

UPORABA SISTEMOV ZA TEHTANJE VOZIL MED VOŽNJO ZA DOLOČITEV REALNE KONSTRUKCIJSKE VARNOSTI MOSTOV

USING WEIGH-IN-MOTION SYSTEMS FOR OPTIMAL ASSESSMENT OF BRIDGES

doc. dr. Aleš Žnidarič, univ. dipl. inž. grad.

ales.znidaric@zag.si

dr. Maja Kreslin, univ. dipl. inž. grad.

maja.kreslin@zag.si

Jan Kalin, univ. dipl. inž. grad.

jan.kalin@zag.si

dr. Andrej Anžlin, univ. dipl. inž. grad.

andrej.anzlin@zag.si

Zavod za gradbeništvo Slovenije

Odsek za mostove in inženirske objekte

Oddelek za konstrukcije

Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 005.6:624.21/.8

Povzetek | Optimalno upravljanje mostov, ki vključuje stroške vzdrževanja, potencialna tveganja in vzdrževanje funkcionalnosti, zahteva natančne informacije o stanju konstrukcij. Eden od ključnih kazalnikov obnašanja je konstrukcijska varnost mostu, ki zahteva poglobljeno poznavanje prometnih obremenitev in njegove odpornosti proti obremenitvam. Vrednotenje varnosti je predvsem ključno za stare mostove, ki so poškodovani in se bližajo koncu življenjskega cikla. Varnost takšnih mostov z uporabo tradicionalnih računskih metod pogosto težko dokažemo. Da bi se izognili nepotrebnim ukrepom, kot je ojačitev ali celo zamenjava mostu, je priporočljivo narediti celovito analizo, ki vključuje preiskave materialov in meritve obnašanja mostu pod prometno obtežbo. Prispevek predstavlja tehnologijo tehtanja vozil med vožnjo v prostem prometnem toku na mostovih (angl. bridge weigh-in-motion oz. B-WIM), ki lahko učinkovito izmeri parametre obnašanja mostu, ki so ključni za določitev njihove realne varnosti: osne obremenitve in medosne razdalje vozil ter vplivnice, faktorje porazdelitve obtežbe in dinamični odziv konstrukcije. Poznavanje pravih vrednosti teh parametrov zmanjšuje negotovosti, povezane z obremenitvami in odzivom konstrukcije. Poleg tega lahko zaradi večje zanesljivosti izmerjenih parametrov v analizah zmanjšamo varnostne faktorje. To omogoča bolj optimalno vzdrževanje in uporabo infrastrukture ter racionalnejšo uporabo razpoložljivih finančnih sredstev.

Ključne besede: upravljanje mostov, konstrukcijska varnost, odziv na prometno obtežbo, tehtanja vozil med vožnjo v prostem prometnem toku na mostovih

Summary | Bridge management requires accurate information on the status of the bridge in order to achieve optimal balancing of maintenance costs, potential risks and overall bridge performance. One of the key performance indicators is structural safety of the bridge, which requires in-depth knowledge of traffic loads, as well as of bridge resistance to that load. Assessment is primarily needed for ageing bridges that are deteriorated and close to the end of their life cycle. Safety of such bridges is often difficult to prove when using only the traditional analytical methods. To avoid unnecessary actions, such as strengthening or even replacement of a bridge, it is beneficial to perform material testing and to measure the bridge response under traffic loading. This paper presents the benefits

of bridge weigh-in-motion (B-WIM) technology, which can efficiently measure bridge performance parameters that are vital for optimal bridge safety assessment: axle loads and spacings of all vehicles, as well as influence lines, girder distribution factors and dynamic amplification of the structure. Knowing of the true values of these indicators significantly reduces uncertainties associated with the load effects that are used in safety assessment. In addition, having measured rather than estimated parameters allows reducing the safety factors used in the analyses. This results in more optimal maintenance measures and use of infrastructure, which results in more rational use of available financial resources.

Key words: bridge management, structural safety, response under traffic loading, bridge weigh-in-motion

1 • UVOD

Vrednotenje obstoječih mostnih konstrukcij je povezano s številnimi izzivi. To velja zlasti za starejše konstrukcije, za katere projektna dokumentacija ne obstaja ali je omejena. Ker imajo mostovi na srečo skrite rezerve v nosilnosti, ki jih med projektiranjem ne upoštevamo, so kljub poškodovanosti in neprestanemu povečevanju prometnih obremenitev verjetno še vedno varni. Zato je cilj analize varnosti preveriti, ali ima konstrukcija ustrezno nosilnost za varno ter zanesljivo prenašanje pričakovanih obtežb. Želimo torej najti mostove, katerih verjetnost porušitve zadostuje kriterijem, ki so predpisani v pravilnikih ((BA 16/97, 2001), (EN 1991-2:2004, 2003), (CAN/CSA-S6-00, 2005)) ali jih je določil lastnik/upravitelj mostu. Učinkovita analiza varnosti temelji na postopni uporabi vse bolj podrobnih informacij, vključno z vedno bolj

kompleksno analizo in določitvijo materialnih karakteristik in prometne obtežbe.

Medtem ko za določitev nosilnosti kritičnih prerezov obstajajo številne metode, predstavlja določitev realne prometne obtežbe velik izziv. Prometna obtežba je namreč slučajna spremenljivka, ki se spreminja s krajem in časom. Z razvojem tehtanja vozil med vožnjo (ang. WIM, weigh-in-motion) se je ta problem omilil, saj z meritvami v prostem prometnem toku pridobimo zanesljive ključne podatke o tovornih vozilih, kot so njihovi osni pritiski, skupne mase, medosne razdalje in hitrosti. V splošnem poznamo dve vrsti sistemov WIM, cestne in mostne. Obe vrsti skušata na podlagi izmerjenega dinamičnega odziva določiti najboljši približek statičnim osnim pritiskom in celotni masi tovornih vozil. V Sloveniji se v okviru nacionalnih in mednarodnih projektov in s

sodelovanjem z industrijo že skoraj 30 let razvija mostna različica sistema B-WIM (ang. bridge weigh-in-motion). Prednost mostne tehnologije je, da je merilno opremo mogoče prestavljati iz lokacije na lokacijo in da poteka celoten proces namestitve sistema ter zajemanja in obdelave podatkov pod mostom. Med namestitvijo in vzdrževanjem senzorjev ne poškodujemo občutljive obrabne plasti voziščne konstrukcije, posledično pa se izognemo cestnim zaporom in prometnim zastojem. Poleg tega lahko mostni sistem WIM sočasno s tehtanjem shranjuje podatke za izračun kazalnikov obnašanja mostov pod prometno obtežbo: deformacije, vplivnice, dinamični odziv in porazdelitev prometne obtežbe po nosilnih elementih. Ustrezna raba teh podatkov je ključna pri vrednotenju varnosti obstoječih mostov.

