

doc. dr. Aleš Žnidarič, univ. dipl. inž. grad.
ales.znidaric@zag.si
Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Dimičeva 12, 1000 Ljubljana



prof. dr. Goran Turk, univ. dipl. inž. grad.
goran.turk@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za
gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



dr. Maja Kreslin, univ. dipl. inž. grad.
maja.kreslin@zag.si
Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Dimičeva 12, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 656.053.432:656.11

DOLOČITEV KARAKTERISTIČNIH NOTRANJIH STATIČNIH KOLIČIN CESTNIH MOSTOV IZ PODATKOV TEHTANJA VOZIL MED VOŽNJO

DETERMINATION OF CHARACTERISTIC INTERNAL FORCES AND MOMENTS IN ROAD BRIDGES FROM WEIGH- IN-MOTION DATA

Povzetek

Prispevek obravnava določitev notranjih statičnih količin cestnih mostov iz podatkov tehtanj vozil med vožnjo (meritev WIM, ang. weigh-in-motion), ki edina zagotovijo celovito in nepristransko sliko o tovornem prometu na merjenem cestnem odseku. Tovrstni podatki so ključni za določitev realnih učinkov prometnih obtežb, s katerimi dokazujemo zadostno varnost mostov, tudi starih in poškodovanih. Takšne mostove bi bilo treba ob upoštevanju obtežnih shem iz sodobnih pravilnikov za mostove pogosto zapreti ali jim omejiti prometno obtežbo. Predstavljene so metode, s katerimi iz podatkov WIM izračunamo karakteristične vrednosti notranjih statičnih količin. Posebej smo analizirali metodo konvolucije in rezultate primerjali z rezultati ekstrapolacije ekstremnih vrednosti, najbolj pogostega postopka za napovedovanje maksimalnih pričakovanih vplivov prometa v izbranem obdobju, ter rezultati obsežnih numeričnih simulacij. Veliko pozornost smo namenili izbiri vhodnih parametrov ter načinu odčitavanja karakterističnih vrednosti, ki bistveno vplivajo na rezultate ekstrapolacij in simulacij. Rezultati kažejo, da daje metoda konvolucije, ki je računsko neprimerno manj zahtevna od ostalih uporabljenih metod, primerljive rezultate. Sočasno so le-ti

manj občutljivi za subjektivno izbiro uporabljenih parametrov. Bistveni zaključek analize je tudi, da za zanesljiv račun karakterističnih notranjih statičnih količin mostov zaradi prometa potrebujemo s sistemom WIM izmerjene osne pritiske in medosne razdalje vsaj 100.000 tovornih vozil.

Ključne besede: most, tehtanje vozil med vožnjo, notranje statične količine, konvolucija, simulacija, WIM, B-WIM

Summary

The paper deals with the determination of the internal forces and moments in road bridges from the weigh-in-motion (WIM) data. WIM measurements are the only means that provide a comprehensive and unbiased picture of freight traffic on a measured road section. The WIM results are crucial for calculating the actual effects of traffic loads, a key parameter in assessing the structural safety of old and deteriorated bridges. Such bridges would often be closed or moved when analysed with load models from the current design codes. The paper presents methods for calculating the characteristic values of load actions calculated using WIM data. We focused on the convolution method and compared the results with the extreme value extrapolations, the most common procedure for predicting the maximum expected impact of traffic load, and extensive numerical simulations. We paid close attention to the selection of input parameters and the determination of characteristic values that significantly affect the extrapolation and simulation results. Finally, we have shown that the convolution method, which is computationally far less demanding than other more commonly used methods, yields comparable results, which are, at the same time, less sensitive to the subjective choice of parameters. The main conclusion of the research is that for a reliable calculation of the characteristic static internal forces and moments in road bridges, we need WIM-measured axle loads and spacings of at least 100,000 heavy goods vehicles.

Key words: bridge, weigh-in-motion, internal forces and moments, convolution, simulation, WIM, B-WIM

1 UVOD

Med obtežbami na mostove je, poleg tistih zaradi naravnih nesreč, najtežje napovedati realno prometno obtežbo ([Bailey, 1996], [Melchers, 1999]). Problem je zlasti izpostavljen pri analizi obstoječih mostov, kjer je poznavanje dejanskih notranjih statičnih količin mostov zaradi prometne obtežbe vitalnega pomena, da dokažemo zadostno konstrukcijsko varnost objektov, ki so bili dimenzionirani na bistveno manjše prometne obtežbe, kot jih prenašajo danes. Na ozemlju Slovenije smo tako v zadnjih 118 letih, od avstro-ogrškega pravilnika za gradnjo mostov [avstro-ogrski imperij, 1904] do Evrokoda [SIST, 2006], uporabljali devet različnih pravilnikov oz. standardov, od katerih je vsak predpisoval drugačne obtežne sheme, ki so bile prilagojene stanju prometa ter stanju stroke v času, ko so nastali.

Velik kakovostni preskok pri določitvi realnih notranjih statičnih količin mostov zaradi prometne obtežbe je bil narejen z uporabo rezultatov tehtanj vozil med vožnjo (ang. weigh-in-motion ali WIM). Za razliko od statičnih tehnic, na katerih stehamo posamezna vozila med mirovanjem, sistemi WIM uporabljajo senzorje, vgrajene v voziščno ali mostno konstrukcijo, in na podlagi izmerjenih odzivov izračunajo najboljši možni približek osnih pritiskov vseh čez sistem vozečih vozil [Žnidarič, 2017a]. Posledično so edini način meritve, ki zagotovi podatke o obtežbah vseh vozil v prometnem toku, kar je bistven podatek pri računanju pričakovanih maksimalnih prometnih obtežb. Sistemi WIM so prvi razcvet doživeli v 70. in 80. letih prejšnjega stoletja. V grobem jih delimo na cestne in na mostne (angl. Bridge WIM ali s kratico B-WIM). Temeljna razlika je, da prvi merijo osne obremenitve s senzorji, vgrajenimi v obrabno plast voziščne konstrukcije, drugi pa s senzorji, največkrat merilniki deformacij, ki so nameščeni na spodnjo stran prekladne konstrukcije [Žnidarič, 2108]. Obe vrsti sistemov zagotavljata primerljive podatke (osne pritiske, medosne razdalje, hitrost in kategorijo vozil ipd.). Lahko pa iz meritev B-WIM izračunamo tudi nekatere ključne kazalnike obnašanja konstrukcije pod prometno obtežbo, kot so izmerjene vplivnice (ang. *influence line* ali *IL*), raznosi obtežbe po konstrukciji in koeficienti sunka. Vsi ti podatki so ključni pri umerjanju izbranega računskega modela konstrukcije in določanju realne prometne obtežbe in posledično omogočijo analizo realne konstrukcijske varnosti obstoječih mostov [Žnidarič, 2017b].

Sočasno zasledimo v Kanadi prve poskuse določitve učinkov prometne obtežbe na podlagi statičnih tehtanj [Agarwal, 1976], ki so služili za osnovo kanadskemu pravilniku za mostove [OHBD, 1979, 1983, 1991] ter mnogim nadaljnjim študijam in raziskavam. Iz istega obdobja izhajajo prvi poskusi uporabe podatkov WIM za določanje realne prometne obtežbe in za kalibracijo pravilnikov za določitve obtežb mostov. Pionirja na tem področju sta bila Ghosn in Moses [Ghosn, 1986], ki sta uporabila teoretične statistične modele [Ang, 2006]. Moses [1979] je tudi avtor prvega mostnega sistema B-WIM. V tistih letih so se z uporabo rezultatov WIM in učinkom prometnih obremenitev na mostove ukvarjali številni avtorji v ZDA ([Nowak, 1991], [Fu, 1995]), na Danskem [Ditlevsen, 1994], v Veliki Britaniji [Cooper, 1995], Švici [Bailey, 1996], Španiji [Crespo-Minguillón, 1997] ter na Irskem [Grave, 2001]. Poleg teoretičnih statističnih modelov so ti avtorji uporabljali simulacije za izračun maksimalnih pričakovanih prometnih obtežb na mostovih.

Iz tega obdobja so tudi prve slovenske raziskave na tem področju ([Žnidarič, 1991], [Žnidarič, 1994], [Žnidarič, 1996], [Žnidarič, 1997]) v sodelovanju s profesorjema Mosesom in Ghosnom. Težava vseh raziskav iz tega obdobja so bile omejene količine podatkov WIM, pogosto vprašljive kakovosti, ki niso bili najbolj primerni za analize prometnih obtežb mostov. Podatki iz cestnih sistemov WIM, ki se namestijo v vozišče, so v tistem času zapisovali čas posameznega vozila zgolj s sekundno natančnostjo, kar ne zadošča za napovedovanje ekstremnih dogodkov z več težkimi vozili na mostu. Zato smo v začetku 90. let prejšnjega stoletja oživili tehnologijo mostnega tehtanja vozil med vožnjo, ki v ZDA pred tem ni zaživela, in jo do konca stoletja v okviru evropskih raziskovalnih projektov ([COST 323, 2006], [WAVE, 2002]) uveljavili kot uspešno alternativo bolj razširjenim cestnim sistemom WIM. V projektih iz 5. in 6. okvirnega programa Evropske komisije ([SAMARIS, 2006], [ARCHES, 2009]) smo poglobili stike z avtorji nekaterih najbolj naprednih študij na področju napovedovanja pričakovanih maksimalnih prometnih obtežb mostov ([Grave, 2001], [O'Connor, 2001], [O'Brien, 2003], [Getachew, 2003], [Caprani, 2005], [Enright, 2010]).

