

ДГКМ
ДРУШТВО НА
ГРАДЕЖНИТЕ
КОНСТРУКТОРИ НА
МАКЕДОНИЈА

Партизански одреди 24,
П. Фах 560, 1000 Скопје
Северна Македонија

MASE
MACEDONIAN
ASSOCIATION OF
STRUCTURAL
ENGINEERS

Partizanski odredi 24,
P. Box 560, 1000 Skopje
North Macedonia

NES-5



mase@gf.ukim.edu.mk
http://mase.gf.ukim.edu.mk

ДИНАМИЧКО ОДНЕСУВАЊЕ НА АБ МОСТОВИ ПОД ДЕЈСТВО НА ПОДВИЖНИ НАТОВАРУВАЊА: ПОЕДНОСТАВЕН НУМЕРИЧКИ И АНАЛИТИЧКИ ПРИСТАП

Дејан ЈАНЕВ¹, Тони АРАНЃЕЛОВСКИ¹, Дарко НАКОВ¹, Горан МАРКОВСКИ¹, Питер МАРК²

АПСТРАКТ

Примената на нумеричкото и аналитичко моделирање на динамичкото однесување на патните армиранобетонски мостови под дејство на сообраќајни натоварувања е од суштинско значење за обезбедување на нивната конструктивна безбедност и трајност. Целта на оваа тема е да го истражи влијанието на подвижните сообраќајни натоварувања врз динамичкото однесување на мостовските конструкции и да идентификува поедноставени методи за прецизна евалуација на нивниот одговор.

За да се оцени динамичкото однесување на мостовските конструкции под дејство на подвижните товари, може да се користат низа истражувачки методологии. Овие методи опфаќаат техники за нумеричко моделирање како што е интеракцијата возило – мост (VBI) и аналитички техники како што е методологијата на површина на одговор (RSM). VBI вклучува симулирање на интеракцијата помеѓу подвижните возила и конструкцијата на мостот за да се процени нивниот динамички одговор. RSM вклучува создавање на мета-модел за предвидување на одговорот на мостовските конструкции кој зависи од голем број параметри. Анализата на чувствителност последователно може да се примени за да се идентификува параметарот со најголемо влијание врз одговорот од интерес. Еден од можните одговори за проценка на динамичкото однесување на мостовските конструкции е динамичкиот коефициент (DAF).

Клучен наод на ова истражување е дека многу меѓусебно поврзани параметри влијаат на динамичкиот одговор на армиранобетонските мостови. Овој кластер на параметри го опфаќа конструктивниот систем на мостот и неговите карактеристики, својствата на материјалите од кои е изведена конструкцијата, состојбата на конструкцијата и карактеристиките на подвижните товари. Оттука произлегува потребата од комбинација на нумеричко и аналитичко моделирање. Секоја од горенаведените методологии има предности и ограничувања, а сеопфатната проценка на динамичкото однесување на мостовските конструкции бара мултидисциплинарен пристап. Со интегрирање на техниките за нумеричко и аналитичко моделирање како што се VBI и RSM, можно е со прифатлива точност да се определи влијанието од подвижните натоварувања врз конструкцијата на мостовите со цел да се обезбеди нивната конструктивна безбедност и трајност.

Клучни зборови: армиранобетонски мостови; динамичко однесување; интеракција возило – мост; методологија на површина на одговор; анализа на чувствителност

¹ Градежен факултет, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, Република Северна Македонија

² Институт за бетонски конструкции, Градежен факултет, Рур универзитет, Бохум, С. Р. Германија

1. ВОВЕД

Мостовите се суштински конструктивни компоненти на модерната инфраструктура, кои поврзуваат различни региони и го олеснуваат движењето на луѓето и размената на материјални добра. Обезбедувањето на конструктивната целост, сигурност и трајност е од најголемо значење при процесот на нивното проектирање и изведба со цел да ги прифатат соодветните експлоатациони сообраќајни натоварувања. Динамичкото однесување на патните армиранобетонски мостови под дејство на сообраќајни натоварувања било и сè уште претставува предизвик за градежните инженери и истражувачи. Разбирањето на ова однесување не е само научноистражувачка работа, туку и клучна потреба за да се обезбеди конструктивната безбедност и трајност на мостовските конструкции.

