

Ocjenjivanje postojećih konstrukcija

Jure Radić, Ana Mandić, Ivona Augustinović

Ključne riječi

postojeće konstrukcije, postupci ocjenjivanja, prikupljanje podataka, metode proračuna, Šibenski most, djelovanje vjetra

Key words

existing structures, assessment procedures, data collection, analytical methods, Šibenik bridge, wind action

Mots clés

structures existantes, procédés d'évaluation, collecte de données, méthodes analytiques, pont de Šibenik, action de vent

Ключевые слова

существующие конструкции, методы оценки, сбор данных, методы расчета, Шибенский мост, воздействие ветра

Schlüsselworte

bestehende Konstruktionen, Bewertungsverfahren, Datensammlung, Berechnungsmethoden, Šibenik-Brücke, Windeinfluss

J. Radić, A. Mandić, I. Augustinović

Izvorni znanstveni rad

Ocjenjivanje postojećih konstrukcija

Pregledno su prikazani postupci ocjenjivanja postojećih konstrukcija kroz načine prikupljanja podataka, metode proračuna i same dokazne postupke. Teorijski se postupci ocjenjivanja dijele u tri razreda i pet razina ocjenjivanja, a u praksi se prilagođavaju postavljenim zahtjevima ocjenjivanja i tipu konstrukcije. Na taj je način ocijenjen Šibenski most izložen djelovanju vjetra, kao primjer ocjenjivanja konstrukcije u više koraka kojima se povećava složenost, a time i točnost.

J. Radić, A. Mandić, I. Augustinović

Original scientific paper

Assessment of existing structures

Procedures used in the assessment of existing structures are presented systematically, through appropriate data collection methods, analytical methods, and validation procedures. Assessment procedures are theoretically divided into three categories and five levels of assessment and, in practice, these procedures are adapted to specific assessment needs and to a particular type of structure. Similar methodology was used to assess the Šibenik Bridge, which is highly exposed to wind action. This particular case is a good example of multiple-step structural assessment characterized by higher complexity, and hence by greater accuracy.

J. Radić, A. Mandić, I. Augustinović

Ouvrage scientifique original

Evaluation des structures existantes

Les procédés utilisés dans l'évaluation des structures existantes sont présentés de manière systématique, en utilisant les méthodes appropriées de collecte des données, d'analyse et de validation des résultats. En théorie, les procédés d'évaluation sont divisés en trois catégories et cinq niveaux d'évaluation et, en pratique, ces procédés peuvent être adaptés aux besoins spécifiques d'évaluation, et aux types individuels des structures. La méthodologie similaire a été utilisée dans l'évaluation du pont de Šibenik, qui est très exposé à l'action de vent. Ce cas particulier est un bon exemple de l'évaluation structurelle à plusieurs pas, qui est caractérisée par une complexité plus élevée, mais aussi par une plus grande précision.

И. Радич, А. Мандич, И. Аугустинович

Оригинальная научная работа

Оценка существующих конструкций

Наглядно показана процедура оценки существующих конструкций, а именно способы сбора данных, методы расчета и сами доказательные методы. Теоретически методы оценки делятся на три класса и пять уровней, а на практике они приспосабливаются к поставленным задачам оценки и типу конструкции. Как пример оценки конструкции приведена оценка Шибенского моста, подверженного ударам ветра. Оценка проводилась в несколько шагов, что увеличило сложность оценки, а тем самым и точность.

J. Radić, A. Mandić, I. Augustinović

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Bewertung bestehender Konstruktionen

Übersichtlich sind Verfahren der Bewertung bestehender Konstruktionen dargestellt, durch Methoden der Datensammlung, Methoden der Berechnung und die eigentlichen Beweisverfahren. Theoretisch teilt man die Bewertungsverfahren auf drei Teile und fünf Bewertungsgrade, und in der Praxis werden sie den gestellten Forderungen der Bewertung und dem Konstruktionstyp angepasst. Auf diese Art und Weise bewertete man die Brücke von Šibenik unter Windbelastung, als Beispiel der Bewertung einer Konstruktion in mehreren Schritten, wodurch die Kompliziertheit und somit auch die Genauigkeit anwächst.

Autori: Prof. dr. sc. **Jure Radić**, dipl. ing. građ.; dr. sc. **Ana Mandić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet; **Ivona Augustinović**, dipl. ing. građ., Institut IGH, Laboratorij za beton i opeku, Pula

1 Uvod

Tijekom godina konstrukcije stare, a njihova se otpornost mijenja. Do dotrajalosti konstrukcije dolazi zbog vremenskih procesa (npr. korozija, zamor) ili oštećenja konstrukcije nekim izvanrednim događajima. Kombinacija agresivnih uvjeta izloženosti, neprikladne izvedbe detalja, zanemarivanje trajnosnih problema, pogreške u izvedbi te podejnjivanje važnosti održavanja mogu rezultirati ozbiljnim oštećenjima. Potom, tijekom vremena događaju se i promjene opterećenja (npr. povećanje prometnog opterećenja na mostovima) ili se zahtijeva produljenje vijeka trajanja konstrukcije.

Osim toga, zahtjevi za konstrukcije mijenjaju se i s razvojem i osuvremenjivanjem propisa i norma u skladu s novostima u pristupu konceptu nosivosti i uporabljivosti građevina te u skladu s novim istraživanjima. Često postojeće konstrukcije, proračunate prema zastarjelim metodama i postupcima, ne zadovoljavaju danas zahtijevane razine pouzdanosti. Ovdje poglavito naglašavamo seizmičku pouzdanost konstrukcija, učinke ekstremnih vjetrova ili, primjerice, valova kod građevina uz more.

Naime, djelovanje vjetra i potresa ne mijenja se vremenski na način kako se mijenja i razvija, na primjer, prometno opterećenje mostova (težine, brzine). No u povijesti su djelovanja vjetra i potresa često bili uzrokom oštećivanja i rušenja. Nakon toga ova se djelovanja počinju detaljnije proučavati i istraživati te se razvijaju nove spoznaje o ovim djelovanjima i njihovim učincima na konstrukcije odnosno o ponašanju nosivih konstrukcija pri ovim djelovanjima (npr. vitke i dinamički podatne konstrukcije osjetljivije su na djelovanje vjetra, mogući razvoj plastičnih zglobova u stupovima visokih vijadukata u seizmičkim područjima). Osim toga, uvodi se i nova filozofija proračuna koja se oslanja na vjerojatnost otkazivanja odnosno vjerojatnost preživljavanja konstrukcija, pa to ima za posljedicu i potrebu za inovacijama propisa za opterećenja. Vjetar se npr. računa za 50-godišnji povratni period, odnosno godišnji rizik premašaja 0,02 u svakoj godini uporabe konstrukcije [2]. Potres se računa za povratni period 475 godina ili vjerojatnost premašaja u 50 godina od 10 % (0,1).

Valja istaknuti da u našoj zemlji često seizmičko djelovanje može biti za neke dijelove konstrukcije mjerodavno, a prije se ili nije uzimalo u obzir pri projektiranju ili se na potres projektiralo po zastarjelim propisima. S druge strane, prema novim hrvatskim normama referentne brzine vjetra, poglavito u priobalju, mogu zahtijevati mnogo veće opterećenje vjetrom od onog na koje su konstrukcije proračunate.

Na temelju svega iznesenog očita je sve veća važnost ocjenjivanja postojećih konstrukcija radi odabira prikladnih metoda njihova održavanja.

Ocjenjivanje stanja postojećih konstrukcija temelji se na istim osnovnim postavkama kao i projektiranje novih. Međutim, postoji vrlo bitna razlika. Naime, kada se konstrukcija projektira, konzervativizam proračunskih modela opterećenja i otpornosti općenito je povoljan jer pokriva nesigurnosti i osigurava pojednostavljenje procesa projektiranja za različite tipove konstrukcija. Osim toga, postizanje veće pouzdanosti u fazi projektiranja ne povećava bitno troškove cijele konstrukcije. Međutim, kad se ocjenjuje postojeća konstrukcija, troškovi zbog prekonzervativnih mjera mogu biti mnogo veći. Stoga je opravdano razmatranje stvarnih djelovanja i otpornosti postojeće konstrukcije.