Nekoliko za statičnimi so začeli raziskovati dinamične vplive na mostove zaradi prometne obtežbe. Predpisi za mostove Kraljevine Jugoslavije [Kraljevina Jugoslavija, 1933] so na primer samo tri leta po nastanku dobili dodatek, ki je vključeval koeficient sunka, K_d [Kraljevina Jugoslavija, 1936]:

$$K_d = 1 + \frac{550 + 5 \cdot L}{10 + L} \cdot 0,01, \quad (1)$$

kjer je L razpetina mostu v metrih. Enaka formula se je uporabljala tudi po 2. svetovni vojni v pravilniku PTP-5 [FLRJ, 1949]. Upoštevanje realnih prirastkov dinamične obtežbe pa je še vedno predstavljalo svojevrsten izziv. Cantieni [Canteini, 1984] na primer podrobno opisuje eksperimentalne postopke za določitev dinamičnih vplivov, ki so temeljili na vožnji enega ali dveh vozil čez umetno neravnino pred mostom ali na njem, in rezultate, ki so bili temelj švicarskih pravilnikov. Ti in podobni rezultati so nekaj let kasneje služili kot osnova za upoštevanje dinamičnih učinkov zaradi prometne obtežbe, ki so implicitno zajeti z obtežnimi shemami za cestne mostove v Evrokodu [SIST, 2006].

Meritve koeficientov sunka zaradi vseh vozil na mostu so postale izvedljive šele z razvojem sistemov B-WIM v zadnjih letih. Ghosn in Xu [Ghosn, 1989] sta sicer že v času prve generacije teh sistemov poskušala osnovni algoritem tehtanja dopolniti z dinamičnimi komponentami in rekonstruirati dinamični odziv konstrukcije, vendar pristop v praksi ni zaživel. Z novo generacije sistemov smo razvili in implementirali več algoritmov merjenja koeficienta sunka, ki temeljijo na obdelavi izmerjenih deformacij mostu v časovnem in frekvenčnem območju ([SAMARIS D30, 2006], [ARCHES D10, 2009]). Posledično je danes mogoče kot del meritev B-WIM v realnem času izračunati koeficient sunka za vsako vozilo, ki pelje čez merjeni most ([Kalin, 2016], [Žnidarič, 2017a], [Žnidarič, 2019], [Kalin, 2021]). Izmerjeni podatki potrjujejo, da se vrednosti koeficienta sunka s povečevanjem obtežbe zmanjšujejo, kar bistveno vpliva na rezultate analize varnosti mostov in kar je bilo do nedavnega mogoče pokazati samo z numeričnimi simulacijami ([Kirkegaard, 1997], [González, 2008], [Caprani, 2013]).

Vsi v prispevku predstavljeni rezultati temeljijo na meritvah B-WIM, ki jih uporabljamo v Sloveniji, bi pa enake podatke o osnih pritiskih in medosnih razdaljah dobili tudi z večino sodobnih sistemov, ki se vgrajujejo v voziščne konstrukcije. Posledično smo v prispevku povsod, kjer sistemi B-WIM niso nujno potrebni, uporabili splošno oznako WIM.

2 UPORABLJENA METODOLOGIJA

Zadnjih 30 let smo tudi v Sloveniji izpopolnjevali metodologijo za določanje učinkov realnih prometnih obtežb mostov, ki temelji na statistični obdelavi rezultatov tehtanj vozil med vožnjo. Za pridobivanje natančnejših podatkov o prometnih obtežbah in posledično zanesljivejše napovedovanje pričakovanih notranjih statičnih količin mostov so bili v zadnjih letih razviti številni novi in izboljšani postopki ([Žnidarič, 2017a], [Žnidarič, 2018], [Žnidarič, 2020]), ki vključujejo:

- iz meritev B-WIM izračunane t. i. izmerjene vplivnice mostu, s katerimi umerimo računski model konstrukcije,
- izboljšano metodo zaznavanja vozil, s čimer zmanjšamo delež napačno stehtanih vozil,
- hitrostno in temperaturno kalibracijo, ki temeljita na robustni statistiki in bistveno zmanjšata napake zaradi dinamične interakcije vozil in mostu ter zaradi okolja, predvsem vplivov temperature.

Natančnost meritev katerikoli sistemov WIM preverimo s primerjavo tež, dobljenih s sistemi WIM, in statičnih tež istih vozil. Razvit je bil sistem kontrole kakovosti rezultatov, ki odpravi tipične napake meritev, kot so manjkajoče ali neobstoječe osi, in poišče vozila z malo verjetnimi karakteristikami, na primer nenormalnimi medosnimi razdaljami ali osnimi pritiski.

Kakovostni in količinsko zadostni podatki so osnova za razvoj robustnega postopka za določitev maksimalne pričakovane prometne obtežbe in maksimalnih notranjih statičnih količin. Konvencionalne metode za račun le-teh temeljijo bodisi na statističnih porazdelitvah ekstremnih vrednosti [Ang, 2006] ali na numeričnih simulacijah [Enright, 2010]. Raziskave kažejo ([Žnidarič, 2012], [Žnidarič, 2017a]), da z relativno enostavnimi in učinkovitimi statističnimi postopki, kot je metoda konvolucije [Moses, 1987], dobimo rezultate, ki le malo odstopajo od rezultatov kompleksnih numeričnih simulacij in so posledično enako primerne za določitev notranjih statičnih količin zaradi prometne obtežbe, ki jih upoštevamo v računu realne konstrukcijske varnosti obstoječih mostov ([ARCHES D08, 2009], [Enright, 2013], [Enright, 2016]). Za razliko od numeričnih simulacij, ki so računsko in časovno zahtevne, je metoda konvolucije tudi nekaj 100-krat hitrejša.

Za analize in primerjave so bili uporabljeni rezultati meritev B-WIM na več lokacijah, ki smo jih izvajali v okviru evropskih projektov TRIMM [Ralbovsky, 2014] iz 6., ter BridgeMon [Corbally, 2014] iz 7. okvirnega programa Evropske komisije. V nadaljevanju sta opisana razvoj in verifikacija metode konvolucije kot robustne alternative obstoječim načinom določanja pričakovanih maksimalnih notranjih statičnih količin mostov zaradi vplivov prometa.

V analizah smo uporabili rezultate meritev B-WIM na treh avtocestnih odsekih s prometom v dveh pasovih v isto smer, in sicer:

- 2-letne meritve s podatki o 793.800 vozilih na odseku Ljubljana-Kranj (vir A),
- 1-mesečne meritve s podatki o 101.680 vozilih na odseku Ljubljana-Celje (vir B) in
- 2-mesečne meritve s podatki o 131.600 tovornih vozilih na odseku Celje-Maribor (vir C).

V prvem primeru je bil tovorni zmeren, v preostalih dveh pa gost. Izmed zbranih podatkov smo uporabili osne pritiske, medosne razdalje in čase prihodov vozil na most do dveh tisočink sekunde natančno. Zaradi primerjave z rezultati drugih avtorjev smo notranje statične količine računali na hipotetičnih prostoležečih mostovih dolžin med 5 in 45 m.

3 RAČUN PRIČAKOVANIH MAKSIMALNIH NOTRANJIH STATIČNIH KOLIČIN MOSTOV

Namen raziskave je bil razviti časovno in stroškovno učinkovit način računa realnih pričakovanih maksimalnih notranjih statičnih količin cestnih mostov zaradi prometa, ki bi bil primeren tudi za analize manj pomembnih obstoječih, predvsem starejših mostov. Njihova nosilnost je zaradi propadanja in manj zahtevnih pravilnikov v času gradnje po pravilu manjša od zahtevane v veljavnih pravilnikih za nove mostove. Razen v Sloveniji se na takih mostovih do sedaj dejanske prometne obremenitve in posledično bolj optimalni načini računa njihove konstrukcijske varnosti niso uporabljali. Upoštevanje realnih namesto projektnih učinkov prometne obtežbe bistveno poveča učinkovitost upravljanja mostov, posledično se bolj optimalno porabijo omejena finančna sredstva za vzdrževanje infrastrukture. Še večji so prihranki uporabnikov zaradi manj rigoroznih ukrepov na mostovih ter posledičnega zmanjšanja prometnih zastojev.

Robustnost določitve pričakovanih maksimalnih notranjih statičnih količin mostov zaradi prometa predstavlja poseben izziv. V literaturi poznane metode zahtevajo množico predpostavk, povezanih z vhodnimi podatki, kar povečuje raztros dobljenih rezultatov. V predlagani metodi konvolucije smo možnost izbire parametrov omejili z uporabo robustnih statističnih metod, ki ne zahtevajo detajlnega in subjektivnega modeliranja vhodnih podatkov.

Za mostove kratkih in srednjih razpetin, ki jih je v Evropi več kot 90 % ([SAMARIS D19, 2006], [Žnidarič, 2011]), je ključen tekoči promet brez zastojev. Kritični dogodki, ki povzročijo velike upogibne momente ali prečne sile v prerezihih mostu, so posledica bodisi enega samega zelo težkega vozila ali več sočasno vozečih lažjih vozil ([Enright, 2013], [Žnidarič, 1998]). Na krajših mostovih z razponom do 10 m lahko kritični dogodek povzroči le nekaj osi na mostu. Za razpone, daljše od 50 m, so tovrstni dogodki povezani z zastoji in gnečo na mostu.

Za izračun karakterističnih vrednosti notranjih statičnih količin najpogosteje uporabimo statistične ekstrapolacije rezultatov meritev WIM, ki jih najprej z vplivnicami pretvorimo v notranje statične količine [Žnidarič, 2017b]. Tudi največje vrednosti momentov in sil, izračunane na podlagi rezultatov WIM, so gotovo nižje, kot jih pričakujemo v preostali življenjski dobi mostu. Posledično izmerjene podatke WIM ali iz njih izraču-

nane notranje statične količine ekstrapoliramo, največkrat s porazdelitvami ekstremnih vrednosti. Alternativno nekateri avtorji ([Enright, 2010], [Enright, 2013]) priporočajo dolgotrajne numerične simulacije prometa s stotinami milijonov vozil, ki na podlagi meritev WIM generirajo kombinacije vozil, ki dajo višje notranje statične količine mostu.