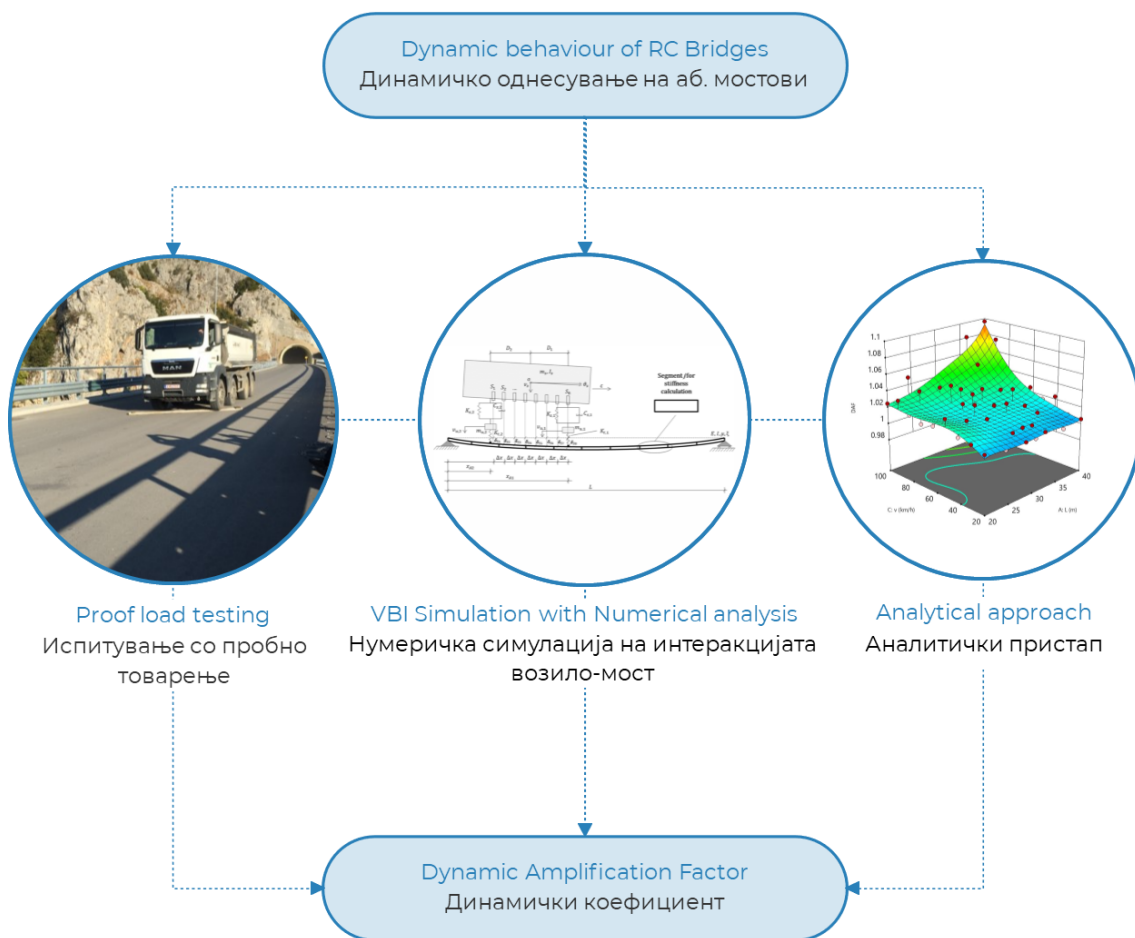
Целта на оваа тема на истражување е да го разбере влијанието на подвижните сообраќајни натоварувања врз динамичкото однесување на мостовските конструкции и да идентификува поедноставени методи за прецизна евалуација на нивниот одговор. Ова истражување произлегува од практичната потреба од едноставни, сигурни и ефикасни методи за следење на конструктивниот интегритет на патните армиранобетонски мостови во услови на сообраќајни натоварувања. За да се оцени динамичкото однесување на мостовските конструкции под дејство на подвижните товари, може да се користат низа истражувачки методологии. Овие методи опфаќаат техники за нумеричко моделирање како што е интеракцијата возило – мост (VBI) и аналитички техники како што е методологијата на површина на одговор (RSM). VBI вклучува симулирање на интеракцијата помеѓу подвижните возила и конструкцијата на мостот за да се процени нивниот динамички одговор. RSM вклучува создавање на мета-модел за предвидување на одговорот на мостовските конструкции кој зависи од голем број параметри, вклучувајќи ги распонот на мостот, рапавоста на подлогата, брзината на движење на возилата, нивната траекторија, тежина и број на оски. Анализата на чувствителност последователно може да се примени за да се идентификува параметарот со најголемо влијание врз одговорот од интерес. Еден од можните одговори за проценка на динамичкото однесување на мостовските конструкции е динамичкиот коефициент (DAF). Овој параметар всушност покажува за колку пати се зголемуваат влијанијата добиени од статичкото дејство на товарот земајќи ја предвид динамичката природа на сообраќајните натоварувања.

Клучен наод на ова истражување е дека многу меѓусебно поврзани параметри влијаат на динамичкиот одговор на армиранобетонските мостови. Овој кластер на параметри го опфаќа конструктивниот систем на мостот и неговите карактеристики, својствата на материјалите од кои е изведена конструкцијата, состојбата на конструкцијата и карактеристиките на подвижните товари. Оттука произлегува потребата од комбинација на нумеричко и аналитичко моделирање. Секоја од горенаведените методологии има предности и ограничувања, а сеопфатната проценка на динамичкото однесување на мостовските конструкции бара мултидисциплинарен пристап.