Ocjenjivanje postojećih konstrukcija možemo definirati kao proces kojim se utvrđuje s kolikom je pouzdanošću postojeća konstrukcija sposobna preuzeti sadašnja i buduća djelovanja, ispunjavajući pri tome zadaću svog postojanja u planiranom vremenu uporabe.

Kako bi se dobile informacije o postojećoj konstrukciji prikupljaju se podaci (točka 2), provode se proračuni (točka 3) te se ocjenjuje pouzdanost postojeće konstrukcije. Širok je spektar postojećih metoda ocjenjivanja različitih složenosti, a odabir odgovarajuće metode uvelike ovisi o postavljenim zahtjevima ocjenjivanja (točka 4).

Ključno je na početku odrediti najznačajnija granična stanja. S tim graničnim stanjima vezane su određene varijable, koje valja ispitati, a onda i primjenjive metode ocjenjivanja. Granična su stanja izvan kojih konstrukcija više ne zadovoljava projektom predviđene zahtjeve, a to su nosivost i uporabljivost. U radu [13], koji se temelji na radu [12], razmatrana su tako i granična stanja nosivosti i granična stanja uporabljivosti, i to rasponskih sklopova grednih mostova na prometno opterećenje te lukova izloženih djelovanju vjetra i lukova u seizmičkoj proračunskoj situaciji.

Ovim radom opisan je cjelokupni postupak ocjenjivanja postojeće konstrukcije na primjeru Šibenskog mosta izloženog vjetrovnom opterećenju [1].

2 Prikupljanje podataka o konstrukciji

Kako bi se odredili učinci djelovanja, potrebno je prikupiti podatke o svojstvima materijala, svojstvima konstrukcije, izmjerama, kao i o prethodnim, sadašnjim i budućim opterećenjima konstrukcije. Uvjeti okoliša fizikalne, kemijske i biološke prirode mogu imati učinke na svojstva materijala. Metode prikupljanja podataka različite su točnosti i različite skupoće [18], a izbor odgovarajuće ovisi o ciljevima ocjenjivanja konstrukcije, a time i o samom postupku ocjenjivanja. Najčešće se jednostavne metode, kao npr. pregled dokumentacije, rabe za niže razine ocjenjivanja, dok je za više razine ocjenjivanja potrebno smanjiti nesigurnosti pregledom konstruk-

cije i ispitivanjem materijala. Gdje god je moguće bolje je odabrati nerazorne metode ispitivanja. Osim pribavljanja podataka koji opisuju trenutačno stanje konstrukcije, valja prikupiti i informacije o vremenskim procesima kao što je dotrajnost, što se može postignuti periodičnim ili trajnim mjerenjima (praćenje stanja konstrukcije).

Rezultati prikupljanja podataka trebaju biti u istom obliku, kako bi se mogli uspoređivati podaci dobiveni različitim metodama i kako bi se oni mogli upotrijebiti u budućim postupcima ocjenjivanja.

Najjednostavniji je način prikupljanja podataka o konstrukciji *proučavanje dokumentacije* o projektiranju i građenju te izvještaja o prethodnim pregledima i održavanju. Naravno, treba se uvjeriti da su podaci točni. Opterećenja se određuju iz važećih propisa za opterećenja, a uvjeti okoliša iz izvještaja o pregledu konstrukcije. Svojstva otpornosti, dakle svojstva materijala i konstrukcije dobivaju se iz propisa, crteža, nekih dijelova projekta građevine (proračun, geotehnički elaborat), dokumentacije o izgradnji (isporuka materijala) i iz izvještaja o prethodnim pregledima i održavanju.

Kako bi se smanjile nesigurnosti o djelovanjima i otpornosti, valja prikupiti podatke na točno određenoj lokaciji građevine ispitivanjem opterećenja, same konstrukcije i materijala. *Ispitivanja konstrukcije* provode se (i ponavljaju) da bi se ustanovili procesi dotrajnosti kao korozijska, zamor i promjene u konstrukcijskom sustavu. *Ispitivanja materijala* mogu biti razorna ili nerazorna, a provode se na gradilištu ili u laboratoriju. Ispituju se sljedeća svojstva odgovarajućim metodama:

- promjene poprečnih presjeka i uzdužne geometrije od preopterećenja (oštećenja, pukotine, napuknuća) i od procesa dotrajnosti (korozijska, ljuštenje, pukotine od zamora) utvrđuju se uporabom lasera, ultrazvučnih uređaja, kliznih mjerila i elektroničkih mjerila, ...
- cjelovitost konstrukcije (traženje skrivenog oštećenja ili nehomogenosti) uporabom, primjerice ispitivanja udarnim odzvanjanjem (ispitivanje impact echo)
- čvrstoća materijala određuje se s pomoću vlačnih i tlačnih ispitivanja na uzorcima, metodom sklerometra, ispitivanja izvlačenjem, čupanjem, kidanjem ili cijepanjem
- svojstva koja utječu na vlastitu težinu ili dodatno stalno opterećenje (gustoća materijala, stalna oprema)
- svojstva vezana za položaj konstrukcije i vijek trajanja (uvjeti okoliša, karbonatizacija i sadržaj klorida u betonu) određuju se ispitivanjem pH, nekim drugim kemijskim ispitivanjima, analizom sadržaja klorida na uzorcima
- svojstva uporabljivosti (širine pukotina, stanje kolnika na cestama).

Kada se uporabom prethodnih načina prikupljanja podataka o konstrukciji ne može utvrditi ponašanje konstrukcije ili se dobivaju neočekivani rezultati, valja ispitati ponašanje konstrukcije, odnosno na koji način ona ispunjava uvjete koji su joj postavljeni. Statičko i/ili dinamičko ponašanje mjeri se jednom, periodično ili stalno, kako bi se dobili podaci o zahtijevanim svojstvima konstrukcije.

Na temelju *praćenja stvarnih djelovanja* na konstrukciju razvijaju se lokalizirani modeli promjenjivog opterećenja koji se kod viših razina ocjenjivanja rabe umjesto normiranih modela djelovanja.

2.1 Pregledi dokumentacije o Šibenskom mostu

Izvorni nacrti Šibenskog mosta nisu pronađeni te su podaci o projektiranoj konstrukciji prikupljeni iz knjiga, članaka u časopisima i zbornicima [14, 20, 21, 22]. Ovi se podaci uvijek ne poklapaju u potpunosti te upozoravaju na iznimnu važnost stvaranja baze podataka o konstrukciji već pri njezinu projektiranju.

Luku Šibenskog mosta raspona 246 m i strelice 30,8 m, sandučastoga poprečnog presjeka s tri komore postupno se povećava debljina od peta prema tjemenu. Izveden je konzolnim postupkom uz pomoć privremenih prednjih zatega i stražnjih zatega koje su bile usidrene u masivne upornjake s kamenom ispunom. Prilazni i nadlučni sklop projektirani su kao nizovi slobodno oslonjenih roštiljnih konstrukcija sastavljenih od predgotovljenih prednapetih nosača monolitno povezanih na mjestu poprečnim gredama nad ležajima i u trećinama raspona. Pri projektiranju mosta naglašeno je bilo rješavanje tehnologije građenja pa su predviđeni mali zaštitni slojevi betona, što je kasnije donijelo trajnosne probleme.

2.2 Pregledi važećih propisa u doba projektiranja i danas kada se provodi ocjena

Šibenski je most izgrađen 1966. godine te je projektiran prema tadašnjim Privremenim tehničkim propisima. Stoga je valjalo ove propise proučiti i usporediti ih s današnjim zahtjevima, u ovom primjeru, s obzirom na vjetrovno opterećenje.

Prema starim Privremenim tehničkim propisima za opterećenja mostova na putovima iz 1949. godine [6], rasponska se konstrukcija pod prometom proračunava na jednak pritisak vjetra u pojedinoj zoni bez obzira na visinu nad terenom I-0,6, II-0,9 i III-1,3 kN/m², dok se promjena pritiska vjetra s visinom može primijeniti kod stupova i lukova primjenom Privremenih tehničkih propisa za opterećenje zgrada. Iznad prometne površine vjetru je izložen prometni trak visine 2,0 m. Most neopterećen prometom mora se ispitati na djelovanje pritiska veličine 2,5 kN/m².