Prispevek predstavlja tehnologijo tehtanja vozil z metodo B-WIM, s katero učinkovito izmerimo parametre za bolj optimalno vrednotenje mostnih konstrukcij. Možnosti so prikazane na primeru jeklenega testnega mostu.

2 • VREDNOTENJE MOSTNIH KONSTRUKCIJ

Upravljevec mostov mora razpolagati z metodami, ki omogočajo objektivno primerjavo njihovega stanja kot podlago za izbiro najbolj učinkovitih ukrepov. Pogoj za pravilno izbiro le-teh je učinkovita analiza konstrukcije, ki je sestavljena iz (slika 1):

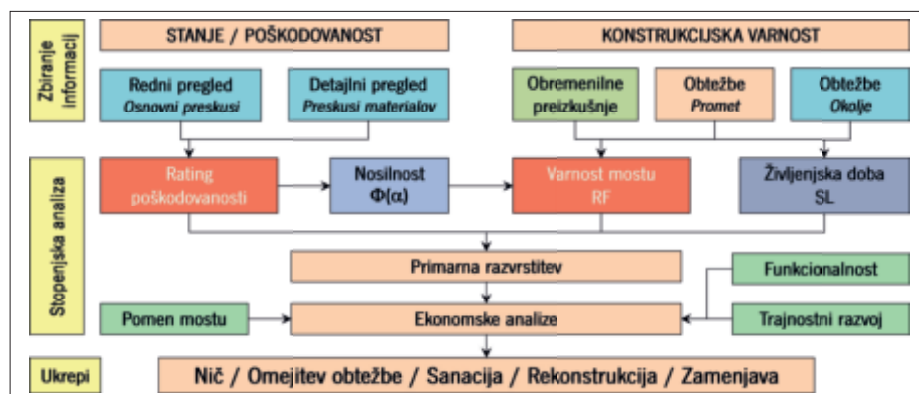
- zbiranja informacij,
- stopenjske analize, od preproste do vedno bolj kompleksnih, in
- izbire ukrepa.

Najbolj pomembna parametra za izdelavo objektivne ocene mostu, t. i. ključna kazalnika obnašanja (ang. KPI – Key Performance Indicator), sta njegovo stanje oz. poškodovanost ter konstrukcijska varnost. Medtem ko je poškodovanost primarno povezana s trajnostjo konstrukcije in narekuje ukrepe za podaljševanje njegove življenjske dobe, kon-

strukcijska varnost zagotavlja, da je most, brez ali z omejitvami prometne obtežbe, varen za uporabo.

2.1 Zbiranje podatkov

Mostne konstrukcije je treba pregledovati v rednih intervalih. Preglede glede na njihovo kompleksnost, podobno kot v ostalih evropskih državah (ReGen D3.1, 2015), delimo na:



Slika 1 • Shematski prikaz analize mostne konstrukcije.

- rutinske preglede, ki jih izvaja vzdrževalec in so namenjeni odkrivanju napak, ki vplivajo na varnost uporabnikov,
- vizualne redne preglede, ki se izvajajo v dve- ali triletnih intervalih,
- glavne preglede, ki so še vedno pretežno vizualni, vendar je treba pregledati tudi najbolj skrite dele objekta; pri nas se izvajajo vsako šesto leto, in
- detaljne preglede, ki se predpišejo po potrebi in vključujejo odvzeme vzorcev materialov, preiskave, ki so potrebne za ugotovitev določenih mehanizmov propadanja, kot so meritve potencialov ali globine karbonatizacije, dolgotrajno spremljanje določenih pojavov, kot so deformacije objekta, ipd.

Poleg ocene okoljskih vplivov, kot so poplave, potresi, podori in drugi izredni dogodki, v primeru računa varnost mostov izmerimo tudi:

- prometne obremenitve (osne pritiske in medosne razdalje vozil ter medsebojne oddaljenosti vozil), ki se od ceste do ceste bistveno razlikujejo in so po pravilu bistveno nižje od projektnih vrednosti,
- dinamično obnašanje mostu, ki je odvisno od interakcije vozil s konstrukcijo ter zlasti od stanja (ravnosti) cestišča pred mostom in na njem.

Pravilno opravljen pregled mostu in analiza poškodovanosti sta ključna parametra za določitev realne nosilnosti in varnosti mostne konstrukcije.

2.2 Stopenjske analize mostnih konstrukcij

Bistvena karakteristika vseh sodobnih metod za analizo konstrukcij je njihova postopnost. Smiselno je začeti s preprostimi in konservativnimi, vendar cenovno ugodnimi načini analize.

Na področju ocene stanja poškodovanosti objekta je na primer mogoče zgolj kvalitativno oceniti stanje ključnih nosilnih elementov konstrukcije. V Sloveniji po drugi strani že 30 let uporabljamo metodo računa ratinga poškodovanosti, s pomočjo katere vse poškodbe na objektu ovrednotimo. Ta metoda zahteva sistematičen pregled mostu, vendar so rezultati ocene stanja neprimerno bolj konkretni in uporabni.

Podoben pristop uporabimo pri računu konstrukcijske varnosti mostne konstrukcije, ki se po načinu uporabe razlikuje od dimenzioniranja novih konstrukcij. Analiza mora čim bolj natančno oceniti sposobnost mostu, da bo v trenutnem stanju in v predvideni življenjski dobi prenesel vse obremenitve z zanesljivo majhnim tveganjem porušitve. Tipično

upoštevamo življenjsko dobo od nekaj let, na primer do predvidene sanacije ali rekonstrukcije, do 20 ali 25 let, ko se uporabljene predpostavke o poslabšanju stanja in povečevanju prometnih obremenitev še ne bodo bistveno spremenile.