Проценката на динамичкото однесување на армиранобетонските мостови под дејство на подвижните товари е сложена работа што бара повеќедимензионален пристап. Со интегрирање на техниките за нумеричко и аналитичко моделирање како што се VBI и RSM, можно е со прифатлива точност да се определи влијанието од подвижните натоварувања врз конструкцијата на мостовите и да се обезбеди нивната конструктивна безбедност и трајност.

2. РАМКА НА ИСТРАЖУВАЊЕ

Постојат различни пристапи за да се истражи основниот проблем при динамичкото однесување на патните армиранобетонски мостови под дејство на подвижни натоварувања, илустрирано на сл. 1. Првиот пристап вклучува испитување на мостовски конструкции со пробно подвижно натоварување, каде што како подвижен товар најчесто се користи тешко товарно возило – камион. Вториот пристап користи методи за нумеричка анализа со цел да ја симулира интеракцијата помеѓу подвижните возила и конструкцијата на мостот, додека третата алтернатива е со примена на аналитички модели за подобро да се разбере однесувањето на мостот под различни околности. Секој од овие пристапи има свои предности и недостатоци, а оптималниот избор неизбежно ќе се разликува од ситуација до ситуација и ќе зависи од специфичните околности на дадената ситуација.



Сл. 1. Различни пристапи за определување на динамичкото однесување на аб. патни мостови под дејство на подвижни товари

Независно кој од предложените пристапи ќе се примени, еден од можните одговори за проценка на динамичкото однесување на мостовските конструкции е преку таканаречениот динамички коефициент (DAF) [1]. Динамичкиот коефициент е широко прифатен при проектирањето и анализата на мостовските конструкции и истиот е дефиниран врз основа на максималните динамички и статички одговори на конструкцијата. Овој параметар обезбедува важни информации за проценка на состојбата и управување со постоечките мостовски конструкции.

Рамката за истражување опфаќа темелен пристап кој се состои од четири различни делови, од кои секој се фокусира на различен аспект од студијата. Почетниот дел ја прикажува процедурата и програмата за динамичко испитување со пробно натоварување, која вклучува детална проценка на состојбата на конструкцијата на мостот. Овој дел вклучува дефинирање на пробниот подвижен товар, идентификување на потребната мерна опрема и мерни точки на конструкцијата, користење на техники за обработка на сигнали за определување на максималниот динамички и статички одговор и примена на техники за постобработка за определување на динамичкиот коефициент (DAF) [1, 2].

Вториот дел од рамката за истражување навлегува во нумеричката анализа на интеракцијата возило – мост (VBI). Овој дел вклучува поедноставена нумеричка анализа со примена на библиотеката OpenSeesPy во програмскиот јазик Python, користејќи го методот на конечни елементи (FE) и соодветни алгоритми за нелинеарна динамичка анализа. Процесот вклучува:

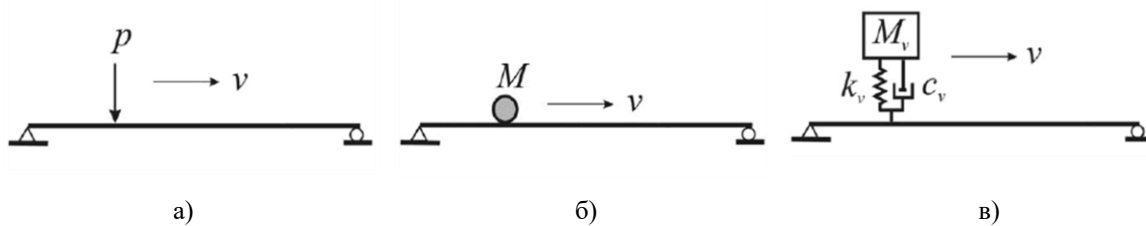
- Дефинирање на моделите на возилото и мостовската конструкција;
- Моделирање на рапавоста на подлогата на патот;
- Решавање на динамичките равенки од интеракцијата помеѓу возилото и мостот;
- Интерпретација на добиените резултати.

Во третиот дел, фокусот е на креирање на базата на податоци за мостовските конструкции земајќи ги предвид виталните критериуми како што се: состојбата на горниот строј и коловозната конструкција на мостот, возно-динамичките карактеристики на возилото (пробниот товар) како и материјалните и геометриските карактеристики на конструкцијата. Базата на податоци е суштинска компонента на рамката за истражување бидејќи ги обезбедува потребните информации за нумеричката анализа во вториот дел и аналитичката анализа во четвртиот дел.

