

# Modeliranje utjecaja prometnoga opterećenja u postupku ocjenjivanja postojećih cestovnih mostova

---

**Skokandić, Dominik; Mandić Ivanković, Ana; Žnidarič, Aleš; Srbić, Mladen**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2020, 71, 1153 - 1165**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.14256/JCE.2609.2019>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:641368>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-06**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 7.1.2019.

Ispravljen / Corrected: 10.6.2019.

Prihvaćen / Accepted: 8.7.2019.

Dostupno online / Available online: 10.12.2019.

# Modeliranje utjecaja prometnoga opterećenja u postupku ocjenjivanja postojećih cestovnih mostova

## Autori:



**Dominik Skokandić**, mag. ing. aedif.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[dskokandic@grad.hr](mailto:dskokandic@grad.hr)



Izv.prof.dr.sc. **Ana Mandić Ivanković**, dipl.ing.grad.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[mandicka@grad.hr](mailto:mandicka@grad.hr)



Doc.dr.sc. **Aleš Žnidarič**, dipl.ing.grad.  
Zavod za Gradbeništvo Slovenije  
[ales.znidaric@zag.si](mailto:ales.znidaric@zag.si)



Dr.sc. **Mladen Srbić**, dipl.ing.grad.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[msrbic@grad.hr](mailto:msrbic@grad.hr)

Pregledni rad

**Dominik Skokandić, Ana Mandić Ivanković, Aleš Žnidarič, Mladen Srbić**

## Modeliranje utjecaja prometnoga opterećenja u postupku ocjenjivanja postojećih cestovnih mostova

Modeli prometnoga opterećenja koji se primjenjuju pri proračunu novih mostova temelje se na konzervativnim pretpostavkama te se njihova upotreba u analizi postojećih mostova nije pokazala učinkovitom. Kod postojećih mostova preporučena je primjena modela prometnoga opterećenja temeljenog na mjerenju prometa u pokretu, koji osim osovinskoga opterećenja i razmaka, daje i podatke o ponašanju mosta pod prometnim opterećenjem. U ovome su radu dani pregled modela prometnoga opterećenja te smjernice o upotrebi podataka dobivenih mjerenjem prometa u pokretu prilikom ocjene stanja postojećih cestovnih mostova.

### Ključne riječi:

prometno opterećenje, mjerenje prometa u pokretu, B-WIM, ocjena stanja, postojeći mostovi

Subject review

**Dominik Skokandić, Ana Mandić Ivanković, Aleš Žnidarič, Mladen Srbić**

## Modelling of traffic load effects in the assessment of existing road bridges

Traffic load models used for the design of new bridges are based on conservative assumptions and have not been proven efficient for assessing safety of existing bridges. In the case of existing bridges, it is reasonable to use load models that are based on bridge weigh-in-motion data which, in addition to axle loads and spacing of bridge-crossing vehicles, provide information on bridge behaviour under traffic load. This paper provides an overview of traffic load models, as well as guidelines on the use of weigh-in-motion data when assessing condition of existing road bridges.

### Key words:

traffic load, weigh-in-motion analysis, B-WIM, condition assessment, existing bridges

Übersichtsarbeit

**Dominik Skokandić, Ana Mandić Ivanković, Aleš Žnidarič, Mladen Srbić**

## Modellierung der Auswirkungen der Verkehrsbelastung bei der Bewertung vorhandener Straßenbrücken

Die zur Berechnung neuer Brücken verwendeten Verkehrslastmodelle basieren auf konservativen Annahmen, und ihre Verwendung bei der Analyse bestehender Brücken hat sich nicht als wirksam erwiesen. Für vorhandene Brücken wird die Verwendung eines Verkehrslastmodells empfohlen, das auf der Messung des Verkehrs basiert und neben der Achslast und dem Achsabstand Informationen zum Verhalten der Brücke unter Verkehrslast liefert. Diese Arbeit bietet einen Überblick über das Verkehrslastmodell und Leitlinien zur Verwendung von Daten aus der Messung des Verkehrs bei der Beurteilung des Zustands vorhandener Straßenbrücken.

### Schlüsselwörter:

Verkehrslast, Messung des Verkehrs, B-WIM, Beurteilung des Zustands, vorhandene Brücken

## 1. Uvod

Posljednjih je godina ocjena stanja postojećih konstrukcija sve bitniji dio graditeljske struke te rastući izazov za inženjere, a posebno se ističe kod cestovnih i željezničkih mostova zbog njihove važne uloge u regionalnoj i globalnoj infrastrukturi. U postupku ocjene stanja postojećih mostova jedan od ključnih koraka jest određivanje utjecaja vanjskih opterećenja na nosivi sustav, gdje se prometno opterećenje ističe zbog svojega promjenjivoga karaktera [1]. Trenutačni propisi za projektiranje novih mostova [2, 3] temelje se na konzervativnim pretpostavkama u vezi opterećenja i otpornosti te uzimaju u obzir predviđeno povećanje težine prometa u uporabnome vijeku mosta, što rezultira izgradnjom pouzdanih i ekonomski isplativih novih mostova. Takve konzervativne pretpostavke ne utječu puno na troškove projektiranja novih mostova, ali se pri primjeni u postupcima ocjene stanja postojećih mostova pokazuju neisplativima te rezultiraju potrebom ojačanja većine tih mostova ili čak i potpunom zamjenom novim mostovima [1, 4]. Nedavna istraživanja dokazala su to da upotreba specifičnih prometnih modela, razvijenih analizom podataka dobivenih sustavima praćenja, može otkriti "skrivenne" rezerve u nosivosti, čime se smanjuju troškovi održavanja te se produljuje preostali uporabni vijek postojećih mostova [5-7]. Osnovni je pristup pri razvijanju specifičnih prometnih modela prikupljanje određenoga uzorka podataka o prometu poput onih o osovinskim opterećenjima i međusobnim razmacima, prilagodba prikupljenih podataka nekoj od statističkih razdioba te ekstrapolacija razdiobe kako bi se procijenili maksimalni učinci opterećenja na promatrani most [7]. Najčešće primjenjivana metoda za prikupljanje podataka o prometu jest tzv. mjerenje prometa u pokretu, skraćeno WIM (engl. *Weight-in-Motion*), temeljeno na načelu da se mjerenje osovinskoga opterećenja i mase vozila provodi prilikom prolaska vozila preko mjernoga mjesta u punoj brzini, bez potrebe za zaustavljanjem ili usporavanjem [8, 9].

WIM sustavi dijeli se u dvije glavne kategorije, stacionarni i prijenosni WIM sustavi. Stacionarni WIM sustavi koriste trakaste ili pločaste senzore koji su ugrađeni u kolničku konstrukciju ceste i u izravnom su dodiru s kotačima prilikom prelaska vozila. S druge strane, prijenosni WIM sustavi primjenjuju upravo rasponski sklop mosta za mjerenje prema načelu da sustav bilježi deformacije koje vozilo uzrokuje svojim prolaskom preko mosta. S obzirom na to da je za takve sustave potreban most odgovarajućih karakteristika, nazivaju se i mosnim WIM sustavima, skraćeno B-WIM sustavima (engl. *Bridge Weight-in-Motion*) [8]. WIM tehnologija prisutna je u Hrvatskoj zadnjih dvadesetak godina, otkako su instalirana dva stacionarna sustava na frekventnijim državnim prometnicama. Od 2005. *Hrvatske ceste* koriste i prijenosne B-WIM sustave za prikupljanje podataka o prometu na raznim cestovnim dionicama [10]. Modeli prometnoga opterećenja za projektiranje novih mostova [2] razvijeni su na temelju ograničenoga uzorka WIM podataka prikupljenih na autocestama diljem Europe 80-ih godina

prošlog stoljeća. Primjena tih modela u postupcima analize stanja postojećih starijih mostova nije se pokazala učinkovitom. S druge strane, specifični modeli prometnoga opterećenja, razvijeni na temelju prikupljenih B-WIM podataka na određenim mostovima, te njihova primjena u ocjeni stanja tih istih mostova daju realnije i bolje rezultate u praksi [11-13].

U radu je razmotren razvitak modela prometnoga opterećenja i odgovarajućih normi kroz godine te je dan kratak pregled metoda kalibracije modela opterećenja u važećim propisima za projektiranje novih mostova. Također, prikazane su metode za razvitak modela prometnoga opterećenja na temelju podataka prikupljenih B-WIM sustavima na postojećim mostovima. Cilj ovoga rada jest pružiti inženjerima koji se bave ocjenjivanjem postojećih mostova smjernice za definiranje mjerodavnoga prometnog opterećenja kako bi ocjene bile što realnije i optimalnije.

## 2. Pregled modela prometnoga opterećenja

Prometno se opterećenje na mostove općenito može podijeliti u dvije prometne situacije: zastoj prometa pri kojemu je na mostu prisutan velik broj vozila na relativno kratkome razmaku te uobičajenu situaciju prometnoga toka, pri kojoj mostom prolaze vozila na većemu razmaku, prosječnom brzinom od 60 do 100 km/h. S inženjerskoga gledišta, učinci prometnoga opterećenja na most dijele se na statičku i dinamičku komponentu [14]. Za razliku od starijih propisa, u većini je novih propisa za projektiranje dinamička komponenta već integrirana u modele opterećenja.

Prve inženjerske rasprave o opterećenju na mostove te dodatnim utjecajima zbog dinamičkoga učinka počele su u drugoj polovini 19. stoljeća [15], popraćene prvim eksperimentima s pokretnim opterećenjem na gredama. Na području Hrvatske, prve smjernice za projektiranje mostova objavljene su 1904. godine [16].

Pojava oklopnih vozila u Prvome svjetskom ratu dovela je do razvitka i objave prvih službenih propisa o prometnome opterećenju na mostove, najprije u UK-u 1918. [15], a potom u SAD-u 1924. godine [17]. U idućim godinama modeli prometnoga opterećenja razvijeni su u većini europskih zemalja, a temeljili su se većinom na inženjerskome iskustvu te raznim studijama. Detaljan povijesni pregled razvitka modela prometnoga opterećenja u UK-u i Europi dan je u knjizi Petera Dawea [15] te u Careyevoj doktorskoj disertaciji [14], dok je razvitak propisa AASHTO [18] u SAD-u opisan u radu autora Kulickog i Mertza [17]. Pregled i razvitak suvremenih propisa za projektiranje novih mostova u zemljama EU-a prikazan je u Pratomu radu [19], a studije koje su prethodile propisima u detaljnome izvještaju Brulsa i suradnika [20].