Ne glede na uporabljeno metodo na rezultate najbolj vplivajo podatki z repov porazdelitev, ki vključujejo najtežja vozila. Pomembna značilnost prometa je število zelo težkih izrednih prevozov, ki imajo po pravilu posebne dovolilnice in bi se morali obravnavati posebej. Delež teh vozil v prometnem toku in način njihove kontrole se od države do države razlikuje, kar pomembno kroji rezultate modeliranja prometnih obtežb in posledično notranjih statičnih količin.

Na rezultate modeliranja bistveno vplivajo tudi dinamične obremenitve mostu zaradi vozil in porazdelitev prometne obtežbe med nosilne elemente oziroma koliko obtežbe dejansko prevzame posamezni nosilni element [Žnidarič, 2019].

3.1 Metoda konvolucije

Metoda konvolucije se že vrsto let uporablja za modeliranje pričakovanih maksimalnih notranjih statičnih količin mostov zaradi prometne obtežbe, predvsem upogibnih momentov v sredini razpetine. Vplivi iz sosednjih pasov na upogibne momente in prečne sile nad podporo so namreč praviloma bistveno manjši zaradi neposrednega vnosa obtežbe v podporo. Tehnika je računsko neprimerno manj zahtevna od računskih simulacij, kjer preko mostu spuščamo množice na modelih temelječih vozil in iščemo maksimalne učinke na konstrukcijo. Že Moses in Verma [Moses, 1987] sta pokazala, da daje konvolucija podobne rezultate kot simulacije Monte Carlo, če velja predpostavka neodvisnega prometa v dveh sosednjih pasovih. Tudi v Sloveniji metodo konvolucije uporabljamo več kot 25 let ([Žnidarič, 1994], [Žnidarič, 1997], [Žnidarič, 2010], [Žnidarič, 2019]).

Metoda predpostavlja, da so največji učinki obtežbe posledica po enega vozila iz dveh sosednjih pasov, ki se srečata na mostu. Ta predpostavka velja za mostove preko ene ali več razpetin, katerih skupna dolžina vplivnice je krajša od približno 40 m. Ob predpostavki neodvisnega prometa v obeh pasovih verjetnostno funkcijo za vsoto dveh slučajnih spremenljivk X in Y , ki lahko predstavljata izmerjene obtežbe ali izračunane notranje statične količine, izrazimo kot:

$$f_z(z) = \sum_{k=1}^n f_x(k) f_y(z-k), \quad (2)$$

kjer sta f_x in f_y verjetnostni funkciji obtežbe ali notranje statične količine v dveh sosednjih pasovih, f_z je verjetnostna funkcija vsote vplivov z obeh pasov, n pa je število vseh vrednosti iz zaloge vrednosti slučajne spremenljivke X . Po teoriji porazdelitev ekstremnih vrednosti dobimo porazdelitveno funkcijo največje vrednosti, če damo osnovno porazdelitveno funkcijo na potenco N_T . Pri tem je N_T število srečanj tovornih vozil na mostu (ang. *multiple-presence* ali *MP events*) v obravnavanem časovnem obdobju. Določimo jih z izrazom [Ang, 2006]:

$$N_T = N_{MP} N_Y N_P, \quad (3)$$

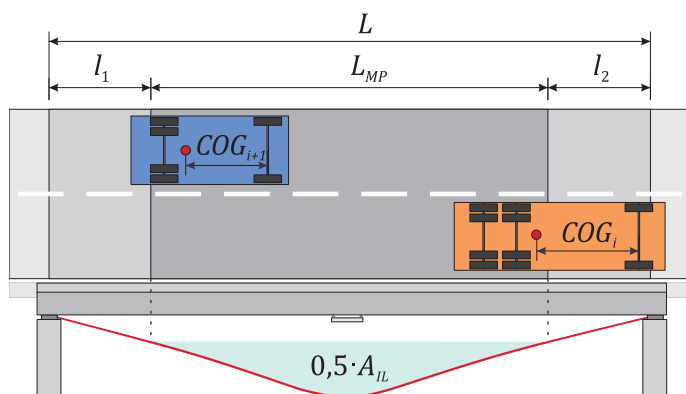
kjer je N_{MP} dnevno število dogodkov MP, N_Y število upoštevanih

dni v letu (običajno 250 delovnih dni), N_P pa je upoštevano število let.

Teoretično bi dogodek MP najbolj natančno določili s seštevanjem časovnih potekov notranjih statičnih količin zaradi vozil z obeh pasov. Najprej bi iz izmerjenih osnih pritiskov, medosnih razdalj in hitrosti ter uporabljene vplivnice izračunali časovni potek momentov ali prečnih sil. Pogoju za MP bi zadostili, če bi bila maksimalna vrednost seštetega poteka zaradi dveh vozil večja od maksimalnih vrednosti zaradi posameznih vozil v dogodku. Za kolikor toliko pravilen izračun bi morali poznati dejanske raznose obtežbe na sosednje prometne pasove, kar je mogoče izmeriti ali modelirati. Žal je postopek računsko zahteven in zaradi pomanjkljivega podatka o dejanskem prečnem položaju vozil na mostu, razen v katerem prometnem pasu vozijo, nenatančen.

Večina avtorjev ([Moses, 1979], [Enright, 2013]) za račun MP upošteva celotno dolžino vplivnice. Tak pristop je konservativen, ker upošteva za prispevek k določitvi maksimalnih pričakovanih notranjih sil tudi dogodke, ko so vozila na začetku ali koncu mostu in so posledično skupni upogibni momenti manjši od upogibnega momenta zaradi enega samega vozila na mestu maksimalnih obremenitev. Da bi se izognili tem nepomembnim dogodkom, smo predlagali izkustveno metodo, kjer določimo dogodek MP iz pogoja, da težišči zaporednih vozil v sosednjih pasovih, COG_i in COG_{i+1} , ležita znotraj efektivne dolžine vplivnice L_{MP} [Žnidarič, 2017a]. Vplivnico definiramo kot funkcijsko vrednost notranje statične količine na izbranem mestu na konstrukciji, tipično na mestu maksimalne vrednosti izbrane statične količine, zaradi premikajoče se enotske obtežbe. Pri upogibnih momentih na mostovih z eno razpetino je to mesto po pravilu v sredini razpetine. Realne vplivnice se zaradi »neidealnih« robnih pogojev in debeline prekladne konstrukcije razlikujejo od teoretičnih računskih vplivnic, zato jih v praksi kalibriramo z uporabo rezultatov B-WIM ali podobnih meritev odziva konstrukcije pod prometno obtežbo.

L_{MP} definiramo kot del dolžine vplivnice, ki celotno površino pod njo, A_{IL} , razdeli na dve polovici. Če je posamezno vozilo zunaj območja L_{MP} , privzamemo, da je prispevek vozila k notranji statični količini zaradi dveh vozil manjši od prispevka enega vozila v najbolj neugodnem položaju na mostu, in se dogodek MP ne zgodi. Za realne mostove preko ene razpetine znaša L_{MP} za upogibne momente (slika 1) med 0,5 in 0,7 celotne dolžine



Slika 1. Določitev efektivne dolžine vplivnice L_{MP} v odvisnosti od njene oblike za most čez eno razpetino.

vplivnice. Postopek zaradi različnih tež in konfiguracij vozil v sosednjih pasovih ter omejenih podatkov o točnem položaju vozil na mostu ni povsem natančen. Posledično se nekateri mejni dogodki izpustijo in drugi neupravičeno prištejejo. Ker pa je pri računu parametra N_{MP} upoštevanih nekaj 10.000 do 100.000 vozil, lahko sklepamo, da je dobljeni rezultat zelo dober približek dejanskemu številu srečanj, brez dogodkov z vozili na začetku ali koncu razpetine.

Zaporedje dveh vozil opredelimo kot MP, če se obe njuni težišči v nekem trenutku nahajata v območju L_{MP} . Najprej izračunamo čase, ko zaporedni vozili, i in $i+1$, ki vozita v isto smer, to območje dosežeta in zapustita:

$$t_{i,1} = T_i + \frac{l_1 + COG_i}{v_i}, \text{ čas vozila } i \text{ na začetku } L_{MP}$$

$$t_{i,2} = T_i + \frac{L - l_2 + COG_i}{v_i}, \text{ čas vozila } i \text{ na koncu } L_{MP}$$

$$t_{i+1,1} = T_{i+1} + \frac{l_1 + COG_{i+1}}{v_{i+1}}, \text{ čas vozila } i+1 \text{ na začetku } L_{MP}$$

$$t_{i+1,2} = T_{i+1} + \frac{L - l_2 + COG_{i+1}}{v_{i+1}}, \text{ čas vozila } i+1 \text{ na koncu } L_{MP}$$

kjer so:

l_1, l_2 razdalji v skladu s sliko 1, v m,

T_i, T_{i+1} časa prihodov prvih osi zaporedno zaznanih vozil na začetek mosta, v s,

v_i, v_{i+1} hitrosti obeh vozil, v m/s, in

COG_i, COG_{i+1} oddaljenosti težišč obeh vozil od prvih osi, v m.