Четвртиот и последен дел од рамката за истражување ги анализира податоците со користење на аналитички пристап. Аналитичкиот пристап во себе вклучува графички приказ на зависноста помеѓу променливите параметри и одговорот од интерес на конструкцијата, методологија на површина на одговор (RSM) и анализа на чувствителност на параметрите. Овој дел дава сеопфатна анализа на податоците собрани во првите три дела и помага да се извлечат значајни заклучоци од истражувањето.

3. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА: ИНТЕРАКЦИЈА ВОЗИЛО – МОСТ

Постојат и достапни се различни методи и модели за моделирање на интеракцијата помеѓу возилата и мостовската конструкција [3]. Изборот на специфичниот модел зависи од посакуваните цели и од самиот процес на анализа. На слика 2 даден е преглед на некои од најважните и најчесто употребените модели.

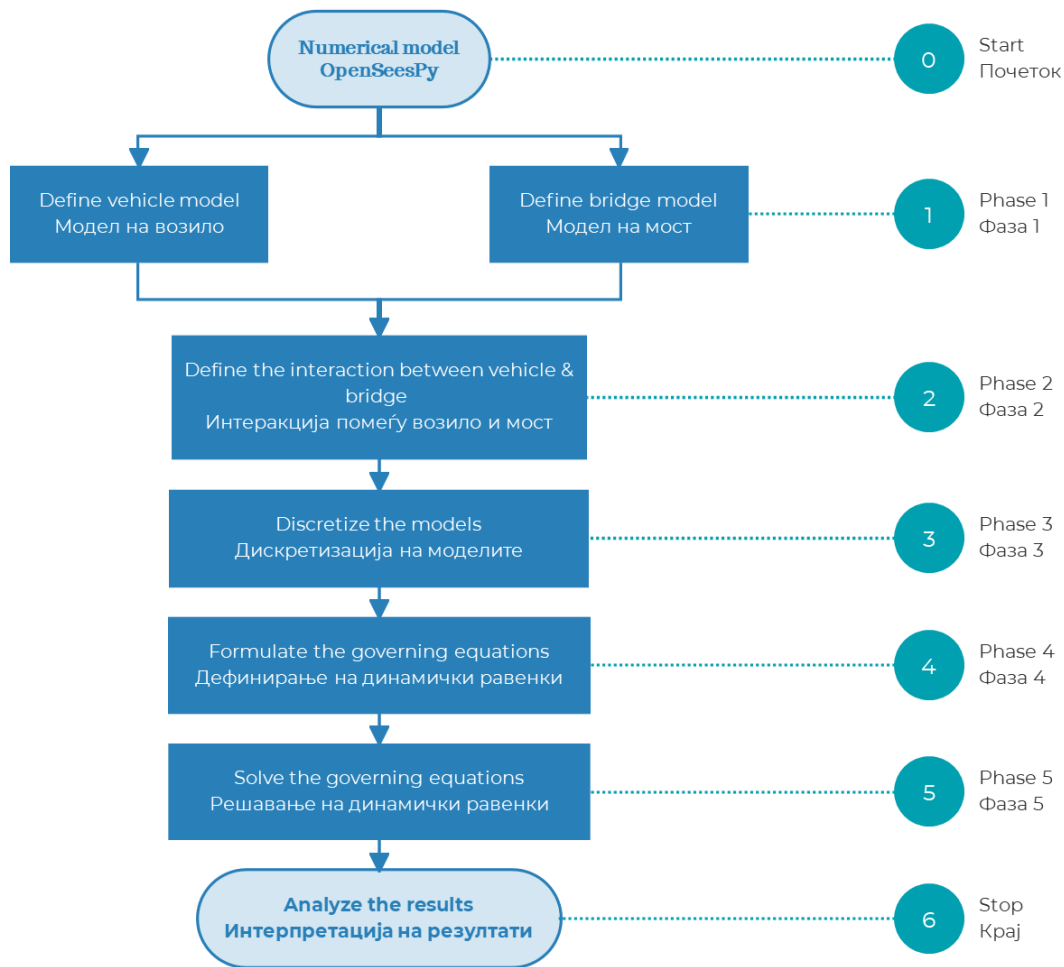


Сл. 2. Модели на возило: а) подвижна сила, б) подвижна маса, в) подвижна осцилаторна маса [3]

Со напредокот на компјутерската технологија развиени се дискретни методи за моделирање и анализа на сложени конструкции. OpenSeesPy претставува модул за конечни елементи со отворен код за програмскиот јазик Python. Истиот широко се применува во инженерската заедница за симулирање на различни динамички одговори кај конструктивните системи. OpenSeesPy им овозможува на корисниците да креираат математички модели со примена на конечни елементи и да користат алгоритми за решение при нелинеарна динамичка анализа [4]. На слика 3 е прикажан дијаграм на тек преку којшто е илустриран процесот на пресметка на интеракцијата возило – мост со примена на овој модул.