V Evropi se z vidika kompleksnosti uveljavlja tako imenovani 5-nivojski model, kjer se analiza na 1. nivoju ne razlikuje bistveno od dimenzioniranja nove konstrukcije. V nadaljevanju postopoma uporabimo bolj natančne in manj konservativne računske modele in podatke meritev na konkretnem objektu. Na najvišjem nivoju uporabimo popolni verjetnostni pristop, ki pa je pogosto vprašljiv zaradi pomanjkanja podatkov, ki bi statistično opredelili v analizi uporabljene parametre. Bistvo 5-nivojske analize je, da analizo na višjem nivoju izvedemo le v primeru, ko z analizo na nižjem nivoju zadostne varnosti ne moremo dokazati.

Ne glede na izbrani nivo analize je treba vedno izvesti skrbni pregled objekta, s posebnim poudarkom na detajlih, ki bi lahko sčasoma vplivali na nosilnost kritičnega prereza oziroma na obnašanje objekta, in z namenom kar se da natančno izračunati stalne obtežbe konstrukcije.

Projekt SAMARIS (SAMARIS, 2006) se je posvetil predvsem dvema faktorjema, ki bistveno povečata učinkovitost analize obstoječih mostov, obremenitnim preizkušnjam za določitev obnašanja mostov in meritvam prometne obtežbe, tako njene statične kot dinamične komponente.

2.3 Razlike med dimenzioniranjem novih in analizo varnosti obstoječih konstrukcij

Nove konstrukcije morajo biti dimenzionirane konservativno, ker v času gradnje ni mogoče predvideti vseh dogodkov med življenjsko dobo objekta, predvsem povečevanja obtežb in detajlov propadanja konstrukcije. Poleg tega je veliko ceneje in hitreje zagotoviti dodatno nosilnost med gradnjo kot v okviru sanacijskih ukrepov, zato je dodatna začetna rezerva v nosilnosti in posledično varnosti dobrodošla in upravičena.

Po definiciji zagotovimo varnost konstrukcije s tem, da je nosilnost R večja od vplivov S , torej:

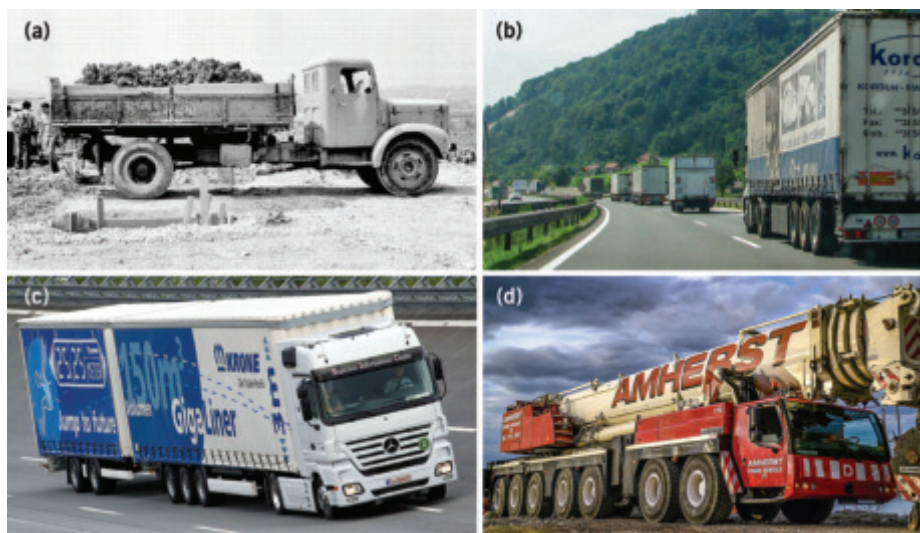
$$\frac{R}{\gamma_R} \geq \sum S \cdot \gamma_S, \quad (1)$$

pri tem sta γ_R in γ_S delna varnostna faktorja za nosilnost in vplivov obtežbe.

Analizo varnosti obstoječega mostu izvedemo na bistveno manj konservativen način kot pri novih mostovih, ker upoštevamo dejansko stanje oz. nosilnosti prerezov ter realne, po možnosti izmerjene vplive. Pogosto uporabimo omejeno trajanje analize, na primer zgolj do naslednjega glavnega pregleda ali do predvidene sanacije. Zato so uporabljeni varnostni faktorji lahko nižji kot pri novih konstrukcijah. V okviru optimizirane analize varnosti mostov je torej treba predvsem:

- dobro definirati *nosilnost* kritičnih prerezov in porušnih mehanizmov in
- realistično ovrednotiti *obtežbe*.

Stalno obtežbo določimo na podlagi podatkov iz projektov, če obstajajo, in po pravilu iz izmer, opravljenih na mostu. Za prometno obtežbo namesto obtežnih shem iz pravilnikov za nove mostove uporabimo sheme, ki so bile razvite na podlagi meritev prometa v določeni



Slika 2 • Primeri različnih tovornih vozil: a) dveosno vozilo iz okoli leta 1970 b) današnji promet na slovenskih cestah c) 60-tonsko in 25 m dolgo vozilo d) avtodvigalo.

državi ali celo na konkretnem cestnem odseku, na katerem je objekt.

Strižno nosilnost kritičnih prerezov največkrat določimo z empiričnimi enačbami, upogibno nosilnost pa z analizo prereza. Pri tem si za določitev lokacije armature največkrat pomagamo z neporušnimi metodami (georadar, skeniranje armature), ki jih kombiniramo in lokalno verifiliramo z destruktivnimi metodami. Bolj zanesljive metode uporabimo, manj je treba reducirati izračunano nosilnost prerezov.