Proračun vjetrovnog opterećenja u skladu s važećom hrvatskom normom HRN ENV 1991-2-4 [8], koja je preuzela europsku prednormu iz 1995. godine, mnogo je složeniji i kada se za dinamički umjereno osjetljive konstrukcije primjenjuje zamjenjujuće statičko opterećenje. Sile vjetra djeluju na most u svim smjerovima, a dobivaju se množenjem usporednoga tlaka srednje brzine vjetra q_{ref} s koeficijentom izloženosti $c_e(z_e)$, dinamičkim koeficijentom odziva konstrukcije na udar vjetra c_d , aerodinamičnim koeficijentom sile vjetra c_f i usporednom ploštinom djelovanja vjetra A_{ref} . Usporedni tlak srednje brzine vjetra ovisan je o usporednoj brzini vjetra v_{ref} koja se određuje prema osnovnoj vrijednosti usporedne brzine vjetra $v_{ref,0}$ koja je prikazana u zemljovidu Hrvatske za područja opterećenja vjetrom u nacionalnom dodatku za primjenu norme, a korigira se s obzirom na nadmorsku visinu.

Najnovijom europskom normom EN 1991-1-4 iz 2005. godine [4] proračun je izmijenjen, i to ponajprije stoga što se dinamički koeficijent odziva konstrukcije na udar vjetra c_d iz hrvatske norme ovdje na upotrebljava, primjenjuju se nešto izmijenjene vrijednosti koeficijenata izloženosti $c_e(z_e)$, a usporedni tlak srednje brzine vjetra q_{ref} zamjenjuje se osnovnim tlakom vjetra q_b . Osnovna brzina vjetra v_b određuje se prema temeljnoj vrijednosti osnovne brzine vjetra $v_{b,0}$ pri čemu europska norma ne daje korekciju ovisno o nadmorskoj visini.



Slika 1. Pogled na Šibenski most na kojem je niveleta prognuta

Proračun u skladu s hrvatskom i europskom normom potanje je opisan i uspoređen u [19].

Prema propisima iz doba projektiranja Šibenskog mosta, opterećenje vjetrom na prometom neopterećen rasponski sklop iznosi 4,48 kN/m, dok se prema današnjoj hrvatskoj normi to opterećenje penje iznad 10 kN/m. Razlika u opterećenju vjetrom rasponskog sklopa pod prometnim opterećenjem ipak je nešto povoljnija, 4,55 kN/m prema starom PTP-5, odnosno 7,80 kN/m prema HRN ENV 1991-2-4.

2.3 Pregledi konstrukcije Šibenskog mosta, geodetska mjerenja i ispitivanja materijala

Osim podataka o projektiranoj konstrukciji, presudno je skupiti i podatke o promjenama koje su se dogodile tijekom njezina trajanja odnosno uporabe [11].

Niveleta Šibenskog mosta projektirana je kao jednostrano nagnuta te joj je pri izgradnji dano konveksno nadvišenje od svega 5 cm. Već 10 godina nakon puštanja mosta u promet ostvarile su se deformacije luka veće od predviđenih te je niveleta mosta u tjemenu luka 30 do 35 cm niža od projektirane.



Slika 2. Oštećenja luka u peti i oštećenja stupa

Na temelju vizualnog pregleda koje je 1989. godine proveo Zavod za konstrukcije Građevinskog instituta Split [9], ustanovljeno je da je od svih dijelova mosta kolnička konstrukcija najviše oštećena zbog vode s kolnika, pojave poprečnih reški u kolniku na mjestima oslonaca te neizvedene hidroizolacije. U sklopu ovog pregleda navedene su mjere koje treba hitno poduzeti da bi se smanjilo daljnje propadanje nosive konstrukcije (skidanje zastora, izrada hidroizolacije te izrada novih završnih slojeva na mostu) te je dan program istražnih radova. Ove mjere i radovi nisu provedeni.

Godine 1995. Hrvatski institut za mostove i konstrukcije (HIMK) proveo je glavni pregled i ispitivanja s iscrpnom analizom stanja mosta [9]. Karakteristični elementi konstrukcije ispitani su nerazornim ispitivanjem mehaničkih svojstava betona (ultrazvukom, sklerometrom, pull-out testom), ispitivanjem stanja armature (mjerenje širine pukotina, mjerenje potencijala korozije, ispitivanje debljine zaštitnog sloja), utvrđivanjem tlačne čvrstoće betona na valjcima, kemijskom analizom sadržaja klorida te dubinom karbonatizacije i stupnja lužnatosti. Nakon ovog pregleda provedena je sanacija manjih oštećenja te ratnih oštećenja na glavnim nosačima primjenom morta.

Posljednji glavni pregled Šibenskog mosta također je proveo HIMK u proljeće 2005. godine [9]. Tada je proveden detaljni vizualni pregled svih dijelova – prometne površine i opreme mosta te masivnih dijelova konstrukcije uz primjenu pokretne skele za pregled teško dostupnih dijelova, kao što su podgled glavnih nosača i konzola pješačkih staza, poprečni nosači, vijenci, gornji dijelovi stupova, zid upornjaka, vanjski zidovi i donja ploha tjemene konstrukcije luka. Provedeno je i mjerenje širine pukotina, mjerenje prodora klorida i mjerenje debljine zaštitnog sloja.

Geodetskim mjerenjem provjereni su karakteristični presjeci na kolniku u 7 mjernih točaka (presjeci na upornjacima, iznad stupova, u sredinama raspona te iznad tjemena luka, i to u točki osi nivelete, ruba kolnika uz rubnjake, gornjeg ruba rubnjaka i vanjskog ruba vijenaca) a gornji rub luka na udaljenostima od 5,0 m.

Ovim pregledom potvrđene su informacije o lošem stanju betona i koroziji armature glavnih nosača i poprečnih nosača iznad stupova i daljnje pogoršanje stanja nadlučne konstrukcije. Sva oštećenja vidljiva na stupovima (ljuskanje betona, mjestimično odlomljen beton zaštitnog sloja i korodirani glavna armatura i vilice) posljedica su loše ugradbe betona, malog zaštitnog sloja i ratnih razaranja. Oštećenja unutarnjih ploha luka uglavnom su posljedica nekvalitetne izvedbe, a oštećenja vanjskih ploha luka dogodila su se ponajprije zbog malog zaštitnog sloja betona do armature, pa je korodirana armatura vidljiva pri petama luka, pogotovo na strani prema Šibeniku.

3 Rekonstrukcija nacrt, proračunski model konstrukcije i metode proračuna

Na temelju prikupljenih podataka o konstrukciji rekonstruiraju se nacrti mosta te se kreira odgovarajući proračunski model, uzimajući u obzir svojstva materijala (kvaliteta betona i armature), djelotvornost armature, smanjenje poprečnog presjeka, eventualne promjene položaja osi konstrukcije, raspodjelu masa itd. Proračunski model valja što je moguće više uskladiti sa stvarnim stanjem na postojećoj konstrukciji – on mora prikladno pokazivati ponašanje konstrukcije, otpornost njezinih dijelova i opterećenja na konstrukciju. Razlikujemo jednostavne, složene i prilagođavajuće metode proračuna.

Za niže razine ocjenjivanja često je djelotvorno proračunavati učinke djelovanja osnovnim metodama na jednostavnim proračunskim modelima, uzimajući u obzir stranu sigurnosti. Tipične jednostavne metode proračuna su one koje se provode na prostornim okvirima i roštiljima (štapni elementi), uzimajući u obzir pojednostavljene raspodjele opterećenja i linearnoelastično ponašanje materijala, što rezultira rješenjem ravnoteže na donjoj granici.

