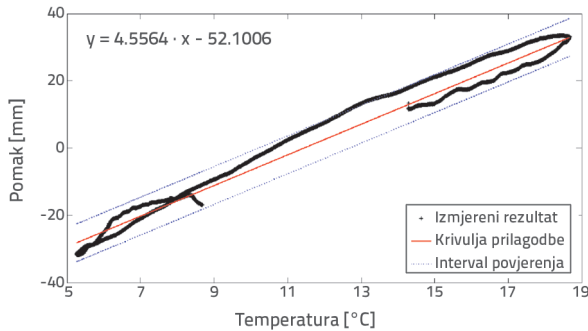
3.3. Pomicanje ležajeva

Dva magnetostriktivna senzora za mjerenje pomaka ugrađena su na prijelaznoj napravi na obje strane, tj. prema Jinkou i prema Junshanu. Podaci o prometu registrirani 7. ožujka 2015. prikupljeni su u intervalima od 1 Hz, a smatra se da je pomak ležaja pozitivan kada se svojim pružanjem udaljava od sredine polja glavnog raspona. Na slici 16. vidimo pomak ležaja na strani Jinkoua, što je na slici 7. označeno kružićem.

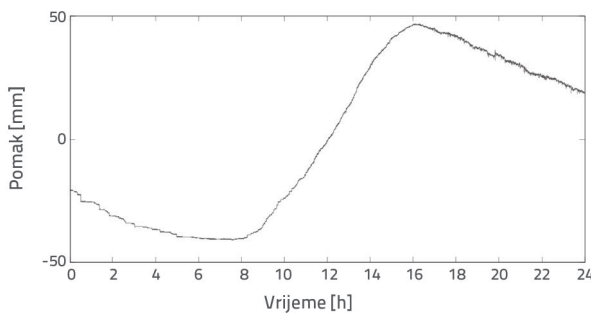


Slika 16. Krivulja pomaka ležaja na strani Jinkoua

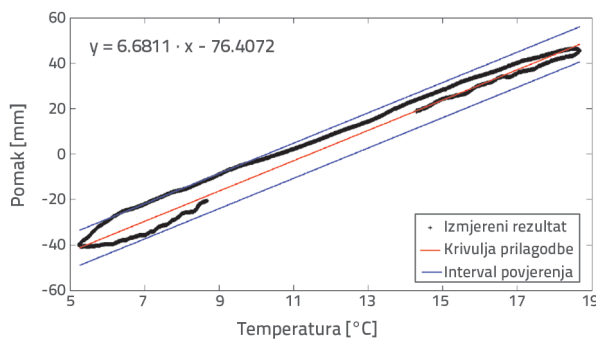
Na slici 17. vidimo regresijsku krivulju između temperature glavnog nosača i pomaka ležaja. Plava crtkana linija je interval 95 %-tne pouzdanosti rezultata. Rezultati odgovarajuće analize za ležaj koji je bliži Junshanu, označeno na slici 7. kvadratićem, prikazani su na slikama 18. i 19.