Modeli prometnoga opterećenja u većini suvremenih propisa za projektiranje razvijeni su na temelju prikupljenih podataka o stvarnome prometu, koji se razlikuju ovisno o lokaciji, te se u skladu s time razlikuju i propisi. Razni nacionalni propisi uspoređeni su u radu Matara i suradnika [21], u kojemu je zaključeno to da američki propisi AASHTO u pravilu daju manje

učinke opterećenja u usporedbi s europskim normama Eurocode [2].

Prvi model prometnoga opterećenja u Hrvatskoj definiran je u normi PTP-5 [22] neposredno nakon Drugoga svjetskog rata, 1949., a razvijen je prema smjernicama iz 1933. [23]. Prometni model PTP-5 sastojao se od četiriju vozila s po dvije osovine (koncentrirane sile) smještenih na dva susjedna prometna traka te odgovarajućega kontinuiranoga opterećenja raspodijeljenog na cijelu korisnu površinu mosta. Također, koncentrirano i kontinuirano opterećenje glavnoga prometnog traka uvećavalo se dinamičkim faktorom  $k_d$ , koji je ovisio o rasponu mosta. Uz taj standardni prometni model, PTP-5 je definirao i dva posebna modela koja su odgovarala opterećenjima tadašnjih oklopnih vozila te ih je valjalo uzeti u obzir kod projektiranja svakoga novog mosta. Vojno vozilo M-25 sastojalo se od ukupno sedam osovina ukupne mase 840 kN, dok je oklopni gusjeničar bio težak 640 kN, a njegova je masa bila raspoređena na dvije tračnice duljine 5 m. Nakon 1973. izdan je novi propis, temeljen na njemačkoj normi DIN 1072 [24], koji se sastojao od dva troosovinska vozila, mase 600 i/ili 300 kN, uz pripadno kontinuirano opterećenje preostale korisne površine mosta. Slično kao i u propisu PTP-5, kontinuirano i koncentrirano opterećenje glavnoga prometnog traka uvećavalo se dinamičkim faktorom, no njegova se vrijednost određivala nešto drugačije nego u propisu PTP-5. Još jedna znatna razlika bila je u tome što je osnovna vrijednost

kontinuiranoga opterećenja glavnoga traka bila veća u odnosu na ostatak mosta.

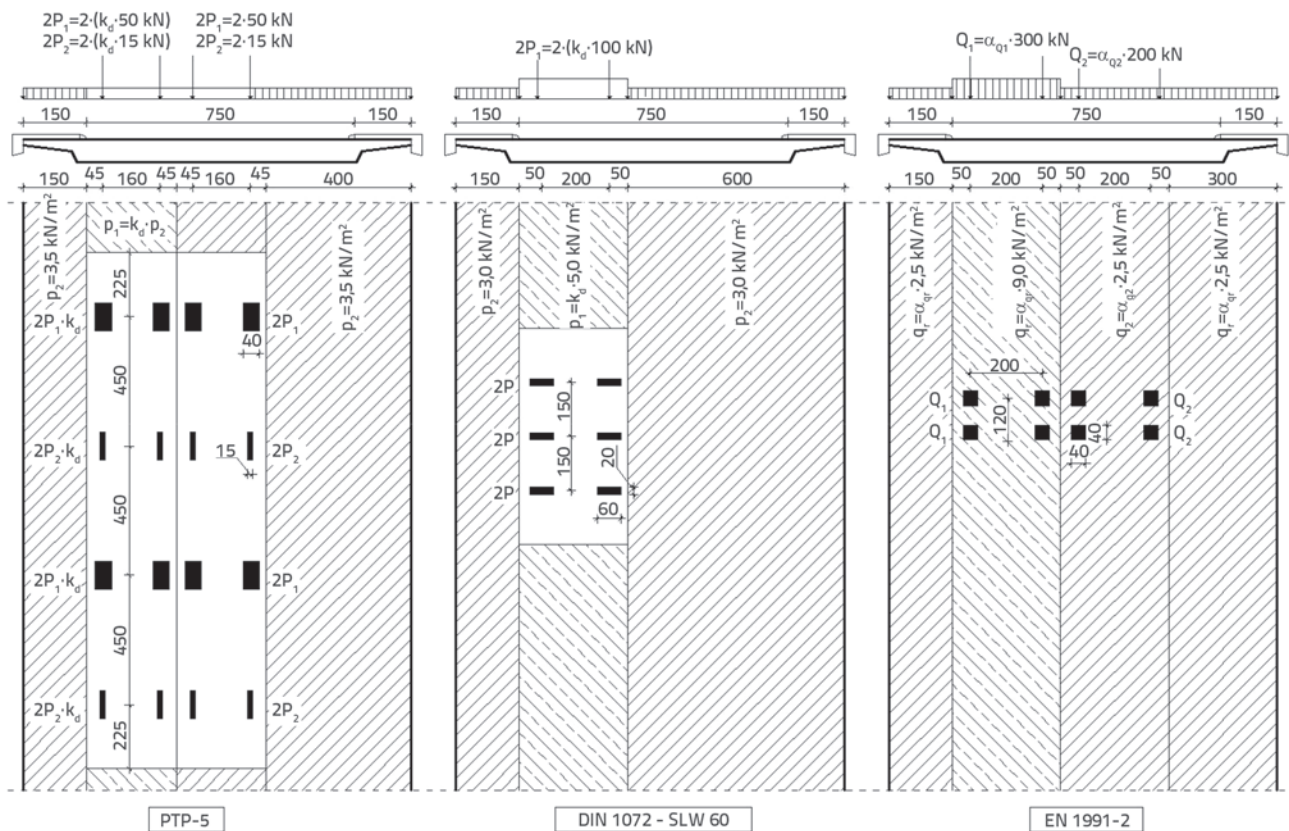
U razdoblju od 1973. do 2002. došlo je do znatnog porasta u opsegu prometa na hrvatskim cestama i autocestama [25], što je nakon revizije dotadašnjih propisa rezultiralo prihvaćanjem europskih prednormi ENV 1991-3 [26], u kojima su modeli prometnoga opterećenja definirani na isti način kao i u konačnome nacrtu norme EN [2], ali s reduciranim vrijednostima korekcijskih faktora. Konačno, godine 2012., nakon što su europske norme prešle s ENV standarda na EN standard, objavljen je propis HRN EN 1991-2 [27], u kojemu su definirani suvremeni modeli prometnoga opterećenja za projektiranje novih mostova.

Detaljniji pregled povijesnoga razvitka propisa za projektiranje mostova u Hrvatskoj dan je u doktorskoj disertaciji Mandić Ivanković [28], a analiza usporedbe trenutačnih i starijih propisa može se naći u radovima Mandić Ivanković [25] i Šavor sa suradnicima [29]. Usporedba modela prometnoga opterećenja prikazana je i na slici 1.

### 3. Prometno opterećenje u HRN EN 1991-2

#### 3.1. Pregledno

Europskom normom EN 1991-2:2003 [2] definirani su prometni modeli za projektiranje novih mostova, koji uključuju vrijednosti



Slika 1. Usporedba novih i prijašnjih modela prometnoga opterećenja u Hrvatskoj: a) PTP-5; b) DIN 1072 - SLW60; c) EN 1991-2

samih opterećenja, njihov raspored, dinamičke učinke, sile kočenja i ubrzanja te centrifugalne sile. Osnova za definiranje norme EN 1991-2 postavljena je u kasnim 80-im godinama prošloga stoljeća [20, 30], na temelju podataka o prometu na nekolicini europskih autocesta. S obzirom na to da je od tih prometnih zapisa prošlo određeno razdoblje u kojemu je došlo do povećanja u volumenu i težini prometa, skupina je istraživača prije nekoliko godina ponovno provela analizu prometnih modela, donijevši zaključak kako odgovaraju zahtjevima suvremenoga prometa [31, 32].

U normi [2] definirana su ukupno četiri modela opterećenja za provjere u skladu s graničnim stanjem nosivosti (GSN) i graničnim stanjem uporabivosti (GSU) te dodatnih pet modela za provjere na umor materijala. Vertikalna opterećenja u definiranim modelima raspodijeljena su u prometne trakove, čiji broj ovisi o ukupnoj korisnoj širini kolnika na mostu [2].

Najčešće primjenjivani model opterećenja za provjere GSN-a i GSU-a kod projektiranja novih cestovnih mostova jest model opterećenja 1 (LM 1), koji se sastoji od koncentriranih osovinskih opterećenja te kontinuiranoga opterećenja raspodijeljenog na ukupnu korisnu površinu mosta. Usporedba toga prometnoga modela i prijašnjih propisa u Hrvatskoj grafički je prikazana na slici 1.

Karakteristične vrijednosti koncentriranih i kontinuiranih opterećenja u prometnome modelu 1 definirane su u normi [2], uz vrijednosti korekcijskih faktora (slika 1.c), koji se primjenjuju za modificiranje opterećenja, ovisno o kategoriji ceste na mostu te očekivanome volumenu i težini prometa. Također, reducirane korekcijske faktore moguće je primijeniti u postupcima analize postojećih mostova kao što je to objašnjeno u sljedećemu poglavlju.

Osnovne vrijednosti korekcijskih faktora razlikuju se od države do države i nalaze se ili u nacionalnome dodatku pojedine države ili se uzimaju s vrijednošću 1,0, ako nije definirano drugačije. Većina država EU-a, uključujući Hrvatsku, primjenjuje preporučenu vrijednost od 1,0 za sve korekcijske faktore kod projektiranja novih mostova. Neke od država koje preporučuju drugačije vrijednosti za nove mostove jesu Danska, Njemačka, Francuska i UK [32]. Naprimjer, veće vrijednosti korekcijskih faktora u Njemačkoj temeljene su na istraživanjima Maurera i Freundta [33, 34] koja su pokazala znatan porast u težini prometa na njemačkim cestama u posljednja dva desetljeća. Nedavne studije o korekcijskim faktorima [35] definirale su postupak za određivanje njihove vrijednosti na pojedinim mostovima, na

cestovnim dionicama ili na razini cijele infrastrukturne mreže. Pregled dosadašnjih istraživanja te analiza i zaključak o korekcijskim faktorima za nekolicinu država EU-a (tablica 1.) prikazan je u radu [32]. Jedan od problema koji proizlazi iz neujednačenih vrijednosti korekcijskih faktora jest nemogućnost projektiranja mosta koji bi s istom razinom sigurnosti mogao podnijeti tzv. transeuropski promet [32, 35].

