

Primljen / Received: 8.3.2019.

Ispravljen / Corrected: 6.5.2019.

Prihvaćen / Accepted: 24.5.2019.

Dostupno online / Available online: 10.1.2020.

Istraživanje modela opterećenja za zamor mostova na autocestama u jugoistočnoj Kini

Autori:



Yuzhao Liang, dipl.ing.građ.
Sveučilište Sichuan, Kina
Fakultet za arhitekturu i okoliš
yzh.liang@foxmail.com
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Feng Xiong**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Sichuan, Kina
Fakultet za arhitekturu i okoliš
fxiong@scu.edu.cn

Prethodno priopćenje

Yuzhao Liang, Feng Xiong

Istraživanje modela opterećenja za zamor mostova na autocestama u jugoistočnoj Kini

Oštećenja konstrukcija mostova uslijed zamora postala su jednim od glavnih uzroka oštećenja, ali još uvijek nisu utvrđeni standardni modeli vozila za proračun zamora mostova na autocestama u Kini. Oslanjajući se na WIM sustav, prikupljeni su podaci o opterećenju različitih vrsta vozila iz šest pokrajina u jugoistočnoj Kini. Za izračunavanje ekvivalentnog osovinskog opterećenja, ekvivalentnog međuosovinskog razmaka i omjera doprinosa zamora usvojeni su Minerov kriterij za kumulativno oštećenje zbog zamora i ekvivalentan kriterij amplitude naprezanja. Utvrđen je spektar opterećenja za zamor koristeći pet ekvivalentnih modela vozila.

Ključne riječi:

mostovi, model opterećenja za zamor, standardno vozilo koje uzrokuje zamor, WIM sustav

Research Paper

Yuzhao Liang, Feng Xiong

Study of a fatigue load model for highway bridges in Southeast China

Although fatigue damage has become one of the main causes of structural damage to bridges, standard vehicle models for highway bridge fatigue design have not as yet been determined in China. Relying on the WIM system, load data were collected for different types of vehicles from six provinces in Southeast China. The Miner's criterion for cumulative fatigue damage, and the equivalent stress amplitude criterion, were adopted for calculating the equivalent axle load, the equivalent wheelbase, and the fatigue damage contribution ratio. The fatigue load spectrum, including five equivalent vehicle models, was identified.

Key words:

bridges, fatigue load model, standard fatigue vehicle, WIM system

Vorherige Mitteilung

Yuzhao Liang, Feng Xiong

Untersuchung von Lastmodellen für die Ermüdung von Autobahnbrücken in Südostchina

Schäden an Brückenkonstruktionen aufgrund von Ermüdung sind zu einer der Hauptursachen für Schäden geworden, aber es wurden noch immer keine Standardmodelle von Fahrzeugen für die Berechnung der Ermüdung von Autobahnbrücken in China festgelegt. Sich an das WIM-System anlehnend wurden Daten über die Belastung unterschiedlicher Fahrzeugtypen aus sechs Provinzen in Südostchina zusammengetragen. Für die Berechnung der äquivalenten Achsenbelastung, des äquivalenten Radstandes und des Verhältnisses des Ermüdungsbeitrags wurden die Kriterien von Miner für die kumulative Beschädigung aufgrund von Ermüdung und das äquivalente Kriterium der Spannungsamplitude verwendet. Festgestellt wurde ein Ermüdungsbelastungsspektrum durch Verwendung von fünf äquivalenten Fahrzeugmodellen.

Schlüsselwörter:

Brücken, Belastungsmodelle für Ermüdung, Standardfahrzeug, welches Ermüdung verursacht, WIM-System

1. Uvod

Brzim razvojem automobilske industrije i prometa, broj vozila koja prometuju autocestom povećava se iz dana u dan, postupno se povećava udio preopterećenih vozila, a trajanje mostova zbog utjecaja zamora na autocestama naglo se skraćuje. Mostovi na autocestama izloženi su ponavljajućim učincima opterećenja vozila tijekom razdoblja korištenja, te se zbog utjecaja zamora akumuliraju oštećenja konstrukcije, a to je razlog zašto oštećenja zbog zamora postaju jednim od glavnih uzroka oštećenja konstrukcija mostova.

Model vozila koje uzrokuje oštećenja zbog zamora ima važnu ulogu u ocjeni zamora na mostovima. Mnogi su znanstvenici proveli istraživanja o tome. Schilling [1] i Raju i sur. [2] smatraju da bruto težina vozila koje uzrokuje zamor mora biti prilagođena raspodjeli opterećenja na određenim mjestima, a osovinsko opterećenje treba biti proporcionalno podešeno kako bi se poboljšala točnost modela vozila koje uzrokuje zamor. Laman i Nowak [3] odabrali su pet mostova s čeličnim nosačima kako bi proučili model opterećenja za zamor mostova s čeličnim nosačima. Rezultati su pokazali da su spektar opterećenja i naprezanja različitih komponenti na različitim mjestima različiti. Predložili su da se model s troosovinskim vozilom preporučuje kao zamjenski za vozila s tri do sedam osovina, a model vozila s četiri osovine izabran je za mjesta na kojima prolaze vozila s deset ili jedanaest osovina. Chotickai i Bowman [4] smatraju da bi stupanj oštećenosti uslijed zamora malih mostova bio prevelik kad bi se u SAD-u provjerio zamor na postojećim cestovnim mostovima, pa su predložena dva nova vozila za proračun zamora. Jedno od njih je vozilo s tri osovine koje se koristi na većini glavnih autocesta, a drugo je vozilo s četiri osovine koje se koristi na cestama gdje je doprinos utjecaja na zamor od vozila s osam osovina do vozila s jedanaest osovina relativno velik. Przemyslaw [5] je uspostavio modele spektra opterećenja i modele opterećenja za analizu pouzdanosti konstrukcije i analizu pouzdanosti uslijed zamora na temelju podataka o opterećenju vozila za trideset i dva specifična stvarna mosta u šesnaest država SAD-a u normalnim uvjetima korištenja.

Uz intenzivnu izgradnju čeličnih mostova posljednjih godina [6, 7], mnogi su znanstvenici proveli opsežna i detaljna istraživanja o modelu opterećenja za zamor mostova u Kini. Tong i Shen [8] istraživali su prometna vozila na gradskim cestama u Šangaju. Prema načelu ekvivalentnog oštećenja uslijed zamora, izmjerenih osamnaest tipova dnevnih prometnih vozila sažeto je u spektar opterećenja koji se sastoji od šest tipova reprezentativnih vozila. Wang i sur. [9] pojednostavili su izmjerene podatke o spektru opterećenja vozila koja doprinose zamoru, a sastojao se od dvoosovinskog i troosovinskog vozila te utvrdili model zamornog opterećenja vozila za vijadukt Guangzhou. Yue F. i sur. [10] primijenili su metodu Monte Carlo za simulaciju podataka o toku prometu koji su prikupljeni sa šest naplatnih postaja na brzjoj autocesti Beijing-Fuzhou. Predložen je model vozila za zamor pogodan za mostove na brzjoj autocesti Peking-Fuzhou te je provjerena valjanost modela. Zhou i sur. [11, 12] odabrali

su osam tipičnih autocesta u Kini za provedbu istraživanja prometnog opterećenja, a spektar opterećenja vozilima mostova korištenih za različite regije dobiven je na temelju načela ekvivalentnog oštećenja uslijed zamora. Izračunan je stupanj oštećenosti zbog utjecaja zamora mostova tipičnih raspona na autocestama, te je utvrđen odgovarajući oblik opterećenja za zamore koje uzrokuje standardno vozilo te koeficijent korekcije utjecaja odgovarajućeg raspona ili duljine utjecajne linije, čime je konstruiran kompletan model standardnih vozila koji uzrokuju zamor za različite vrste mostova na autocestama. Lan i sur. [13] uspostavili su spektar zamornog opterećenja, uključujući šest reprezentativnih tipova vozila primjenom SHM sustava za mjerenje podataka o opterećenju vozila na mostu na autocesti Binzhou Yellow River u pokrajini Shandong. Za predviđanje obujma prometa tijekom uporabnog vijeka mosta korišten je i logistički model.