Slika 17. Krivulja regresije između pomaka ležaja i temperature grede



Slika 18. Krivulja pomaka ležaja ja strani Junshan-a

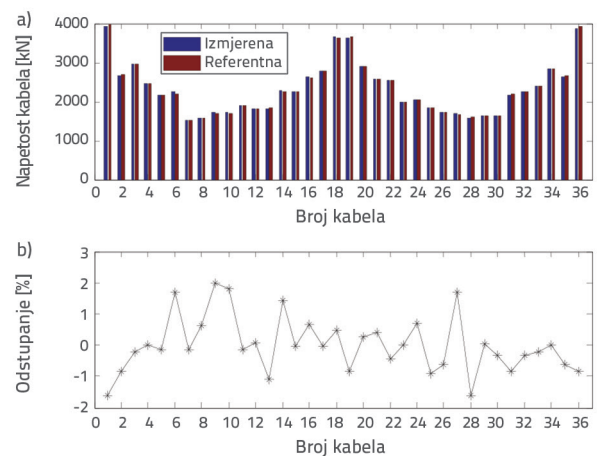


Slika 19. Krivulja regresije između pomaka ležaja i temperature grede

Regresijska krivulja pokazuje na linearan odnos između temperature grede i pomaka ležajeva na obje strane mosta. Odgovarajući korelacijski koeficijent na strani Jinkoua iznosi 0,9918, a taj koeficijent iznosi 0,9928 na strani Junshana. Na osnovi regresijske jednadžbe prikazane na slikama 17 i 19 može se zaključiti da pomak dvaju ležajeva na obje strane raste za otprilike 4,6 mm tj. 6,7 mm pri porastu temperature od 1 °C, a suma pomaka oba ležaja iznosi 11,3 mm, što se dobro podudara s rezultatom (12,2 mm) analize konačnih elemenata (FEA). Rezultati pokazuju da je ponašanje ležajeva zadovoljavajuće.

3.4. Napetost kabela

Ukupno 36 akcelerometara postavljeno je na 36 vješaljki, a obilježeni su brojevima od 1, 2, 3 36 računajući od strane Jinkoua prema Junshanu. Frekvencija mjerenja iznosi 20 Hz. Napetost kabela u jednosatnim intervalima određuje se pomoću metode spektra snage. Kako se napetost kabela mijenja ovisno o opterećenju i uvjetima okoline, analiziraju se podaci izmjereni u 2 sata ujutro. U to je vrijeme stanje temperaturnog polja u konstrukciji ujednačeno. Za potrebe uspoređivanja napetosti kabela, kao referentna vrijednost usvojen je rezultat periodičkih ispitivanja provedenih u siječnju 2006. godine. Na slici 20. prikazana je napetost kabela izmjerena 5. ožujka 2015. te razlika između rezultata praćenja i referentnih rezultata. Kao što se može vidjeti na slici 20., odstupanje napetosti kabela manje je od 3 %, što znači da vješaljke funkcioniraju pravilno.



Slika 20. a) Napetost kabela izmjerena u 2 sata ujutro; b) razlika između izmjerene napetosti kabela i referentnih rezultata

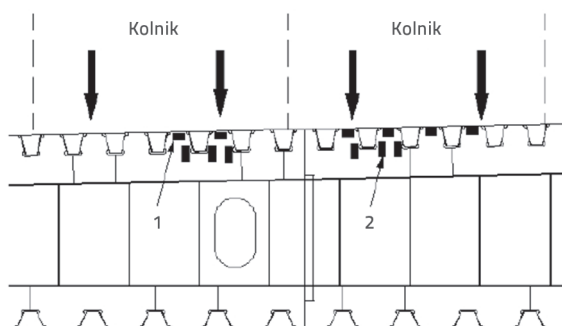
3.5. Ocjena zamora

Na temelju izmjerenih podataka o naprezanju, na Mostu Junshan ocijenjen je zamor čeličnog sandučastog nosača pomoću metode žarišnih naprezanja. Imajući u vidu karakteristike naprezanja čeličnog sandučastog nosača, naglasak je stavljen na analizu dvaju opasnih područja: zavareni spoj između ploče i U-rebra, i zavareni spoj između dijafragme i donjeg ruba U-rebra. Za oba je spoja određeno šest mjernih točaka koje su definirana brojčanim oznakama od lijeve strane prema desnoj, npr. 2-1, 2-2 ... 2-6. Raspored mjernih točaka prikazan je na slici 21.

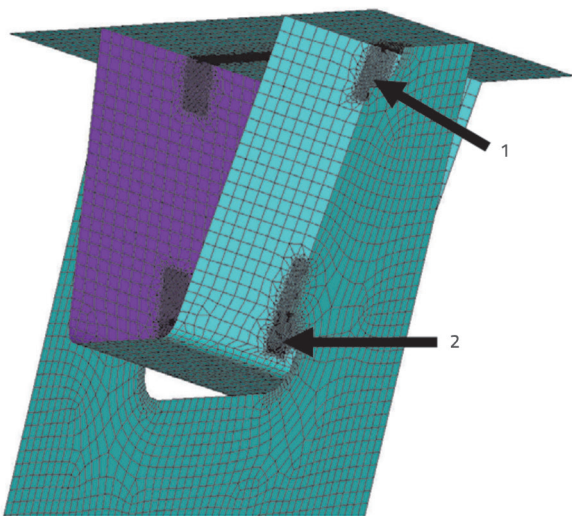
Najprije je razvijen FEM model segmenta čeličnog sandučastog nosača kako bi se analizirao faktor koncentracije naprezanja (eng. *stress concentration factor* - SCF). Lokalni je model prikazan na slici 22., a vrijednosti SCF izračunane za dvije vrste zavarenih spojeva iznose 1,55 tj. 1,49.