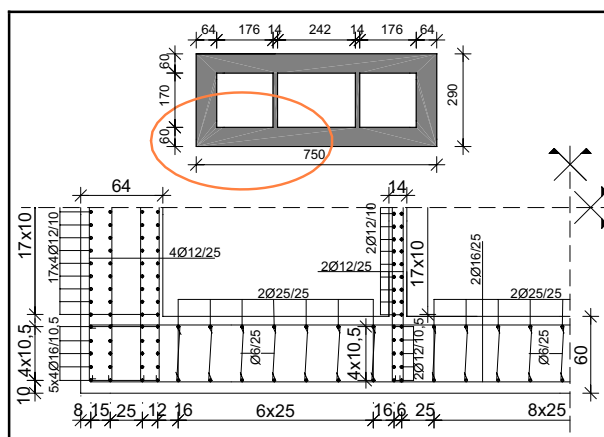
Kada je niža razina ocjenjivanja zakazala, valja rabiti detaljnije odnosno složene metode proračuna. One uključuju metodu konačnih elemenata i nelinearne metode (analiza granice popuštanja) koje mogu rezultirati većim kapacitetom nosivosti. Specifično modeliranje vremenski promjenjivog ponašanja materijala (skupljanje i pužanje armiranobetonskih i prednapetih betonskih konstrukcija), te uzimanje u obzir međudjelovanja između sastojaka nekog materijala (prianjanje, utjecaj ugrađene armature), otkrit će skrivene rezerve konstrukcije i smanjiti utjecaj jednostavnijih metoda.

Kako bi se u sklopu ocjenjivanja konstrukcije upotrijebile nove informacije o njezinom ponašanju (npr. zbog dugotrajnog promatranja), proračunske modele treba prilagođavati. Prilagođavajućim modelima moguće je obnoviti konstrukcijske varijable (npr. svojstva krutosti) uporabom izmjerenih podataka, kao što su promjene u pomacima, deformacijama, vrijednostima oštećenja (npr. širine pukotina).

3.1 Model Šibenskog mosta

Proračun Šibenskog mosta izloženog vjetrovnom opterećenju bilo je potrebno provesti na modelu cjelokupne konstrukcije. Primijenjen je prostorni proračunski model sastavljen od štapnih konačnih elemenata luka, stupova i rasponskog sklopa kojima su pridruženi odgovarajući poprečni presjeci na temelju rekonstruiranih nacrti [1, 12].

U presjecima lukova i stupova upisana je stvarno ugrađena armatura. Podaci o količini i rasporedu armature u presjecima stupova nisu bili dostupni, pa su poslužili podaci o armaturi stupova Paškog mosta koji su približno jednakog poprečnoga presjeka kao i na Šibenskom mostu, uz kontrolu minimalno potrebne armature u odnosu od 0,4% betonskog presjeka.



Slika 3. Poprečni presjek s armaturom u peti luka

Prednapeti su glavni nosači nadlučne konstrukcije iznad stupova međusobno povezani poprečnim nosačem koji

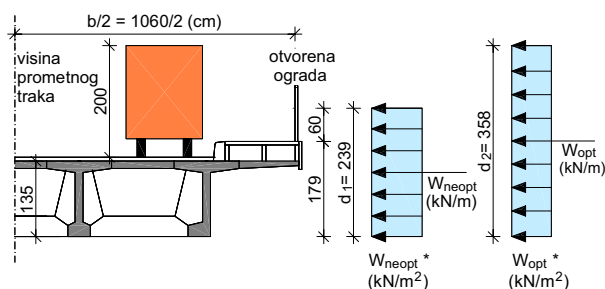
je svojim donjim krajem vertikalnom armaturom usidren u stup ispod njega, dok je u njegovu gornjem dijelu po sredini poprečnog presjeka po čitavoj duljini poprečnog nosača izvedena vertikalna razdjelnica. Stoga je spoj stupova s nadlučnom konstrukcijom modeliran tako da su dva stupa pri vrhu fiksno spojena s poprečnim nosačem, a nadlučni sklop je nepomičnim vezama spojen za krajnje točke poprečnih nosača.

Na krajevima svakog raspona, zbog dilatacije iznad stupova, modeliraju se zglobovi da bi rasponska konstrukcija djelovala kao niz slobodno oslonjenih greda. Čvorovi na mjestu upetosti stupova u temelje i luk modeliraju se potpuno upetima, a ležajevi nad upornjacima kao zglobovi sa spriječenim pomacima i oslobođenim zaokretanjem oko poprečne osi.

3.2 Modeliranje opterećenja za ocjenu Šibenskog mosta

Vlastita se težina proračunava računalnim programom na temelju površina zadanih poprečnih presjeka i volumnih masa materijala koje su im dodijeljene. Dodatno stalno opterećenje po cijeloj širini mosta svodi se na kontinuirano u uzdužnom smjeru. Dodatno se zadaju i opterećenja od dijelova koji u modelu nisu zadavani kao elementi, npr. dijafragme luka i poprečni nosači u trećinama raspona.

Opterećenje vjetrom se mijenja s visinom promatranog elementa konstrukcije nad terenom te ga je potrebno računati za različita visinska područja. Osim toga, različitog je intenziteta vjetar koji puše na most kojim ne teče promet i na most pod prometnim opterećenjem. Nadalje, potrebno je razmotriti i djelovanje vjetra poprijeko i djelovanje vjetra uzduž osi mosta [1].



$$w_{neopt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{b,1}^2 \cdot c_e(z) \cdot c_{f,1} \cdot d_1 \text{ (kN/m)}, \quad v_{b,1} = 35 \text{ m/s}$$

$$w_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{b,2}^2 \cdot c_e(z) \cdot c_{f,2} \cdot d_2 \text{ (kN/m)}, \quad v_{b,2} = 23 \text{ m/s}$$

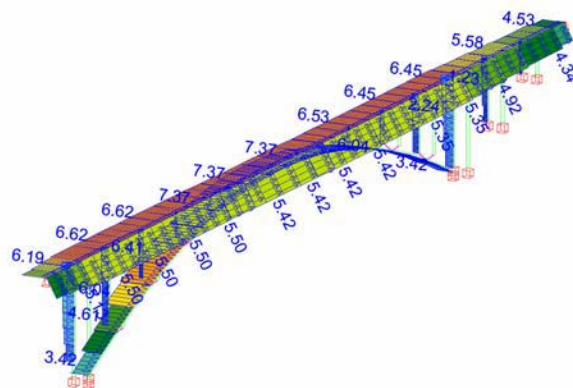
Slika 4. Djelovanje vjetra na rasponsku konstrukciju

Na primjeru Šibenskog mosta valjalo je prvo razmotriti djelovanje vjetra na rasponsku konstrukciju za most kojim ne teče promet i za most pod prometnim optereće-

njem. Ova su opterećenja promjenljiva duž mosta s obzirom na promjenljivu visinu nad terenom od upornjaka do područja iznad tjemena luka. Ekscentrično opterećenje vjetrom na rasponsku konstrukciju izaziva i dodatni moment torzije. Djelovanje vjetra uzdužno na rasponsku konstrukciju uzima se kao 25 % vrijednosti sile proračunate za poprečni smjer.

Vjetar na stupove, osim što se povećava s visinom stupa, različitog je intenziteta kada djeluje poprečno odnosno uzdužno na os mosta jer različiti odnosi dimenzija poprečnog presjeka stupa rezultiraju različitim aerodinamičnim koeficijentom sile.

Djelovanje vjetra na luk mijenja se s visinom osi luka nad terenom, a uz to je zbog promjenjive visine poprečnog presjeka luka od pete prema tjemenu promjenjiv i aerodinamični koeficijent sile. Djelovanje vjetra uzdužno na luk može se uzeti sa 25 % vrijednosti djelovanja vjetra poprečno na luk.



Slika 5. Prikaz opterećenja vjetrom poprečno na os mosta

4 Ocjenjivanje postojećih konstrukcija

Ocjenjivanja postojećih konstrukcija moguće je provoditi postupcima različite složenosti i uz ulaganje različitih napora. Općenito se postupci ocjenjivanja dijele u tri razreda [18]:

Ocjene temeljene na mjerenjima – metode su u kojima se učinci djelovanja određuju izravnim mjerenjima, a ne proračunima konstrukcije. Kako se mjere uporabljivosti mogu odrediti samo izravnim mjerenjima ovo su metode ocjene isključivo graničnih stanja uporabljivosti.