Sun i sur. [14] napravili su simulacijski proračun spektra opterećenja vozila s normalnim i intenzivnim uvjetima prometa za državnu autocestu 309 u Kini, kojom prometuju teška, preopterećena vozila. Dobivene su krivulje naprezanja u vremenu u normalnim i intenzivnim uvjetima rada. Na temelju načela linearnih kumulativnih oštećenja izvedena je ekvivalentna amplituda naprezanja za analizu pouzdanosti autocesta na zamor. Sun i sur. [15] pribavili su osnovne informacije o prometu 6. Ring Road ceste u Pekingu na temelju WIM sustava (eng. *Weigh-in-Motion* - WIM). Prema načelu ekvivalentnosti oštećenja, dobiven je spektar opterećenja za zamor za šest tipova vozila. Pomoću WIM sustava na mostu Jiujiang Yangtze, Shao i sur. [16] dobili su podatke o opterećenju vozila i podatke o tipu vozila u terenskom istraživanju i utvrdili spektar zamornog opterećenja vozila koji se sastoji od sedam ekvivalentnih modela vozila. Liu i sur. [17, 18] napravili su standardni model vozila koji odgovara kineskom prometnom opterećenju uspoređujući i analizirajući modele standardnih vozila koja dovode do zamora u američkim i britanskim propisima. Xia i sur. [19] prikupili su podatke o praćenju mosta Xinyihe na brzjoj cesti Beijing-Shanghai. Na temelju Minerovog linearnog kumulativnog omjera oštećenja i načela ekvivalentnog oštećenja zamorom utvrđen je spektar opterećenja za zamor mosta Xinyihe koji obuhvaća devet reprezentativnih tipova vozila, te je ispitana vrijednost njihova doprinosa oštećenju uslijed zamora.

Zhai i sur. [20] pregledali su izmjereni spektar opterećenja na zamor materijala na pet različitih autocesta iz aspekta utjecaja naprezanja tipičnih detalja zamora kabelskog visećeg mosta s čeličnim sandučastim nosačima, kako bi se izračunalo svako pojedino oštećenje zamorom u stvarnom prometnom toku i odredile vrste vozila koje su uglavnom uzrokovale oštećenja. Prikupljanjem podataka o opterećenju vozila mosta Xihoumen, Ma i sur. [21] uspostavili su statističku funkciju raspodjele bruto težine vozila i međuosovinskog razmaka svakog tipa vozila u uvjetima različitih opterećenja. Koristeći Palmgren-Miner teoriju akumulacije oštećenja od zamora određeni su parametri opterećenja za zamor raznih vozila, te je procijenjen vijek sučeonih zavarenih spojeva U-rebara zbog utjecaja zamora. Di i

sur. [22] prikupljali su godinu dana podatke o opterećenju vozila lučkog mosta na autocesti u priobalnom području Zhejiang. Prema broju osovina i međuosovinskom razmaku, vozila su podijeljena u sedam kategorija. Analizirane su karakteristike raspodjele opterećenja vozila lučkog mosta na autocesti i dobivena je ekvivalentna osovinska težina i međuosovinski razmak za svaki tip vozila. Konačno, ocijenjena su tri ključna detalja zamora ortotropnih čeličnih kolničkih ploča lučkog mosta na autocesti koristeći dobiveni spektar opterećenja za zamor i metodu koncentracije naprezanja.

Uspostava modela opterećenja za zamor osnova je za provjeru oštećenja konstrukcije zbog zamora i procjene trajanja mosta zbog djelovanja zamora. Europska norma (Eurocode 3) [23], britanska norma BS5400 [24] i američka norma AASHTO kod [25] navode svoje odgovarajuće modele opterećenja za proračun zamora. Kineska norma za projektiranje čeličnih mostova na autocestama [26] također je dala model opterećenja iz aspekta zamora za čelične mostove u Kini. To je model vozila s četiri osovine i osovinskim opterećenjem od 120 kN. Međuosovinski razmak je 120 cm, 600 cm i 120 cm. Međutim, Kina je golemo područje, s vrlo velikim razlikama u razini gospodarskog razvoja i rasporedu industrijske strukture. Radna pravila i karakteristike raspodjele opterećenja vozila također su različiti. Prema tome, upotreba jedinstvenog modela opterećenja vozila iz aspekta zamora na nacionalnoj razini ne može ispuniti zahtjeve za poboljšanje ovog problema. Međutim, model opterećenja vozila na temelju podataka o opterećenju vozila s određene točke prikupljanja podataka je nepouzdan i ne može potpuno odražavati stvarnu situaciju prometnog opterećenja u ovom području. Da bi se dobio točan model opterećenja iz aspekta zamora, potrebno je kombinirati podatke o opterećenju vozila s nekoliko tipičnih cesta u određenom području kako bi se provela relevantna istraživanja. Jugoistočna Kina jedna je od najaktivnijih regija u gospodarstvu. To je zajedničko zaleđe razvijenih gospodarskih zona, kao što su Delta rijeke Yangtze, Delta rijeke Pearl, Južna delta rijeke del Fujian i Western Taiwan Straits. Posljednjih se godina prometna industrija ubrzano razvijala, a promet je naglo porastao. Međutim, postoji nekoliko modela opterećenja vozila koji se mogu koristiti za simuliranje stvarnih prometnih uvjeta na ovom području. Modeli opterećenja za zamor koji predstavljaju prometne uvjete u jugoistočnoj Kini potrebni su za procjenu ponašanja mostova pod opterećenjem vozila. U ovom istraživanju autor primjenjuje WIM sustav za prikupljanje podataka o opterećenju vozila iz šest pokrajina u jugoistočnoj Kini i provodi sustavno istraživanje modela opterećenja za zamor vozila što utječe na sigurnost konstrukcije mosta. Prvo, raspravlja se o prikupljanju, obradi i analizi podataka o opterećenju reprezentativnih vozila i modela vozila iz različitih pokrajina. Nakon toga, za izračunavanje ekvivalentnog osovinskog opterećenja, ekvivalentnog međuosovinskog razmaka i omjera doprinosa oštećenja uslijed zamora materijala primjenjuje se Minerov kriterij za kumulativno oštećenje zamorom i kriterij ekvivalentne amplitude naprezanja. Konačno, prema iznesenoj formuli, predlažu se spektar opterećenja i standardni model opterećenja za zamor za svaku

pokrajinu u jugoistočnoj Kini te se uspoređuju s nalazima drugih znanstvenika.

2. Prikupljanje podataka o opterećenju vozila

Precizno utvrđivanje modela opterećenja za zamor mostova na autocestama treba se temeljiti na stvarnim prikupljenim podacima o opterećenju vozila, uključujući podatke o tipu vozila, bruto težini vozila i osovinskom opterećenju. S obzirom na to da različita područja imaju različite karakteristike opterećenja vozila, potrebno je prikupiti podatke o opterećenju vozila iz različitih regija.

2.1. Lokacije prikupljanja podataka

U ovom istraživanju, primijenjen je WIM sustav (eng. *Weigh-in-Motion* - WIM) za prikupljanje podataka o opterećenju vozila iz šest pokrajina u jugoistočnoj Kini od 10. do 23. rujna 2014. Prikupljanje podataka uključuje vrijeme putovanja, broj traka, brzinu, vrstu vozila, broj osovine, vrstu osovine, osovinsko opterećenje, itd. [27-29]. Podaci o opterećenju vozila prikupljeni su s devet autocesta različitih vrsta, uključujući pet državnih brzih cesta, dvije pokrajinske brze ceste i dvije državne autoceste. Označavanje autocesta i mjesta za prikupljanje u svakoj od šest pokrajina navedeno je u tablici 1.

Tablica 1. Mjerne stanice u svakoj pokrajini

Pokrajina	Oznaka autoceste	Mjesto prikupljanja podataka
Hunan	G65	most Daping
	Državna cesta 107	most Xinqiang
Zhejiang	Državna cesta 104	most Lixiaojiang
Guangdong	G55	most Kengkou
	G15W3	most Hanjiang
Fujian	S10	most Gangdao
	G15	most Tianluo
Jiangxi	G56	most Xinping
Guangxi	S2201	most Gangjian

2.2. Obrada podataka








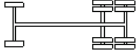

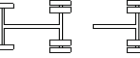



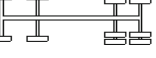

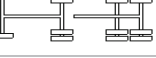









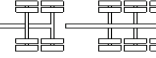
Obradu podataka treba promatrati iz dva aspekta: univerzalnosti i posebnosti. Iz aspekta univerzalnosti, pogreške podataka uzrokovane sustavnim razlozima treba izostaviti. Neki prikupljeni podaci posebno imaju mali utjecaj na rezultate istraživanja. Odbacujući ih, može se pojednostaviti proces izračuna kako bi se olakšalo daljnje istraživanje. Ta dva aspekta imat će velik utjecaj na proces istraživanja i rezultat. Na WIM sustav neizbježno utječu mnoge nepouzdanosti, kao što su elektromagnetske smetnje, što rezultira netočnošću podataka. Osim toga, došlo je do pogrešaka u sustavu prikupljanja informacija o vozilima [30]. Na primjer, ako dva troosovinska vozila jedno za drugim prođu mjesto

prikupljanja podataka, WIM sustav ih može smatrati jednim šesteroosovinskim vozilom, a jedno šesteroosovinsko vozilo može smatrati kao dva vozila s tri osovine ili dvoosovinsko vozilo i vozilo s četiri osovine. Kako bi se poboljšala točnost i pouzdanost uzoraka vozila, potrebno je eliminirati potencijalne lažne podatke vozila analizom izvornih podataka. Taj se postupak uglavnom provodi usporedbom prikupljenih podataka o vozilu s podacima o vozilu registriranim u odjelu za upravljanje vozilima na osnovi brojke registracijske pločice.