Tablica 3. Rezultati ocjene zamora

Mjerna točka	Stupanj oštećenja [%]	Očekivani vijek trajanja [godina]	Mjerna točka	Stupanj oštećenja [%]	Očekivani vijek trajanja [godina]
1-1	0	>>100	2-1	52.6	190
1-2	0	>>100	2-2	29.3	342
1-3	0	>>100	2-3	595.9	17
1-4	0	>>100	2-4	3.8	2625
1-5	14.2	705	2-5	510.1	20
1-6	31.9	314	2-6	348.2	29



Slika 21. Raspored mjernih točaka



Slika 22. Lokalni model konačnih elemenata

Nakon toga su analizirani podaci o naprezanju izmjereni od 3. do 18. studenog 2011. te su statistički analizirani podaci o žarišnom naprezanju, a standardni dnevni spektar naprezanja dobiven je metodom smjerom kiše.

Na kraju je ocijenjen zamor građevine na osnovi kriterija linearnog kumulativnog oštećenja i krivulja otpornosti na zamor. Rezultati ocjene prikazani su u tablici 3.

Iz rezultata se može uočiti da je stupanj oštećenosti prve vrste zavarenog spoja na kraju projektiranog vijeka trajanja bitno niži od 100 %. Kod druge vrste zavarenog

spoja, stupanj oštećenosti je u većini mjernih točaka veći od 100 %, osim u točkama 2-1 i 2-4. To pokazuje da do oštećenja uslijed zamora može doći u zavarenim spojevima između dijafragme i donjeg ruba U-rebra. Osnovni razlog takvog ponašanja leži u činjenici da je savojna deformacija ograničena dijafragmom, što dovodi do velikog sekundarnog savojnog naprezanja. Istovremeno, vertikalna savojna deformacija dijafragme uzrokuje velika savojna naprezanja i posmična naprezanja u ravnini. U ovoj zoni mosta uočene su pukotine uzrokovane zamorom pa se stoga može zaključiti da je ta zona slaba točka čeličnog sandučastog nosača i da se u njoj treba provoditi intenzivnije praćenja stanja te pojačanje konstrukcije.

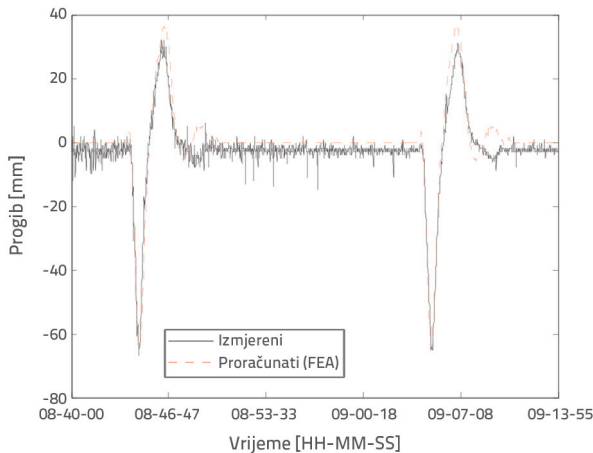
4. Praćenje stanja mosta u ekstremnim uvjetima

2. studenog 2011. godine, dva kamiona mase 178 tona prešla su preko mosta iz smjera Jinkoua krećući se prema gradu Junshanu. To su bili kamioni s poluprikolicama s većim brojem osovina: jedan je imao 15, a drugi 16 osovina. Zbog sigurnosti mosta, promet je bio privremeno zatvoren od 08:32:00 do 09:14:24 a kamioni su preko mosta vozili brzinom od 10 km/h. Prvi je kamion došao do prijelazne naprave na strani grada Jinkoua u 08:43:39 a prešao je prijelaznu napravu na strani grada Junshana u 08:49:32, dok je vrijeme dolaska i odlaska drugog kamiona bilo 09:03:53 tj. 09:10:01. Vrijeme je bilo ugodno s temperaturom od 18,7 °C a puhao je povjetarac brzine 2,6 m/s. Priprema prvog kamiona za prelazak preko mosta prikazana je na slici 23.