Če vozilo $i+1$ vozi v nasprotni smeri, se enačbi za to vozilo ustrezno prilagodita:

$$t_{i+1,1} = T_{i+1} + \frac{l_2 + COG_{i+1}}{v_{i+1}}, \text{ čas vozila } i+1 \text{ na začetku } L_{MP} \quad (5)$$

$$t_{i+1,2} = T_{i+1} + \frac{L - l_1 + COG_{i+1}}{v_{i+1}}, \text{ čas vozila } i+1 \text{ na koncu } L_{MP}$$

Vsi podatki, razen l_1 in l_2 , so zbrani v bazah meritev WIM. Za doseganje primerne natančnosti je treba čase prihodov meriti vsaj na stotinko sekunde natančno, česar vsi cestni sistemi WIM ne zagotavljajo. Vse meritve B-WIM, opisane v članku, smo zajemali z intervalom 1/512 s.

Če vozilo i doseže območje L_{MP} pred vozilom $i+1$, je pogoj za MP izpolnjen, če velja:

$$t_{i+1,1} < t_{i,2}, \quad (6)$$

v nasprotnem primeru pa, če velja:

$$t_{i,1} < t_{i+1,2}. \quad (7)$$

Realne vrednosti N_{MP} se v odvisnosti od gostote prometa in dolžine vplivnice gibljejo med nekaj do nekaj sto dogodki na dan.

3.2 Povratna doba

Če je verjetnost, da slučajna spremenljivka Z v poljubnem letu preseže določeno vrednost z , enaka p , potem je povratna doba $R(Z)$ definirana kot ([Ang, 2006], [Enright, 2010]):

$$R(Z) = \frac{1}{p} \leftrightarrow p = \frac{1}{R(Z)}. \quad (8)$$

Verjetnost, da Z v N_Y letih ne preseže določene vrednosti z , je enaka:

$$P[Z \leq z \text{ v } N_Y \text{ letih}] = P[Z \leq z \text{ v enem letu}]^{N_Y} = (1 - p)^{N_Y} =$$

$$\left(1 - \frac{1}{R(Z)}\right)^{N_Y} = (1 - \alpha), \quad (9)$$

kjer je α verjetnost, da slučajna spremenljivka Z v N_Y letih vsaj enkrat preseže vrednost z . Od tod izpeljemo poznano enačbo za povratno dobo:

$$R(Z) = \frac{1}{1 - (1 - \alpha)^{1/N_Y}} \quad (10)$$

Če na primer izberemo, da sta $\alpha = 5\%$ in $N_Y = 50$ let, je povratna doba $R(Z)$ enaka 975,3 leta. Če sta $R(Z) \gg 1$ in $N_Y < R(Z)$, lahko enačbo (10) poenostavimo:

$$\alpha = 1 - (1 - p)^{N_Y} = 1 - \left(1 - \frac{1}{R(Z)}\right)^{N_Y} \approx 1 - e^{-\frac{N_Y}{R(Z)}} \quad (11)$$

in dobimo pogosto uporabljeni približek:

$$R(Z) \approx -\frac{N_Y}{\ln(1 - \alpha)} \approx \frac{N_Y}{\alpha}. \quad (12)$$

Za ta primer je v Evrokodu [SIST, 2006] podana približna vrednost povratne dobe 1000 let.

3.3 Ekstrapolacija s porazdelitvami ekstremnih vrednosti

Z meritvami WIM vedno zajamemo končno število podatkov o vozilih, med katerimi zelo verjetno ni tistih, ki bodo v preostali življenjski dobi mostu povzročile maksimalne notranje statične količine zaradi prometa. Zato je treba razpoložljive podatke bodisi ekstrapolirati ali jih uporabiti v numeričnih simulacijah, katerih rezultat bodo tovrstni bolj neugodni obtežni dogodki.

Statistična ekstrapolacija s porazdelitvami ekstremnih vrednosti je najbolj pogost postopek za napovedovanje maksimalnih pričakovanih učinkov prometne obtežbe v izbranem obdobju. Izhajamo iz porazdelitve maksimalnih vrednosti notranjih statičnih količin v nekem obdobju, ki jih izračunamo iz meritev WIM. Najbolj pogosto za verjetnostno funkcijo, za katero uporabimo maksimalne dnevne ali maksimalne letne vrednosti, uporabimo normalno porazdelitev ali Gumbelovo porazdelitev ekstremnih vrednosti. Rezultate prikažemo na verjetnostnem papirju ali diagramu z izbrano funkcijo na ordinati. Če vrednosti iz repa porazdelitvene funkcije sledijo izbrani funkciji, z linearno interpolacijo skozi te vrednosti odčitamo pričakovan upogibni moment ali silo v skladu z izbrano povratno dobo.

3.3.1 Odčitavanje rezultatov

Pri obravnavi dnevni ali letni maksimalni vrednosti je z vrednost, ki je slučajna spremenljivka v enem dnevu oziroma letu ne bo presegla z verjetnostjo $(1-p)$:

$$P[Z \leq z] = F_Z(z) = 1 - p \rightarrow z = F_Z^{-1}(1 - p) = F_Z^{-1}\left(1 - \frac{1}{R(Z)}\right), \quad (13)$$

kjer je F_Z porazdelitvena funkcija za dnevne ali letne maksimalne vrednosti.

Če na primer poznamo maksimalne letne vrednosti upogibnih momentov ali prečnih sil, lahko ob predpostavki Gumbelove porazdelitve karakteristično vrednost, ki je slučajna spremen-

ljivka Z za povratno dobo 975,3 leta oz. 1000 let ne preseže, izračunamo po enačbi:

$$z = F_Z^{-1}(1-p) = F_Z^{-1}\left(1 - \frac{1}{975,3}\right) = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{975,3}\right)\right) = 6,88 \approx -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{1000}\right)\right) = 6,91. \quad (14)$$

Pri ocenah vpliva prometa na podlagi podatkov WIM bolj pogosto uporabimo maksimalne dnevne vrednosti. Če upoštevamo 5 % verjetnost dnevnega presežanja in 250 delovnih dni na leto, znaša povratna doba za obdobje 50 let:

$$R(Z) = \frac{1}{1 - (1 - \alpha)^{1/N}} = \frac{1}{1 - (1 - 0,05)^{1/50 \cdot 250}} = 243\,697 \text{ dni} \quad (15)$$

ali z uporabo približnega pristopa:

$$R(Z) \approx \frac{N_Y}{\alpha} = \frac{50 \cdot 250}{0,05} = 250\,000 \text{ dni}. \quad (16)$$

V tem primeru je ob upoštevanju Gumbelove porazdelitve vrednost, ki je slučajna spremenljivka ne preseže, enaka:

$$z = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{243697}\right)\right) = 12,40 \approx -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{250000}\right)\right) = 12,43 \quad (17)$$

Primer na sliki 2 prikazuje porazdelitveno funkcijo maksimalnih dnevnih upogibnih momentov, ki smo jih izračunali z množenjem osnih pritiskov iz vira podatkov A in 25 m dolge vplivnice mostu. Dobljeni rezultati so ekstrapolirani iz različnega števila podatkov iz repa porazdelitve. Če na primer želimo dobiti upogibni moment s 75-letno povratno dobo, ob upoštevanju 250 delovnih dni v letu, karakteristično vrednost odčitamo pri ordinati:

$$z = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{75 \cdot 250}\right)\right) = 9,84. \quad (18)$$

Slučajna spremenljivka Z se porazdeljuje po normirani Gumbelovi porazdelitvi ($u=0$ in $b=1$), medtem ko se slučajna spremenljivka M , ki predstavlja upogibni moment, porazdeljuje po Gumbelovi porazdelitvi s parametroma $u \neq 0$ in $b \neq 1$:

$$m = u - \frac{1}{b} \ln(-\ln(1-p)) = u + \frac{z}{b}, \quad (19)$$

kjer parametra u in b izračunamo z linearno ekstrapolacijo, kot je prikazano na sliki 2. Različni avtorji predlagajo različna števila podatkov iz repa verjetnostne funkcije, ki jih uporabimo za ekstrapolacijo, od 5 % N_Y [Sivakumar, 2011] do 30 % N_Y [OBrien, 2010], in funkcije $2\sqrt{N_Y}$ [Castillo, 1988], kjer je N_Y število vseh upoštevanih maksimalnih vrednosti. Posledično subjek-

tivna izbira števila N_Y bistveno vpliva na ekstrapolirane vrednosti notranjih sil. V primeru na sliki 2, ki prikazuje porazdelitev 687 maksimalnih dnevnih upogibnih momentov, se karakteristične vrednosti upogibnih momentov, odčitane pri $z=9,84$, gibljejo med 2580 in 2885 kNm. Da bi zmanjšali vpliv subjektivne izbire parametrov pri ekstrapolaciji notranjih sil, smo za mostove razpetin do 45 m raziskali možnost uporabe metode konvolucije.

3.3.2 Obdelava vhodnih podatkov

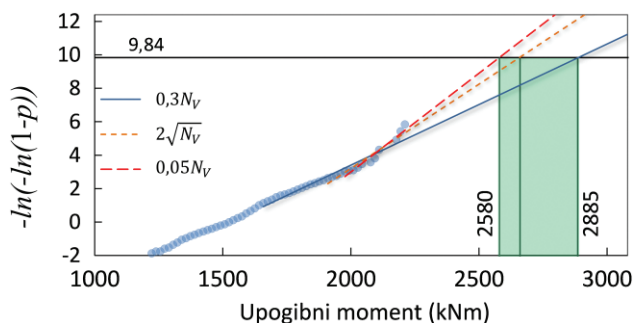
Postopek ekstrapolacije se začne s prilagoditvijo izmerjenih podatkov. Poznamo tri načine, parametrično prilagajanje na osnovi vseh podatkov, parametrično prilagajanje na osnovi dela podatkov in neparametrično prilagajanje. V prvem načinu iščemo parametre ene ali več porazdelitev, ki najbolj opišejo vse izmerjene podatke. V zadnjem načinu v analizi upoštevamo surove podatke. V srednjem načinu, ki se pri modeliranju prometnih obtežb zaradi dejstva, da so za analize mostov pomembne samo največje obtežbe, največ uporablja, pa prilagodimo modelirano funkcijo izbranemu številu podatkov iz repa porazdelitve.