Prema odnosu stupnja oštećenosti zamorom i m -te snage amplitude naprezanja, ako je težina lakog vozila 0,1 puta veća od težine teškog vozila, stupanj oštećenosti zamorom uzrokovanog lakim vozilom je samo 0,001 puta veći od onog koje uzrokuje

teško vozilo (izračunano za $m = 3$). Stoga je učinak lakog vozila na oštećenje zamorom obično vrlo malen u usporedbi s onim od teškog vozila. U vezi s relevantnim istraživanjima [24, 31], u ovom se radu ne razmatra oštećenje zamorom uzrokovano vozilima s bruto masom vozila (eng. *Gross Vehicle Weight - GVW*) manjom od 30 kN. Ta vozila uključuju mali osobni automobil (manje od 9 sjedala), veliki i srednji osobni automobil (9 sjedala i više), dvoosovinske i troosovinske kamione itd. Istovremeno, uzimajući u obzir da neke vrste vozila, kao što su kamioni sa sedam osovina, kamioni s osam osovina i kamioni s devet osovina, čine vrlo mali udio u ukupnom prometnom protoku, tj. manje od 0,1 %, oštećenja zamorom na mostovima autocesta u stvarnom radnom procesu mogu se zanemariti, tako da se

Tablica 2. Klasifikacija tipa vozila i konfiguracija osovina

Model vozila	Tip vozila	Reprezentativno vozilo	Dijagram	Konfiguracija osovina	Osovinski razmak [cm] i raspon izmjerenih osovinskih opterećenja [kN] ^a
2-osov. vozilo	A	malo putničko vozilo			[3.8, 14.4], 270, [4.5, 16.1]
	B	veliko i srednje veliko putničko vozilo			[16.4, 27.2], 520, [17.8, 34.3]
	C	gospodarsko vozilo			[5.7, 73.8], 430, [7.3, 101.7]
3-osov. vozilo	D	gospodarsko vozilo			[8.9, 63.8], 430, [17.3, 111.7], 130, [15.3, 113.8]
	E	tegljač			[11.4, 72.1], 230, [11.5, 131.7], 310, [12.9, 132.9]
	F	gospodarsko (teretno) vozilo			[14.3, 53.8], 180, [18.5, 54.7], 560, [17.5, 121.0]
4-osov. vozilo	G	gospodarsko vozilo			[18.2, 72.9], 190, [19.4, 75.6], 450, [27.5, 125.2], 130, [29.7, 129.3]
	H	tegljač			[21.1, 77.4], 350, [17.3, 79.0], 730, [27.3, 155.6], 130, [21.2, 169.3]
	I	veliki tegljač			[17.9, 97.3], 400, [22.3, 107.4], 560, [26.2, 119.7], 340, [21.6, 121.8]
5-osov. vozilo	J	gospodarsko vozilo			[18.2, 115.4], 130, [19.6, 136.9], 650, [15.4, 94.6], 130, [11.6, 91.4], 130, [14.3, 95.7]
	K	tegljač			[23.9, 92.1], 350, [27.3, 107.6], 640, [15.4, 99.7], 130, [19.3, 101.5], 130, [19.8, 105.2]
	L	tegljač			[22.7, 70.8], 300, [49.4, 146.3], 130, [14.6, 131.2], 720, [17.5, 131.9], 130, [12.4, 125.7]
6-osov. vozilo	M	tegljač			[27.9, 97.3], 130, [22.3, 107.4], 650, [26.2, 119.7], 130, [18.6, 121.1], 130, [17.4, 121.8], 130, [21.7, 122.5]

^a Prikazani su [raspon izmjerene težine prve osovine (kN)], međuosovinski razmak (cm), [raspon izmjerene težine druge osovine (kN)].

može izbaciti udio vozila manji ili jednak 0,1 %. Nakon obrade podataka, ovo istraživanje je zadržalo 448.622 podatka o opterećenju vozila za dva tjedna, od čega Hunan iznosi 11,11 %, Zhejiang 5,6 %, Guangdong 19,9 %, Fujian 31,8 %, Jiangxi 22,83 % i Guangxi 8,76 %.

2.3. Klasifikacija vozila

U velikom broju vrsta vozila koja putuju cestom postoji više od 20 vrsta vozila, a njihova stvarna opterećenja su različita. Stoga je potrebno pregledati i klasificirati izmjerene podatke o vozilu. Oštećenja zamorom mostova na autocesti najvećim se dijelom odnose na amplitude naprezanja i vremena ciklusa, na što utječe GVW, odnosno broj osovina, tako da su GVW i broj osovina ključna osnovica za klasifikaciju vozila. Prema GVW i broju osovina, u kombinaciji s konfiguracijom osovine vozila u Kineskom priručniku o modelima vozila [32], ovo istraživanje odabire 13 reprezentativnih vozila, kao što su mala osobna vozila, velika i srednja osobna vozila i dvosovinska gospodarska vozila itd., a označeni su kao tip vozila A, tip vozila B, ..., tip vozila M. U isto vrijeme, prema broju osovina, 13 reprezentativnih vozila podijeljeno je u pet modela vozila, kao što su dvoosno vozilo, troosno vozilo, itd. Klasifikacija vozila i konfiguracija osovine svakog tipa vozila prikazani su u tablici 2.

Zbog velike brzine kretanja vozila na brzim cestama, teško je prikupiti podatke o međuosovinskim razmacima pomoću WIM sustava ili drugim metodama. Prikupljeni podaci o vozilu ne sadrže podatke o međuosovinskom razmaku. Međutim, međuosovinski razmak je fiksiran u vrijeme napuštanja tvornice vozila, a njegov raspon varijacije je mali. Prema Zhou i sur. [12] te Shau i sur. [16], parametri međuosovinskog razmaka svakog tipa vozila prikazani su u tablici 2. U tablici 2. također je prikazana i veličina izmjerenih koncentriranih osovinskih opterećenja svakog tipa vozila.

2.3. Analiza opterećenja vozila

Prema klasifikaciji vozila iz prethodnog poglavlja, dobiveni su ukupni brojevi i postoci svakog tipa vozila za svaku pokrajinu, a prikazani su u tablici 3. U prethodnim istraživanjima o podacima u vezi s opterećenjem vozila, mali osobni automobil, veliki i srednji osobni automobil te dvoosovinsko gospodarsko vozilo najčešći su tipovi koji su vozili autocestom [33, 34]. U ovom radu podaci o vozilima manjim od 30 kN isključeni su iz obrade podataka, među kojima je najveći broj malih osobnih automobila, ali su ove tri vrste i dalje najbrojnije u zadržanim podacima.

Iz tablice 3. najveći broj vozila u svakoj pokrajini je vozilo tipa C, od čega je najveći udio u pokrajini Zhejiang, tj. 65,9 %. Osim u pokrajini Hunan, drugi najveći udio ima tip vozila B, dok je drugi najveći udio u Humanu tip A. Osim dvoosovinskih vozila, najveći broj u Humanu je tip E, u Zhejiangu je tip G, u Guangdongu je tip G M, u pokrajinama Fujian i Jiangxi su to tip H, a Guangxi je to tip K. Dobiven je postotak modela vozila prema broju osovina u različitim pokrajinama, kao što je prikazano u tablici 4. Nije teško vidjeti da su postojale velike razlike u različitim pokrajinama. Najveći postotak bila su dvoosovinska vozila, a dominantan položaj bio je vrlo očigledan, što je pokazalo ovu značajku u svim pokrajinama. Drugi najveći udio bio je složeniji. U pokrajinama Hunan i Guangdong to su troosovinska vozila, u Zhejiang, Fujian i Jiangxi su četveroosovinska vozila, a Guangxi 5-osovinska vozila, što je usko povezano s rasporedom lokalne industrijske strukture i načinom gospodarskog razvoja. Važno je napomenuti da je broj troosovinskih, peterosovinskih i šesterosovinskih vozila u Guangdongu usporediv, razlika nije velika, što se razlikuje od ostalih pokrajina. To upućuje na raznolikost gospodarskog razvoja u pokrajini Guangdong, a svaki model vozila bio je naširoko korišten. U drugim je pokrajinama na autocesti bio zastupljen uglavnom jedan model vozila ili najviše dva modela.