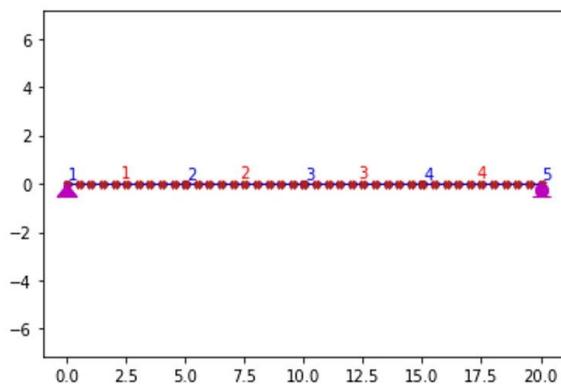
За да се анализира однесувањето на возилото, почетниот чекор е да се дефинира и генерира моделот на возилото, земајќи ги предвид параметрите како што се масата на возилото, крутоста и придушувањето на системот за суспензија, бројот на оски и меѓуоскиното растојание. Откако ќе се дефинира возилото, следниот чекор е одредување на неговите почетни услови, вклучувајќи ја почетната местоположба, почетната брзина и почетното забрзување.

Преминувајќи кон моделот на мостот, првиот чекор е да се дефинираат неговите карактеристики, вклучувајќи ја масата на конструкцијата, крутоста и придушувањето, статичкиот систем, геометријата и рапавоста на подлогата. Следно, се дефинираат граничните услови на конструкцијата на мостот коишто се во зависност од статичкиот систем на математичкиот модел на конструкцијата. На крај, се дефинираат почетните услови на мостот, вклучувајќи ги неговите почетни вертикални деформации, брзина и забрзување. За моделирање на конструкцијата, најчесто се користат гредни елементи, како Ојлер-Бернули или други гредни елементи. На слика 4 е прикажан поедноставен математички модел на мостовска конструкција генериран со примена на модулот OpenSeesPy во програмскиот јазик Python.

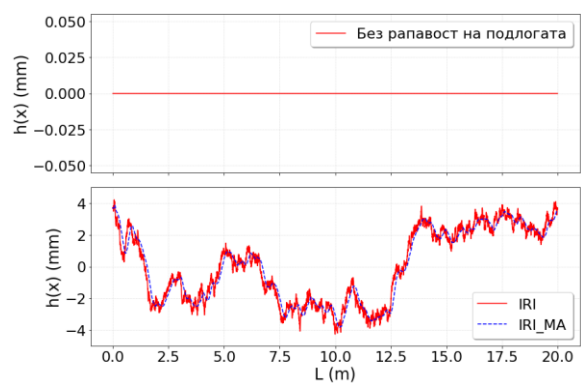


Сл. 3. Дијаграм на тек на нумеричката анализа за пресметка на интеракцијата возило – мост

Рапавоста на подлогата на коловозот кај патните мостови претставува дополнителен проблем при симулацијата на одговорот на конструкцијата, бидејќи се смета дека истата значително влијае за зголемување на интензитетот на подвижните натоварувања. За моделирање на рапавоста првенствено се користат функциите за спектрална густина на моќност (PSD) [5]. Со примена на случаен Гаусов процес се генерира рапавоста на подлогата, односно состојбата на патот (лоша до одлична) и се обезбедува профилот на подлогата долж мостот, како што е прикажано на слика 5.



Сл. 4. Дискретизиран математички модел – OpenSeesPy



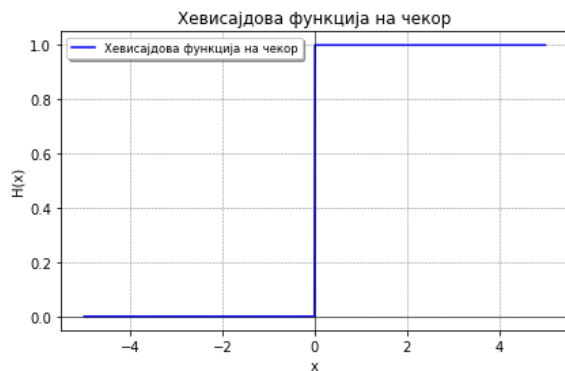
Сл. 5. Профил на рапавост на подлогата

Анализата на интеракција помеѓу возилото и мостот (VBI) вклучува истовремено пресметување на динамичките одговори и на мостовската конструкција и на возилото. Во литературата се