Rezultat je odvisen od števila točk in funkcije, ki jo izberemo za ekstrapolacijo. Da bi se izognili subjektivnosti, smo izbiro in prilagajanje funkcije nadomestili z glajenjem izmerjenih podatkov. Za glajenje smo uporabili različne kernelove funkcije gostote [Corbally, 2014], ki smo jih upoštevali preko celotne porazdelitve. Bistvo kernelovega postopka je, da vsak podatek nadomestimo s funkcijo, največkrat z Gaussovo, kvadratno ali trikotno. Obliko funkcije in širino glajenja levo in desno od podatka definirajo parametri. Za Gaussovo funkcijo je to pasovna širina h :

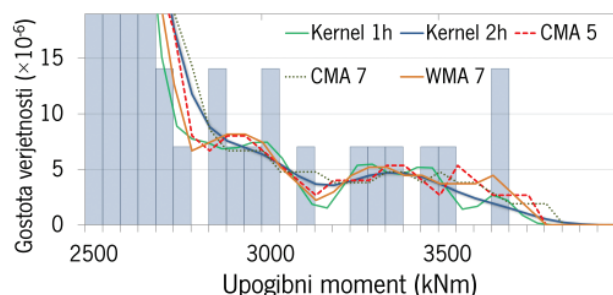
$$h = \left(\frac{4\sigma^5}{3n}\right)^{1/5} \approx 1.06 \sigma n^{-0.2}, \quad (20)$$

kjer je n število podatkov v vzorcu, σ pa njihov standardni odklon. Za kvadratno (ang. *Central Moving Average* ali *CMA*) in trikotno drseče povprečje (ang. *Triangular Weighted Moving Average* ali *WMA*) izberemo število točk, ki jih povprečimo v posameznem koraku [Press, 2007]. Prispevke funkcij seštejemo, da dobimo poglajeni približek osnovne porazdelitve gostote verjetnosti. Postopek je ilustriran v [Žnidarič, 2017a].

Izbira funkcije glajenja in njenih parametrov, če so zmerni, ne vpliva bistveno na končne rezultate. Glavni namen glajenja je, da premosti pogosto pomanjkljive podatke meritev WIM v repu porazdelitve, zaradi omejenega števila izmerjenih ekstremnih dogodkov. Posledično bolj zanesljivo odčitamo karakteristične vrednosti. Slika 3 prikazuje primer močno povečane funkcije gostote verjetnosti repa upogibnih momentov, izračunanih iz vira podatkov A in vplivnice na 25 m dolgem prostoležečem mostu. Ne glede na izbor funkcije in parametrov za glajenje – prikazani so rezultati uporabe dveh Gaussovih kernelovih funkcij, dveh kvadratnih in enega trikotnega drsečega povprečja – so razlike majhne. Posledično so majhne tudi razlike v rezultatih modeliranja notranjih statičnih količin.



Slika 2. Ekstrapolacija upogibnih momentov, Gumbelov verjetnostni papir, različno število upoštevanih podatkov.



Slika 3. Primer uporabe različnih funkcij za glajenje upogibnih momentov, izračunanih iz rezultatov WIM.

3.4 Karakteristične vrednosti notranjih statičnih količin

Pri projektiranju ali analizi konstrukcij potrebujemo karakteristične vrednosti notranjih statičnih količin zaradi prometnih obtežb. Evrokod [SIST, 2006] jih določa pri povratni dobi 975,3 oz. 1000 let. V ZDA [AASHTO, 2012] in Kanadi [OHBD, 1979, 1983, 1991] uporabljajo pričakovano srednjo vrednost 75-letnih ali 50-letnih obremenitev ([Nowak, 1993], [Nowak, 1994]) ali 75-letno povratno dobo, ki ustreza dogodku, da je vrednost obremenitev presežena enkrat v 75 letih. Te vrednosti so si blizu, vendar niso enake. Zaradi lažjih primerjav z rezultati iz literature [Enright, 2016] smo v analizah uporabljali 75-letno povratno dobo.

Predpostavimo torej, da poznamo maksimalne letne vrednosti notranjih statičnih količin, X , in njihovo porazdelitveno funkcijo F_X :

$$F_X(X) = P(X \leq x) \quad (21)$$

Če letne maksimume razvrstimo v bloke po 75 let, potem je porazdelitvena funkcija maksimuma 75-letnih vrednosti, $G(x)$, enaka [Ang, 2006]:

$$G(x) = F_X^{75}(x) \quad (22)$$

Notranjo statično količino s 75-letno povratno dobo (X_{75}) za 75-letni blok (ali za 75-letno življenjsko dobo) izračunamo z enačbo:

$$X_{75} = F_X^{-1}\left(1 - \frac{1}{R(Z)}\right) = F_X^{-1}\left(1 - \frac{1}{75}\right) = F_X^{-1}(0,987) \quad (23)$$

oziroma:

$$X_{75} = G^{-1}\left(\left(1 - \frac{1}{R(Z)}\right)^{N_Y}\right) = G^{-1}\left(\left(1 - \frac{1}{75}\right)^{75}\right) = G^{-1}(0,365) \quad (24)$$

Notranjo statično količino s 75-letno povratno dobo za 75-letno življenjsko dobo iz porazdelitvene funkcije torej odčitamo pri ordinati 0,365.

Podobno bi notranjo statično količino s 1000-letno povratno dobo in 50-letno življenjsko dobo konstrukcije v skladu z Evrokodom odčitati pri:

$$X_{1000} = G^{-1}\left(\left(1 - \frac{1}{1000}\right)^{50}\right) = G^{-1}(0,951) \quad (25)$$

3.5 Primer rezultatov računa konvolucije

Slika 4 prikazuje faze računa upogibnih momentov z metodo konvolucije. Uporabili smo vir podatkov A in izmerjene osne pritiske ob upoštevanju medosnih razdalj pomnožili s vplivnico upogibnih momentov na sredini prostoležečega mostu dolžine 25 m. Na diagramih (a) in (b) sta podani funkciji gostote verjetnosti izračunanih upogibnih momentov zaradi vozil v voznem in prehitvalnem pasu. Na diagramu (c) je podana skupna gostota verjetnosti, izračunana z enačbo (2), na diagramu (d) pa detajl repa iste funkcije. Na diagramu (e) je prikazan rezultat konvolucije za različna časovna obdobja in odčitka pri $G^{-1}(0,365)$, v skladu z enačbo (24), ki daje za 75-letno povratno dobo upogibni moment 2472 kNm, ter pri in $G^{-1}(0,951)$, v skladu z enačbo (25), ki daje za 1000-letno povratno dobo in 50-letno življenjsko dobo upogibni moment 2663 kNm.

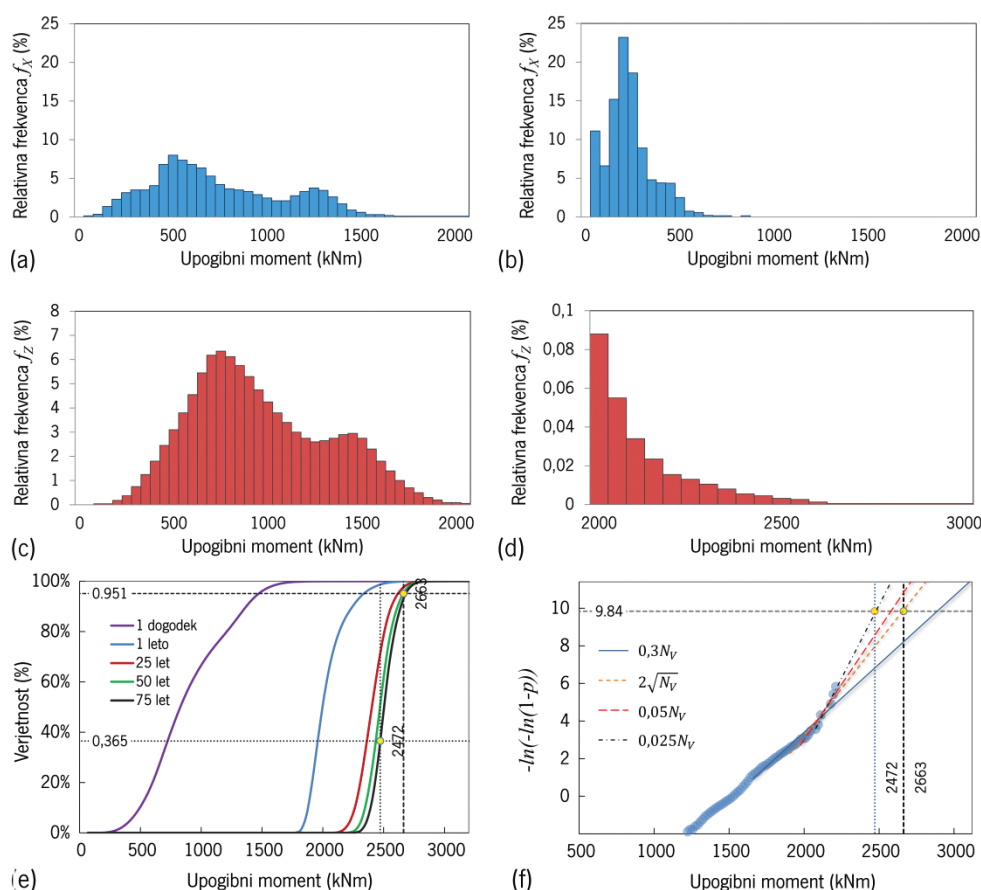
Na diagramu (f) so za primerjavo podani rezultati na Gumbelovem verjetnostnem papirju, kjer so vrednosti na ordinati transformirane po enačbi $-\ln(-\ln(1-p))$. Prikazane so ekstrapolirane premice, izračunane iz v literaturi predlaganih $0,05N_v$, $0,30N_v$ in $2\sqrt{N_v}$ ([Castillo, 1988], [Enright, 2013]), kjer je N_v celotno število vseh maksimalnih dnevnih vrednosti upogibnih momentov, v tem primeru 687. Iz diagrama je očitno, da daje v tem primeru metoda konvolucije pri 75-letni povratni dobi manj konservativne rezultate, ki se z ekstrapolacijo ujema, če upoštevamo zgolj $0,025N_v$ oz. le 17 najvišjih vrednostih iz repa porazdelitve dnevnih upogibnih momentov. Primarni razlog za ujemanje pri nizkem deležu N_v je, da Gumbelova funkcija navzgor ni omejena, teže vozil in posledično največje izmerjene notranje statične količine pa so. V prikazanem primeru zadnjih približno 20 vrednosti vedno slabše sledi predpostavljeni Gumbelovi porazdelitvi. Identični način računa uporabimo za prečne sile in, v primeru več povezanih razpetin, za upogibne momente nad podporo. Detajlni postopek računa notranjih statičnih količin z metodo konvolucije je podan v [Žnidarič, 2017a].