Pri projektiranju novih mostov kot prometno obtežbo upoštevamo obtežne sheme iz pravilnikov, ki upoštevajo tudi najmanj verjetne dogodke med življenjsko dobo objekta. Realno stanje je v večini primerov bistveno drugačno in se zelo razlikuje od posamezne države in kategorije ceste. Na sliki 2a je tipično dveosno vozilo skupne teže okoli 15 ton iz časa povprečne starosti mostov na

slovenskih državnih cestah, to je dobrih 50 let. Slika 2b prikazuje današnji promet na slovenskih cestah, slika 2c pa 60-tonsko in 25 m dolgo vozilo. Taka vozila že vozijo po nekaterih evropskih cestah in so primarno namenjena transportu na velike razdalje. V podobno kategorijo sodijo prihajajoči elektronsko vodeni konvoji, t. i. *truck platoons*, v katerih bodo vozila med seboj oddaljena le nekaj metrov. Za mostove pa so zaradi težkih osi na majhni medsebojni razdalji najbolj neugodna avtodvigala (slika 2d), ki v primerjavi z drugimi vozili podobne mase povzročajo nesorazmerno velike vplive.

Če torej poznamo realno stanje mostu in prometne obremenitve, lahko analizo varnosti izvedemo na bistveno manj konservativen način, kot je bil upoštevan pri projektiranju. Če za analizo obstoječih, zlasti starejših konstrukcij uporabimo pravilnike za dimenzioniranje, bodo rezultat analize zelo verjetno nepotrebne

omejitve prometne obtežbe na mostu ali nepotrebno dragi sanacijski ukrepi.

2.4 Izbira ukrepa

Po analizi poškodovanosti, varnosti in po možnosti preostale življenjske dobe konstrukcije pred izbiro ukrepa izvedemo še ekonomsko analizo, ki mora poleg ocene stroškov predvidenih ukrepov upoštevati tudi oceno posrednih stroškov, povezanih z uporabniki infrastrukture, in preostalih stroškov med življenjsko dobo. Upoštevamo vsaj pomen mostu v cestni mreži (na mrežnem nivoju) in faktorje trajnostnega razvoja, to je vpliv predvidenih ukrepov na ljudi in okolje. Šele v naslednji fazi objekte razvrstimo glede na predlagani ukrep:

- Pusti pri miru (Do nothing)
- Spremljaj propadanje (Monitoring)
- Izvedi popravilo (Treatment)
- Izvedi ojačitve (Strengthening)
- Zamenjaj konstrukcijo ali njen element (Replacement)

dič, 2017), (Žnidarič, 2017)). To omejuje njeno uporabo na mostove z vplivnicami, krajšimi od približno 40 metrov, kar pa še vedno zajema krepko čez 90 % vseh mostov (Žnidarič, 2011).

3.2 Mehka obremenilna preizkušnja

Cilj *mehke obremenilne preizkušnje* ali *SLT* je na bolj enostaven način pridobiti podatke, ki jih sicer zajamemo s pomočjo tradicionalne diagnostične obtežne preizkušnje. Primarni cilj je izmeriti obnašanje konstrukcije pod prometno obtežbo z namenom optimizacije analitičnega modela mostu. Uporaba sistema B-WIM pomeni, da v nasprotju z drugimi načini obtežne preizkušnje najeta težka tovorna vozila nadomestimo z rednim prometom in da med meritvami mostu ni treba zapreti.

Z metodo SLT prvenstveno merimo dejanske vplivnice mostu, ki se po pravilu močno razlikujejo od teoretičnih. Najpogostejši razlogi so preprečeni zasuki podpor in nezadostno poznavanje detajlov konstrukcije. Nadaljnje izboljšave analitičnega modela dosežemo z merjenjem faktorjev porazdelitve obtežbe (ang. *Girder Distribution Factor* ali *GDF*), kjer statistično ovrednotimo deleže obtežbe, ki jih prevzemajo posamezni konstrukcijski elementi, ter merjenjem koeficienta sunka (ang. *Dynamic Amplification Factor* ali *DAF*).

Ob očitnih prednostih je projekt SAMARIS opredelil tudi nekaj omejitev:

- SLT ni namenjena računu mejnih stanj, temveč kontrolam na nivoju mejnega stanja uporabnosti; zato je najbolj primer-

3 • MOSTNI SISTEM WIM IN ANALIZA VARNOSTI MOSTOV

Mostni sistemi za tehtanje vozil med vožnjo oz. sistemi B-WIM so bili predstavljeni pred 40 leti (Moses, 1979), vendar so bili kljub številnim prednostim v tistem obdobju uspešni samo v Avstraliji, kjer so razvili enostavnejšo različico, ki se uporablja na kratkih prepustih (Peters, 1986). Tehnologijo B-WIM smo pričeli v Slovenji intenzivno razvijati v devetdesetih letih prejšnjega stoletja v okviru dveh evropskih raziskovalnih projektov ((COST 323, 2002), (WAVE, 2001)), katerih rezultati so privedli do sodelovanja z industrijo in do komercialne različice sistema, imenovanega SiWIM® ((Žnidarič, 2010), (Žnidarič, 2017)).

Mostni sistem WIM je zlasti primeren za:

- kratkotrajne meritve, ki trajajo do nekaj tednov, saj ga lahko enostavno prestavimo z mostu na most,
- meritve na lokacijah, kjer rezanje utorov v obrabno plast za cestne senzore ni dovoljeno ali zaželeno,
- analize mostov, saj sočasno s tehtanjem meri podatke za izračun kazalnikov obnašanja mostov: deformacije, vplivnice, koeficiente sunka in porazdelitev prometne obtežbe po nosilnih elementih.

V okviru projektov SAMARIS (SAMARIS, 2006) in ARCHES (ARCHES, 2009) smo poleg modeliranja prometne obtežbe predlagali uporabo rezultatov meritev s sistemom B-WIM za izbol-

jšanje računa varnosti obstoječih mostov. Postopek smo imenovali *mehka obremenilna preizkušnja* (ang. *Soft Load testing* ali *SLT*). Z njo primarno izračunamo tri ključne kazalnike obnašanja, s katerimi umerimo računske modele konstrukcije: vplivnice mostu, porazdelitev obtežbe po elementih in koeficient sunka (ang. *Dynamic Amplification Factor* ali *DAF*).