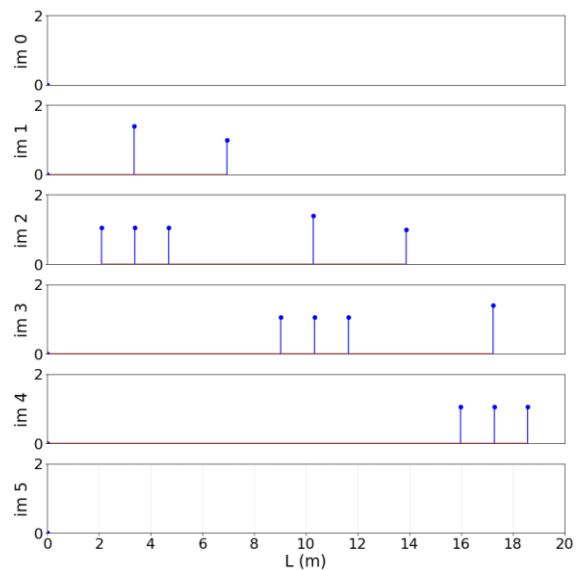
достапни решенијата во затворена форма за поедноставни случаи. Овие решенија ги комбинираат основните статички системи на греди со модели на возило како подвижна сила, подвижна маса или подвижна осцилаторна маса. Кога се разгледуваат моделите на возило и мост се составуваат две групи на диференцијални равенки, по една за секој потсистем. Овие равенки претставуваат диференцијални равенки од втор ред кои се споени преку интеракцијата помеѓу двата система. Интеракцијата се одредува преку контактните сили што се јавуваат на точките за контакт помеѓу тркалата од возилото и површината на мостот. Како што точките за контакт се движат со текот на времето, равенките на движење стануваат две групи на споени временски зависни диференцијални равенки од втор ред кои мора да се решат истовремено. Пред да се започне со анализата, потребно е да се дефинира вкупното време потребно за влез и излез на возилото од мостот и временскиот чекор во којшто ќе се врши анализата. Потоа, со примена на Хевисајдовата функција на чекор (Heaviside step function), се одредува влезот и излезот на секоја оска од возилото на/од мостот (рав. 1 и слика 6).

$$H(x) := \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Пред примена на рав. 1, потребно е да се определат координатите на движење (x) на секоја од оските на возилото. За секоја вредност на координатата $x > 0$ функцијата на чекор добива вредност еднаква на $H = 1$ што значи дека оската од возилото се наоѓа на конструкцијата. Кога оската од возилото е надвор од конструкцијата, функцијата е еднаква на $H = 0$, односно вредностите за координатата се $x < 0$, како што е илустрирано на слика 7.

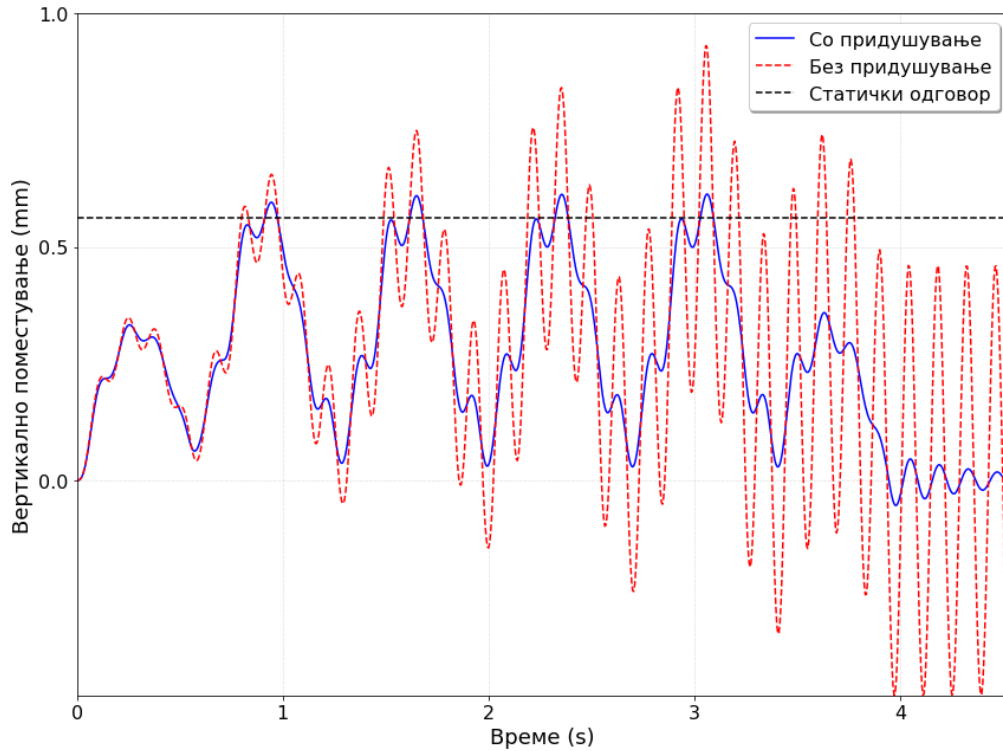


Сл. 6. Хевисајдова функција на чекор



Сл. 7. Местоположба на оските од возилото на и надвор од конструкцијата

Сите предложени методи за анализа на интеракцијата возило – мост (VBI) се чекор-по-чекор динамички методи. За решавање на диференцијални равенки од втор ред во VBI проблемите, најчесто се користат методи за директна интеграција како што е методот Newmark-beta. Збирот на диференцијални равенки на движење од втор ред мора да се реши во секој временски чекор. По решавањето на диференцијални равенки од втор ред, споени преку интеракцијата помеѓу двата система (возилото и мостовската конструкција), се добива одговорот на конструкцијата. Одговорот најчесто се прикажува преку вертикалните поместувања на конструкцијата во критичните пресеци како што е дадено на слика 8.