Tablica 1. Korekcijski faktori za projektiranje novih mostova u nekim zemljama EU-a

Zemlja EU-a	Vrijednost korekcijskih faktora				
	$\alpha_{q,i}$	$\alpha_{q,i}$	$\alpha_{q,i}$	$\alpha_{q,i}$	$\alpha_{q,i}$
	$i=1$	$i>1$	$i=1$	$i=2$	$i>2$
Hrvatska [27] (i većina zemalja EU-a)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Danska [32]	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00
Francuska [32]	1,00	1,00	1,00	1,20	1,20
Njemačka [32]	1,00	1,00	1,33	2,40	1,20
Ujedinjeno Kraljevstvo [32]	1,00	1,00	0,61	2,20	2,20
Nizozemska [36]	1,00	1,00	1,15	1,40	1,40

### 3.1.1. Primjena korekcijskih faktora u postupku ocjenjivanja postojećih mostova

Reduciranom vrijednošću korekcijskih faktora, temeljenom na podacima o stvarnom izmjerenom prometna određenom mostu ili dionici ceste, prometni model 1 može se primijeniti u analizi stanja postojećih mostova [37]. Naprimjer, iako nema službenih propisa i smjernica za modeliranje prometnoga opterećenja prilikom ocjene stanja mostova u Hrvatskoj, istraživanje koje je provela Mandić Ivanković [38] rezultiralo je smanjenim korekcijskim faktorima na temelju brojenja stvarnoga opsega prometa. U nekim europskim državama reducirani korekcijski faktori sastavni su dio službenih normi za ocjenu stanja postojećih konstrukcija, naprimjer, u švicarskoj normi SIA 269/1:2011 [39]. Za razliku od vrijednosti prilikom projektiranja novih mostova, korekcijski faktori za ocjenu stanja definirani su ovisno o duljini mosta, ali i o tipu poprečnoga presjeka glavnoga nosača (sandučasti, pločasti i drugi), a u nekim slučajevima i o kategoriji ceste na mostu (autocesta, državna cesta i drugo).

Tablica 2. Reducirane vrijednosti korekcijskih faktora za ocjenu stanja postojećih mostova u Hrvatskoj – vrijednosti preporučene u znanstvenoj studiji [38]

Raspon [m]		≤ 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 50
Slobodno oslonjena greda $\alpha_{q2} = \alpha_{qr} = 1,0$	$\alpha_{q1}$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	$\alpha_{q1}; \alpha_{q2}; \alpha_{q1}$	0,30	0,38	0,51	0,58	0,62
Kontinuirani nosač $\alpha_{q2} = \alpha_{qr} = 1,0$	$\alpha_{q1}$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	$\alpha_{q1}; \alpha_{q2}; \alpha_{q1}$	0,48	0,72	0,78	0,81	0,82

Tablica 3. Reducirane vrijednosti korekcijskih faktora za ocjenu stanja postojećih mostova u Švicarskoj – vrijednosti iz norme [39]

Tip mosta		Raspon [m]	$\alpha_{0,1}$	$\alpha_{0,2}$	$\alpha_q; \alpha_{gr}$
Gredni mostovi	Sanduk	20 – 80	0,70	0,50	0,50
	Dva nosača	20 – 80			0,40
	Više nosača	15 – 35			0,40
Pločasti mostovi		10 – 30	0,80	0,53	0,40
Ostali tipovi mostova		5,3 – 10	0,60	0,40	0,40
		< 5,3	0,50	0,40	0,40

Znanstvena studija [37], koja definira smjernice za određivanje reduciranih veličina korekcijskih faktora, temelji se na mjerenju stvarnoga opsega prometa na autocestama u Nizozemskoj i njegovoj usporedbi s modelom 1 prometnoga opterećenja iz normi [2]. Slično istraživanje proveli su O'Brien i Enright [40], koji su određivali omjer stvarnoga opsega prometa i modela iz normi na više mjernih mjesta diljem Europe. Nadalje, utjecaji izmjerenoga prometnoga opterećenja i norme na mostu u Sloveniji uspoređeni su u radu [6].

Preporučene vrijednosti reduciranih korekcijskih faktora za cestovne mostove, dobivene usporedbom sa stvarnim opsegom prometa na hrvatskim cestama [38], prikazane su u tablici 2., a vrijednosti iz važeće švicarske norme za ocjenjivanje postojećih mostova [39] u tablici 3.

### 3.2. Razvitak modela prometnoga opterećenja 1

Razvitak modela prometnoga opterećenja za cestovne mostove počeo je u kasnim osamdesetim godinama prošlog stoljeća [20], temeljeći se na podacima o stvarnome opsegu prometa prikupljenima na europskim autocestama od 1977. do 1987. godine. Postupak koji je rezultirao definicijom današnjega modela 1 podijeljen je u nekoliko ključnih koraka, koji su ukratko objašnjeni u nastavku, a detaljniji pregled može se pronaći u radovima [20, 30, 41].

Osnovni korak u definiranju modela prometnoga opterećenja bio je prikupiti podatke o stvarnome opsegu prometa, odnosno o osovinskim opterećenjima i razmacima te međusobnim razmacima između vozila za sva vozila na određenoj cestovnoj dionici. Takve je podatke bilo moguće prikupiti jedino korištenjem WIM sustava s obzirom na to da se svi traženi podaci mjere u realnome vremenu i pri punoj brzini prolaska vozila. Problem je bio u tome što u to vrijeme WIM sustavi nisu bili često upotrebljavani te nisu davali dovoljno pouzdane podatke. Zbog toga je prva ideja bila da se mjerenja s više lokacija kombiniraju u jedinstveni, tzv. europski prometni uzorak, što se na kraju pokazalo nemogućim jer se na takav nehomogen uzorak ne mogu primijeniti metode za ekstrapolaciju podataka, koje su neophodne za predviđanje učinaka prometnoga opterećenja u danome periodu. Izmjereni podaci o masi vozila prilično su se razlikovali ovisno o lokaciji, no dnevni maksimumi i osovinski razmak bili su relativno slični [41] te je za daljnje istraživanje odabran uzorak izmjeren na autocesti A6 pokraj Auxerre u Francuskoj.

Odabrani uzorak nije bio najteži među svim raspoloživima, ali je procijenjeno to da je relativno veliko prometno opterećenje za jedan prometni trak. Detaljna statistička analiza prometnoga uzorka iz Auxerre može se naći u Aneksu A izvještaja [41].

Detaljne studije [20, 30] u kojima su simulirane realne prometne situacije rezultirale su definiranjem dviju najčešćih situacija na cestama, nazvanih "uobičajeni tijek prometa" te "zastoj u prometu", koje će se za potrebe definicije prometnoga modela kombinirati u susjednim prometnim trakovima. Osnovna je razlika u brzini vozila te u razmacima između njih, čije su vrijednosti smanjene do minimuma kako bi se simulirao prometni zastoj [31].

Sljedeći korak, nakon odabira prometnoga uzorka i definiranja prometnih situacija, bio je odrediti učinke opterećenja na most, odnosno izraditi izračun pripadnih momenata savijanja i poprečnih sila. Proračun je napravljen metodom utjecajnih linija, odnosno površina, na ukupno devet različitih slučajeva za slobodno oslonjene i kontinuirane mostove raspona od pet do 200 metara. Vrijednosti učinaka pojedinih vozila spojene su u histogram [30] momenata savijanja i/ili poprečnih sila, iz kojeg su ekstrapolacijom za određene povratne periode određene nominalne vrijednosti prometnoga opterećenja. Odabir mjerodavnoga povratnog perioda neophodan je za procjenu učinaka prometnoga opterećenja u budućnosti jer su primjenjeni prometni podaci zabilježeni u relativno kratkome periodu. Pod pretpostavkom ujednačenoga opsega prometa teških vozila te neovisnosti njihovih masa povratni period za neograničeni broj vozila može se odrediti pomoću izraza (1), prema [30]:

$$R = R_{y\alpha} \cong \frac{-T}{\ln(1-\alpha)} \cong \frac{T}{\alpha} \quad (1)$$

gdje je  $R$  povratni period za pripadni projektni vijek ( $T$ ) i fraktulu ( $\alpha$ ). Naprimjer, ako je projektni vijek 50 godina, mogućnost prekoračenja određenih vrijednosti opterećenja u povratnome periodu od 1000 godina iznosi 5 %.

Za određivanje maksimalnih vrijednosti osovinskoga opterećenja norme EN 1991-2 te pripadnih učinaka primijenjene su tri metode ekstrapolacije [30]:

- polunormalna razdioba – maksimalne vrijednosti izmjerenih učinaka opterećenja aproksimirane su normalnom razdiobom

- Gumbelova razdioba – slično kao i kod prethodne metode, maksimalne vrijednosti aproksimirane su dvoparametarskom Gumbelovom razdiobom tipa 1
- Monte Carlo (MC) simulacija – metoda kojom se kreira što veći broj mogućih prometnih situacija na temelju izmjerenih prometnih podataka. U slučaju jako velikog broja ponavljanja (simulacija) za određivanje maksimalnih učinaka opterećenja nije potrebna statistička ekstrapolacija.

Detaljniji pregled korištenih metoda ekstrapolacije s pripadajućim formulama i grafičkim prikazima dan je u radu [41]. Nakon što su određene nominalne veličine prometnoga opterećenja, sljedeći je korak bio odrediti dinamički učinak pri međudjelovanju vozila i rasponskoga sklopa mosta, što je uzeto u obzir dinamičkim faktorom kojim se povećavaju vrijednosti određene ekstrapolacijom [30].

Određivanje jedinstvenoga dinamičkog faktora za sva vozila nije jednostavno jer njegova vrijednost ovisi o više parametara, i to vrsti rasponskoga sklopa, duljini raspona, vrsti i brzini vozila, stanju kolnika na mostu i drugima. U studijama koje su prethodile razvitku norme [20, 30] proveden je velik broj simulacija na raznim tipovima mostova s raznim uvjetima na kolniku kako bi se odredila veličina "faktora utjecaja", definiranog kao omjer dinamičkoga i statičkoga učinka opterećenja. Preporučene vrijednosti toga faktora, ovisno o vrsti učinka prometnoga opterećenja (moment savijanja, poprečna sila), broju prometnih trakova i veličini mosta, nalaze se u radu [41].