Tablica 3. Ukupan broj i postoci svakog tipa vozila za svaku pokrajinu

Pokrajina Oznaka vozila	Hunan		Zhejiang		Guangdong		Fujian		Jiangxi		Guangxi	
	[broj]	[%]	[broj]	[%]	[broj]	[%]	[broj]	[%]	[broj]	[%]	[broj]	[%]
A	11954	23,9	1973	7,9	7340	8,2	14271	10,0	12386	12,1	4840	12,3
B	4934	9,9	2166	8,6	20521	23,0	32693	22,9	31835	31,1	9847	25,0
C	25664	51,4	16547	65,9	38712	43,4	54642	38,3	33868	33,1	10251	26,1
D	1379	2,8	236	0,9	2258	2,5	2588	1,8	1815	1,8	1687	4,3
E	1387	2,8	262	1,0	2701	3,0	3540	2,5	3121	3,0	1296	3,3
F	225	0,5	37	0,1	1370	1,5	1181	0,8	1193	1,2	963	2,4
G	930	1,9	1790	7,1	2741	3,1	9592	6,7	3816	3,7	728	1,9
H	644	1,3	1239	4,9	1263	1,4	9965	7,0	5667	5,5	1034	2,6
I	99	0,2	191	0,8	425	0,5	2342	1,6	1924	1,9	684	1,7
J	211	0,4	91	0,4	1577	1,8	2595	1,8	1223	1,2	1673	4,3
K	413	0,8	179	0,7	1905	2,1	2361	1,7	1559	1,5	2779	7,1
L	724	1,4	314	1,3	2308	2,6	3424	2,4	1678	1,6	2560	6,5
M	1267	2,5	77	0,3	6177	6,9	3450	2,4	2333	2,3	987	2,5
Ukupno	49831	100	25102	100	89298	100	142644	100	102418	100	39329	100

Tablica 4. Postotak modela vozila u različitim pokrajinama

Pokrajina	Postotak modela [%]				
	2-osov.	3-osov.	4-osov.	5-osov.	6-osov.
Hunan	85,39	6,00	3,36	2,71	2,54
Zhejiang	82,40	2,13	12,83	2,33	0,31
Guangdong	74,55	7,09	4,96	6,48	6,92
Fujian	71,23	5,12	15,35	5,87	2,42
Jiangxi	76,24	5,99	11,14	4,35	2,28
Guangxi	63,41	10,03	6,22	17,83	2,51

3. Model opterećenja koje dovodi do zamora

Zamor mostova na autocestama ima karakteristike promjenjive amplitude, malog naprezanja, visokog ciklusa i dugog trajanja. Ključ za izračun otpornosti na zamor (ili uporabnog vijeka) pod promjenjivom amplitudom ponavljano opterećenja jest taj kako uspostaviti vezu između promjenjive amplitude i konstantne amplitude otpornosti na zamor [35]. Svrha uspostavljanja spektra opterećenja modela vozila je zamjena modela vozila za različita vozila svakog tipa u skladu s načelom ekvivalentnosti kumulativnih oštećenja [36].

S obzirom na složenost vozila koja su prometovala na različitim autocestama, bilo je teško odabrati vrstu reprezentativnog vozila koje će služiti za procjenu zamora. Stoga se ovim istraživanjem pretpostavilo da su oštećenja zamorom uzrokovana s n ekvivalentnim modelima vozila bila jednaka onima uzrokovanim s n sličnih reprezentativnih vozila. Istovremeno je pretpostavljena linearna veza između osovinskog opterećenja i amplitude izmjeničnog naprezanja. Za izračunavanje ekvivalentnog osovinskog opterećenja novih modela vozila korišten je Minerov kriterij za kumulativno oštećenje zamorom [37] i ekvivalentni kriterij amplitude naprezanja [38], a zbroj ekvivalentnih osovinskih opterećenja bio je ekvivalentna ukupna težina modela vozila.

3.1. Stupanj opterećenosti ciklusa naprezanja

Minerov kriterij smatra da se oštećenja uzrokovana n -tom amplitudom naprezanja u ciklusu naprezanja jednake amplitude mogu izraziti s n/N , a stupanj oštećenosti zamorom zbog n -tog ciklusa naprezanja jednake amplitude dan je izrazom (1):

$$D_e = n/N \tag{1}$$

pri čemu je N broj ciklusa naprezanja i deformacije koji se dogodio prije loma uslijed zamora konstrukcije. Oštećenje zamorom prouzročeno promjenjivom amplitudom naprezanja može se kvantitativno izraziti sa n_i / N_i , a oštećenje se može linearno superponirati. Stoga se stupanj oštećenosti zamorom bilo kojeg konstrukcijskog elementa pod djelovanjem ciklusa naprezanja s promjenjivom amplitudom može definirati kao:

$$D_v = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} \tag{2}$$

pri čemu je n_i broj koliko puta djeluje amplituda naprezanja, a N_i je broj loma uslijed zamora pri cikličnom ispitivanju s različitim amplitudama naprezanja, ili broj ciklusa (vijek trajanja uslijed zamora) ekvivalentan svakoj amplitudi naprezanja u krivulji konstantne amplitude otpornosti na zamor.

Prema izrazima (1) i (2), i jednadžbi krivulje zamora konstantne amplitude [39] u detaljnom eksponencijalnom obliku $M(\Delta\sigma)^m = C$, nakon ciklusa naprezanja jednake amplitude od $\sum_{i=1}^t n_i$ puta, stupanj oštećenosti zamorom je:

$$D_e = \frac{\sum_{i=1}^t n_i}{C / (\Delta\sigma_e)^m} \tag{3}$$

pri čemu je C parametar karakteristike konstrukcija ili materijala, $\Delta\sigma_e$ je naprezanje jednake amplitude, m je konstanta materijala definirana S-N krivuljom. U ovom je radu $m = 3$. Nakon ciklusa naprezanja promjenjive amplitude od $\sum_{i=1}^t n_i$ puta, stupanj oštećenosti zamorom je:

$$D_v = \sum_{i=1}^t \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^t \frac{n_i}{C / (\Delta\sigma_i)^m} \tag{4}$$

gdje je $\Delta\sigma_i$ naprezanje promjenjive amplitude.

3.2. Ekvivalentno osovinsko opterećenje

Izračun osovinskog opterećenja temelji se na Minerovom kriteriju za kumulativno oštećenje zamorom [35]. Svako djelovanje osovina s različitim osovinskim opterećenjem jednako je ponovljenom djelovanju osovinskog opterećenja, tako da je jednaka akumulacija zamornog oštećenja zamorom koju uzrokuju dva djelovanja.

U ovom radu autor navodi da $p = 1, 2, \dots, 6$ označava pokrajine (Hunan, Zhejiang, itd.), $q = 1, 2, \dots, 5$ označavaju modele vozila (2-osno vozilo, 3-osovinsko vozilo, ..., 6-osovinsko vozilo), a $l = 1, 2, \dots, 6$ označavaju broj osovina, W_{pqjl} predstavlja l -to osovinsko opterećenje j -tog vozila za peti tip vozila u p -toj pokrajini. Budući da osovinsko opterećenje ima linearnu vezu s amplitudom naprezanja koje ono uzrokuje, odnosno, smatrajući elastičan radni odnos između njih, dobijemo:

$$\Delta\sigma_{pqjl} = \beta W_{pqjl} \tag{5}$$

gdje je β linearni koeficijent, a $\Delta\sigma_{pqjl}$ je amplituda naprezanja uzrokovana s W_{pqjl} . Prema izrazima (4) i (5), stupanj oštećenosti zamorom uzrokovan l -tom osovinom r vozila za q -ti model vozila u p -toj pokrajini je:

$$D_{pql} = \frac{1}{C} \beta^m \sum_{j=1}^r n_{pqjl} W_{pqjl}^m \tag{6}$$

Stupanj oštećenosti zamorom zbog ekvivalentnog osovinskog opterećenja od strane l -te osi r puta za q -ti tip vozila u p -toj pokrajini je:

$$D_{pql}^e = \frac{1}{C} \beta^m W_{pql}^m \sum_{j=1}^r n_{pqj} \quad (7)$$

pri čemu je W_{pql} ekvivalentna osovinska težina s l -tom osi r puta za q -ti tip vozila u p -toj pokrajini.