Ocjene temeljene na modelima – metode su u kojima se učinci djelovanja određuju proračunskim modelima. Ovim se metodama mogu modelirati, pa stoga i ocjenjivati, i granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti. Metode se sastoje od tri koraka: 1. prikupljanja podataka o djelovanjima i otpornosti konstrukcije → 2. proračuna učinaka djelovanja na modelu konstrukcije → 3. ocjene nosivosti i uporabljivosti.

Tablica 1. Razredi i razine ocjenjivanja konstrukcija i odgovarajući postupci

RAZREDI OCJENJIVANJA		POSTUPAK OCJENJIVANJA		
Cilj ocjenjivanja	razina ocjene			
NEFORMALNE OCJENE		Vizualni pregledi		
Kvalitativne ocjene stanja	razina 0	Ocjenjivanje učinaka dotrajalosti (pukotine, ljuštenje, odlamanje, korozija) po iskustvu inženjera		
OCJENE TEMELJENE NA MJERENJIMA		Određivanje učinaka djelovanja	Dokazni postupak	
Kvantitativno ocjenjivanje uporabljivosti	razina 1	Mjerenje vrijednosti određenih parametara pod uporabnim opterećenjem	Usporedba izmjerenih i graničnih vrijednosti	
OCJENE TEMELJENE NA MODELIMA		Prikupljanje podataka	Model proračuna	Dokazni postupak
Kvantitativno ocjenjivanje nosivosti i uporabljivosti	razina 2	Iz projekata i propisa Pregledi	Osnovni modeli Detaljniji modeli	Deterministički (izvanredno) Poluprobabilistički (parcijalni koeficijenti)
	razina 3	Pregledi konstrukcije (izmjere) i ispitivanja materijala	Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni) Prilagođeni modeli	Poluprobabilistički (parcijalni koeficijenti)
	razina 4	Praćenja (monitoring) za prepoznavanje sustava Praćenje opterećenja Dokazna opterećenja	Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni) Prilagođeni modeli	Poluprobabilistički (parcijalni koeficijenti) Približne probabilističke metode (FORM, SORM)
	razina 5	Kao za razine 3 i 4 + Statistička svojstva podataka	Jednostavni i prilagođeni modeli Stohastički modeli konačnih elemenata	Približne probabilističke metode (FORM, SORM) Simulacijske probabilističke metode (MCS)

Neformalne ocjene – metode su temeljene na iskustvu i prosuđivanju inženjera koji se ocjenjivanjem bavi. Stanje konstrukcije ocjenjuje se na temelju vizualnog pregleda. Stoga su više-manje subjektivne i primjenjuju se samo izvanredno.

Predložene razine ocjenjivanja u tablici 1 [17, 18], objašnjene u nastavku, nisu stroge i granice među njima su fleksibilne. Postupak ocjenjivanja valja prilagoditi tipu konstrukcije. Preporučuje se ocjenjivanje započeti jednostavnim postupcima niže razine i ako se takva ocjena pokaže nezadovoljavajućom započeti detaljniju, višu razinu ocjenjivanja. U radu [12] razvijen je, između ostalog, i postupak ocjene stanja lukova izloženih vjetrovnom opterećenju u tri koraka: linearni proračun, nelinearni proračun, procjena pouzdanosti (vidi [13]). Ovdje je primjena tog postupka na cjelokupni Šibenski most detaljno prikazana.

Ocjena ispunjavanja uvjeta uporabljivosti (razina 1)

Na razini 1 učinci djelovanja određuju se mjerenjima te se uporabljivost postojeće konstrukcije ocjenjuje usporedbom izmjerenih i graničnih vrijednosti koje su ili dane propisima ili određene individualno. Ocjenjivanje se provodi pod stvarnim ili pod pokusnim opterećenjem. Uobičajena je primjena ove metode:

- pri ispitivanju uporabljivosti ili sigurnosti prometa prije promjena uvjeta uporabe mjerenjem statičkih i dinamičkih parametara (npr. progibi stropova u zgradama, progibi, nagibi, ubrzanja i prirodne frekvencije željezničkih mostova za povećane brzine vlakova)
- pri nadziranju dinamičkih opterećenja mjerenjem dinamičkih parametara kao što je povećanje amplituda osciliranja zbog lošeg stanja kolnika na cestovnim mostovima (dinamički koeficijent)
- pri nadziranju ponašanja gotovo neprikladnih konstrukcija mjerenjem statičkih i dinamičkih parametara (npr. progibi, rast pukotina).

Ocjena pristupom parcijalnih koeficijenata temeljena na pregledu dokumentacije (razina 2)

Parcijalni se koeficijenti pronalaze u propisima ili smjernicama. Ako ne postoje smjernice za ocjenjivanje postojećih konstrukcija s odgovarajućim vrijednostima parcijalnih koeficijenata rabe se njihove vrijednosti dane u propisima za projektiranje novih konstrukcija. Na razini 2 ocjenjuje se nosivost i uporabljivost postojeće konstrukcije na jednostavnim proračunskim modelima (ponekad se zahtijevaju detaljniji proračuni i metoda konačnih elemenata) uporabom podataka o otpornosti konstrukcije i djelovanjima iz glavnih i izvedbenih projekata, ins-

pekijske dokumentacije i propisa. Iznimka su specifične vrijednosti koje su uzrokovale potrebu za ocjenjivanjem, kao npr. oštećenja konstrukcije ili izvanredna opterećenja. Moguće je u ocjenu uključiti i spoznaje o konstrukciji dobivene na temelju vizualnih pregleda. Uobičajena je primjena ove metode:

- pri dokazivanju nosivosti i uporabljivosti nakon nastanka oštećenja uzrokovanih izvanrednim djelovanjima kao što su izvanredno prometno opterećenje, udari, potres, oluja ...
- pri dokazivanju nosivosti i uporabljivosti nakon stvaranja oštećenja zbog dotrajalosti (posljedice zamora, korozija ili neki drugi proces dotrajalosti)
- pri utvrđivanju nosivosti i uporabljivosti zbog promjena uvjeta uporabe konstrukcije, (npr. prenamjena neke prostorije zgrade u skladište ili očekivani prijelaz izvanrednih vozila preko mosta na što konstrukcije nisu izvorno proračunane).



Slika 6. Dinamičko i statičko ispitivanje jednoga staroga željezničkog mosta

Ocjena pristupom parcijalnih koeficijenata temeljena na dodatnim ispitivanjima (razina 3)

Kao i u prethodnoj razini 2 i u razini 3 ocjene, parcijalni koeficijenti pronalaze se u propisima ili smjernicama. Kada prethodna ocjena nije zadovoljavajuća, potrebno je točnije odrediti svojstva materijala (mehanička i kemijska), geometrijske izmjere i skrivena oštećenja ili nehomogenosti. Ispitivanja materijala provode se na građevini ili u laboratoriju i to na određenom broju uzoraka. Rezultati se statistički obrađuju da bi se odredile karakteristične vrijednosti ispitanog svojstva na samoj građevini. Geometrijske izmjere primjenjuju se s nazivnim vrijednostima.

Na ovoj razini obično postaju potrebni detaljniji proračunski modeli, a valja provjeriti njihovu usklađenost sa stvarnošću. Stoga je preporučljivo odrediti pokazatelje kao što su progib u sredini raspona, deformacije (odnosno naprezanja), prirodne frekvencije i modalne oblike čije vrijednosti uspoređujemo na stvarnoj konstrukciji i na proračunskom modelu. U proračunske modele valja uključiti parametre konstrukcije: krutost poprečnog presjeka (modul elastičnosti, izmjere, krutost rasponskog sklopa i dodatnih elemenata), zglobove i fleksibilnost

ležajeva, raspodjelu masa i svojstva prigušenja i prisilne deformacije koje utječu na ponašanje konstrukcije (npr. vanjsko prednapinjanje).