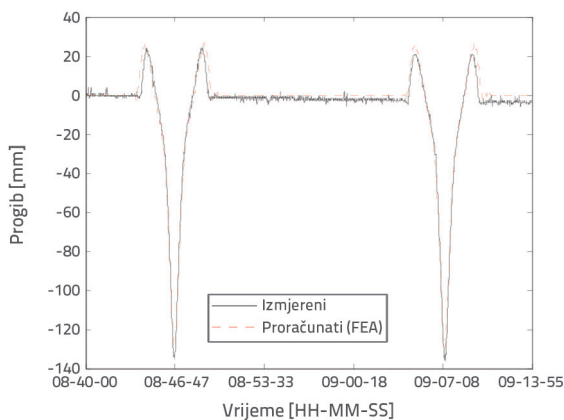


Slika 23. Kamion spreman za prelaz preko mosta

Dok su kamioni prelazili preko mosta, odziv konstrukcije praćen je pomoću sustava SHMS. Provedena je i numerička analiza metodom konačnih elemenata kako bi se validirali rezultati praćenja. S obzirom na to da je most bio privremeno zatvoren, ekstrahirani su rezultati pokretnog opterećenja. Na slici 24. vidi se progib na sredini drugoga raspona na strani grada Jinkoua, a radi usporedbe, crvenom crtkanom linijom prikazan je i rezultat dobiven metodom konačnih elemenata. Na slici 25. prikazan je rezultat ostvaren u nizvodnoj mjernoj točki u sredini središnjeg (trećeg) raspona.



Slika 24. Krivulja progiba u sredini drugoga raspona na strani grada Jinkoua

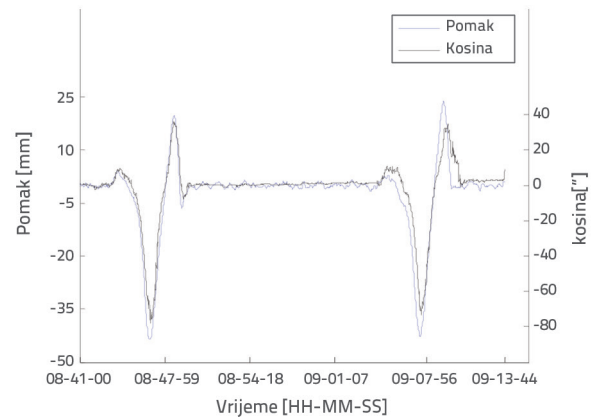


Slika 25. Krivulja progiba u sredini središnjeg (trećeg) raspona (nizvodno)

Kao što se može vidjeti na slikama 24. i 25., sustavom SHMS detaljno je praćen odziv konstrukcije kada su se dva kamiona kretala po mostu, a rezultati mjerenja sukladni su s rezultatima dobivenima metodom konačnih elemenata. Maksimalni progib grede na drugom i trećem rasponu iznosio je 67

mm tj. 136 mm. Rezidualna deformacija nakon što su kamioni prošli preko mosta bila je vrlo mala, što znači da se konstrukcija ponašala elastično.

Postavljenim uređajem GPS mjereno je uzdužni i poprečni pomak na vrhu pilona, a tiltmetrom je mjereno uzdužni i poprečni nagib na vrhu pilona. Prikupljeni su i analizirani podaci o uzdužnom pomaku i nagibu pilona na strani Junshana, a pomak i nagib od Jinkoua do Junshana definiran je kao pozitivan. Rezultati praćenja prikazani su na slici 26.