Uz karakteristične vrijednosti prometnoga opterećenja prikazane na slici 1.c i ostale reprezentativne vrijednosti, uglavnom za provjere GSU-a, definirane su kao rijetke, česte i nazovistalne. Karakteristične vrijednosti definirane su za povratni period od 1000 godina kako bi u obzir uzele povećanje u opsegu i težini prometa u budućnosti. U slučajevima kada su za proračun mjerodavne vrijednosti za jednogodišnji povratni period dopušteno je koristiti karakteristične vrijednosti reducirane faktorom 0,80 [41].

### 3.3. Revizija modela prometnoga opterećenja 1

Pred kraj prošloga stoljeća pripremao se prvi nacrt normi Eurocode kako bi se prešlo s ENV standarda na EN standard te su stručnjaci isticali kako je zbog povećanja volumena i težine prometa kao i zbog napretka u WIM tehnologiji [31] neophodna revizija i ponovna procjena određenih modela prometnoga opterećenja. Skupina istraživača na čelu s prof. O'Connorom [42] započela je 1998. studiju čiji se prvi dio sastojao od revizije izvornoga postupka kalibracije, tijekom kojeg se koristio tadašnji prometni zapis iz Auxerra [20], dok je drugi dio bio nova kalibracija provedena istim postupkom, ali uz korištenje novoga prometnog zapisa nazvanoga "suvremeni promet" koji je te godine izmjeren u Europi. Rezultat je pokazao znatnu redukciju u variranju podataka o mjerenoj prometu, zahvaljujući napretku WIM tehnologije kroz godine, te je zaključak bio da je prometni model dovoljno konzervativan kako bi uzeo u obzir rast opsega

prometa u posljednjih 20-ak godina. Detaljan pregled studije prikazan je u preliminarnome [42] i u konačnome izvještaju [31]. U novije vrijeme istraživanje koje je proveo Rymasz [32] ističe prijedlog o povećanju karakterističnih vrijednosti modela opterećenja 1 zbog načela o kojemu se trenutačno raspravlja u zemljama EU-a, a kojim bi se maksimalna dopuštena masa vozila na europskim autocestama povećala na 60 tona, što je 50 % više u odnosu na trenutačnu vrijednost od 40 tona u većini država EU-a.

## 4. Lokalni modeli prometnoga opterećenja

### 4.1. Mjerenje prometa – općenito

Postoji više metoda za prikupljanje podataka o prometu, a najčešće korištena ujedno je i najjednostavnija. Riječ je o upotrebi mjeraca prometa [43]. U pravilu postoje dvije vrste mjeraca prometa, i to prijenosni kao što su to ručni brojači te pneumatske gumene cijevi postavljene na cestu te stacionarni koji su najčešće pozicionirani pored ceste ili u kolničkoj konstrukciji, a koji laserskom ili optičkom tehnologijom bilježe opseg prometa na određenoj dionici [44]. Brojači prometa u Hrvatskoj se kontinuirano koriste od 1971. godine [10].

Iako je njihova upotreba vrlo raširena te se koriste za statističke analize prometa, brojači prometa ne pružaju nikakve podatke o masi vozila i osovinskim opterećenjima. Detaljniji pregled dostupnih vrsta brojača prometa može se naći u izvještaju JRC-a za cestovni promet [44].

Kako bi se dobili realni podaci o osovinskim opterećenjima, svako pojedino vozilo na cestovnoj dionici mora se izvagati na statičkim vagama ili u pokretu. Statičke vage daju najpreciznije rezultate, ali, nažalost, ne daju realan prikaz prometnoga zapisa jer je proces mjerenja vrlo spor, a i najteža vozila imaju tendenciju izbjegavanja vaganja zbog prisutnosti policije i kazni za pretovarenost [43].

Vaganje vozila u pokretu, skraćeno nazvano WIM, jest tehnologija koja mjeri svako vozilo koje prelazi preko mjernoga mjesta u punoj brzini te daje podatke o ukupnoj masi vozila (GSW), osovinske opterećenju i razmaku, duljini i klasi vozila te niz drugih. U pravilu, razlikuju se dva osnovna tipa WIM sustava, i to stacionarni koji se ugrađuju u habajući sloj kolničke konstrukcije te prijenosni koji koriste rasponski sklop mostova i propusta za mjerenje vozila, zbog čega se i nazivaju mosni WIM sustavi, ili skraćeno B-WIM sustavi [43]. Glavne značajke i prednosti B-WIM sustava jesu to što su u cijelosti prijenosni te što se senzori za mjerenje postavljaju s donje strane rasponskoga sklopa mosta, čime je ometanje prometa na mostu tijekom instalacije i kalibracije svedeno na minimum [6]. Također, osim osnovnih podataka o vozilu (tablica 4.), koje omogućuju i stacionarni WIM sustavi, B-WIM tehnologija daju uvid i u odgovor konstrukcije mosta na djelovanje prometnoga opterećenja [6]. Ti podaci o konstrukciji služe za potvrdu točnosti rezultata B-WIM mjerenja, ali su i vrlo važan parametar prilikom analize stanja postojećega mosta [43, 46]. Očiti nedostaci B-WIM tehnologije jesu to što je za normalno funkcioniranje potreban most odgovarajućih

Tablica 4. Primjer zapisa podataka o jednome vozilu B-WIM sustavom [46]

Vremenski zapis	Trak	Brzina [m/s]	Klasa	Broj osovina	GSW [kN]	AW1 [kN]	AW2 [kN]	Osovinski razma [m]
2007-03-22-00-39-28-955	1	17,5	41	2	123,8	37,07	86,69	6,07

karakteristika, a neophodno je i ekspertno inženjersko znanje o mostovima za uspješnu kalibraciju i analizu rezultata [47].

Detaljniji pregled i opis dostupnih WIM i B-WIM sustava nalazi se u izvještajima znanstvenih projekata COST 323 [45] i WAVE [48] te u Žnidarićevoj doktorskoj disertaciji [43] i radu [47]. Primjena B-WIM podataka o prometu i konstrukciji mosta u postupku ocjene stanja postojećih mostova opisana je u projektu ARCHES [49, 50] te brojnim znanstvenim radovima [6, 11, 12, 51, 52].

#### 4.2. Osnovni pristup analizi podataka prikupljenih WIM i B-WIM mjerenjem

Ključni je korak u procesu obrade podataka prikupljenih WIM i B-WIM mjerenjem odabir pogodne metode ekstrapolacije prikupljenih podataka te procjena maksimalnih učinaka prometnoga opterećenja u nekome određenom razdoblju [7].

Prije same ekstrapolacije iz neobrađenih podataka mjerenja potrebno je proračunati učinke opterećenja, tj. pripadne momente savijanja i/ili poprečne sile koje uzrokuju vozila prolazeći preko mosta [53]. S obzirom na to da su učinci laganih vozila na konstrukciju mosta vrlo mali i mogu se zanemariti pri procjeni stanja mosta, komercijalni WIM sustavi ne uzimaju u obzir vozila lakša od 35 kN [47]. Za pretvorbu osovinskih opterećenja u pripadajuće učinke djelovanja najčešće se primjenjuje metoda utjecajnih linija, koja je bila primijenjena i prilikom razvitka modela opterećenja iz normi EN 1991-2 [20]:

$$Q_S(x) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot I_i(x) \quad (2)$$

gdje je  $A_i$  težina osovine  $i$ ,  $n$  broj osovina, a  $I_i(x)$  vrijednost ordinate utjecajne linije ispod osovine  $i$  na lokaciji  $x$ . Dva najčešće primjenjivana pristupa za procjenu učinaka djelovanja u određenome razdoblju jesu ekstrapolacija prilagodbom mjerenih podataka nekoj od statističkih razdioba te primjena velikog broja simulacija Monte Carlo, modeliranih na temelju izmjerenih podataka [79]. Statistička ekstrapolacija korištena je u mnogim studijama te u razvitku prometnih modela iz norme EN 1991-2, kao što je to objašnjeno u prvome dijelu rada.

Statističke metode razlikuju se ovisno o odabranoj vrsti razdiobe, koja se odabire tako da što točnije opisuje maksimalne vrijednosti učinaka prometnoga opterećenja. Velik broj autora primjenjuje normalnu razdiobu [12, 54, 55], kojom se podaci o prometu uspoređuju s vrijednostima normalne razdiobe kako bi se utvrdilo postoji li znatno odstupanje. Međutim, učestaliji je pristup korištenje neke od ekstremnih razdiobi koje spadaju u poopčenu skupinu

razdioba ekstremnih vrijednosti (engl. *Generalized extreme values distribution* – GEV) kao što su Gumbellova [56, 57] ili Weibullova [58] razdioba. U slučajevima kada se primjenjuju neke od GEV razdioba, prilagodba podataka provodi se za maksimalne vrijednosti izmjerenih vrijednosti, a u pravilu su to dnevni ili tjedni maksimumi.

Statističke su metode praktičnije za opću upotrebu nego simulacije velikoga broja podataka poput metode Monte Carlo, no primjenom statističkih metoda moguće je predvidjeti specifičnu prometnu situaciju (određen broj i položaj teških vozila na mostu) koja nije zabilježena u periodu kada su provedena WIM mjerenja [43]. Detaljniji pregled i prednosti statističkih metoda ekstrapolacije mogu se naći u projektu ARCHES [50] te u radovima [53, 59]. Većina autora koja se bavi usporedbom statističkih metoda kao zaključak ističe to da ih ima mnogo, da se uvelike razlikuju te da još uvijek nema jasne preporuke koja je među njima najpogodnija za općenitu uporabu [53, 59].

Četiri najčešće korištene statističke metode obrade prometnih podataka jesu prilagodba podataka mjerenja normalnoj razdiobi i potenciranje vrijednosti uz primjenu teorije ekstremnih vrijednosti [53], metoda Block Maxima [54, 60], metoda iskakanja rezultata iznad graničnih vrijednosti u kombinaciji s poopčenom Pareto razdiobom (engl. *Peaks over Threshold* – POT metoda) [61] te Riceove formule za ekstrapolaciju učinaka opterećenja [59, 62, 63].