3.1 Modeliranje prometne obtežbe za mostove

Če poznamo osne pritiske in medosne razdalje vozil, vplivnice notranjih sil in deleže porazdelitve obtežbe po mostu, lahko izračunamo notranje statične veličine v kritičnih nosilnih elementih. V analizi konstrukcij te rezultate pretvorimo v največje pričakovane notranje sile. Najpogostejše izmerjene rezultate ekstrapoliramo s pomočjo normalne porazdelitve ali porazdelitev ekstremnih vrednosti, največkrat Gumbelove, včasih tudi Weibullove (Žnidarič, 2017). Druga možnost je, da največje pričakovane notranje sile napovemo s pomočjo zelo natančnih simulacij (Enright, 2013).

V Sloveniji pretežno uporabljamo alternativni način ekstrapolacije, ki temelji na računsko bistveno manj zahtevni statistični metodi konvolucije. Ta predvideva, da je največji vpliv prometne obremenitve na mostu posledica enega težkega vozila v vsakem od dveh prometnih pasov ((Moses, 1987), (Žnidarič, 2010), (Man-

na za kontrolo varnosti zaradi trenutnega prometa,

- zaradi težko predvidljivih sprememb je treba veljavnost analize omejiti, tipično na 20 do 25 let,
- rezultate analiz naj interpretirajo samo eksperti, ki znajo predvideti obnašanje mostu tudi pri večji obtežbi in pod potencialno spreminjajočimi se pogoji,
- če obstaja realna verjetnost, da bo prometna obtežba presegla izmerjeno za več kot 50 %, je priporočljivo meritve podaljšati ali opraviti klasično diagnostično obtežno preizkušnjo.

3.3 Dinamično obnašanje mostov pod prometno obtežbo

Glavni razlog za dinamična vzbujanja mostu zaradi prometa so udarne jame, posedki in druge neravnine vozne površine. Amplituda

nihanja mostu je odvisna od vrste, hitrosti, mase in vzmetenja vozila ter se precej razlikuje od enega do drugega (Cebon, 1999). Relativno dobro oceno realnih dinamičnih odzivov lahko izračunamo z naprednim modeliranjem, ki upošteva interakcijo mostu in vozila ((Kirkegaard, 1997), (Caprani, 2013)), vendar je postopek zamuden, rezultate pa je težko kalibrirati. Zato je bil pri projektih SAMARIS in ARCHES razvit in pozneje v sistemu SiWIM® implementiran postopek za merjenje koeficienta sunka k_d oz. faktorja dinamičnega ojačenja (ang. *Dynamic Amplification Factor*) DAF. Uporabimo klasično definicijo ((Caprani, 2013), (Žnidarič, 2017)):

$$DAF = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_S}, \quad (2)$$

kjer je ε_T maksimalni izmerjeni vpliv deformacij zaradi obtežnega dogodka in je praviloma večji od računskega statičnega vpliva

ε_S . Slednjega ocenimo s filtriranjem signala obtežnega dogodka z nizkopasovnim filtrom. Središčno frekvenco in širino filtra izračunamo z analizo velikega števila odzivov mostu zaradi naključnih vozil (Kalin, 2015). Razmerje med vrednostma daje oceno za DAF in ga izračunamo za vse obtežne dogodke.

Rezultati potrjujejo, da so teoretične vrednosti DAF iz pravilnikov pretirano konservativne, saj je dinamično vzbujanje mostu obratno sorazmerno skupni masi oziroma vsoti vseh osnih pritiskov na mostu zaradi enega ali več vozil. Primer je podan v nadaljevanju. Če meritev WIM na mostu ne izvedemo, projekt ARCHES priporoča uporabo vrednosti okoli 1,15 za razpetine, daljše od 15 m za dvosmerni promet, in vrednost 1,30, če poteka promet samo po enem pasu. To je več, kot bi pokazale meritve, vendar manj od zahtev v večini pravilnikov za dimenzioniranje mostov.

4 • PRIMER

Namen meritev, opravljenih na testnem mostu, je bil zagotoviti informacije, da bo upravitelj mostu lahko:

- optimiziral računski model mostu in dobil bolj realno oceno njegove konstrukcijske varnosti,

- zmanjšal ali celo opustil omejitve prometne obtežbe, ki je trenutno v veljavi,
- olajšal načrtovanje in spremljanje izjemnih težkih prevozov.

Izbrani tipični podvoz je sestavljen iz šestih prostoležečih jeklenih nosilcev in sovprežnega

armiranega betonskega krova (slika 3). Dolg je 27 in širok 8,5 m, ima dva prometna pasova in odstavni pas ter jekleno palično zavetrovanje na sredini in v četrtnah razpetin. Ker je v relativno dobrem stanju, ni idealen primer za dokazovanje koristi mehke obremenilne preizkušnje. Te bi bile bolj očitne na starejših mostovih, ki nimajo ustreznih dilatacij in ležišč, zaradi česar se obnašanje lahko znatno razlikuje od predvidenega v projektu.



Slika 3 • Pogled na testni most s strani (levo) in od spodaj (desno).

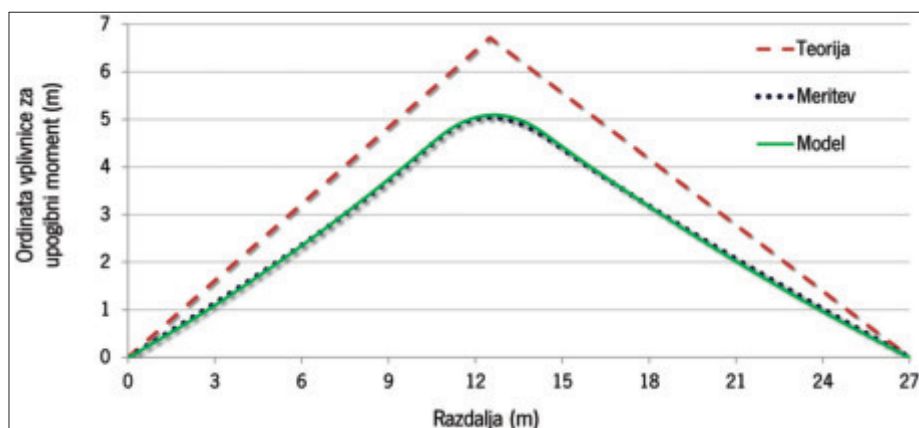


Slika 4 • Jeklena členkasta ležišča (levo) in uničena vozna površina pred dostopom na most (desno).