Kada se ocjenjuju rasponski sklopovi mostova, zbog različitih prometnih uvjeta na različitim vrstama cesta (lokalne, državne, autoceste), različitih dinamičkih učinaka (neravnosti kolnika) i različite poprečne raspodjele, normirana prometna opterećenja zamjenjuju se onima prilagođenim danoj lokaciji mosta sa smanjenim učincima.

Kada je nakon određenog vremena uporabe konstrukcije, pri ponovljenom ocjenjivanju, potrebno dopuniti znanje o otpornosti konstrukcije ili nekog njezina dijela, na samoj se građevini provode ispitivanja pojedinih konstrukcijskih elemenata ili ponašanje konstrukcije u cijelosti. Na temelju novih podataka dopunjuju se prethodne funkcije raspodjele pojedinih svojstava, a time i njihove karakteristične vrijednosti.

Ocjena ciljane pouzdanosti uz modificirane parcijalne koeficijente (razina 4)

Na osnovi svojstava pouzdanosti određene konstrukcije, ciljane se pouzdanost uspostavlja kao kriterij ocjene razine 4. Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima da bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti. Specifična svojstva pouzdanosti konstrukcije jesu:

- povijest opterećenja – na primjer ako je most bio u uporabi dovoljno dugo, razumno je pretpostaviti da je mogao biti izložen nekom izvanrednom djelovanju
- posljedice otkazivanja – male, srednje, velike i vrlo opasne posljedice otkazivanja s obzirom na koje se konstrukcije dijele, i to na temelju odnosa ukupnih troškova (koji uključuju troškove izgradnje i troškove zbog otkazivanja) i troškova izgradnje konstrukcije
- zalihe ili rezerve konstrukcije – prema kojima se konstrukcije dijele u skladu s vrstom sloma, ako se slom događa, na duktilne konstrukcije s visokim rezervama nosivosti i konstrukcije s krhkim slomom
- upozorenje pred slom – vrijednost ciljane pouzdanosti može se smanjiti ako je periodičnim ispitivanjem ili sustavom praćenja omogućeno uočiti upozorenje sloma.

Potpuna probabilistička ocjena (razina 5)

Glavni rezultat probabilističke ocjene na razini 5 jest vjerojatnost otkazivanja odnosno odgovarajući indeks pouzdanosti konstrukcije ili njezina elementa. Za razliku od koncepta parcijalnih koeficijenata, gdje su proračunski parametri konačni, a nesigurnosti se uzimaju u

obzir parcijalnim koeficijentima, vjerojatnost otkazivanja izravno ovisi o nesigurnostima u parametrima opterećenja i otpornosti.

Nesigurnosti se modeliraju primjenom odgovarajućih funkcija raspodjele za svaku osnovnu varijablu te se za definirano granično stanje proračunava vjerojatnost otkazivanja odnosno odgovarajući indeks pouzdanosti za pojedine dijelove konstrukcije ili konstrukciju u cijelosti. Vrlo je važno da inženjer koji se bavi ocjenjivanjem konstrukcije bude svjestan toga da je proračunani indeks

pouzdanosti konstrukcije pokazatelj pouzdanosti, a ne apsolutna mjera nosivosti i uporabljivosti. Ovaj se indeks uspoređuje s prihvatljivom razinom nosivosti i uporabljivosti (ciljana pouzdanost).

Postupak probabilističke ocjene prikazan je na slici 7.

Ciljana pouzdanost

Vjerojatnosti otkazivanja valja usporediti s dopuštenom graničnom vrijednošću koja se izražava kao tražena ili ciljana vrijednost indeksa pouzdanosti β_{target} . Teorija pouzdanosti konstrukcija ne daje pravila za izbor tražene razine pouzdanosti. Pitanje je koju razinu zahtijevati da bi konstrukcija (ili njezin pojedini dio) u okviru raspoloživih informacija mogla biti proglašena dovoljno pouzdanom.

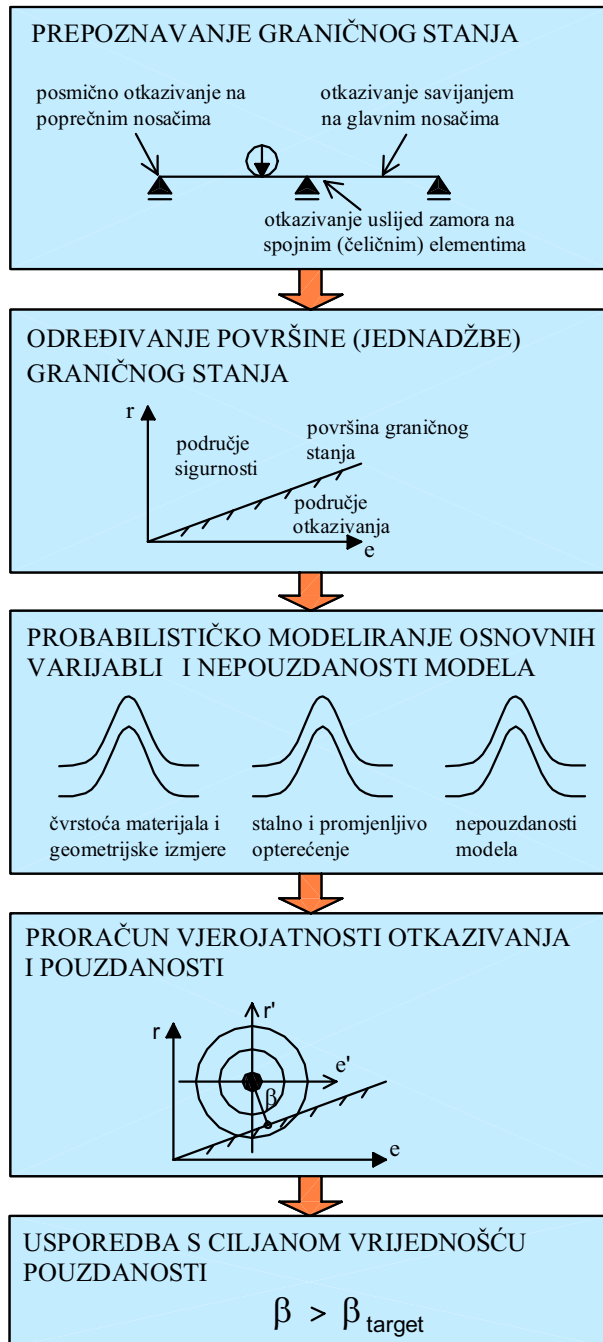
Treba istaknuti da je potrebno razlikovati tražene pouzdanosti za različita granična stanja. Tražena pouzdanost za granično stanje uporabljivosti može biti manje stroga negoli ona tražena za granično stanje nosivosti. Na sličan način, posljedice otkazivanja, kao i tip sloma (krhki ili plastični), moraju utjecati na proračun prihvatljivih vjerojatnosti. I konačno referentni period valja uključiti u proračun. Godišnje su vjerojatnosti otkazivanja, naravno, manje od vjerojatnosti otkazivanja u uporabnom vijeku konstrukcije.

Na primjer, osnovna europska norma EN 1990 [6] daje prihvatljivu godišnju vjerojatnost otkazivanja $1,3 \times 10^{-6}$ kojoj odgovara indeks pouzdanosti $\beta = 4,7$ i 50-godišnju vjerojatnost otkazivanja $7,2 \times 10^{-5}$ ($\beta = 3,8$) za granično stanje nosivosti te godišnju $1,4 \times 10^{-3}$ ($\beta = 3,0$) i 50-godišnju $7,0 \times 10^{-2}$ ($\beta = 1,5$) za granično stanje uporabljivosti.

Navedeni indeksi pouzdanosti upotrebljavaju se pri projektiranju novih konstrukcija. No ovaj je problem mnogo ozbiljniji za postojeće konstrukcije kojih velik broj više ne zadovoljava nove norme, a fondovi za njihovo pojačanje su ograničeni. Stoga postoji jak ekonomski poticaj za potpuno određivanje i kapaciteta i vijeka konstrukcija.