Сл. 8. Вертикални поместувања на конструкцијата од подвижно натоварување

Покрај вертикалните поместувања, одговорот на конструкцијата може да се прикаже и преку максималните моменти на свиткување и/или максималните напречни сили во критичните пресеци.

4. КРЕИРАЊЕ БАЗА НА ПОДАТОЦИ

Креирањето на базата на податоци за мостовските конструкции се врши така што се земаат предвид неколку витални критериуми како што се: состојбата на горниот строј и коловозната конструкција на мостот, возно-динамичките карактеристики на возилото како и материјалните и геометриските карактеристики на конструкцијата. Во табела 1 дадена е детална класификација за секој од горенаведените критериуми.

Табела 1. Критериуми за креирање база на податоци

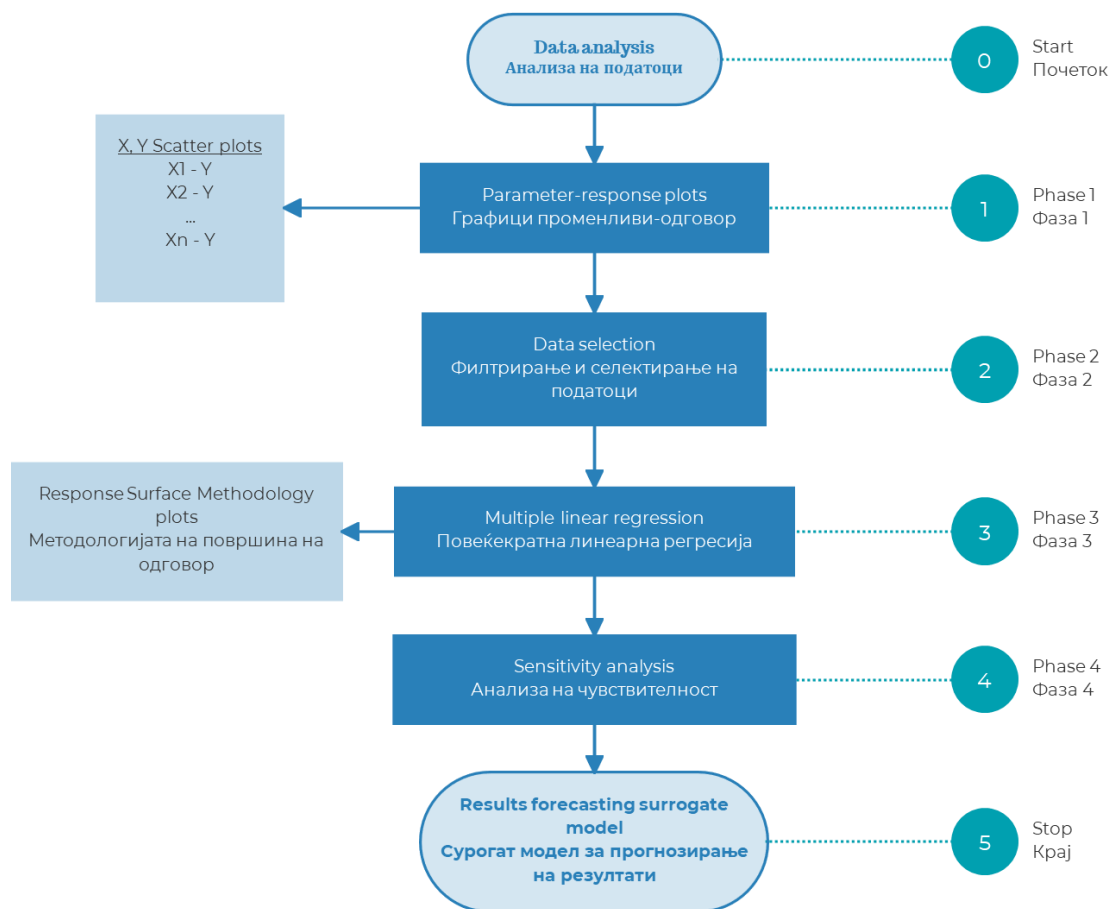
<p>Состојба на горен строј:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дилатациони спојници - коловозна конструкција 	<p>Карактеристики на возилото:</p> <ul style="list-style-type: none"> - бруто-тежина на возилото - брзина на движење - траекторија на движење - број на оски - растојание помеѓу оски - фреквенција на возилото
<p>Материјални карактеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> - јакост на притисок на бетонот - модул на еластичност - Поасонов коефициент - крутост на свиткување - процент на армирање 	<p>Геометриски карактеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> - должина на распон - агол на закосеност - напречен и надолжен наклон - површина, момент на инерција и торзионен момент на инерција на напречен пресек