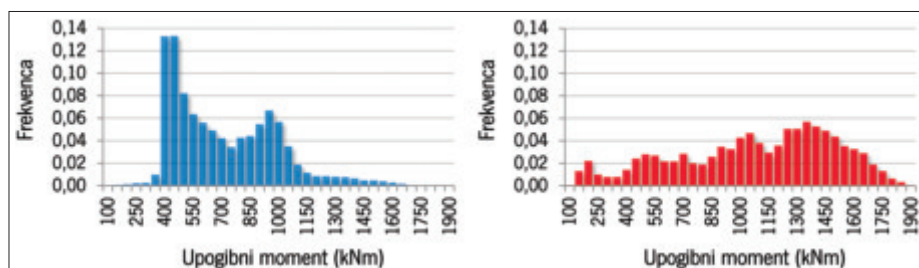
Deformacije mostu med prevozi vozil smo merili s šestimi senzorji na spodnjih pasnicah vsakega nosilca (Žnidarič, 2017), ki so zagotovili informacije tako za račun osnih pritiskov kot za tri kazalnike obnašanja: vplivnice, faktorje porazdelitve obtežbe in koeficient sunka. Vozna površina na obeh straneh mostu je bila v izrazito slabem stanju z velikimi neravninami in izpadlimi zrni asfalta (slika 4, desno).

4.1 Eksperimentalne vplivnice

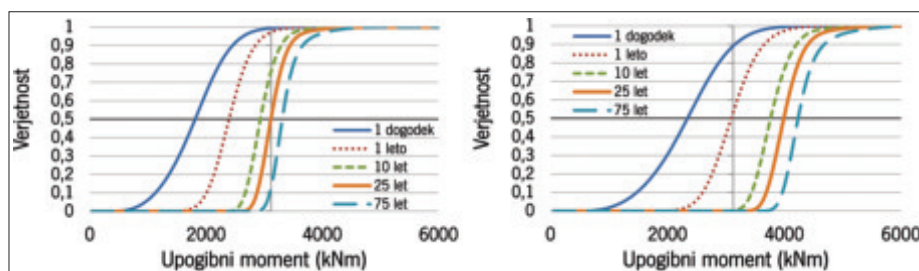
Vplivnica opisuje spremembo notranje sile (momenta ali prečne sile) na določeni točki konstrukcije zaradi pomične enotne sile. Kot taka je ena od ključnih komponent algoritmov B-WIM ((Moses, 1979), (ARCHES D08, 2009), (Žnidarič, 2015)). Za učinkovito tehtanje s sistemi B-WIM in optimalno analizo varnosti mostov potrebujemo vplivnice, ki temeljijo na meritvah (SAMARIS D30, 2006). Slika 5 kaže



Slika 5 • Primerjava teoretične, izmerjene in kalibrirane vplivnice iz računskega modela za upogibni moment na testnem mostu.



Slika 6 • Porazdelitev izmerjenih upogibnih momentov na testnem mostu – vozni (levo) in prehitvalni pas (desno).



Slika 7 • Pričakovani upogibni momenti, izračunani iz modelne (levo) in teoretične vplivnice (desno).

teoretično, izmerjeno in v računskem modelu izračunano vplivnico za upogibni moment obravnavanega mostu. V sistem SiWIM® je vgrajen algoritem, ki izračuna vplivnico za vsako vozilo, ki pelje čez most (Žnidarič, 2017). Posamezne vplivnice povprečimo v t. i. 'izmerjeno' vplivnico. T. i. 'modelno' vplivnico izračunamo s pomočjo računskega modela, ki mu na podporah spreminjamo togost zasučnih vzmeti, dokler ne najdemo najboljšega ujemanja z izmerjeno vplivnico.

Slika 6 potrjuje, da se tudi idealni prostoležeči most z jeklenimi členkastimi podporami na obeh straneh nosilcev ne obnaša povsem v skladu s teorijo in da so posledično tudi upogibni momenti manjši. Razlike na starejših mostovih, ki so pogosto brez ležišč in dilatacij in se ne obnašajo po predvidevanjih, lahko presežejo več deset odstotkov. Na obravnavanem mostu se najvišja ordinata vplivnice upogibnih momentov zmanjša za približno 25 %, ustrezno so za podoben odstotek manjši računski upogibni momenti. Ko računski model umerimo, enostavno izračunamo vplivnice za poljubno notranjo silo in za vse zanimive lokacije na konstrukciji.

4.2 Modeliranje prometne obtežbe

Prometno obtežbo smo določili z metodo konvolucije (Žnidarič, 2017). Slika 6 prikazuje histograma upogibnih momentov za vozni in prehitvalni pas, ki sta bila izračunana iz izmerjenih osnih obremenitev in medosnih razdalj ter *modelnih* vplivnic (slika 5). Podobna histograma izračunamo za strižne sile. Z metodo konvolucije izračunani ekstrapolirani upogibni momenti so prikazani na sliki 7, z uporabo modelne (levo) in prostoležeče teoretične vplivnice (desno). Detajlni postopek računa z metodo konvolucije je podan v (Žnidarič, 2017).