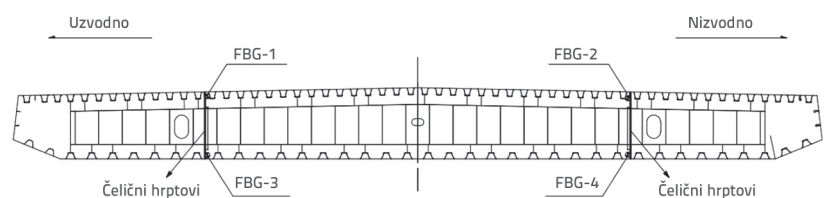


Slika 26. Praćenje uzdužnog pomaka i nagiba pilona Junshan

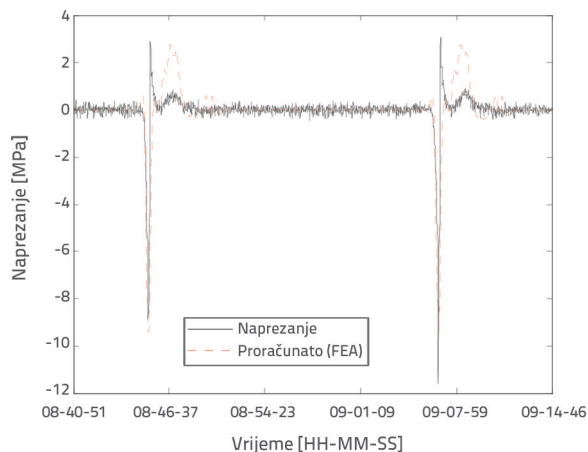
Dobiveni rezultati pokazuju da je variranje uzdužnog pomaka u skladu s variranjem nagiba, što potvrđuje dobru usporednu (križnu) baždarenost različitih vrsta senzora. Maksimalni pomak iznosi 43,8 mm dok odgovarajući nagib iznosi 78,0°. Minimalne vrijednosti su 23,9 mm tj. 36,5°.

Kao što se može vidjeti na slici 7., prilično velik broj senzora za mjerenje deformacija postavljeno je na pojedinim dionicama duž čeličnog sandučastog nosača u svrhu praćenja napreznja. U svakoj dionici postavljene su četiri mjerne točke na dva čelična rebra, uzvodno i nizvodno, a dvije mjerne točke postavljene su, jedna na vrh a druga na dno svakog čeličnog rebra, kao što se to vidi na slici 27.

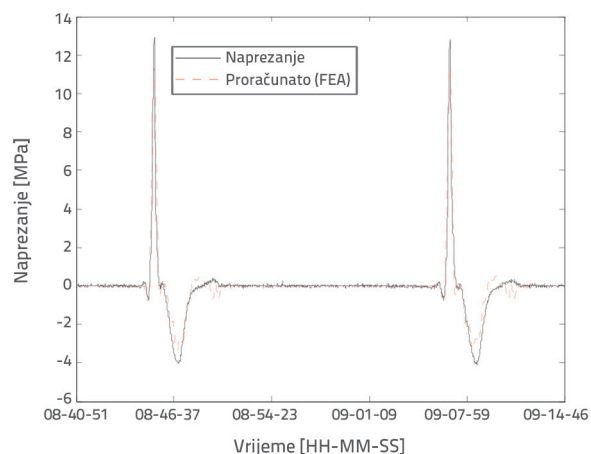
Rezultati na gornjim mjernim točkama na nizvodnim rebrima u sredini drugoga raspona na strani Jinkoua prikazani su na slici 28. Radi usporedbe, rezultati izračunani metodom konačnih elemenata prikazani su na istoj slici crvenom crtkanom linijom. Na slici 29. prikazani su rezultati na donjim mjernim točkama, a rezultati dobiveni na gornjim i donjim mjernim točkama u sredini trećeg (središnjeg) raspona prikazani su na slikama 30. i 31.