Probabilistička modelska pravila JCSS (*Joint Committee on Structural Safety*) [5] predlažu indekse pouzdanosti prema tablici 2. vodeći računa da ciljana pouzdanost ovisi o posljedicama otkazivanja konstrukcije ali i o relativnim troškovima koje valja uložiti za povećanje pouzdanosti. Veća je vrijednost indeksa pouzdanosti potrebna što su veće posljedice otkazivanja i što su ulaganja za osiguranje odgovarajuće pouzdanosti manja.

Kada djelovanja imaju statistički neovisne maksimalne godišnje vrijednosti, indeks pouzdanosti za različite povratne periode može se odrediti prema sljedećem odnosu [3]:



Slika 7. Shema postupka probabilističke ocjene [18]

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n$$

gdje je:

Φ - funkcija raspodjele standardizirane normalne varijable

β_n - indeks pouzdanosti za povratni period od n godina

β_1 - indeks pouzdanosti za jednogodišnji period

Tablica 2. Ciljane vrijednosti indeksa pouzdanosti prema JCSS [23] pretvorene s jednogodišnjega na 50-godišnje razdoblje

Relativni troškovi za postizanje pouzdanosti	Granično stanje nosivosti		
	manje posljedice otkazivanja	umjerene posljedice otkazivanja	velike posljedice otkazivanja
veliki	$\beta = 1,7$	$\beta = 2,0$	$\beta = 2,6$
uobičajeni	$\beta = 2,6$	$\beta = 3,2$	$\beta = 3,5$
mali	$\beta = 3,2$	$\beta = 3,5$	$\beta = 3,8$

4.2 Linearni proračun Šibenskog mosta

U prvom koraku ocjenjujemo Šibenski most na djelovanje normiranoga vjetrovnog opterećenja linearnim proračunom uz uzimanje u obzir geometrijske nelinearnosti.

U presjecima lučnih nosača pojavljuju se uzdužne sile od stalnog opterećenja koje mogu imati u kombinaciji s momentima savijanja od vertikalnog stalnog opterećenja i horizontalnog opterećenja vjetrom povoljne učinke. Stoga provjeravamo dvije kombinacije djelovanja:

$$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot W$$

$$1,00 \cdot G + 1,5 \cdot W$$

Proračun je proveden posebno za opterećenje vjetrom poprečno i posebno za opterećenje vjetrom uzdužno na most, odakle se dobiva potrebna površina armature za stupove i luk. Mjerodavni su rezultati za prvu kombinaciju i poprečno djelovanje vjetra prikazani u tablici 3. [1].

Na temelju linearnog proračuna moguće je donijeti sljedeće zaključke:

- kod luka najkritičnija su prva dva odsjeka uz pete luka, dakle 8 % ukupne dužine luka sa svake strane, gdje je potrebna armatura čak 3-3,8 puta veća od postojeće.
- najkritičniji su stupovi S5 i S6 uz tjeme luka koji trebaju čak 6 puta veću površinu armature od postojeće.

Tablica 3. Mjerodavni rezultati linearnog proračuna Šibenskog mosta na vjetrovno opterećenje

Element konstrukcije	$A_{\text{potrebna}} / A_{\text{postojeća}}$
1. odsječak luka uz petu lijevo	3,81
2. odsječak luka uz petu lijevo	3,16
3. odsječak luka od pete lijevo	1,10
4. odsječak luka od pete lijevo	1,06
4. odsječak luka od pete desno	1,06
3. odsječak luka od pete desno	1,10
2. odsječak luka od pete desno	2,71
1. odsječak luka uz petu desno	2,99
S2 – uz rasponsku konstrukciju duljine 4,9 m	1,55
S2 – uz luk duljine 4,76 m	2,26
S3 – uz rasponsku konstrukciju duljine 4,9 m	1,30
S3 – uz luk duljine 6,0 m	1,95
S5 – cijeli stup	6,26
S6 – cijeli stup	5,97
S8 – uz luk duljine 4,75 m	1,07

4.3 Nelinearni proračun Šibenskog mosta

U drugom koraku proračun provodimo uzimajući u obzir geometrijsku i materijalnu nelinearnost. Armaturu ograničavamo na stvarno ugrađenu, a promjenjivo opterećenje zadajemo u koracima do konačnog sloma konstrukcije. I ovdje provjeravamo dvije kombinacije djelovanja:

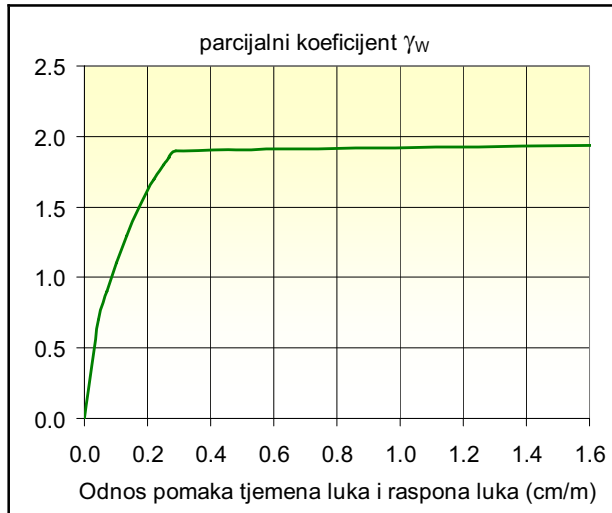
$$1,35 \cdot G + \gamma_w \cdot W$$

$$1,00 \cdot G + \gamma_w \cdot W$$

gdje parcijalni koeficijent za promjenjivo djelovanje vjetra povećavamo u koracima $\gamma_w = 0; 0,5; 0,6; 0,7; \dots; 1,5; 1,6; 1,7 \dots$. Konstrukcija prolazi kroz korake opterećenja pri čemu se u njoj mijenjaju krutosti presjeka te naprezanja. Takvim načinom proračuna pratimo pri kojoj razini opterećenja, odnosno vrijednosti parcijalnog koeficijenta za vjetar γ_w dolazi do sloma. Kao rezultat proračuna u poprečnom smjeru promatra se pomak u tjemenu luka, a pri proračunu u uzdužnom smjeru pomak u području $\frac{1}{4}$ raspona luka.

U sklopu ovog koraka razlikujemo tri razine proračuna. Ponajprije smo proračun proveli provjeravajući elemente luka i elemente svih stupova zajedno. Rezultat je ove faze parcijalni koeficijent za vjetar $\gamma_w = 1,25$ što je manja vrijednost od normiranog $\gamma_w = 1,5$. Kako je linearni proračun pokazao da su tjemeni stupovi najkritičniji, u drugoj fazi oni su izostavljeni iz razmatranja te dobiveni parcijalni koeficijent za vjetar iznosi $\gamma_w = 1,7$, što je za-

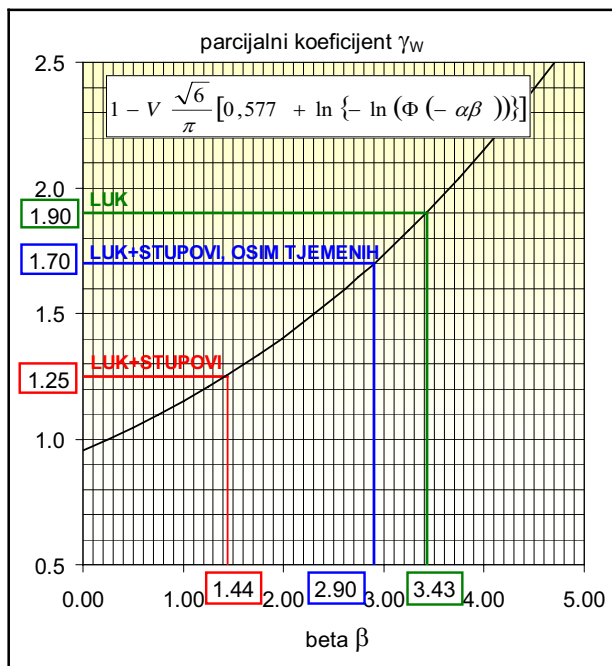
dovoljavajuće. U trećoj su fazi razmatrani samo elementi luka, pri čemu parcijalni koeficijent za vjetar iznosi $\gamma_w = 1,9$. Dakle sam luk ima još veću sigurnost na vjetrovno opterećenje nego kad se promatra zajedno sa stupovima.