Preglednica 1 podaja računske vrednosti rezultatov s slike 7. Z uporabo *modelnih* vplivnic iz umerjenega računskega modela so se upogibni momenti v primerjavi z vrednostmi, ki smo jih dobili z uporabo teoretičnih vplivnic, zmanjšali za 23 do 24 %. Razlika je sicer manjša, kot jo dosegamo na starejših mostovih, še vedno pa lahko predstavlja razmejitev med povsem primerno in nezadostno računsko varnostjo mostu. Strižne sile so se z upošte-

	1 dogodek	1 leto	10 let	25 let	75 let
Vplivnica iz umerjenega rač. modela	1820,7	2397,9	2920,3	3094,8	3285,3
Teoretične prostoležeča vplivnica	2385,2	3141,0	3797,5	4015,4	4256,0
Delež prostoležečega momenta	76,3 %	76,3 %	76,9 %	77,1 %	77,2 %

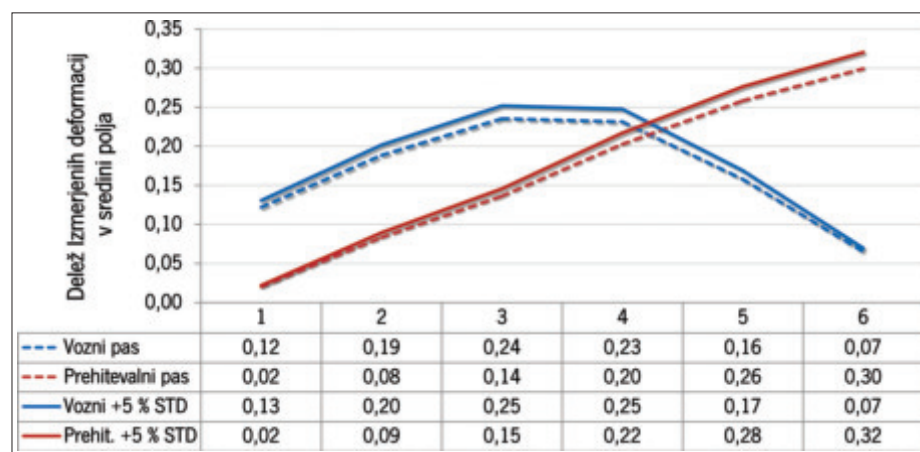
Preglednica 1 • Primerjava upogibnih momentov, izračunanih z modelno in teoretično vplivnico (v kNm).

vanjem delnega vpetja podpor povečale za zanemarljivi 1 %.

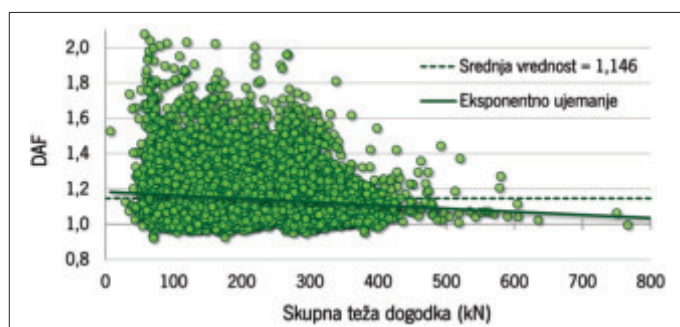
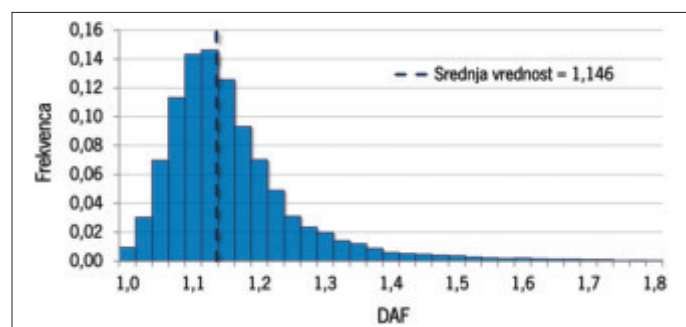
4.3 Izmerjeni raznos obtežbe po nosilcih

Shranjene maksimalne izmerjene deformacije mostu med vožnjo vseh vozil na vseh merskih mestih koristno uporabimo za določitev statistično ovrednotenih faktorjev porazdelitve upogibnih momentov in strižnih sil. Tipično izračunamo srednje vrednosti in standardne

odklone deformacij iz nekaj sto izmerjenih odzivov mostu zaradi težkih vozil. Deleže srednjih vrednosti, povečane za standardne odklone, upoštevamo kot faktorje porazdelitve obtežbe (GDF), s katerimi upoštevamo delež celotnega momenta ali prečne sile, ki ga prevzame posamezni nosilni element. Rezultati na sliki 8 prikazujejo deleže izmerjenih deformacij v sredini razpetine testnega mostu po posameznih nosilcih in glede na prometni pas.



Slika 8 • Srednje vrednosti s standardnimi odkloni razporeditve prometne obtežbe po nosilcih od 1 do 6 za vozni in prehitevalni pas.



Slika 9 • Porazdelitev izmerjenih vrednosti DAF na testnem mostu (levo) in iste vrednosti v odvisnosti od skupne teže vozila na mostu (desno).

5 • ZAKLJUČEK

Zagotavljanje varnosti obstoječih mostov predstavlja enega ključnih dejavnikov pri upravljanju cestnega premoženja. S staranjem objektov in povečevanjem prometa postaja ta veja upravljanja vse večji izziv. Standardi za projektiranje z leti postajajo vse strožji, zato veliko obstoječih objektov, ki so bili zgrajeni po prejšnjih predpisih, pogojem za zagotavljanje varnosti po teh pravilnikih ne more zadostiti. Da se izognemo najbolj neizprosnim ukrepom, kot so rekonstrukcije in zamenjave mostov, ter s tem povezanimi neposrednimi in posrednimi stroški, v prvi fazi čim bolj

realno ocenimo dejansko stanje objektov. V nadaljevanju učinkovitost analize in predlaganih ukrepov postopoma izboljšujemo z vključevanjem rezultatov meritev materialnih karakteristik in meritev z mostnimi sistemi za tehtanje vozil med vožnjo. Poleg zbiranja podatkov o osnih obtežbah vseh vozil, kar zagotavljajo vsi sistemi WIM, s sistemom B-WIM sočasno izvedemo mehko obtežno preizkušnjo, s katero izmerimo obnašanje konstrukcije pod prometno obtežbo. Rezultat so izmerjeni, ne predpostavljani ključni kazalniki obnašanja – vplivnice mostu, porazdelitev