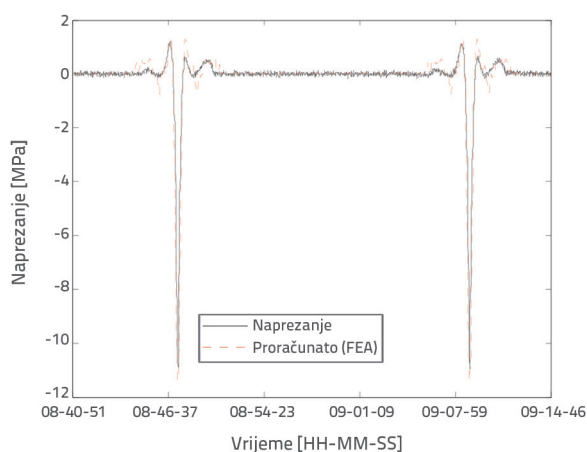
Slika 27. Raspored točaka za mjerenje napreznja po čeličnim rebrima



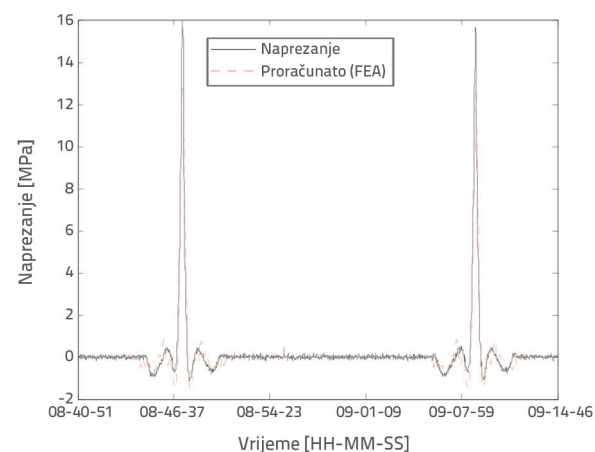
Slika 28. Krivulja naprezanja na gornjoj mjernoj točki u sredini drugog raspona na strani Jinkoua (nizvodna rebra)



Slika 29. Krivulja naprezanja na donjoj mjernoj točki u sredini drugog raspona na strani Jinkoua (nizvodna rebra)



Slika 30. Krivulja naprezanja na gornjoj mjernoj točki u sredini trećeg raspona (nizvodna rebra)



Slika 31. Krivulja naprezanja na donjoj mjernoj točki u sredini trećeg raspona (nizvodna rebra)

Na slici 28. može se uočiti raskorak između izmjerenog naprezanja i proračuna metodom konačnih elemenata što bi se moglo objasniti nedovoljno preciznim postavljanjem senzora na nosač (senzor nije bio u odgovarajućem položaju ili pod odgovarajućim kutom), pa stoga izmjereni vremenski zapisi u određenom području nisu dobro usklađeni s teoretskim vrijednostima.

Na slikama 29. do 31. možemo uočiti da su izmjereni rezultati u skladu s rezultatima dobivenima metodom konačnih elemenata. Pri opterećenju nanesenom pomoću kamiona, vrh čeličnih rebara uglavnom je u tlaku, a dno je rebara u vlaku. Maksimalno i minimalno naprezanje u drugom rasponu iznosi 12,9 MPa, tj. -11,6 MPa, a odgovarajući rezultati za treći raspon su 16,0 MPa tj. -10,9 MPa. Stoga se može zaključiti da su naprezanja na čeličnim rebrima u trećem rasponu veća od naprezanja u rubnim rasponima (drugom i četvrtom).

Osim toga, deformacija konstrukcije i vrijednosti rezidualnog naprezanja bile su vrlo male nakon što su kamioni

prešli preko mosta, što znači da je čitava konstrukcija u elastičnom stanju te da nije došlo do promjene mehaničkih karakteristika.

5. Zaključak

U ovom se radu opisuje projektiranje i primjena sustava SHMS na Mostu Junshan. Detaljno se analiziraju različiti podaci izmjereni tijekom svakodnevnog korištenja mosta i u ekstremnim uvjetima. Rezultati praćenja dobiveni GPS-om i tiltmetrom na istoj lokaciji su podudarni, što znači da su različite vrste senzora križno umjerene na odgovarajući način. Osim toga, izmjereni rezultati u skladu su s rezultatima simulacije što implicira da sustav SHMS dobro funkcionira te da može pravodobno i točno registrirati sve vrste podataka. Rezultati analize provedene u ekstremnim uvjetima pokazuju da je čitava konstrukcija u elastičnom stanju te da se mehaničke karakteristike nisu promijenile nakon što su kamioni prešli

preko mosta. Rezultati ocjene zamora pokazuju da se može očekivati oštećenje nekih lokalnih zavarenih spojeva te da se u tim zonama trebaju provesti opsežnije radnje praćenja i radnje održavanja koje uključuju odgovarajuća pojačanja. Uz to, sustav s konstrukcijom u naravnoj veličini i s velikim brojem stvarno zabilježenih podataka, predstavlja dobru osnovu za daljnja istraživanja u području utvrđivanja oštećenja na konstrukciji, ocjenjivanja stanja, validacije projektiranja, te provođenja terenskih eksperimentalnih analiza.