3.6 Primerjava rezultatov konvolucije in simulacije

Da bi potrdili ustreznost rezultatov, dobljenih z metodo konvolucije, smo jih primerjali z rezultati simulacije Monte Carlo, ki jih je iz istih podatkov pripravil avtor metode za detajlno numerično simulacijo vplivov prometne obtežbe [Enright, 2016]. Na podlagi porazdelitvenih funkcij in statističnih parametrov, ki jih izpelje iz podatkov WIM, modelira skupne mase, število in pritiske osi, tipe ter medsebojne razdalje vozil. Z generiranjem zaporedij več sto milijonov vozil oz. več desetletij prometa se izogne potrebi po ekstrapolaciji in posledični razpršenosti rezultatov, ki jo kaže primer na sliki 4(f). So pa rezultati zelo odvisni od uporabljenih porazdelitvah funkcij in drugih predpostavk, uporabljenih pri modeliranju vozil.

Pri primerjavi rezultatov konvolucije in simulacije smo uporabili:

- vir podatkov A,
- samo vozila z največ sedmimi osmi, da smo izključili težke izredne prevoze, ki jih je treba obravnavati ločeno,
- dva pasova v isti smeri oz. avtocestni promet,
- račun upogibnih momentov in prečnih sil,
- vplivnice prostoležečih mostov z razpetinami 5, 15, 25, 35 in 45 m.



Slika 4. Gostota verjetnosti upogibnih momentov v (a) voznem in (b) prehitevalnem pasu, (c) gostota verjetnosti skupnih momentov, (d) detalj repa porazdelitve skupnih momentov, (e) rezultati konvolucije za 75-letno in 1000-letno povratno dobo in (f) ekstrapolacije Gumbelove porazdelitve za 75-letno povratno dobo.

Primerjali smo vrednosti notranjih statičnih količin pri 75-letni povratni dobi (preglednica 1).

V povprečju so rezultati simulacije upogibnih momentov za 10,8 %, prečnih sil pa za 3,9 % višji od rezultatov konvolucije. Razlike so večje pri razpetinah pod 35 m, pri daljših so manjše od 2 %. Največje razlike opazimo pri najkrajši razpetini, kjer so

upogibni momenti, izračunani z metodo konvolucije, za 31,5 % nižji od simuliranih vrednosti. Razlike za prečne sile so po pričakovanju manjše.

Glavni razlog za razlike so simulirana vozila, ki so občutno težja od izmerjenih. V preglednici 2 so izbrani podatki o simuliranih vozilih, ki so povzročila največje upogibne momente [Enright, 2016]. O količini simuliranih vozil priča podatek, da bi se eno vozilo pojavilo šele leta 2079. Prva dva dogodka sta posledica srečanja dveh tovornih vozil na mostu, preostalih osem enega samega vozila. Za 25-metrsko razpetino so vsa najbolj neugodna tovorna vozila 4-osna, s skupno maso med 68 in 73 tonami. Skupna masa najtežjega vozila je za 16 % večja od najtežjega tovornega izmerjenega vozila, ki je tehtalo 62,7 tone, naslednja štiri so tehtala le med 51,7 in 57,2 tone. Poleg tega znašajo osni pritiski prvih dveh osi vseh teh vozil med 17 in 29 ton, medtem ko izmerjeni osni pritiski v nobenem primeru niso presegali 10,5 tone po osi. Dodatno je 57 % medosnih razdalj simuliranih vozil krajših od dejanskih, kar dodatno povečuje notranje statične količine. Vse pretirane simulirane vrednosti so v preglednici 2 osenčene.

Posledično dobimo z metodo konvolucije, ki bolj dosledno upošteva izmerjene teže in karakteristike realnih tovornih vozil, manj konservativne rezultate kot s simulacijami. Pri slednjih so razlike zelo odvisne od predpostavk in porazdelitvenih funkcij, uporabljenih pri generiranju prometa.

Razpetina (m)	5	15	25	35	45
Upogibni momenti (kNm)					
Simulacija	312,5	1433	2676	3882	5233
Konvolucija	214,2	1255	2485	3810	5173
Razmerje	0,685	0,876	0,928	0,981	0,989
Prečne sile (kN)					
Simulacija	281,8	387,4	435,7	463,7	482,0
Konvolucija	245,8	366,9	429,7	462,3	482,4
Razmerje	0,872	0,947	0,986	0,997	1,001

Preglednica 1. Primerjava notranjih statičnih količin, izračunanih pri 75-letni povratni dobi s konvolucijo in simulacijo.

Dogodek	Datum	Upogibni moment (kNm)	Hitrost (km/h)	Dolžina (cm)	Vozni pas	Osi	Skupna masa (kg)	Osn pritisk 1 (kg)	Osn pritisk 2 (kg)	Osn pritisk 3 (kg)	Osn pritisk 4 (kg)	Medosna razdalja 1 (cm)	Medosna razdalja 2 (cm)	Medosna razdalja 3 (cm)
1	26.11.49	2 816	104,0	540	1	2	14 500	6 900	7 700			540		
			88,9	490	2	4	72 000	23 100	25 400	11 900	11 600	150	210	130
2	13.08.15	2 762	114,8	440	1	3	22 800	6 600	10 500	5 700		310	130	
			77,4	630	2	4	68 000	19 800	22 600	13 500	12 000	190	300	140
3	02.06.18	2 641	82,8	510	1	4	72 200	25 900	24 600	11 700	10 000	130	230	150
4	27.06.59	2 603	67,0	540	1	4	72 900	22 100	23 800	14 100	12 800	180	230	130
5	17.08.13	2 589	86,0	550	1	4	72 600	23 600	23 300	13 100	12 600	180	240	130
6	23.04.42	2 585	78,8	560	1	4	71 700	24 000	29 200	9 700	8 800	200	230	130
7	25.01.69	2 585	79,2	550	1	4	72 800	22 500	23 700	11 800	14 900	180	240	130
8	03.05.79	2 567	68,8	550	1	4	71 800	23 800	25 000	10 700	12 300	190	230	130
9	21.09.19	2 565	89,3	520	1	4	71 900	17 400	25 800	16 100	12 500	150	240	130
10	03.09.30	2 560	66,6	520	1	4	70 400	27 100	24 700	8 000	10 600	160	220	140

Preglednica 2. Simulirana vozila, ki so povzročila 10 največjih upogibnih momentov na prostoležečem mostu z razpetino 25 m [Enright, 2016].

4 ANALIZA OBČUTLJIVOSTI PARAMETROV

V nadaljevanju smo analizirali parametre, ki vplivajo na rezultate s konvolucijo izračunanih notranjih statičnih količin [Žnidarič, 2017a]:

- glajenje porazdelitev: brez glajenja, z Gaussovo kernelovo funkcijo z različnimi pasovni širinami po enačbi (20), s centralnim in s trikotnim drsečim povprečenjem, oboje s 3, 5, 7 in 15 točkami;
- upoštevanje prometa v vseh ali samo v delovnih dneh,
- (ne)vklučitev težkih posebnih prevozov, opredeljenih kot vozila z več kot sedmimi osmi; v Sloveniji sicer vsako vozilo, katerega masa presega 40 ton, potrebuje posebno dovoljenje;
- število potrebnih podatkov o vozilih iz meritev WIM za zanesljivo določitev vplivov prometne obtežbe; do te analize so bila v svetovni literaturi podana zgolj inženirsko ocenjena priporočila [COST 323, 2006].

4.1 Glajenje porazdelitev

Rezultati kažejo, da nizka stopnja glajenja, do 2h pri Gaussovi funkciji ali do 5-točkovno glajenje pri drsečih povprečjih, minimalno vpliva na rezultate, pomaga pa premagati vrzeli v repih porazdelitev in omogoča bolj natančno odčitavanje iz porazdelitvenih funkcij (slika 3).

Na splošno so učinki glajenja podobni učinkom modeliranja repov. V obeh primerih so rezultati odvisni od tega, kako model sledi dejanskim podatkom.