Budući da je stupanj opterećenosti zamorom jednak, $D_{pql}^e = D_{pqj}^e$, onda je:

$$W_{pql} = \left(\frac{\sum_{j=1}^r n_{pqj} W_{pqjl}^m}{\sum_{j=1}^r n_{pqj}} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\sum_{j=1}^r f_{pqj} W_{pqjl}^m \right)^{\frac{1}{m}} \cdot f_{pq} = \frac{n_{pq}}{N_p} \quad (8)$$

gdje je n_{pq} broj q -tog modela vozila u p -toj pokrajini, N_p je broj vozila u p -toj pokrajini.

Osovinski razmak svakog modela vozila u svakoj pokrajini je:

$$A_{pql} = \sum_{j=1}^r f_{pqj} A_{pqjl} \quad (9)$$

gdje je A_{pql} ekvivalentni osovinski razmak l -te osovine za q -ti model vozila u p -toj pokrajini, A_{pqjl} je l -ti osovinski razmak j -tog vozila za q -ti model vozila u p -toj pokrajini.

Sumirajući podatke o opterećenju vozila u šest pokrajina, ekvivalentna osovinska težina svakog modela vozila u jugoistočnoj Kini dan je izrazima (10) i (11):

$$W_{ql} = \sum_{p=1}^6 f_p W_{pql} \cdot f_p = \frac{n_p}{N} \quad (10)$$

$$A_{ql} = \sum_{p=1}^6 f_p A_{pql} \quad (11)$$

gdje je: W_{ql} ekvivalentna osovinska težina s i -tom osovinom za q -tog model vozila u jugoistočnoj Kini, n_p je broj vozila u p -toj pokrajini, N je broj svih vozila, a A_{ql} je ekvivalentni osovinski razmak s i -tom osovinom za q -ti model vozila u jugoistočnoj Kini.

3.3. Omjer udjela oštećenja uslijed zamora

Omjer udjela oštećenja uslijed zamora daje moguće relativno oštećenje koje uzrokuje svaki model vozila na konstrukcijama mostova. Standardno vozilo za opterećenje zamorom odabrat će najnepovoljniji model vozila za većinu oštećenja konstrukcija uslijed zamora..

Vozilo se sastoji od višestrukih osovina, tako da stvara samo jedan ciklus naprezanja kad prolazi preko mosta s najdužim rasponom, a generira višestruke cikluse naprezanja kad prelazi preko mosta malog raspona, ali još uvijek može biti ekvivalentan ciklusu naprezanja koristeći kriterij akumulacije linearnih oštećenja. Prema izrazu (5), za vozilo čija težina je W_{pqj} bez obzira na veličinu raspona:

$$\Delta \sigma_{pqjl} = \beta W_{pqjl} \quad (12)$$

Prema izrazima (4) i (12), najveće oštećenje zamorom uzrokovano modelom p -tog vozila u p -toj pokrajini za neko razdoblje je kako slijedi:

$$D_{pq} = \frac{1}{C} \beta^m n_{pq} W_{pq}^m \quad (13)$$

pri čemu n_{pq} je q -ti broj modela vozila u p -toj pokrajini, W_{pq} je ekvivalentna težina osovine q -tog vozila u p -toj pokrajini. Pretpostavljajući da je ukupan broj vozila u p -toj pokrajini V_p a učestalost q -tog modela vozila je f_{pq} tada je, prema izrazu (13),

$$D_{pq} = \frac{1}{C} \beta^m V_p f_{pq} W_{pq}^m \quad (14)$$

Stoga je najveće zamorno oštećenje uzrokovano svim vrstama vozila u p -toj pokrajini:

$$D_p = \frac{1}{C} \beta^m V_p \sum_{q=1}^5 f_{pq} W_{pq}^m \quad (15)$$

a omjer doprinosa oštećenju zamorom q -tog modela vozila u p -toj pokrajini je:

$$\lambda_{pq} = \frac{D_{pq}}{D_p} = \frac{f_{pq} W_{pq}^m}{\sum_{q=1}^5 f_{pq} W_{pq}^m} \quad (16)$$

Na isti način, omjer doprinosa oštećenju zamorom u jugoistočnoj Kini je:

$$\lambda_q = \frac{D_q}{D} = \frac{f_q W_q^m}{\sum_{q=1}^5 f_q W_q^m} \quad (17)$$

pri čemu D je većina oštećenja zamorom uzrokovanih svim vozilima o kojima su prikupljeni podaci u jugoistočnoj Kini.

4. Spektar modela vozila za opterećenje na zamor

Uz osovinsko opterećenje i međuosovinski razmak, još jedan važan parametar osovinske konfiguracije je prostor između (razmak) kotača. Pozivajući se na Kineski priručnik za modele vozila [30] i pregled na terenu, razmak kotača svih vrsta vozila je

Tablica 5. Spektar opterećenja za zamor mostova na autocesti u pokrajini Hunan

Model vozila	Relativna učestalost	Parametri modela vozila ^b	GVW [kN]
2-osov.	85,4 %	34,3 (395), 57,2	91,5
3-osov.	6,0 %	63,5 (318), 71,2 (246), 101,4	236,1
4-osov.	3,4 %	59,6 (264), 79,0 (564), 80,2 (142), 88,1	306,8
5-osov.	2,7 %	74,3 (289), 120,8 (368), 85,1 (447), 85,2 (130), 89,0	454,5
6-osov.	2,5 %	73,3 (300), 90,4 (130), 104,1 (720), 83,0 (130), 86,2 (130), 90,9	527,9

^b Prikazani su težina prve osovine (kN), [međuosovinski razmak (cm)], težina druge osovine (kN).

Tablica 6. Spektar opterećenja za zamor mostova na autocesti u pokrajini Zhejiang

Model vozila	Relativna učestalost	Parametri modela vozila ^b	GVW [kN]
2-osov.	82,4 %	26,2 (424), 44,6	70,8
3-osov.	2,1 %	49,7 (315), 68,3 (248), 83,3	201,2
4-osov.	12,8 %	30,2 (263), 55,1 (565), 44,9 (146), 46,4	176,6
5-osov.	2,3 %	51,9 (289), 74,8 (367), 56,5 (449), 54,6 (130), 58,0	295,7
6-osov.	0,3 %	47,1 (300), 62,1 (130), 65,5 (720), 54,8 (130), 56,4 (130), 61,7	347,7

^b Prikazani su težina prve osovine (kN), [međuosovinski razmak (cm)], težina druge osovine (kN).

Tablica 7. Spektar opterećenja za zamor mostova na autocesti u pokrajini Guangdong

Model vozila	Relativna učestalost	Parametri modela vozila ^b	GVW [kN]
2-osov.	74,6 %	40,5 (440), 78,0	118,5
3-osov.	7,1 %	50,4 (291), 64,9 (300), 94,7	210,1
4-osov.	5,0 %	48,3 (256), 69,4 (540), 83,2 (150), 84,4	285,3
5-osov.	6,5 %	58,0 (270), 108,8 (439), 73,5 (365), 72,0 (130), 79,2	391,5
6-osov.	6,9 %	55,5 (300), 81,8 (130), 89,3 (720), 78,9 (130), 75,0 (130), 87,9	468,5

^b Prikazani su težina prve osovine (kN), [međuosovinski razmak (cm)], težina druge osovine (kN).

Tablica 8. Spektar opterećenja za zamor mostova na autocesti u pokrajini Fujian

Model vozila	Relativna učestalost	Parametri modela vozila ^b	GVW [kN]
2-osov.	71,2 %	29,8 (436), 53,5	83,3
3-osov.	5,1 %	53,2 (293), 67,0 (287), 87,8	208,0
4-osov.	15,4 %	35,5 (285), 58,2 (589), 51,4 (152), 53,4	198,5
5-osov.	5,9 %	52,4 (261), 80,1 (435), 53,5 (371), 50,5 (130), 53,9	290,3
6-osov.	2,4 %	52,4 (300), 65,5 (130), 68,5 (720), 62,0 (130), 67,3 (130), 87,9	378,3

^b Prikazani su težina prve osovine (kN), [međuosovinski razmak (cm)], težina druge osovine (kN).