##### 4.2.1. Prilagodba učinaka prometnoga opterećenja normalnoj (Gaussovoj) razdiobi

Prilikom ekstrapolacije učinaka prometnoga opterećenja za dulje povratne periode učestali je pristup prikupljanje prometnih podataka u određenome razdoblju, izračun učinaka prometnoga opterećenja za svako vozilo te generiranje histograma prilagodbom velikog broja podataka normalnoj razdiobi kako bi se odredile maksimalne vrijednosti učinaka u povratnome periodu [7, 64]. Procjena maksimalnih učinaka provodi se tako da se generirani histogram potencira u skladu s teorijom ekstremnih vrijednosti [53, 64, 65]. Ako se pretpostavi da prikupljeni podaci imaju srednju vrijednost  $\mu$  i standardnu devijaciju  $\sigma$ , maksimalne se očekivane vrijednosti određuju potenciranjem na vrijednost  $N$  te su rezultat  $\mu_{Max}$  i  $\sigma_{Max}$ :

$$\mu_{Max} = \mu + \sigma \cdot \sqrt{2 \ln(N)} - \sigma \cdot \frac{\ln[\ln(N)] + \ln(4\pi)}{2\sqrt{2 \ln(N)}} \quad (3)$$

$$\sigma_{Max} = \frac{\sigma}{\sqrt{2 \ln(N)}} \quad (4)$$



Određivanje vrijednosti parametra  $N$  u izrazima (3) i (4) ovisi o definiranoj povratnoj periodu [47]. Kod tog načina ekstrapolacije mogu se koristiti razni tipovi normalne razdiobe, i to standardna normalna razdioba [64], tromodalna razdioba [1], bimodalna razdioba [66] i druge.

#### 4.2.2. Metoda Block Maxima (metoda maksimalnih vrijednosti perioda)

Primjena teorije ekstremnih vrijednosti za potenciranje inicijalne razdiobe učinaka prometnoga opterećenja rezultira strmijom krivuljom razdiobe gustoće vjerojatnosti (engl. *Probability density function* – PDF), čime se smanjuje standardna devijacija. Istodobno, što je viša potencija, smanjuje se udio ukupnih podataka koji pridonose maksimalnoj razdiobi rezultantne funkcije [59]. U slučajevima kada je velik broj raznih prometnih opterećenja (različite konfiguracije teških vozila) u izrazima (3) i (4) potreban je jako velik broj  $N$  kako bi se s dovoljnom vjerojatnošću predvidjeli maksimalni učinci opterećenja za određeni period. Naprimjer, Fu i You [67] definirali su to da za most na kojemu prosječni dnevni opseg prometa teških vozila iznosi 4000, vrijednost  $N$  mora biti 109,5 milijuna kako bi se s dovoljnom točnošću predvidjeli maksimalni učinci prometnoga opterećenja u povratnoj periodu od 75 godina, čime u praksi postaje nemoguće primjenjivati takav postupak [59].

Metoda Block Maxima temelji se na podjeli perioda mjerenja podataka na manje periode iste duljine, koji se međusobno ne preklapaju, a nazivaju se blokovi. Prilikom primjene na podatke dobivene mjerenjem prometa ti blokovi mogu biti definirani kao dani, tjedni, mjeseci itd. Načelo metode Block Maxima jest to da se u obzir uzimaju samo maksimalne vrijednosti iz svakoga pojedinog bloka, čija duljina mora biti dulja od bilo kakve anomalije u statističkom procesu, što u slučaju mjerenja prometa mogu biti jutarnje i popodnevne gužve (engl. *rush hours*) [53, 68]. Uz pretpostavku da su maksimalni utjecaji opterećenja u svakome bloku međusobno neovisni, ukupni se podaci mogu prilagoditi svakoj od triju ekstremnih razdioba: Gumbellovoj, Weibullovoj i Freichetovoj. Nedostatak je takvog pristupa to što se zbog korištenja više razdioba rezultantne funkcije razlikuju od inicijalne. U zadnje se vrijeme primjenjuje objedinjavanje tih triju razdioba u poopčenu distribuciju ekstremnih vrijednosti (GEV) kako bi se izbjegle nesigurnosti u rezultatima [53]. Praktična primjena metode Block Maxima može se naći u radu [59], gdje su blokovi definirani kao dani, te u radu [69] u kojemu se primjenjuje kako bi se opisao predviđeni godišnji porast volumena i težine prometa.

Očiti je nedostatak takvoga pristupa ekstrapolaciji podataka to što se primjenjuje samo maksimalna vrijednost iz pojedinoga bloka, a što je dovelo do toga da neki autori tu metodu nazivaju uzaludnim trošenjem podataka [68]. Problem je i u činjenici da prva vrijednost manja od maksimalne iz jednoga bloka može biti veća nego najveća vrijednost drugoga bloka, ali zbog osnovne pretpostavke te metode ta vrijednost neće biti uzeta u obzir u krajnjemu rezultatu [53].

#### 4.2.3. POT metoda (engl. Peaks over threshold), metoda iskakanja rezultata iznad graničnih vrijednosti

Očite nedostatke metode Block Maxima djelomično može riješiti tzv. metoda iskakanja rezultata iznad graničnih vrijednosti (engl. *Peaks over thresholds*), odnosno POT metoda, koja u obzir uzima sve izmjerene podatke koji su veći od unaprijed određene granične vrijednosti (engl. *threshold*). U skladu s time iz osnovnoga načela te metode proizlazi i njezin najveći nedostatak, a to je subjektivnost prilikom odabira mjerodavne granične vrijednosti koja izravno utječe na rezultate. Naprimjer, ako je odabrana granična vrijednost previsoka, pojavljuje se isti problem kao i u metodi Block Maxima jer se u obzir uzima jako mali dio ukupnoga broja podataka, što rezultira velikom razinom nesigurnosti i nepouzdanim rezultatima. S druge strane, ako je odabrana granična vrijednost preniska, pojavljuju se podaci koji nisu relevantni, a utječu na konvergenciju i na krajnji rezultat [53]. Prilikom odabira granične vrijednosti potrebno je uzeti u obzir duljinu mosta, oblik i duljinu utjecajne linije ili površine, najučestalije konfiguracije teških vozila i drugo.

Osnovno je načelo prilikom odabira granične vrijednosti to da ona bude postavljena što je niže moguće, a da se pritom ne utječe na konvergenciju krajnjega rezultata. Više o POT metodi i definiranju granične vrijednosti izneseno je u Colesovoj knjizi [70], dok su se Zhou [71] i Yang [72] u svojim radovima fokusirali na primjenu POT metode kod određivanja maksimalnih učinaka prometnoga opterećenja na mostovima [71].

Nakon selekcije podataka koji se nalaze iznad granične vrijednosti, potrebno ih je prilagoditi nekoj od statističkih razdioba. Više istraživača [53, 61, 70] preporuča poopčenu razdiobu Pareto kao najpogodniju za primjenu prilikom modeliranja prometnoga opterećenja.

#### 4.2.4. Riceova formula

Riceovom formulom određuje se prosječan broj slučajeva kada vrijednost mjerenoga parametra u normaliziranome procesu prijeđe unaprijed postavljenu graničnu vrijednost. Naziv je dobila po Stephenu Riceu [73] te se često primjenjuje u raznim inženjerskim granama. U pravilu, formula rezultira predviđenim brojem slučajeva kada stacionarni proces  $X(t)$  "prelazi" graničnu vrijednost  $u$ . U građevinskoj se struci Riceova formula primjenjuje uglavnom u analizi konstrukcija izloženih djelovanjima iz okoliša kao što su vjetar, udari valova i temperaturne promjene. Više o primjeni Riceove formule u inženjerstvu može se naći u radu [74].

Primjena te formule kod modeliranja prometnoga opterećenja moguća je pod pretpostavkom da se učinci prometnoga opterećenja na mostove duljega raspona mogu prikazati kao stohastički Gaussov proces kao što je to predložio Ditlevsen [75]. Primjena je opisana izrazom (5), gdje je srednja vrijednost broja prelazaka  $v$  definirana za graničnu vrijednost  $x > 0$  i referentni period  $T_{REF}$  [53]:

$$v(x) = \frac{\sigma'}{2\pi\sigma} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

gdje je  $m$  srednja vrijednost,  $\sigma$  standardna devijacija, a  $\sigma'$  standardna devijacija prve derivacije stohastičkoga procesa  $\dot{x}$ . Kumulativna funkcija distribucije može se izvesti iz izraza (5) kao što je to opisao Cremona [63], koji je ujedno sugerirao metodu za određivanje optimalne veličine razreda za funkciju distribucije, a što je primijenio Getachew u svojoj doktorskoj disertaciji [76]. Riceovu formulu primjenjuje i Jacob u studiji [62] o razvoju prometnih modela za normu EN 1991-3.

#### 4.2.5. Simulacije prometa metodom Monte Carlo

Metoda Monte Carlo temelji se na velikome broju ponavljanja slučajnoga uzorkovanja raznih prometnih situacija iz prikupljenih podataka. Prednost je te metode to što u obzir uzima i situacije koje nisu zabilježene prilikom WIM mjerenja te što kod velikog broja ponavljanja (simulacija) statistička ekstrapolacija rezultata nije potrebna. Više o primjeni metode Monte Carlo i ostalih metoda simulacije u modeliranju prometnoga opterećenja izneseno je u projektu ARCHES [59] te u radovima [76-81].

Primjena metode Monte Carlo u modeliranju učinaka prometnoga opterećenja temelji se na podacima prikupljenima WIM mjerenjima kao što su masa vozila, osovinsko opterećenje, broj i razmak osovina te međusobni razmak između vozila. Korištenjem tih ulaznih parametara moguće je simulirati prometne situacije za višegodišnja razdoblja [79]. S obzirom na velik broj ulaznih podataka, metodom Monte Carlo moguće je simulirati vrste vozila te međusobne kombinacije vozila koje nisu zabilježene u periodu WIM mjerenja. Za razliku od modela prometnih opterećenja iz normi, metoda Monte Carlo uz standardni promet omogućuje uzimanje u obzir i specijalnih i pretovarenih vozila, čime daje pouzdanije rezultate [50, 79].