4.2 Vpliv izrednih prevozov

Kljub majhnemu deležu zelo težkih tovornih vozil na slovenskih cestah le-ta znatno vplivajo na izračunane pričakovane

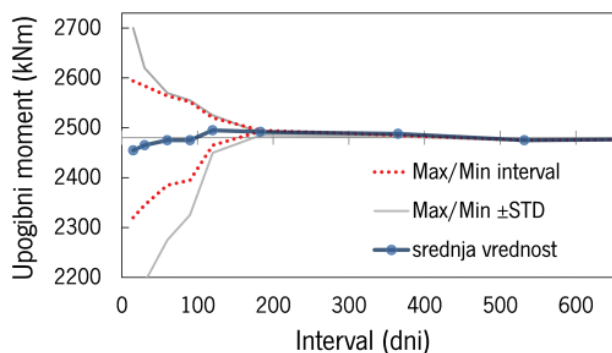
maksimalne notranje statične količine. V primeru vira podatkov B so se le-te povečale za 20 %, čeprav se je v povprečju čez most peljalo samo eno vozilo na dan z več kot sedmimi osmi. Pri modeliranju prometnih obremenitev je zato bistveno, da pridobimo zanesljive podatke o tovrstnih vozilih in da jih v modelu pravilno upoštevamo.

4.3 Vpliv upoštevanih dni v tednu

Z metodo konvolucije izračunane notranje statične količine iz vseh treh virov podatkov kažejo, da upoštevanje podatkov WIM iz različnih dni v tednu (samo delavniki, brez nedelj ali vsi dnevi) minimalno vpliva na izračunane upogibne momente in prečne sile. Ugotovljene največje razlike med izračunanimi karakterističnimi vrednostmi notranjih statičnih količin so bile, ne glede na upoštevane dneve v tednu, manjše od 1,2 %.

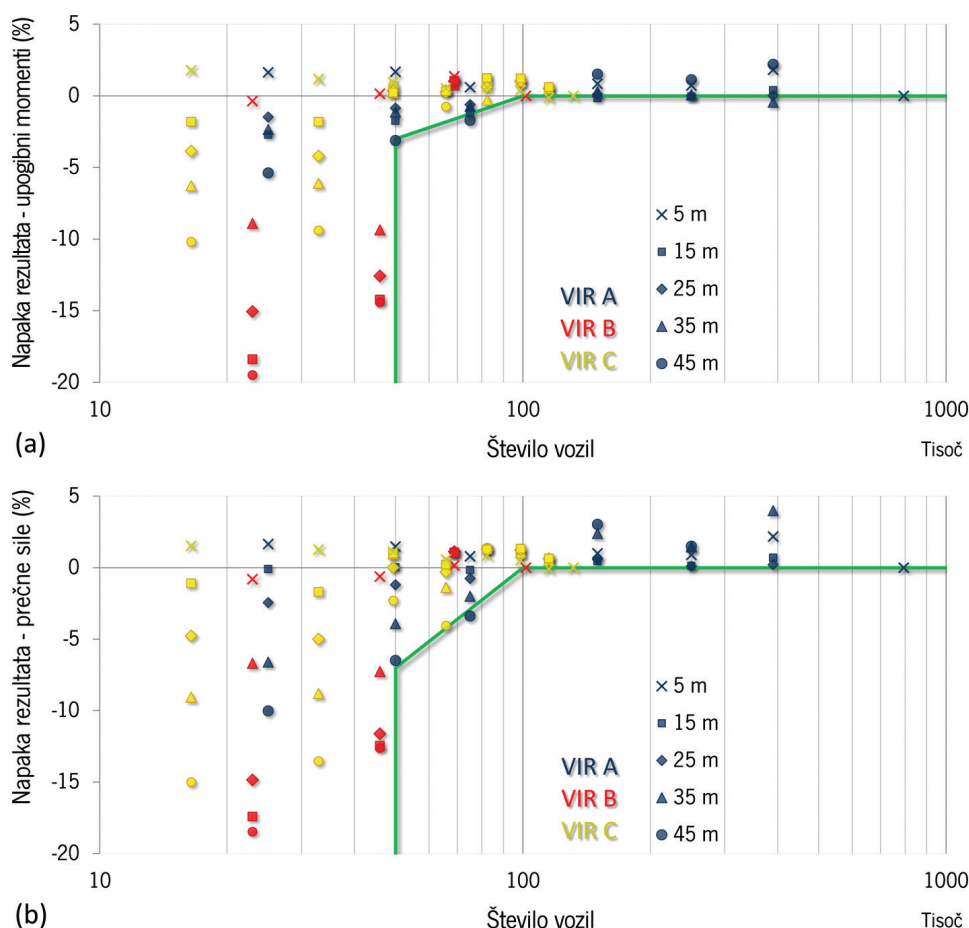
4.4 Vpliv količine podatkov

Da bi ocenili vpliv količine uporabljenih podatkov WIM na rezultate modeliranja notranjih statičnih količin, smo iz treh izmerjenih virov podatkov ter vplivnic na prostoležečih mostovih dolžin 5, 15, 25, 35 in 45 m izračunali notranje statične količine. Rezultate smo razdelili na podatkovne nize zaporednih vozil, ki so vsebovali enako število momentov oz. prečnih sil. Pri tem smo spreminjali velikost uporabljenih nizov. Slika 5 prikazuje za primer srednje vrednosti nizov upogibnih momentov, izračunanih iz osnih pritiskov iz vira podatkov A za prostoležeči most z razpetino 25 m, kjer smo podatke razdelili na 15-dnevne nize, potem na 30-dnevne, 60-dnevne itd. Dodani sta še ovojnice z upoštevanimi standardnimi odkloni ter ovojnice maksimalnih oz. minimalnih vrednosti.



Slika 5. Primer odvisnosti upogibnih momentov od trajanja meritev WIM – vir podatkov A, prostoležeči most razpetine 25 m.

- Podatkovni nizi z manj kot 50.000 vozili lahko podcenijo vrednosti notranjih statičnih količin za 20 %, raztros rezultatov je velik.
- Izjema so najkrajše razpetine (5 m), kjer se upogibni momenti in prečne sile ne spremenijo za več kot 2 % ne glede na velikost nizov. Razlog so ekstremne osne obremenitve 3- in 4-osnih tovornjakov, ki so dovolj dobro zastopane tudi v krajših nizih podatkov. Zelo težka avtodvigala in priklopniki za težke tovore, ki vplivajo na notranje statične količine daljših razpetin, so po drugi strani redki in je njihova prisotnost v krajših nizih bolj ali manj slučajna.
- Srednje vrednosti izračunanih notranjih statičnih količin se približajo končnim vrednostim, če upoštevamo vsaj 100.000 vozil. V teh primerih srednje vrednosti pri vseh raz-



Slika 6. Napake karakterističnih vrednosti (a) upogibnih momentov in (b) prečnih sil v odvisnosti od števila upoštevanih vozil.

Da bi primerjali vpliv števila podatkov na izračunane upogibne momente in prečne sile neodvisno od gostote prometa in vira podatkov, smo rezultate kot na sliki 5, dobljene iz vseh treh virov podatkov in za pet upoštevanih dolžin vplivnice, normirali tako, da smo jih delili s t. i. končnimi vrednostmi, ki smo jih dobili ob upoštevanju največjega razpoložljivega števila podatkov iz primerjanega vira na določeni dolžini vplivnice.

Na podlagi tako izračunanih napak meritev, združenih v diagramih na sliki 6, ugotavljamo:

petinah dosežejo vsaj 99 % končnih vrednosti, koeficienti variacije pa padejo pod 3 %.

- Nizi s 50.000 do 100.000 vozili so pogojno uporabni, bodo pa ob višjih nezanesljivostih rezultatov upogibni momenti oziroma prečne sile, pridobljeni iz teh nizov, lahko za nekaj odstotkov podcenjeni.

Posledično predlagamo, da se za zanesljivo modeliranje notranjih statičnih količin na cestnih mostovih uporabi podatke WIM o vsaj 100.000 tovornih vozilih.

5 ZAKLJUČEK

Prvi cilj raziskave je bil ugotoviti, kako primerna je metoda konvolucije za račun karakterističnih notranjih statičnih količin iz podatkov WIM. Rezultate smo primerjali z rezultati bolj splošno uporabljenih ekstrapolacij porazdelitev ekstremnih vrednosti, predvsem Gumbelove, ter dolgotrajnimi simulacijami Monte Carlo. Ugotavljamo, da so dobljeni rezultati primerljivi, s tem da so rezultati konvolucije bolj robustni, se bolje ujemajo z rezultati meritev dejanskega prometa in nanje subjektivne odločitve pri pripravi vhodnih podatkov bistveno ne vplivajo. Na rezultate ekstrapolacije ekstremnih vrednosti po drugi strani zelo vpliva subjektivna izbira števila podatkov z repa porazdelitve, na rezultate računskih simulacij pa izbira porazdelitvenih funkcij ter parametrov za modeliranje prometa ter vozil. Primerjava rezultatov konvolucije in simulacije je nadalje potrdila, da so ob enakih izhodiščih izračunane notranje statične količine zelo podobne. V konkretnih računskih primerih prostoležečih mostov razpetin 5 do 45 m so razlike nastopile pri krajših razpetinah, ker so bili rezultati simulacije zaradi nerealno težkih modeliranih vozil pretirano konservativni. Pri razpetinah, daljših od 15 m, so razlike padle pod 10 %. Razhajanja so po pričakovanju večja pri upogibnih momentih kot pri prečnih silah. Pri slednjih je napaka pri razpetinah, daljših od 15 m, manjša od 5 %.