Zahvale

Ovo istraživanje financijski je potpomogla Kineska zaklada za prirodne znanosti (projekt br. 51408250,51708188) te Zaklada za pokretanje novih doktorskih istraživanja koja djeluje u sklopu Sveučilišta tehničkih znanosti pokrajine Hubei (projekt br. BSQD14043). Autori zahvaljuju Institutu za istraživanje mostova pri Kineskoj grupaciji za tehnologiju velikih mostova, Zhongtie, na ustupanju podataka o praćenju stanja mosta

LITERATURA

- [1] Ni, Y.Q., Xia, Y., Liao W. Y., Ko, J.M.: Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower. *Structural control and health monitoring*, 16 (2009), pp. 73-98, doi:10.1002/stc.303
- [2] Ko, J.M., Ni, Y.Q.: Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering structures*, 27 (2005), pp. 1715-1725, doi:10.1016/j.engstruct.2005.02.021
- [3] Li, H.N., Li, D.S., Song, G.B.: Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering structures*, 26 (2004), pp. 1647-1657, doi:10.1016/j.engstruct.2004.05.018
- [4] Wang, C., Ai, D.M., Ren, W.X.: A wavelet transform and substructure algorithm for tracking the abrupt stiffness degradation of shear structure. *Advances in Structural Engineering*, 22 (2019) 5, pp. 1136-1148, doi:10.1177/1369433218807690
- [5] Catbasa, F.N., Susoy, M., Frangopol, D.M.: Structural health monitoring and reliability estimation: Long span truss bridge application with environmental monitoring data. *Engineering structures*, 30 (2008), pp. 2314-2359, doi:10.1016/j.engstruct.2008.01.013
- [6] Pines, D.J., Aktan, A.E.: Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4 (2002) 4, pp. 372-380, doi:10.1002/pse.129
- [7] Lynch, J.P., Law, K.H., Kiremidjian, A.S., Carryer, E., Farrar, C.R., Sohn, H., Allen, D.W., Nadler, B., Wait, J.R.: Design and performance validation of a wireless sensing unit for structural monitoring applications. *Structural Engineering & Mechanics*, 17 (2004) 3-4, pp. 393-408, doi:10.12989/sem.2004.17.3_4.393
- [8] Magalhaes, F., Cunha, A., Caetano, E.: Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated OMA to damage detection. *Mechanical Systems and signal processing*, 28 (2012), pp. 212-228, doi:10.1016/j.ymssp.2011.06.011
- [9] Brownjohn, J.M.W., Magalhaes, F., Caetano, E., Cunha, A.: Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge. *Engineering Structures*, 32 (2010) 8, pp. 2003-2018, doi:10.1016/j.engstruct.2010.02.034
- [10] Wenzel, H.: *Health Monitoring of Bridges*. John Wiley & Sons, (2009)
- [11] Casciati, F.: An overview of structural health monitoring expertise within the European Union. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure - Proceedings of the 1st International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, Tokyo, pp. 31-37, 2003.
- [12] Goulet, J., Kripakaran, P., Smith, I.F.C.: Multimodel structural performance monitoring. *Journal of Structural Engineering*, 126 (2010) 10, pp. 1309-1318, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000232
- [13] Desjardins, S.L., Londono, N.A., Lau, D.T., Khoo, H.: Real-time data processing analysis and visualization for structural monitoring of the confederation bridge. *Advances in Structural Engineering*, 9 (2006) 1, pp. 141-157, doi:10.1260/136943306776232864
- [14] Mufti, A.A.: Structural health monitoring of innovative Canadian civil engineering structures. *Structural Health Monitoring*, 1 (2002) 1, pp. 89-103, doi:10.1177/147592170200100106
- [15] Jang, S., Jo, H., Cho, S., Mechitov, K., Rice, J.A., Sim, S.H., Jung, H.J., Yun, C.B., Spencer, B.F.Jr., Agha, G.: Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology deployment and evaluation. *Smart Structures and Systems*, 6 (2010) 5, pp. 439-459, doi:10.12989/sss.2010.6.5_6.439
- [16] Cho, S., Jo, H., Jang, S., Park, J., Jung, H.J., Yun, C.B., Spencer, B.F., Seo J.W.: Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: Data analyses. *Smart Structures and Systems*, 6 (2010) 5-6, pp. 461-480, doi:10.12989/sss.2010.6.5_6.461
- [17] Yun, C.B., Lee, J.J., Kim, S.K., Kim, J.W.: Recent R&D activities on structural health monitoring for civil infra-structures in Korea. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 7 (2003) 6, pp. 637-651, doi:10.1007/BF02829136
- [18] Fujino, Y., Murata, M., Okano, S., Takeguchi, M.: Monitoring system of the Akashi Kaikyo Bridge and displacement measurement using GPS. *Proc. SPIE'S 5th Annual international symposium on nondestructive evaluation and health monitoring of ageing infrastructure*, International society for optics and photonics, Newport Beach, pp. 229-236, 2000
- [19] Fujino, Y., Siringoringo, D.M., Abe, M.: Japan's experience on long-span bridge monitoring. *Structural Monitoring and Maintenance*, 3 (2016) 3, pp. 233-257, doi:10.12989/smm.2016.3.3.233
- [20] Fujino, Y., Abe, M., Shibuya, H., Yanagihara, M., Sato, M., Nakamura, S., Sakamoto, Y.: Forced and ambient vibration tests and vibration monitoring of Hakucho suspension bridge. *5th International Bridge Engineering Conference*, Transportation Research Record, Tampa, pp. 57-63, 2000.
- [21] Ou, J.P., Li, H.: Structural health monitoring in mainland china: review and future trends. *Structural Health Monitoring*, 9 (2010) 3, pp. 219-231, doi:10.1177/1475921710365269