Očiti je nedostatak metode Monte Carlo određena razina subjektivnosti koja proizlazi iz zadavanja ulaznih parametara, a koja može bitno utjecati na krajnji rezultat. Osim toga, primjena te metode zahtijeva ekspertno znanje inženjera kao i upotrebu računala s dovoljno snažnim procesorima za obradu vrlo velikog broja podataka, čime je djelomično ograničena njezina komercijalna upotreba [79].

Model Monte Carlo, izrađen u sklopu projekta ARCHES [50] i razvijen na sveučilištu UCD u Dublinu [79, 82], koristi WIM podatke za vozila teža od 35 kN prikupljene na pet mjernih mjesta u Europi između 2005. i 2008. Prikupljeni podaci analizirani su prije upotrebe primjenom algoritma za kontrolu kvalitete te kamera na svim WIM mjernim mjestima kako bi se uklonili svi nepouzdana podaci. Taj model detaljno je opisan, osim u projektu ARCHES, i u radovima [69, 79], a kontrola kvalitete podataka WIM mjerenja tema je doktorske disertacije [43] i nedavnoga Žnidaričeva istraživanja [47].

Osim opisanih metoda, neke od manje zastupljenih mogu se naći u preglednome radu [53].

Kao dio projekta ARCHES [50], uz spomenuti model Monte Carlo, razvijena je pojednostavljena metoda obrade prometnih podataka, temeljena na statističkoj metodi konvolucije [12, 83]. Tu metodu predložio je Žnidarič [7], a primijenjena je i u radovima [6, 46, 84] te je detaljnije opisana u sljedećemu poglavlju.

#### 4.3. Primjer obrade B-WIM podataka

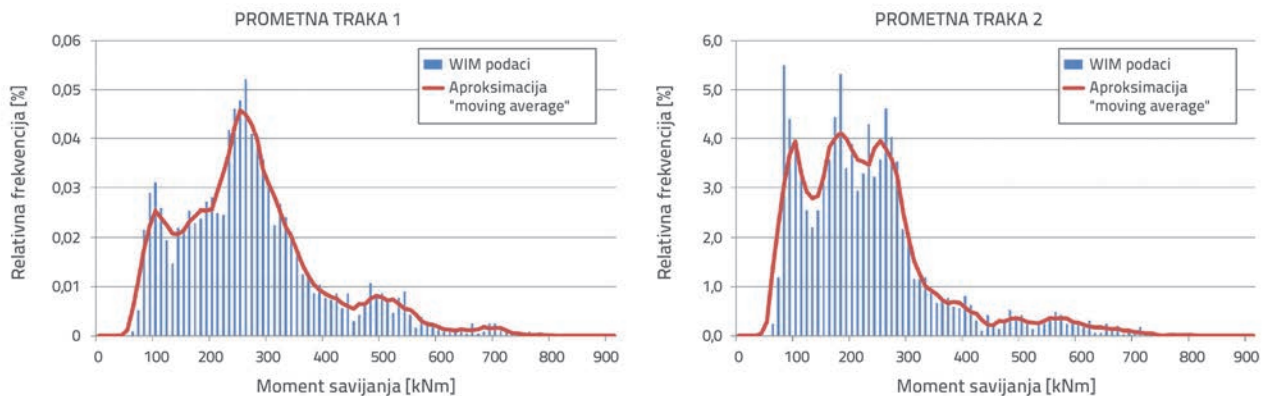
Osnovna je pretpostavka predložene metode ta da je maksimalan učinak prometnoga opterećenja na most dostignut u trenutku kada se dva vozila, svaki u svojem prometnom traku, susretnu na kritičnome presjeku mosta (npr. sredina raspona). Ta pretpostavka vrijedi za sve manje i srednje mostove s utjecajnim linijama do 30 ili 40 m, na kojima je kritično opterećenje postignuto tijekom normalnoga toka prometa, dok je na duljim mostovima mjerodavna situacija prometnoga zastoja [43]. S obzirom na to da je prema istraživanju provedenome u sklopu projekta SKRIBT [85, 86] najzastupljeniji tip mosta na transeuropskim prometnicama (TEN-T prometnice) slobodno oslonjeni ili kontinuirani gredni most s rasponom do 30 m, ta je metoda povoljna za praktičnu primjenu, što je potvrđeno i u radu [43].

Istodobna prisutnost vozila u susjednim prometnim trakovima definirana je kao kritični učinak prometnoga opterećenja te se njegovo trajanje mjeri u sekundama [43]. Taj je pristup pogodan za primjenu i kod mostova s jednosmjernim i dvosmjernim prometom, uz male modifikacije prilikom određivanja trajanja istodobne prisutnosti vozila, a što je objašnjeno u [43].

Prije modeliranja prometnoga opterećenja potrebno je prikupiti podatke o prometu WIM mjerenjima te je preduvjet za primjenu te metode to da zapis svakoga pojedinog vozila (tablica 4.) ima vremenski zapis čija je preciznost na razini tisućinke sekunde kako bi se točno odredio broj slučajeva istodobne prisutnosti vozila na više trakova na mostu. Postizanje dovoljne preciznosti krajnjega rezultata predviđanja učinaka prometnoga opterećenja u određenim razdobljima, uzimajući u obzir i dinamička svojstva, zahtijeva velik broj izmjerenih vozila, i to minimalno 100.000 vozila ili barem dva mjeseca kontinuiranoga mjerenja [6, 43].

S obzirom na velik broj vozila, njihovi statički učinci na most, određeni izrazom (2), sistematizirani su u histogram relativnih frekvencija, zasebno za svaki prometni trak. Veličina razreda za grupiranje učinaka opterećenja odabire se tako da omogućuje dovoljno dobru raspodjelu te da je maksimalna vrijednost najvišega razreda barem 10 % veća od maksimalnoga učinka opterećenja zabilježenog mjerenjem kako bi se vršni dijelovi razdiobe [7] mogli precizno modelirati. Primjeri histograma za most s dva prometna traka prikazani su na slici 2. [46], gdje je razdioba aproksimirana funkcijom pomičnoga prosjeka (debeli crvena krivulja), koja je definirana kao funkcija distribucije vjerojatnosti (engl. *Probability mass function* – PMF) za svaki prometni trak.

Kritični slučaj opterećenja na most definiran je kao istodobno prisustvo po jednog vozila na dva susjedna prometna traka. Uz pretpostavku da je prometni tok u tim trakovima međusobno



Slika 2. Histogrami relativnih frekvencija momenata savijanja za prometnu traku 1 (lijevo) i prometni traku 2 (desno), prema [46]

neovisan, moguće je definirati kumulativni histogram za oba prometna traka, primjenjujući izraz (6):

$$f_z = \sum_{k=1}^m f_x(k) \cdot f_y(z-k) \tag{6}$$

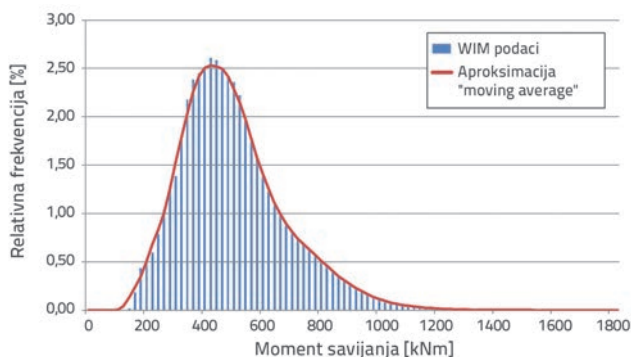
gdje su  $f_x$  i  $f_y$  funkcije distribucije vjerojatnosti učinaka prometnoga opterećenja u trakovima 1 i 2, dok je  $f_z$  funkcija distribucije vjerojatnosti kritičnoga učinka prometnoga opterećenja definiranog kao istodobno prisustvo vozila na susjednim prometnim trakovima, a  $m$  je broj razreda kumulativnoga histograma prikazanog na slici 3., prema [46].

Funkcija distribucije vjerojatnosti na slici 3. koristi se za definiciju funkcije kumulativne gustoće (engl. *Cumulative Distribution Function* - CDF), te njezinih statističkih parametra, srednje vrijednosti i standardne devijacije, koje su kritični učinak prometnoga opterećenja u razdoblju WIM mjerenja. Primjenom teorije ekstremnih vrijednosti [65] CDF se može definirati za bilo koji povratni period, i to potenciranjem na vrijednost:

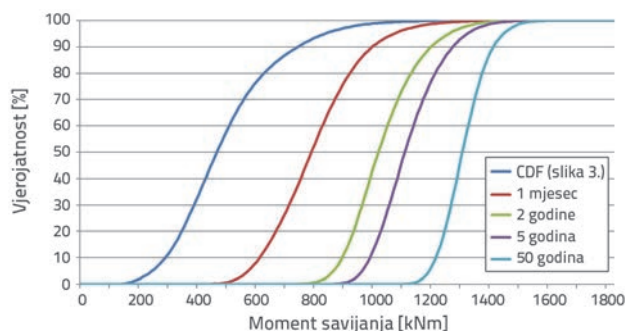
$$F_{max}(z) = F_z^N(z) \tag{7}$$

gdje je  $N$  broj očekivanih prisustava više vozila u definiranoj povratnoj periodu, a računa se izravno iz WIM podataka, što je detaljnije objašnjeno u [43]. Grafički prikazi CDF-a nazivaju se i konvolucijskim krivuljama, a na slici 4. prikazane su za razne povratne periode [7].

Kako bi se u obzir uzeli i dinamički učinci zabilježeni WIM mjerenjima, statičke učinke prometnoga opterećenja (slike 3. i 4.) potrebno je uvećati dinamičkim faktorom (DAF), koji se može odrediti izravno iz B-WIM podataka. Proračun vrijednosti DAF faktora može imati velik utjecaj na krajnji rezultat, pa je i sam postupak predmet mnogih radova i znanstvenih projekata [43, 51, 87, 88]. Primjer vrijednosti DAF faktora za nešto više od 200.000 izmjerenih vozila dan je u radu [6], gdje je zaključeno to kako je njegova vrijednost od 1,035 puno manja od vrijednosti koju preporučaju propisi [20], a koja bi za takvu vrstu mosta bila 1,20.