V nadaljevanju smo analizirali, kako na izračunane karakteristične notranje statične količine cestnih mostov vplivajo glajenje podatkov, upoštevanje oz. neupoštevanje izrednih prevozov, upoštevanje oz. neupoštevanje vikendov ter količina podatkov WIM. Pokazali smo, da uporabljena metoda glajenja ter upoštevanje vikendov na rezultate bistveno ne vplivata. Po drugi strani je pravilno upoštevanje izrednih prevozov ključno, saj so se v primeru vira podatkov B karakteristične vrednosti upogibnih momentov in prečnih sil povečale za 20 %. Temeljni zaključek raziskave pa je, da potrebujemo za zanesljivo modeliranje notranjih statičnih količin na cestnih mostovih podatke WIM (osne pritiske, medosne razdalje in natančne čase za račun medsebojne oddaljenosti) za vsaj 100.000 težkih tovornih vozil. Viri z manj kot 50.000 podatki dajo pretirano nezanesljive rezultate, pogojno so uporabne baze s podatki o 50.000 do 100.000 vozilih.

6 LITERATURA

AASHTO, LFRD Bridge Design Specifications, American Association for State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 2012.

Agarwal, A., Wolkowicz, M., Interim Report on Ontario Commercial Vehicle Survey, Research and Development Branch, Ontario Ministry of Transportation and Communications, Downsview Ontario, 1976.

Ang, A. H., Tang, W. H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, 2. izd. Somerset: Wiley, 2006.

ARCHES D08, Recommendations on bridge traffic load monitoring, <http://arches.fehrl.org>, 2009.

ARCHES D10, Recommendations on dynamic amplification allowance, <http://www.fehrl.org>, 2009.

Avstro-ogrski imperij, Bauentwürfe für Brücken - Gradnja mostov, Reichsgefeßblatt für die im reichsrat vertretene königreiche und länder., Dunaj, 1904.

Bailey, S., Basic Principles and load models for the structural safety evaluation of existing bridges, Doktorska disertacija št. 1467, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1996.

Cantieni, R., Dynamic load tests on highway bridges in Switzerland - 60 Years experience of EMPA, EMPA Report No. 211, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, 1994.

Caprani, C., Probabilistic Analysis of Highway Bridge Traffic Loading, Doktorska disertacija, University College Dublin, 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), 901-909, 2013.

Castillo, E., Extreme Value Theory in Engineering, Academic Press, New York, 1988.

Cooper, D., The determination of highway bridge design loading in the United Kingdom from traffic measurements, Zbornik First European Conference on Weigh-in-Motion of Road Vehicles, ETH, Zürich, 1995.

Corbally, R., Žnidarič, A., Cantero, D., Hajializadeh, D., Kalin, J., Leahy, C., Zupan, E., Algorithms for Improved Accuracy of Static Bridge-WIM System, Poročilo D1.3 projekta Bridgemon, ROD, Dublin, 2014.

Crespo-Minguillón, C., Casas, J., A comprehensive traffic load model for bridge safety checking, Structural Safety, Zvezek 19, 339-359, 1997.

Enright, B., Simulation of traffic loading on highway bridges, Doktorska disertacija, University College Dublin, 2010.

Enright, B., Output from traffic simulation based on WIM data from site near Ljubljana. Dublin: neobjavljen dokument, 2016.

Enright, B., O'Brien, E. J., Monte Carlo simulation of extreme traffic loading on short and medium span bridges, Structure and Infrastructure Engineering, 9(12), 1267-1282, 2013.

Enright, B., O'Brien, E. J., Dempsey, T., Extreme traffic loading in bridges, Proceedings of IABMAS 2010 conference. Philadelphia, USA, 2010.

Fu, G., Hag-Elsafi, O., Bridge Evaluation for Overloads Including Frequency of Appearance, Applications of Statistics and Probability, ed. Favre and Mébarki, 687-692 1995.

Getachew, A., Traffic Load Effects on Bridges, Doktorska disertacija, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.

Ghosn, M., Moses, F., Reliability Calibration of Bridge Design Code, Journal of Structural Engineers ASCE, 112(4), 745-763, 1986.

Ghosn, M., Xu, Q., Estimating Bridge Dynamics Using the Weigh-in-Motion Algorithm, Washington DC: Transportation Research Record, 1989.

González, A., Rattigan, P., O'Brien, E., Caprani, C., Determination of bridge life-time dynamic amplification factor using finite element analysis of critical loading scenarios, Engineering Structures, 30, 2330-2337, 2008.

- Grave, S., Modelling of Site-Specific Traffic Loading on Short to Medium Span Bridges, Doktorska disertacija, Trinity College Dublin, 2001.
- Kalin, J., Žnidarič, A., Kreslin, M., Calculation of optimised bridge dynamic amplification factor using bridge weigh-in-motion data, Foz do Iguaçu, Brazil, IABMAS, 313-319, 2016.
- Kalin, J., Žnidarič, A., Anžlin, A., Kreslin, M. Measurements of bridge dynamic amplification factor using bridge weigh-in-motion data, Structure and infrastructure engineering, 1-13, 2021
- 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, Aalborg University, 1997.
- Kraljevina Jugoslavija, Predpisi za cestne mostove, Uradni list Kraljevine Jugoslavije, Beograd, 1933.
- Kraljevina Jugoslavija, Predpisi za cestne mostove. Dodatek: koeficient sunka, 2, Uradni list Kraljevine Jugoslavije, Beograd, 1936.
- Melchers, R. E., Structural Reliability Analysis and Prediction, 2. izd., Wiley, New York, 1999.
- Moses, F., Weigh-in-Motion system using instrumented bridges, ASCE Transportation Engineering Journal, 105(3), 233-249, 1979.
- Moses, F., Verma, P., Load Capacity Evaluation of Existing Bridges, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) - Report No. 301, Washington D.C., 1987.
- Nowak, A., Hong, Y., Bridge live load models, Journal of Structural Engineering, ASCE, 117(9), 2757-2767, 1991.
- Nowak, A. S., Live load model for highway bridges, Structural Safety 1993(13), 53-66, 1993.
- Nowak, A. S., Grouni, N. H., Calibration of the Ontario Bridge Design Code 1991 edition, Canadian Journal of Civil Engineering, Volume 21(1), 25-35, 1994.
- O'Brien, E., Caprani, C., Žnidarič, A., Quilligan, M., Site-specific probabilistic bridge load assessment, Shanghai, China, Thomas Telford, 341-348, 2003.
- O'Brien, E. J., Enright, B., Getachew, A., Importance or the tail in truck weight modelling for bridge assessment, Journal of Bridge Engineering, 210-213, 2010.
- O'Connor, A., Probabilistic Traffic Load Modelling for Highway of Bridges, Doktorska disertacija, Trinity College Dublin, 2001.
- OHBDC, Ontario Highway Bridge Design Code, Ontario Ministry of Transportation, Downsview, 1979, 1983, 1991.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, 3. izd. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- PTP-5, Privremeni Tehnički Propisi za opterećenje mostova na putevima, Uradni list FLRJ, Beograd, 1949.
- Ralbovsky, M., McRobbie, S., Šajna, A., Leban Bajt, M., Sekulić, D., Žnidarič, A., Final report of advanced bridge monitoring techniques, TRIMM D3.2 report, <https://www.fehrl.org/library?id=7234#>, AIT Vienna, 2014.
- SAMARIS D19, State of the art report on assesment of structures in selected EEA and CE countries, <http://www.fehrl.org>, 2006.
- SAMARIS D30, Guidance for the optimal assessment of highway structures, <http://www.fehrl.org>, 2006.
- SIST, SIST EN 1991-2:2006, Evrokod 1, Vplivi na konstrukcije - 2. del: Prometna obtežba mostov, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2006.
- Sivakumar, B., Ghosn, M., Moses, F., NCHRP report 683 - Protocols for collecting and using traffic data in bridge design, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.
- WAVE, Weigh-in-Motion of Axles and Vehicles for Europe, General report, LCPC, Paris, 2002.
- Žnidarič, A., Žnidarič, J., Terčelj, S., Određivanje težine teretnih vozila u toku vožnje preko konstrukcije mosta, SDGK, 321-326, Cavtat, 1991.
- Žnidarič, A., Kontrola varnosti obstojećih mostov. Gradbeni vestnik, 45(8), 223-230, 1996.
- Žnidarič, A., Moses, F., Structural Safety of Existing Road Bridges, Kyoto, McGraw Hill, 1843-1850, 1997.
- Žnidarič, A., Lavrič, I., Kalin, J., Extension of Bridge WIM Systems to Slab Bridges, COST, 263-272, Lisbon, 1998.
- Žnidarič, A., Vzpostavitev metodologije določanja in kontroliranja nosilnosti objektov na državnih cestah - Poročilo P 901/09-670-1, ZAG, Ljubljana, 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), 225-232, 2011.
- Žnidarič, A., Kreslin, M., Lavrič, I., Kalin, J., Simplified approach to modelling traffic loads on bridges, Transport Research Arena 2012, 2012(48), 2887-2896, 2012.
- Žnidarič, A., Influence of number and quality of weigh-in-motion data on evaluation of load effects on bridges, Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, 2017a.
- Žnidarič, A., Kreslin, M., Kalin, J., Meritve z mostnimi sistemi za tehtanje vozil med vožnjo, Slovensko društvo za mehaniko, 187-195, Ljubljana, 2017b.
- Žnidarič, A., Kalin, J., Kreslin, M., Improved accuracy and robustness of bridge weigh-in-motion systems, Structure and Infrastructure Engineering, 2018(4), 412-424, 2018.
- Žnidarič, A., Kreslin, M., Kalin, J., Anžlin, A., Uporaba sistemov za tehtanje vozil med vožnjo za določitev realne konstrukcijske varnosti mostov, Gradbeni vestnik, 2019(12), 291-298, 2019.
- Žnidarič, A., Kalin, J., Using bridge weigh in motion systems to monitor single span bridge influence lines, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2020(10), 743-756, 2020.
- Žnidarič, J., Žnidarič, A., Evaluation of the Carrying Capacity of Existing Bridges, Slovene-US project JF094, ZRMK Ljubljana, 1994.