Tablica 9. Spektar opterećenja za zamor mostova na autocesti u pokrajini Jiangxi

Model vozila	Relativna učestalost	Parametri modela vozila ^b	GVW [kN]
2-osov.	76,2 %	29,8 (441), 51,5	81,3
3-osov.	6,0 %	47,8 (279), 56,0 (305), 70,2	174,0
4-osov.	11,1 %	35,5 (305), 56,4 (608), 50,2 (165), 48,7	193,9
5-osov.	4,4 %	52,4 (271), 80,1 (451), 53,5 (352), 50,5 (130), 53,9	261,9
6-osov.	2,3 %	49,7 (300), 57,6 (130), 60,6 (720), 53,2 (130), 52,4 (130), 57,4	330,9

^b Prikazani su težina prve osovine (kN), [međuosovinski razmak (cm)], težina druge osovine (kN).

relativno blizu. Većina njih koncentrirana je na 1,8 m u području od 1,7 do 2,1 m, a prostor između kotača vozila uglavnom je postavljen na 1,8 m u većini propisa o autocestama [24, 25, 40]. Stoga je u ovom radu prostor između kotača svih vrsta vozila unificiran na 1,8 m. Parametri ekvivalentnih modela vozila za svaku pokrajinu i jugoistočnu Kinu dobiveni su pomoću statističkog modela opterećenja vozila i prema izrazima (8) do (11), a prikazani su u tablicama 5. do 11. Omjer udjela oštećenja uslijed zamora od svakog modela vozila u svakoj pokrajini i jugoistočnoj Kini prikazan je u tablici 12, gdje je HN kratica za Hunan, ZJ je kratica za Zhejiang, GD je kratica za Guangdong, FJ je kratica za Fujian, JX je kratica za Jiangxi, GX je kratica za Guangxi, a SEC je kratica za jugoistočnu Kinu.

Iako je jugoistočna Kina razvijenija regija u Kini, zbog utjecaja razine gospodarskog razvoja i industrijskog razmještaja, spektar i omjer opterećenja za zamor modela vozila uvelike se razlikuju među pokrajinama. Među njima, Hunan i Guangdong imaju najveće ekvivalentne težine vozila, a slijede ih Zhejiang, Fujian i Jiangxi, a Guangxi je najmanji. U područjima jugoistočne Kine, šesteroosovinska vozila u Humanu, Guangdongu i Jiangxi imaju najveći omjer doprinosa i bio bi dobar izbor za standardna vozila koja uzrokuju zamor u tim pokrajinama.

Četveroosovinsko standardno vozilo odabrano je u pokrajini Zhejiang, a peteroosovinsko standardno vozilo je odabrano u Fujianu i Guangxi. Što se tiče cijele jugoistočne regije, vozilo sa šest osovine ima i najveći omjer udjela, pa je šesteroosovno vozilo odabrano kao standardno vozilo za zamor na cijelom jugoistočnom području. Slika 1. prikazuje odgovarajuće parametre vozila svih standardnih vozila za zamor.

Iz tablice 4 i tablice 12 također se može vidjeti da omjer udjela opterećenja za zamor malo utječe na broj ili učestalost vozila, ali težina vozila ima značajan utjecaj. Iako broj dvoosovinskih vozila u jugoistočnoj Kini čini 60 % ili čak 80 % u nekim pokrajinama, to nema najveći omjer oštećenja zbog manje ekvivalentne težine vozila.

Tablica 10. Spektar opterećenja za zamor mostova na autocesti u pokrajini Guangxi

Model vozila	Relativna učestalost	Parametri modela vozila ^b	GVW [kN]
2-osov,	63,4 %	42,6 (434), 68,5	111,0
3-osov,	10,0 %	57,5 (303), 64,7 (294), 58,2	180,4
4-osov,	6,2 %	58,7 (316), 54,5 (599), 34,3 (189), 47,6	195,1
5-osov,	17,8 %	60,1 (279), 55,8 (456), 25,7 (345), 28,6 (130), 37,0	207,3
6-osov,	2,5 %	61,8 (300), 44,0 (130), 43,7 (720), 25,6 (130), 31,6 (130), 42,4	249,1

^b Prikazani su težina prve osovine (kN), [međuosovinski razmak (cm)], težina druge osovine (kN),

Tablica 11. Spektar opterećenja za zamor mostova na autocesti u pokrajini jugoistočnoj Kini

Model vozila	Relativna učestalost	Parametri modela vozila ^b	GVW [kN]
2-osov,	74,5 %	35,8 (432), 66,7	102,5
3-osov,	6,1 %	53,5 (294), 64,7 (290), 85,2	203,5
4-osov,	10,0 %	40,2 (287), 59,9 (587), 56,9 (156), 59,3	216,4
5-osov,	6,1 %	57,0 (271), 85,9 (439), 57,3 (366), 55,8 (130), 60,8	316,8
6-osov,	3,2 %	56,5 (300), 74,2 (130), 80,9 (720), 70,4 (130), 68,6 (130), 77,8	428,5

^b Prikazani su težina prve osovine (kN), [međuosovinski razmak (cm)], težina druge osovine (kN),

Tablica 12. Omjer udjela oštećenja uslijed zamora

Tip vozila	Omjer oštećenosti [%]						
	HN	ZJ	GD	FJ	JX	GX	SEC
2-osov.	11,8	17,2	10,2	10,2	15,1	27, %	11,8
3-osov.	8,7	8,9	4,7	9,4	9,8	14,0	7,5
4-osov.	10,6	36,1	8,1	24,7	25,3	11,0	15,0
5-osov.	28,0	31,2	27,6	29,2	24,3	38,8	28,8
6-osov.	41,0	6,6	49,5	26,6	25,4	9,2	36,9

5. Usporedba postojećeg standardnog vozila za zamor

Na temelju Minerova kriterija kumulativnog oštećenja uslijed zamora, u ovom su radu utvrđeni standardni modeli vozila za zamor šest pokrajina jugoistočne Kine, koji su uspoređeni s rezultatima istraživanja drugih znanstvenika. U standardnom modelu vozila za proračun zamora, međuosovinski razmak i raspodjela osovinog opterećenja su relativno fiksni, što uglavnom određuju proizvođači automobila prema tehničkoj normi za vozila.

Istraživanja drugih znanstvenika prikazala su matematičke pristupe. Stoga će ovaj dio izravno usporediti GVW (bruto težina vozila) svakog modela vozila, ne uzimajući u obzir učinak drugih čimbenika i istraživačkih metoda o modelu.

Lan i sur. [13], Sun i sur. [15], Xia i sur. [19] i Liu i sur. [31] dobili su lokalne standardne modele vozila za zamor proučavajući prikupljene podatke o opterećenju vozila za Shandong, Jiangsu, Peking, Guizhou, Zhejiang, Henan i druga mjesta u Kini. Među njima, većina znanstvenika izabrala je šesteroosovinsko vozilo

kao standardni model vozila za zamor u području istraživanja. Osim za 318 kN u Pekingu, bruto težina vozila (eng. *gross vehicle weight* - GVW) šesteroosovinskog modela vozila za zamor drugih područja iznosi 531 kN do 595 kN. To je uglavnom zbog podataka dobivenih istraživanjem na šestoj obilaznici Pekinga, koja je urbana cesta, tako da je GVW manji.