Slika 8. Dijagram ovisnosti parcijalnog koeficijenta za vjetar i pomaka u tjemenu luka u odnosu na raspon luka za nelinearni proračun elemenata luka

4.3 Procjena pouzdanosti Šibenskog mosta

U trećem koraku za približnu procjenu pouzdanosti lučnih mostova u obliku indeksa pouzdanosti β primjenjuje se metoda standardiziranih FORM koeficijenata (standardiziranih α vrijednosti koeficijenata osjetljivosti) [7, 12].



Slika 9. Parcijalni koeficijenti za vjetar i odgovarajući indeksi pouzdanosti

Norma EN 1990 [3] preporučuje parcijalni koeficijent 1,5 za djelovanje vjetra kao dominantno djelovanje pri provjeri graničnog stanja nosivosti. Ovaj smo koeficijent i primijenili u linearnom proračunu. S druge strane, nelinearnim proračunom dobivamo vrijednosti parcijalnih koeficijenata do kojih konstrukcija može podnijeti djelovanje vjetra.

Za poznati parcijalni faktor dobiven iz druge ocjene lukova na djelovanje vjetra, uz određenu varijancu opterećenja od vjetra, a s pomoću izraza za proračunsku vrijednost Gumbelove raspodjele, određen je odgovarajući indeks pouzdanosti i valja ga usporediti s ciljanom vrijednošću.

Ciljanu vrijednost indeksa pouzdanosti za granično stanje nosivosti biramo iz tablice 2. za velike posljedice otkazivanja, uz visoka ulaganja za osiguranje odgovarajuće pouzdanosti $\beta_{target,GSN} = 2,6$, te zaključujemo da procijenjena pouzdanost nije dovoljna ako se promatra cijeli most kada se provjeravaju elementi luka i svih stupova, no ako izuzmemo tjemene stupove iz razmatranja, procijenjena pouzdanost luka i svih ostalih stupova je zadovoljavajuća.

5 Zaključak

Ocjenjivanje postojećih konstrukcija koje su dotrajale zbog izloženosti agresivnim uvjetima, neprikladne ili pogrešne izvedbe, zanemarivanja problema trajnosti ili su manje pouzdane zbog promjene zahtjeva za konstrukciju, važno je zbog odabira prikladne metode održavanja. U svijetu se već više desetljeća takvi postupci ocjenjivanja primjenjuju, razvijaju te ponegdje i propisuju [15, 16, 17]. Kod nas nema sustavnog pristupa ovoj problematici i tek se u novije vrijeme više pozornosti posvećuje suvremenim metodama ocjenjivanja postojećih konstrukcija koje se temelje na probabilističkom pristupu.

U ovom su radu opisani postupci ocjenjivanja različite složenosti kroz načine prikupljanja podataka, metode proračuna i same dokazne postupke. Postojeće su metode različitih složenosti, a odabir prikladne metode, odnosno slijeda metoda različite složenosti, ovisit će o postavljenim zahtjevima ocjenjivanja te o samoj vrsti konstrukcije (i broju sličnih) koja se promatra.

Postupak ocjene graničnih stanja mostova izloženih djelovanju vjetra detaljno prikazan u primjeni na Šibenski most, samo je jedan od primjera ocjenjivanja postojeće konstrukcije u više koraka kojima se složenost, a time i točnost, povećava.

Za mostove koji ne zadovoljavaju uvjete koraka ocjene opisanih u ovom radu, potrebno je detaljnije analizirati djelovanje vjetra na danoj lokaciji mosta te primijeniti točnije metode proračuna vjerojatnosti otkazivanja kon-

strukcija i prikladne računalne programe. Moguće je analizom stvarnog djelovanja vjetra na lokaciji svakog pojedinog mosta utvrditi drukčiju raspodjelu, manju varijancu, a time i veći indeks pouzdanosti.

Svakako je važno istaknuti da bismo slične metode trebali i dalje istraživati i unapređivati te što prije uključiti u praksu održavanja postojećih građevina.

IZVORI

- [1] Augustinović, I.: *Ocjena Šibenskog mosta izloženog normiranom vjetrovnom opterećenju*, diplomski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2009.
- [2] Cook, N.: *Designers' Guide to EN 1991-1-4 Eurocode 1: Actions on structures, General actions, Part 1-4: Wind actions*, Thomas Telford, 2007.
- [3] *EN 1990: Basis of structural design*, European Committee for Standardization, Bruxelles, April, 2002
- [4] *EN 1991-1-4: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions*, European Committee for Standardization, Bruxelles, April 2005.
- [5] Faber, M.H., Sørensen, J.D.: *Reliability Based Code Calibration*, Paper for the Joint Committee on Structural Safety, 2002.
- [6] Furundžić B.: *Privremeni tehnički propisi za opterećenje mostova na putovima PTP-5 (1949)*, Zbirka tehničkih propisa u građevinarstvu, Izdavačko preduzeće Građevinska knjiga, Beograd, 1969.
- [7] Gulvanessian, H., Calgaro, J.A., Holický, M.: *Designers' Guide to EN 1990 Eurocode: Basis of structural design*, Thomas Telford, 2002.
- [8] *HRN ENV 1991-2-4 Eurokod 1: Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 2-4. dio: Djelovanja na konstrukcije – Opterećenje vjetrom (ENV 1991-2-4: 1995)*
- [9] *Izveštje o Glavnom pregledu Šibenskog mosta na D8, HIMK, Zagreb, 2005.*
- [10] Joint Committee of Structural Safety. *Probabilistic Model Code*, 2001., <http://www.jcss.ethz.ch/>
- [11] Junaković, M.: *Šibenski most u seizmičkoj proračunskoj situaciji*, diplomski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2009.
- [12] Mandić, A.: *Granična stanja postojećih mostova*, disertacija, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [13] Mandić, A., Radić, J., Šavor, Z.: *Ocjenjivanje graničnih stanja postojećih mostova*, Građevinar 61 (2009) 6, str. 533 – 545.
- [14] Medak, M., Radić, J., Veverka, R., Bleiziffer, J., Kučer, A., Kalafatić, I.: *Main inspection of Šibenik Arch Bridge*, Proceedings of the International Conference on Bridges, SECON HDGK, Dubrovnik, 2006, pp. 961-968.
- [15] *Management of bridges/Gestion des ponts*, Highway agency-Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes-Transport Research Laboratory-Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Thomas Telford, 2005.
- [16] O'Brien, E.J., Žnidarić, A., Brady, K., González, A.: *Procedures for the assessment of highway structures*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport 158, 2005 Issue TRI, pg. 17-25.
- [17] Radić, J., Mandić, A.: *Ocjenjivanje postojećih konstrukcija*, Poglavlje VII, Betonske konstrukcije • Sanacije, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, SECON HDGK, Andris, Zagreb, 2008., str. 463-506.
- [18] Rücker, W., Hille, F., Rohrmann, R.: *F08a - Guideline for the Assessment of Existing Structures*, SAMCO Final Report, Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), Division VII.2 Buildings and Structures, Berlin, Germany, 2006.
- [19] Šavor, Z., Radić, J., Mandić, A.: *Neke usporedbe hrvatskih i europskih norma za djelovanja*, Građevinar 58 (2006) 8, str. 641 – 648
- [20] Šimunić, Ž., Pavlović, B., Kučer, A., Janjuš, G., Šuto, G., Mekjavić, I.: *Dinamičko ispitivanje Šibenskog mosta*, Zbornik radova Petog općeg Sabora HDGK, Brijuni, 2001., str. 325-330.
- [21] Šram, S.: *Gradnja mostova - Betonski mostovi*, Golden marketing, Zagreb, 2002.
- [22] Šram, S.: *Most preko Šibenskog zaljeva*, Ceste i mostovi 34 (1988) 11-12, str. 469-472.
- [23] Vrouwenvelder, T.: *Reliability Based Code Calibration – The use of the JCSS Probabilistic Model Code*, Joint Committee on Structural Safety, Paper for the Workshop on Code Calibration, 2002.