Slika 3. Konvoluirani histogram za oba prometna traka [46]



Slika 4. Konvolucijske krivulje (CDF-s) za razne povratne periode [46]

Za usporedbu predstavljene metode obrade prometnih podataka isti uzorak obrađen je i primjenom simulacije Monte Carlo iz projekta ARCHES [50] te metodom statističke ekstrapolacije koju predlaže Sivakumar [12]. U prosjeku su učinci prometnoga opterećenja 2,7 % manji nego kod primjene metode Monte Carlo jer ona u obzir uzima i konfiguracije teških vozila koja nisu zabilježena mjerenjem. Detaljne usporedbe prikazane su u radovima [7, 42]. U radovima [6, 46, 84] uspoređeni su učinci prometnih opterećenja na oglednome mostu određenih prema propisima [2] i B-WIM mjerenjem lokalnoga opterećenja prethodno prikazanom metodom. Rezultati usporedbe dokazuju to da primjena B-WIM mjerenja u postupcima ocjene stanja postojećih

mostova može rezultirati otkrivanjem drugim metodama skrivenih rezervi nosivosti, što dovodi do smanjenja ukupnih troškova održavanja i produljenja pretpostavljena preostalog uporabnog vijeka.

## 5. Zaključak

Cilj je ovoga rada dati pregled najčešće primjenjivanih metoda obrade prometnoga opterećenja te njihove primjene prilikom analize stanja postojećih cestovnih mostova i ukratko prikazati razvitak modela prometnoga opterećenja u važećim propisima za projektiranje novih mostova. Zbog svojega promjenjivog karaktera, prometno je opterećenje ključni ulazni parametar i kod projektiranja novih mostova, ali osobito kod analize postojećih mostova. Modeli prometnih opterećenja u propisima za projektiranje novih mostova najčešće se opisuju kao konzervativni zbog ograničenoga uzorka mjerenja prometa primijenjenoga za njihovu kalibraciju te uključenih

razina sigurnosti. Takvi modeli omogućavaju inženjerima projektiranje pouzdanih i optimalnih novih mostova koji će biti u stanju preuzeti predviđeni porast u volumenu i težini prometa u budućnosti [37]. No, unatoč jedinstvenim normama za projektiranje novih mostova u državama EU-a, nosivosti mostova na autocestama diljem Europe razlikuju se zbog primjene različitih korekcijskih faktora kroz nacionalne dodatke (tablica 3.).

S druge strane, prikupljanje i obrada prometnih podataka na određenoj lokaciji te njihova primjena prilikom ocjene stanja postojećih mostova zahtjevan je postupak jer, kao što je prikazano u radu, većina dostupnih metoda za obradu prometa sadrži određenu razinu subjektivnosti ili su složene za praktičnu upotrebu. Pojednostavljena metoda, prikazana u zadnjem poglavlju rada, daje rezultate koji zanemaruju odudaraju od zahtjevnijih metoda te se zato preporučuje njezina praktična upotreba prilikom ocjenjivanja stanja postojećih cestovnih mostova.

## LITERATURA

- [1] O'Connor, A., O'Brien, E.J.: Traffic load modelling and factors influencing the accuracy of predicted extremes, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32 (2005) 1, pp. 270-278, <http://dx.doi.org/10.1139/I04-092>.
- [2] Eurocode: Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges. Brussels, 2005.
- [3] Eurocode: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 2: Concrete bridges - Design and detailing rules, . Brussels, 2005.
- [4] Šavor, Z., Novak, M.Š.: Procedures for reliability assessment of existing bridges, *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 67 (2015) 6, pp. 557-572.
- [5] O'Connor, A., Enevoldsen, I.: Probability-based assessment of highway bridges according to the new Danish guideline, *Structure and Infrastructure Engineering*, 5 (2009) 2, pp. 157-168.
- [6] Mandić Ivanković, A., Skokandić, D., Žnidarič, A., Kreslin, M.: Bridge performance indicators based on traffic load monitoring, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2479 (2017) 12, pp. 1-13, <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2017.1415941>.
- [7] Žnidarič, A., Kreslin, M., Lavrič, I., Kalin, J.: Simplified Approach to Modelling Traffic Loads on Bridges, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48 (2012), pp. 2887-2896.
- [8] Moses, F.: Weigh-In-Motion system using instrumented bridges, *ASCE Transportation Engineering Journal*, 105 (1979), pp. 233-249.
- [9] Žnidarič, A., Kreslin, M., Kalin, J.: Weigh-in-motion and traffic load monitoring, Fact Sheet WG 2-9 - COST Action TU 1402 - Quantifying the Value of Structural Health Monitoring, 2016.
- [10] Šegavić, D., Ružič, I.: WIM - Measuring of total mass and axle load of vehicles on public roads in Croatia, in 6. Hrvatski Kongres o Cestama, Opatija, 2015.
- [11] O'Brien, E., Žnidarič, A., Ojio, T.: Bridge weigh-in-motion—Latest developments and applications world wide, in *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles HV Paris 2008*, pp. 25-38, 2008.
- [12] Sivakumar, B., Ghosn, M., Moses, F.: Protocols for collecting and using traffic data in bridge design, NCHRP report No. 683. Washington D.C., Transport Research Board, 2011.
- [13] Žnidarič, A., Herga, L., Pirman, B., Wilenpart, T., Hevka, P., Močnik, C., Ružič, D.: Management of bridges in Slovenia. National Report, in *Proceeding os the 25<sup>th</sup> World Road Congress*, Seoul, 2015.
- [14] Carey, C.: Traffic Loading on Highway Bridges - PhD Thesis, Dublin Institute of Technology, 2008.
- [15] Dawe, P.: Research perspectives: traffic loading on highway bridges. Thomas Telford, 2003.
- [16] Austro-Hungarian Empire: Guidelines for construction of railway and road bridges. Vienna, 1904.
- [17] Kulicki, J.M., Mertz, D.R.: Evolution of Vehicular Live Load Models During the Interstate Design Era and Beyond. General structures committee, pp. 1-26, 2011, <http://dx.doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.03.017>.
- [18] American Association of State Highway and Transportation Officials: LRFD Bridge Design Specifications, p. 1704, 2014, Available: [www.transportation.org](http://www.transportation.org).
- [19] Prat, M.: Traffic load models for bridge design: recent developments and research, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3 (2001) 4, pp. 326-334, <http://dx.doi.org/10.1002/pse.91>.
- [20] Bruls, A., Mathieu, A., Calgaro, J., Prat, M.: The main models of traffic loads on bridges - Background studies, in *IABSE Report, Basis of Design and Action on Structures, Background and application of Eurocode 1*, pp. 215-227, Delft, Netherlands, 1996.
- [21] Matar, H.B., Bakhoum, M.M., Ishac, I.I.: Traffic actions for the design of roadway bridges: A comparison of international codes, *Long Span Bridges and Roofs - Development, Design and Implementation*, 2013.
- [22] Furundžić, B.: Privremeni tehnički propisi za opterećenje mostova na putovima PTP-5 (1949). Belgrade: Izdavačko preduzeće Građevinska knjiga, 1969.