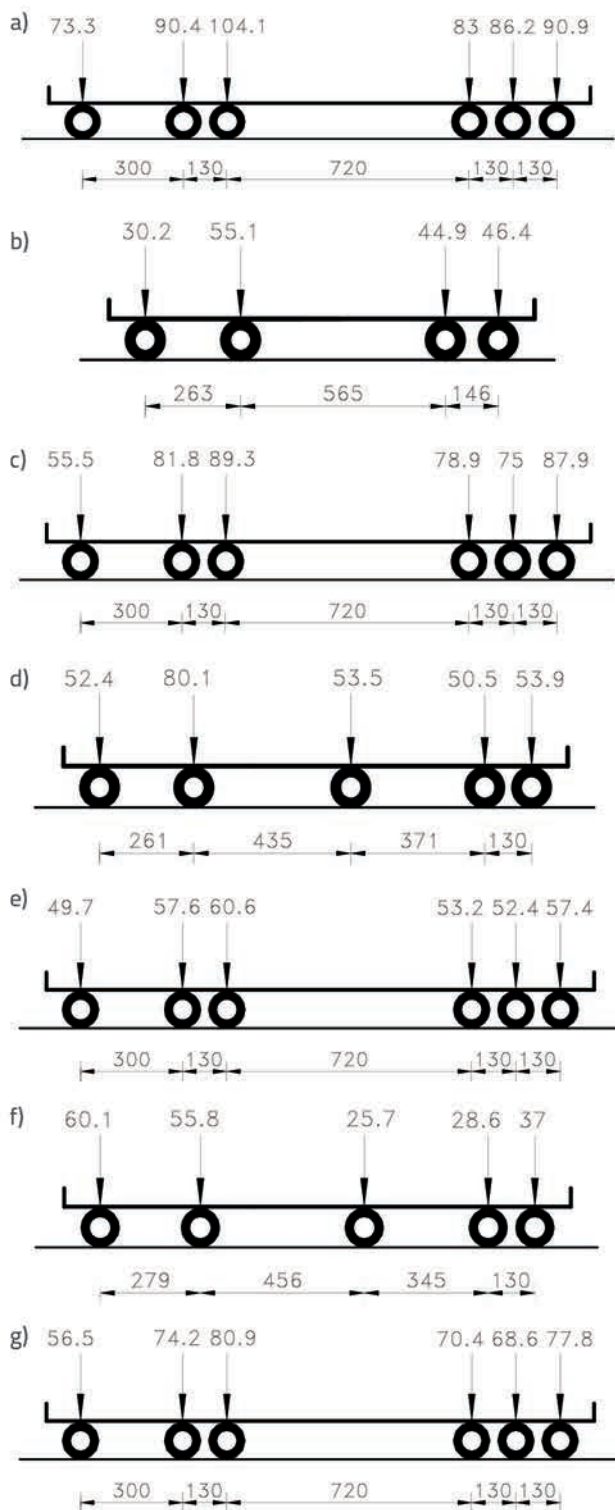
Među sedam modela standardnih vozila za zamor koji su uspostavljeni u ovom radu, GVW četiri modela šesteroosovinskih vozila su 330 kN do 527 kN, nešto manji nego kod ostalih autora. U područjima gdje standardno vozilo za zamor nije šesteroosovinsko vozilo, Liu i sur. [31] odabrali su troosovinsko vozilo kao standardni model vozila za zamor za Zhejiang i 4-osovinsko vozilo za zamor za Guizhou. A model vozila s četiri osovine s GVW od 480 kN odabran je kao model za izračun opterećenja za zamor po kineskom propisu o čeliku za mostove. U ovom radu autor je odabrao vozilo s četiri osovine kao standardni model za zamor za Zhejiang i peterosovinsko vozilo za Fujian i Guangxi. Opće razlike u rezultatima istraživanja uglavnom se pripisuju sljedećim činjenicama:

a) Vrijeme prikupljanja.

Prije 2013. bilo je nesuglasica je li norma 49 tona i 55 tona u industriji autocesta u Kini. "49 tona" je tehnička norma za vozila, a nacionalni standard [41] propisuje da maksimalna ukupna projektirana masa 6-osovinskih vozila ne smije prelaziti 49 tona. A "55 tona" se odnosi na granicu maksimalne nosivosti autocesta, mostova, tunela i propusta putem odjela za projektiranje, izradu i upravljanje cestama. Upravni odjel već dugo nije donio jedinstveno stajalište o ovom pitanju, što je rezultiralo primjenom različitih normi. Posljednjih je godina taj problem postupno ujedinjen, a na kraju je pobijedilo "49 tona". Autor je podatke o vozilima prikupljao nakon 2013. godine, dok su drugi znanstvenici podatke prikupljali prije 2012. godine. Uz oštre mjere kontrole preopterećenosti vozila, GVW vozila koja putuju autocestom smanjila se u odnosu na prijašnje stanje. Zbog toga je GVW standardnih modela vozila za zamor koji je autor dobio manja nego kod drugih znanstvenika.

b) Mjesto prikupljanja podataka.

Mjesto prikupljanja podataka uzoraka ima dalekosežan utjecaj na rezultate. Kina ima golemo područje i široku cestovnu mrežu. Što se tiče jedne pokrajine, nemoguće je prikupiti podatke o opterećenju vozila za svaku cestu, tako da su individualno prikupljeni podaci često djelomični i nerazumljivi, pa nije sigurno daju li pouzdane karakteristike opterećenja vozila. U slučaju pokrajine Zhejiang, mjesto prikupljanja Liu i sur. Je G104 i G15,



Slika 1. Standardno vozilo za zamor: a) Hunan; b) Zhejiang; c) Guangdong; d) Fujian; e) Jiangxi; f) Guangxi (osovinska opterećenja su u kN, a međuosovinski razmaci su u cm)

a mjesto prikupljanja za rad je državna autocesta 104. Prva je brza cesta, a druga je autocesta, što je glavni razlog za razliku u standardnom modelu vozila za zamor za istu pokrajinu.

c) Razlike u gospodarskom razvoju i strukturi industrije.

U reformi i širenju, brzina izgradnje prometnica predstavlja objektivnu potrebu za gospodarskim razvojem. Poznata izreka "bogatima, prva cesta" postigla je konsenzus lokalnih vlasti u Kini. Razvoj gospodarstva zahtijeva potporu prijevoznike industrije, gdje najviše sudjeluju velika teretna vozila. Stoga je standardni model vozila za zamor na većini područja Kine vozilo sa šest osovin, koje nije neko posebno vozilo s najvećim kapacitetom nosivosti u Kini i ne zahtijeva dodatnu administrativnu dozvolu. No, u manje razvijenim područjima, industrijski razvoj je relativno zaostao pa je standardni model vozila za zamor četveroosovinsko ili peterosovinsko vozilo, kao što je to u pokrajinama Guangxi i Guizhou.

d) Utjecaj vrste industrije na način prijevoza

U posljednjih nekoliko godina neke su pokrajine istraživale intenzivnije i ekonomičnije industrijske modele. Na primjer, Zhejiang snažno razvija IT ekonomiju i malu robnu ekonomiju, što dovodi do brzog rasta logističke industrije. Za razliku od šesteroosovinskog kamiona koji se koristi u tradicionalnom industrijskom načinu prijevoza ugljena i energije, vlasnici logistike uglavnom se oslanjaju na troosovinska ili četveroosovinska vozila za prijevoz i prijenos robe zbog fleksibilne i praktične uporabe. Prema tome, standardni model vozila za zamor dobiven u Zhejiangu razlikuje se od ostalih pokrajina.

6. Zaključak

U šest pokrajina jugoistočne Kine postavljeno je devet mjesta za prikupljanje podataka o opterećenju vozila različitih na različitim vrstama autocesta, uključujući pet državnih autocesta, dvije pokrajinske brze ceste i dvije državne autoceste. Nakon obrade podataka, zadržano je ukupno 13 reprezentativnih tipova vozila i 448.622 podatka o vozilu. Na temelju Minerovog kriterija kumulativnog oštećenja zamorom i ekvivalentnog kriterija amplitude naprezanja izvedene su formule za izračunavanje ekvivalentnog osovinskog opterećenja, ekvivalentnog međuosovinskog razmaka i omjera udjela oštećenja uslijed zamora u šest pokrajina i jugoistočnoj Kini. Na kraju je predloženo sedam standardnih modela vozila za zamor koji su prikazani u ovom radu, a obuhvaćaju šest pokrajina i jugoistočnu Kinu, te su uspoređeni s postojećim modelima standardnih vozila za zamor, a analizirani su i razlozi za razlike u rezultatima.

Najveći broj vozila u svakoj pokrajini je tip C, od čega najveći udio ima Zhejiang. Osim Hunana, drugi najveći udio vozila ima tip B, dok je drugi najveći udio u Hunanu tip A. Osim dvoosovinskih vozila, najveći udio u Hunanu je tip E, za Zhejiang je to tip G, za Guangdong je tip M, Fujian i za Jiangxi tip H, a za Guangxi je tip K.

Dobiven je postotak modela vozila prema broju osovina u različitim pokrajinama. Vozila s dvije osovine čine najveći dio vozila u svim pokrajinama. Drugi najveći udio modela vozila je složeniji. Za Hunan i Guangdong su to troosovinska vozila, za Zhejiang, Fujian i Jiangxi su četveroosovinska vozila, a za Guangxi su to peterosovinska vozila.

Prema formuli ekvivalentnog osovinskog opterećenja i ekvivalentnog međuosovinskog razmaka izvedenog u ovome radu, spektar opterećenja za zamor, uključujući pet ekvivalentnih

modela vozila, utvrđen je za svaku pokrajinu i jugoistočnu Kinu. Idealno standardno vozilo za zamor imalo bi šest osovina, osim četveroosovinskog vozila u Zhejiangu, peterosovinskih vozila u Fujianu i Guangxi.

Na omjer udjela opterećenja uslijed zamora broj ili učestalost vozila imaju mali utjecaj, ali je značajan utjecaj težine vozila. Udio prikupljenih dvoosovinskih vozila iznosi 60 % ili čak 80 % u nekim pokrajinama, ali nema najveći omjer doprinosa štetama zbog manje ekvivalentne težine vozila.