4.4 Koeficient sunka

Vrednosti koeficienta sunka (DAF oz. k_d) izračunamo iz merjenih odzivov mostu zaradi vozil, ki prečkajo most. Rezultati meritev na testnem mostu so v skladu s pričakovanji in izkušnjami sledili Gumbelovi porazdelitvi (slika 9, levo). Če DAF prikažemo kot funkcijo maksimalne deformacije ali kot skupne teže vozil v posameznem obtežnem dogodku zaradi posameznega ali več sočasnih vozil na mostu, se vrednosti DAF po pričakovanjih zmanjšujejo, če maksimalna deformacija oz. skupna teža dogodka narašča (slika 9, desno). Treba je opozoriti, da je bil testni most neobičajno živahen, z osnovno lastno frekvenco pri 3,1 Hz, ki je blizu frekvence nihanja težkih vozil (Cebon, 1999), zato so vrednosti DAF visoke vse do 400 kN. Posledično znaša povprečna vrednost DAF 1,146 v primerjavi s približno 1,05 na tipičnih mostovih (Kalin, 2015). Kljub temu vrednosti DAF zaradi najtežjih dogodkov z veliko osmi, kot pri ostalih mostovih, izrazito padejo. Koeficient sunka vsekakor sodi med ključne kazalnike obnašanja konstrukcije, s katerim, če ga ocenimo na osnovi predstavljene metodologije, dokažemo rezerve v obnašanju in posledično optimiziramo rezultate analize varnosti mostu.

obtežbe po elementih in koeficient sunka, s pomočjo katerih umerimo računske modele konstrukcije. S statistično obdelavo notranjih sil, izračunanih iz izmerjenih osnih pritiskov in vplivnic, izračunamo pričakovane realne prometne obremenitve za izbrano obdobje. Ker parametre izmerimo, zmanjšamo nezanesljivosti in posledično v analizah uporabimo nižje varnostne faktorje. Posledično izračunamo višje faktorje varnosti, kar za veliko starih in poškodovanih mostov pomeni, da zadoščajo ukrepi za preprečitev nadaljnjega propadanja, ni pa treba predvideti ojačitve za povečanje nosilnosti ali celo zamenjave mostu. Prav tako po opisanem postopku preverimo in optimiziramo omejitve prometne obtežbe, ki negativno vplivajo na učinkovitost transporta.

6 • LITERATURA

- ARCHES D08, Recommendations on bridge traffic load monitoring, Bruselj: EK, 2009.
- ARCHES D10, Recommendations on dynamic amplification allowance, Bruselj: EK, 2009.
- BA 16/97, The Assessment of Highway Bridges and Structures, London: British Standards Institution, 2001.
- CAN/CSA-S6-00, Design of Highway Bridges, Supplement NO.1-1990, Existing Bridge Evaluation, Toronto: Canadian Standard Association, 2005.
- Caprani, C., Lifetime Highway Bridge Traffic Load Effect from a Combination of Traffic States Allowing for Dynamic Amplification. *Journal of Bridge Engineering*, 18(9), pp. 901-909, 2013.
- Cebon, D., *Handbook of Vehicle-Road Interaction*, Taylor & Francis, Abington, 1999.
- COST 323, Weigh-in-Motion of Road Vehicles: Final Report of the COST 323 Action, Jacob, B., OBrien, E.J., Jehaes, S. (Eds.), Paris: LCPC, 2002.
- EN 1991-2:2004, Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges, Brussels: CEN, 2003.
- Enright, B., OBrien, E. J., Monte Carlo simulation of extreme traffic loading on short and medium span bridges, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(12), p. 1267–1282, 2013.
- Kalin, J., Žnidarič, A., Kreslin, M., Using weigh-in-motion data to determine bridge dynamic amplification factor, Dübendorf (Zürich), MATEC Web of Conferences, pp. <http://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2015/05/contents/contents.html>, 2015.
- Kirkegaard, P., Neilsen, S., Enevoldsen, I., Heavy vehicles on minor highway bridges - calculation of dynamic impact factors from selected crossing scenarios, ISSN 1395-7953 R9722 ured. s.l.: Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1997.
- Mandić, A. I., Skokandić, D., Žnidarič, A., Kreslin, M., Bridge performance indicators based on traffic load monitoring, *Structure and Infrastructure Engineering*, p. 13, 2017.
- Moses, F., Weigh-In-Motion system using instrumented bridges, *ASCE Transportation Engineering Journal*, pp. 105: 233-249, 1979.
- Moses, F., Verma, P., Load Capacity Evaluation of Existing Bridges, Washington: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) - Report No. 301, 1987.
- Peters, R. J., CULWAY - An unmanned and undetectable highway speed weighing system, Melbourne, Proceedings of the 13th ARRB conference, pp. 70-83, 1986.
- ReGen D3.1, Guidelines on collecting WIM data and forecasting of traffic load effects on bridges, Dublin: NRA Ireland, 2015.
- SAMARIS D30, Guidance for the optimal assessment of highway structures, http://www.fehrl.org/?m=32&id_directory=355 ed. Ljubljana: ZAG, 2006.
- WAVE, Bridge WIM - Report of Work Package 1.2. Ljubljana: UCD Dublin & ZAG Ljubljana, 2001.
- Žnidarič, A., Lavrič, I., Applications of B-WIM technology to bridge assessment. Philadelphia, USA, Proceedings of IABMAS 2010 conference, 2010.
- Žnidarič, A., Lavrič, I., Kalin, J., Latest practical developments in the Bridge WIM technology, Philadelphia, USA, Proceedings of IABMAS 2010 conference, pp. 993-1000, 2010.
- Žnidarič, A., Pakrashi, V., O'Brien, E. J., O'Connor, A., A review of road structure data in six European countries, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban design and planning*, 164(4), pp. 225-232, 2011.
- Žnidarič, A., Herga, L., Pirman, B., Willenpart, T., Hevka, P., Močnik, C., Ružič, D., Management of bridges in Slovenia, National Report, Seoul: PIARC - World Road Congress, 2015.
- Žnidarič, A., Vpliv števila in kvalitete podatkov tehtanja vozil med vožnjo na določitev obremenitev mostov, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, 2017.
- Žnidarič, A., Kalin, J., Kreslin, M., Improved accuracy and robustness of bridge weigh-in-motion systems, *Structure and Infrastructure Engineering*, p. 13, 2017.