- [22] Wong, K.Y.: Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges. *Structural control and health monitoring*, 1 (2004), pp. 91-124, doi:10.1002/stc.33
- [23] Li, H., Ou, J.: The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6 (2015) 1, pp. 43-67, doi:10.1007/s13349-015-0115-x
- [24] Sun, L.M., Sun, Z. Dan, D.H., Zhang, Q.W., Huang, H.W.: Researches and implementations of structural health monitoring systems for long-span bridges in china. *Doboku Gakkai Ronbunshuu A*, 65 (2009) 1, pp.15-29, doi:10.2208/jsceja.65.15
- [25] Weng, S., Zhu, H.P., Li, P.H., Xia, Y., Ye, L.: Construction of orthogonal projector for the damage identification by measured substructural flexibility. *Measurement*, 88 (2016), pp. 441-455, doi:10.1016/j.measurement.2015.12.047
- [26] Fang, S.E., Perera, R.: Power mode shapes for early damage detection in linear structures, *Smart Materials and Structures*, 18 (2009) 6, pp. 1-14, doi:10.1016/j.jsv.2009.02.002
- [27] Lei, Y., Jiang, Y.Q., Xu, Z.Q.: Structural damage detection with limited input and output measurement signals. *Mechanical systems and signal processing*, 28 (2012), pp. 229-243, doi:10.1016/j.ymssp.2011.07.026
- [28] Yan, W.J., Zhao, M., Sun, Q., Ren, W.X.: Transmissibility-based system identification for structural health Monitoring: Fundamentals, approaches, and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 117 (2019), pp. 453-482, doi:10.1016/j.ymssp.2018.06.053
- [29] Li, H., Ou, J. P., Zhao, X.F., Zhou, W.S., Li, H.W., Zhou, Z., Yang, Y.S.: Structural Health Monitoring System for the Shandong Binzhou Yellow River Highway Bridge. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21 (2006) 3, pp. 306-317, doi:10.1111/j.1467-8667.2006.00437.x