- [23] Kraljivina Jugoslavija: Pravilnik za cestne mostove, Beograd, 1933.
- [24] Deutsches Institut für Normung DIN: DIN 1072; Straßen- und Wegbrücken, pp. 1-12, 1985.
- [25] Mandić, A., Radić, J.: Prilog osuvremenjivanju propisa za opterećenja mostova, *Građevinar*, 56 (2004) 7, pp. 409-422.
- [26] CEN: ENV 1991-3 Basis of design and actions on structures - Part 3: Traffic loads on bridges, 2003.
- [27] HZN: HRN EN 1991-2:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - 2. dio: Prometna opterećenja mostova, Zagreb, 2012.
- [28] Mandić Ivanković, A.: Granična stanja postojećih mostova - PhD thesis, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2008.
- [29] Šavor, Z., Radić, J., Mandić, A.: Neke usporedbe hrvatskih i europskih norma za djelovanja, *Građevinar*, 58 (2006), pp. 641-648.
- [30] Bruls, A., Croce, P., Sanpaolesi, L.: Calibration of road load models for road bridges, in IABSE Report, Basis of Design and Action on Structures, Background and application of Eurocode 1, pp. 439-453, Delft, Netherlands, 1996.
- [31] O'Connor, A., Jacob, B., O'Brien, E., Prat, M.: Report of Current Studies Performed on Normal Load Model of EC1, *Revue Française de Génie Civil*, 5 (2001) 4, pp. 411-433, <http://dx.doi.org/10.1080/12795119.2001.9692315>.
- [32] Rymza, J.: Proposal to Change the Design Load in the Eurocode 1 Based on Loads from Vehicles with a Mass of 60 Tonnes, *Transportation Research Procedia*, 14 (2016), pp. 4020-4029, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.499>.
- [33] Maurer, R., Arnold, A., Müller, M.: Effects from the new load-model according to DIN EN 1991-2/NA on the design of concrete bridges, *Beton- und Stahlbetonbau*, 11 (2011), pp. 747-759.
- [34] Freundt, U., Böning, S., Kaschner, R.: Road bridges between actual and future heavy load traffic - Road traffic loads according to DIN EN 1991-2/NA, *Beton- und Stahlbetonbau*, 11 (2011), pp. 736-746.
- [35] OBrien, E.J., O'Connor, A.J., Arrigan, J.E.: Procedures for Calibrating Eurocode Traffic Load Model 1 for National Conditions, *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability - Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, no. June, pp. 2597-2603, 2012, <http://dx.doi.org/10.1201/b12352-397>.
- [36] Maljaars, J., Steenbergen, R., Abspoel, L., Kolstein, H.: Safety assessment of existing highway bridges and viaducts, *Structural Engineering International*, 22 (2012) 1, pp. 112-120, <http://dx.doi.org/10.2749/101686612X13216060213716>.
- [37] Leahy, C., OBrien, E., O'Connor, A.: The Effect of Traffic Growth on Characteristic Bridge Load Effects, *Transportation Research Procedia*, 14 (2016), pp. 3990-3999, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.496>.
- [38] Mandić, A., Radić, J., Šavor, Z.: Ocjenjivanje graničnih stanja postojećih mostova, *Građevinar*, 61 (2009) 6, pp. 533-545 (in Croatian).
- [39] SIA: SIA 269 : 2011 - Existing Structures - Bases for Examination and Interventions, Zurich, Switzerland, 2011.
- [40] OBrien, E.J., Enright, B.: Using Weigh-in-Motion Data to Determine Aggressiveness of Traffic for Bridge Loading, *Journal of Bridge Engineering*, 18 (2013) 3, pp. 232-239, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000368](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000368).
- [41] Croce, P., Holický, M., Marková, J., Arteaga, A., de Diego, A., Tanner, P., Lara, C., Diamantidis, D., Vrouwenvelder, T.: *Design of Bridges*, 1st ed. Czech Technical University in Prague, 2010.
- [42] O'Connor, A., Jacob, B., O'Brien, E. J., Prat, M.: Effects of Traffic Loads on Road Bridges-Preliminary Studies for the Re-Assessment of the Traffic Load Model for Eurocode 1, Part 3., EJ O'Brien & B. Jabob (eds.). *Proceedings of the Second European Conference on Weigh-in-Motion of Road Vehicles*, 1998.
- [43] Žnidarič, A.: Influence of number and quality of weigh-in-motion data on evaluation of load effects on bridges (Doctoral dissertation), University of Ljubljana, 2017.
- [44] Leduc, G.: Road Traffic Data: Collection Methods and Applications, Technical Report - European Commission, Joint Research Centre, 2008.
- [45] Jacob, B., OBrien, E. J., Jehaes, S. (Eds.): *Weigh-in-Motion of Road Vehicles: Final Report of the COST 323 Action*, 2002.
- [46] Skokandić, D., Žnidarič, A., Mandić Ivanković, A., Kreslin, M.: Application of Bridge Weigh - in - Motion measurements in assessment of existing road bridges, in *Proceedings of JOINT COST TU1402 - COST TU1406 - IABSE WC1 WORKSHOP*, pp. 4.6.1-8, Zagreb, 2017.
- [47] Žnidarič, A., Kalin, J., Kreslin, M.: Improved accuracy and robustness of bridge weigh-in-motion systems, *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 2479, no. December, pp. 1-13, 2017, <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2017.1406958>.
- [48] Jacob, B.: *Weigh-in-Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE)*, General Report, Paris, 2002.
- [49] ARCHES D10: Recommendations on dynamic amplification allowance, Brussels: European Commission, 2009.
- [50] ARCHES D08: Report D08: Recommendations on bridge traffic load monitoring, Brussels: European Commission, 2009.
- [51] Žnidarič, A., Lavrič, I.: Applications of B-WIM technology to bridge assessment, in *Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2010*, Philadelphia, USA, 2010.
- [52] Žnidarič, A., Lavrič, I., Kalin, J.: Measurements of bridge dynamics with a bridge weigh-in-motion system, in *5<sup>th</sup> International Conference on Weigh-in-Motion (ICWIM5)*, pp. 388-397, 2008.
- [53] OBrien, E.J., Schmidt, F., Hajjalizadeh, D., Zhou, X.Y., Enright, B., Caprani, C.C., Wilson, S., Sheils, E.: A review of probabilistic methods of assessment of load effects in bridges, *Structural Safety*, 53 (2015), pp. 44-56, <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2015.01.002>.
- [54] Nowak, A.S.: Live load model for highway bridges, *Structural Safety*, 13 (1993) 1-2, pp. 53-66, [http://dx.doi.org/10.1016/0167-4730\(93\)90048-6](http://dx.doi.org/10.1016/0167-4730(93)90048-6).
- [55] Nowak, A.S., Hong, Y.K.: Bridge live load models, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 117 (1992) 9, pp. 2757-2767.
- [56] Cooper, D.: Development of short span bridge-specific assessment live loading, *Safety of Bridges*, pp. 64-89, 1997.
- [57] O'Connor, A., Eichinger, E.M.: Site-specific traffic load modelling for bridge assessment, *Proceedings of the ICE - Bridge Engineering*, 160 (2007) 4, pp. 185-194, <http://dx.doi.org/10.1680/bren.2007.160.4.185>.
- [58] Grave, S., OBrien, E.J., O'Connor, A.: The Determination of Site-Specific Imposed Traffic Loadings on Existing Bridges, *The Fourth International Conference on Bridge Management*, 2000, <http://dx.doi.org/10.1680/bm4.28548>.
- [59] Zhou, X., Schmidt, F., Jacob, B.: Extrapolation of traffic data for development of traffic load models, in *IABMAS2012, 6<sup>th</sup> Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, pp. 1503-1509, Lago di Como, Italy, 2012, <http://dx.doi.org/10.1201/b12352-215>.

- [60] Ghosn, M., Moses, F.: Markov Renewal Model for Maximum Bridge Loading, *Journal of Engineering Mechanics*, 111 (1985) 9, pp. 1093-1104, [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1985\)111:9\(1093\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1985)111:9(1093)).
- [61] Crespo-Minguillón, C., Casas, J.R.: A comprehensive traffic load model for bridge safety checking, *Structural Safety*, 19 (1997) 4, pp. 339-359, [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730\(97\)00016-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730(97)00016-7).
- [62] Flint, A., Jacob, B.: Extreme Traffic Loads on Road Bridges and Target Value of their Effects for Code Calibration, in IABSE Report, Basis of Design and Action on Structures, Background and application of Eurocode 1, pp. 469-477, Delft, Netherlands, 1996.
- [63] Cremona, C.: Optimal extrapolation of traffic load effects, *Structural Safety*, 23 (2001) 1, pp. 31-46, [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730\(00\)00024-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730(00)00024-2).
- [64] O'Brien, E.J., Enright, B., Getachew, A.: Importance of the Tail in Truck Weight Modeling for Bridge Assessment, *Journal of Bridge Engineering*, 15 (2010) 2, pp. 210-213, [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000043](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000043).
- [65] Ang, A.H., Tang, W.H.: *Probability Concepts in Engineering, Planning and Design*. Wiley and Sons, 1975.
- [66] Mei, G., Qin, Q., Lin, D.J.: Bimodal renewal processes models of highway vehicle loads, *Reliability Engineering and System Safety*, 83 (2004) 3, pp. 333-339, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2003.10.002>.
- [67] Fu, G., You, J.: Truck Loads and Bridge Capacity Evaluation in China, *Journal of Bridge Engineering*, 14 (2009) 5, pp. 327-335, [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000006](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000006).
- [68] Caprani, C.C., O'Brien, E.J.: Estimating Extreme Highway Bridge Traffic Load Effects, in Safety, reliability and risk of structures, infrastructures and engineering systems: proceedings of the Tenth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR2009), Osaka, Japan, pp. 3053-3060, 2010.
- [69] O'Brien, E.J., Bordallo-Ruiz, A., Enright, B.: Lifetime maximum load effects on short-span bridges subject to growing traffic volumes, *Structural Safety*, 50 (2014) September, pp. 113-122, <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.05.005>.
- [70] Coles, S.: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer, London, 2001.
- [71] Zhou, X.Y., Schmidt, F., Toutlemonde, F., Jacob, B.: A mixture peaks over threshold approach for predicting extreme bridge traffic load effects, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 43 (2016), pp. 121-131, <http://dx.doi.org/10.1016/j.probengmech.2015.12.004>.
- [72] Yang, X., Zhang, J., Ren, W.X.: Threshold selection for extreme value estimation of vehicle load effect on bridges, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14 (2018) 2, <http://dx.doi.org/10.1177/1550147718757698>.
- [73] Rice, S.O.: Mathematical Analysis of Random Noise, *Bell System Technical Journal*, 24 (1945) 1, pp. 46-156, <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1945.tb00453.x>.
- [74] Rychlik, I.: On Some Reliability Applications of Rice's Formula for the Intensity of Level Crossings, *Extremes*, pp. 331-348, 2001.
- [75] Ditlevsen, O.: Traffic Loads on Large Bridges Modeled as White Noise Fields, *Journal of Engineering Mechanics*, 120 (1994) 4, pp. 681-694, [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1994\)120:4\(681\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1994)120:4(681)).
- [76] Getachew, A.: Traffic Load Effect on Bridges - Statistical Analysis of Collected and Monte Carlo Simulated Vehicle Data (Doctoral Thesis), Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003.
- [77] Moses, F., Verma, P.: *Load Capacity Evaluation of Existing Bridges*, 1987.
- [78] Caprani, C.C., O'Brien, E.J., McLachlan, G.J.: Characteristic traffic load effects from a mixture of loading events on short to medium span bridges, *Structural Safety*, 30 (2008) 5, pp. 394-404, <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2006.11.006>.
- [79] Enright, B., O'Brien, E.J.: Monte Carlo simulation of extreme traffic loading on short and medium span bridges, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9 (2013) 12, pp. 1267-1282, <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2012.688753>.
- [80] Bailey, S.F., Bez, R.: Site specific probability distribution of extreme traffic action effects, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 14 (2002) 1-2, pp. 19-26, [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-8920\(98\)00013-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-8920(98)00013-7).
- [81] O'Brien, E.J., Caprani, C.C., O'Connell, G.J.: Bridge assessment loading: A comparison of West and Central/East Europe, *Bridge Structures*, 2 (2006) 1, pp. 25-33, <http://dx.doi.org/10.1080/15732480600578451>.
- [82] Enright, B., O'Brien, E. J., Dempsey, T.: Extreme traffic loading in bridges, in Proceedings of the Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, Philadelphia, USA, 2010.
- [83] Žnidarič, A., Moses, F.: Structural Safety of Existing Road Bridges, in Proceedings of the ICOSSAR 97 conference, pp. 1843-1850, Kyoto, 1997.
- [84] Skokandić, D., Mandić Ivanković, A., Džeba, I.: Multi - level road bridge assessment, in Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment - 19<sup>th</sup> IABSE Congress, pp. 970-977, no. September, Stockholm, 2016.
- [85] SKRIBIT: Protection of critical bridges and tunnels in the course roads - Final Report, 2012.
- [86] Žnidarič, A., Pakrashi, V., O'Brien, E. J., O'Connor, A.: A review of road structure data in six European countries, in Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban design and planning, pp. 225-232, 2011.
- [87] O'Brien, E.J., Gonzalez, A., Dowling, J., Žnidarič, A.: Direct measurement of dynamics in road bridges using a bridge Weigh-in-Motion system, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 8 (2013) 4, pp. 263-270.
- [88] Kalin, J., Žnidarič, A., Kreslin, M.: Using Weigh-in-motion Data to Determine Bridge Dynamic Amplification Factor, in EVACES'15, 6th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Duebendorf, Switzerland, 2015.