LITERATURA

- [1] Schilling, C.G.: Stress Cycles for Fatigue Design of Steel Mosts, *Journal of Structural Engineering*, 110 (1984) 6, pp. 1222-1234, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1984\)110:6\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:6(1222))
- [2] Raju, S.K., Moses, F., Schilling, C.G.: Reliability Calibration of Fatigue Evaluation and Design Procedures, *Journal of Structural Engineering*, 116 (1990) 5, pp. 1356-1369, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1990\)116:5\(1356\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1990)116:5(1356))
- [3] Laman, J.A., Nowak, A.S.: Fatigue-Load Models for Girder Mosts, *Journal of Structural Engineering*, 122 (1996) 7, pp. 726-733.
- [4] Chotickai, P., Bowman, M.D.: Truck Models for Improved Fatigue Life Predictions of Steel Mosts, *Journal of Most Engineering*, 11 (2006) 1, pp. 71-80, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2006\)11:1\(71\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:1(71))
- [5] Przemyslaw, R.: WIM Based Load Models for Most Serviceability Limit States, University of Nebraska - Lincoln, Lincoln, Nebraska, 2011.
- [6] Chen, Z.S., Liu, S.M., Yu, X.F., Ma, C.M., Liu, L.: Experimental Investigations on VIV of Most Deck Sections: A Case Study, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 21 (2017) 7, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0120-1>
- [7] Chen, Z.S., Zhang, C., Wang, X.: Wind Tunnel Measurements for Mlutter of A Long-afterbody Most Deck, *Sensors*, 17 (2017) 2, pp. 335-349, <https://doi.org/10.3390/s17020335>
- [8] Tong, L.W., Shen, Z.Y.: Fatigue Load Spectrum of Urban Road and Most, *Journal of Structural Engineering*, 30 (1997) 5, pp. 20-27.
- [9] Wang, R.H., Chi C., Chen, Q.Z., Zhen, X.X.: Research on Vehicle Model of Guangzhou Viaduct under Fatigue Load, *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 32 (2004) 12, pp. 94-96.
- [10] Yue, F., Ren, X.S., Chen, M., Miao, Y.Y., Li, M.Y., Hao, Z.G.: Study on fatigue traffic loading for highway mosts in China, *Key Engineering Materials*, 452 (2010), pp. 805-808, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.452-453.805>
- [11] Zhou, Y.T., Bao, W.G., Zhai, H., Liu, Y.F.: Study on Traffic Load Standard of Expressway in China, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 27 (2010) 2, pp. 36-41.
- [12] Zhou, Y.T., Zhai H., Bao, W.G., Liu, Y.F.: Study on Standard Fatigue Vehicle Load of Highway Mosts, *Highway*, 12 (2010), pp. 21-25.
- [13] Lan, C.M., Li, H., Ou, J.P.: Traffic load modelling based on structural health monitoring data, *Structure and Infrastructure Engineering*, 7 (2011) 5, pp. 379-386, <https://doi.org/10.1080/15732470902726809>
- [14] Sun, X.Y., Xu, C., Wang, H.L., Zheng, Z.J.: Investigation of Highway Most Load Effect for Fatigue Reliability Analysis, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 28 (2011) 2, pp. 80-85.
- [15] Sun, S.W., Sun, L.M.: Statistic Model of Vehicle Load for Highway Mosts, *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 40 (2012) 2, pp. 198-204, <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-374x.2012.02.007>
- [16] Shao, Y.H., Lv, P.M.: Fatigue Load Spectrum for Jiu Jiang Yangtze River Most, *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 35 (2012) 5, pp. 50-56.
- [17] Liu, Y.F., Zhou, Y.T., Bao, W.G., Zhai, H.: Research on Fatigue Standard Load Derivation Method of Highway Steel Most, *Highway*, 32 (2012), pp. 164-169.
- [18] Liu, Y.F., Bao, W.G., Zhou, Y.T., Zhai, H.: Study on Fatigue Load of Highway Steel Most, *Highway*, 1 (2013) Feb, pp. 1-7.
- [19] Xia, Y.F., Li, F.F., Gu, Y., Yuan, W.W., Zong, Z.H.: Research on Vehicle Fatigue Load Spectrum of Expressway Most Based on WIM, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 31 (2014) 3, pp. 56-64.
- [20] Zhai, M.S., Wang, C.S., Cui, B., Tang, Y.M.: Research on fatigue load model of Steel Deck Based on WIM. *Most Construction*, 47 (2017) 2, pp. 31-36.
- [21] Ma, R.J., Xu, S.Q., Wang, D.L., Chen, A.R.: Vehicle models for fatigue loading on steel box-girder mosts based on weigh-in-motion data, *Structure and Infrastructure Engineering*, 14 (2017) 6, pp. 701-713, <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1359308>
- [22] Di, J., Wang, J., Peng, Q., Qin, F.J., Dai, J.: Research and Application of Fatigue Load Spectrum of Port Highway Most. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 38 (2018) 4, pp. 48-55.
- [23] Herrmann, H., Bucksch, H.: Eurocode 3 - Design of steel structures. *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [24] BSI (British Standards Institute): Part 2: Steel concrete and composite mosts: Specification for load. BS 5400, London, 1978.
- [25] AASHTO: Guide for design of pavement structures, Washington DC, 1933.
- [26] Ministry of Transport of the People's Republic of China.: JTG D64-2015: Specifications for Design of Highway Steel Most, Beijing, China, 2015.

- [27] Giorgio, A., Joan, R.C., Michel, G.: WIM-based live-load model for advanced analysis of simply supported short- and medium-span highway mosts, *Journal of Most Engineering*, 22 (2017) 10, pp. 1–11, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001081](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001081)
- [28] Habib, T., Hani, T., Zhao, J.: WIM-based assessment of load effects on mosts due to various classes of heavy trucks, *Engineering Structures*, 140 (2017), pp. 189–198, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.060>
- [29] Chen, B., Ye, Z. N., Chen, Z.S., Xie, X.: Most vehicle load model on different grades of roads in China based on Weigh-in-Motion(WIM) data, *Measurement*, 122 (2018), pp. 189–198, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.005>
- [30] Lydon, M., Taylor, S.E., Robinson, D., Mufti, A., Brien, E.J.O.: Recent developments in most weigh in motion(B-WIM), *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6 (2015) 1, pp. 69–81, <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0119-6>
- [31] Liu, Y., Li, D.R., Zhang, Z.H., Zhang, H.P., Jiang, N.: Fatigue Load Model Using the Weigh-in-Motion System for Highway Mosts in China, *Journal of Most Engineering*, 22 (2017) 6, pp. 1-8, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001048](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001048)
- [32] China Auto Industry Association, *Chinese Vehicle Model Manual*, Beijing, 2012.
- [33] Miao, T.J., Chan, T.H.T.: Most live load models from WIM data, *Engineering Structures*, 24 (2002) 8, pp. 1071–1084, [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(02\)00034-2](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(02)00034-2)
- [34] Ruan, X., Shi, X., Ying, T.: Analysis of highway vehicle load in china based on WIM data, *IABSE Symposium Report*, 97 (2010) 18, pp. 55–62, <https://doi.org/10.2749/222137810796025609>
- [35] Buch, A.: *Fatigue strength calculation*, 1988
- [36] Yin, G.S., Liu, X.W., Hou X.H.: Fatigue analysis of steel bar in box girder under vehicle load spectrum. *Journal of Traffic & Transportation Engineering*, 13 (2010) 6, pp. 20–27.
- [37] Kaechele, L.E.: *Review and analysis of cumulative-fatigue-damage theories*, Rand, Santa Monica, CA., 1963
- [38] Meggiolaro, M.A., de Castro, J.T.P., Wu, H.: Generalization of the moment of inertia method to estimate equivalent amplitudes for simplifying the analysis of arbitrary non-proportional multiaxial stress or strain histories, *Acta Mechanica*, 227 (2016) 11, pp. 3261–3273, <https://doi.org/10.1007/s00707-015-1542-9>
- [39] Aeran, A., Siriwardane, S.C., Mikkelsen, O., Langen, I.: A new nonlinear fatigue damage model based only on S-N curve parameters, *International Journal of Fatigue*, 103 (2017), pp. 327–341, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.017>
- [40] MOT.: *JTG D60-2015: General Code for Design of Highway Mosts and Culverts*, Beijing, China, 2015.
- [41] AQSIQ, SAC.: *Limits of dimensions, axle load and masses for road vehicles*, Beijing, China. 2004.