Во процесот на анализа на податоците креирањето на базата на податоци е од суштинско значење. Базата на податоци обезбедува структуриран и организиран простор за складирање,

управување и пристап до податоците. Оваа организирана структура на податоци го олеснува ефикасното пронаоѓање и манипулацијата со податоци и им овозможува на аналитичарите да вршат сложени операции и трансформации неопходни за донесување значајни заклучоци. Дополнително, се обезбедува интегритет, конзистентност и безбедност на податоците, кои се клучни за точна и доверлива анализа на податоците во аналитичкиот пристап.

5. АНАЛИТИЧКИ ПРИСТАП

Голем број меѓусебно поврзани параметри влијаат на динамичкиот одговор на армиранобетонските мостови. Овој кластер на параметри го опфаќа конструктивниот систем на мостот и неговите карактеристики, својствата на материјалите од кои е изведена конструкцијата, состојбата на конструкцијата и карактеристиките на подвижните товари. Со цел да се определи влијанието на секој фактор поединечно, неопходно е да се пристапи аналитички кон проблемот и да се применат соодветни методи како што се методологијата на површина на одговор (RSM) и анализата на чувствителност (SA).



Сл. 9. Дијаграм на тек на аналитички пристап за анализа на динамичкиот одговор на армиранобетонски мостови

На слика 9 прикажан е дијаграм на тек на аналитички пристап за анализа на динамичкиот одговор на армиранобетонски мостовски конструкции при дејство на подвижни натоварувања. Пред да се започне со примена на методологијата на површина на одговор, потребно е да се изврши филтрирање и селектирање на податоците од претходно креираната база на податоци. За таа цел, најпрво се врши плотирање на графици на секој од променливите параметри со одговорот на конструкцијата така што ќе се утврди дали постојат податоци коишто не се вклопуваат и може да ја намалат точноста на понатамошната анализа. Откако ќе се генерираат површините на одговор со примена на повеќекратна линеарна регресија со добиените полиномни равенки, се преминува кон анализа на чувствителност на секој променлив параметар. Преку анализата на

чувствителност се определува влијанието на секој поединечен како и интеракцијата помеѓу групирани променливи параметри врз одговорот на моделот.

5.1. Методологија на површина на одговор

Методологијата на површина на одговор (RSM) претставува збир од статистички техники кои се користат за оптимизирање на сложените системи со моделирање и анализа на одговорот на системот при различни влезни променливи [6], како што се:

- Дизајн на експерименти (DOE);
- Регресиска анализа;
- Анализа на варијансата (ANOVA);
- Оптимизација;
- Валидација.

Најпрво се започнува со дизајнот на експерименти (DOE) кој вклучува избор на соодветен број експерименти и избор на вредностите на влезните променливи.

Потоа, следува регресиската анализа која се користи за изградба на математички модел којшто ја опишува врската помеѓу влезните променливи и одговорот на системот. Најчесто при регресиската анализа се применува линеарна регресија која ја наоѓа најдобрата линија што одговара за набљудуваните податоци со минимизирање на грешките помеѓу набљудуваните и предвидените вредности користејќи го методот на најмали квадрати. Изразот (рав. 2) за едноставен линеарен регресиски модел со една независна променлива X и зависна променлива Y е дефиниран како:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

каде што:

- β_0 е сегмент што правата го отсекува на y -оската;
- β_1 е коефициент на правецот на правата и
- ε_i е грешка.

Процентите најмали квадрати за β_0 и β_1 може да се пресметаат со примена на изразите (рав. 3 и 4):

$$\beta_1 = \frac{\sum [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sum [(X_i - \bar{X})^2]} \quad (3)$$

$$\beta_0 = \bar{Y} - \beta_1 \bar{X} \quad (4)$$

каде \bar{X} и \bar{Y} се средните вредности на примероците на X и Y соодветно. Откако β_0 и β_1 ќе се пресметаат, можат да се предвидат нови вредности за Y користејќи го изразот (рав. 5):

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X \quad (5)$$

каде што \hat{Y} е прогнозирана вредност на Y за дадена вредност на X .

Анализата на варијансата (ANOVA) го одредува значењето на променливите во полиномната равенка. Преку статистички тестови се утврдува кои параметри имаат најголемо значење во моделот, односно се доаѓа до заклучок кои членови од полиномната равенка може да бидат исклучени со цел да се добие поедноставна и попрактична форма за примена на полиномната равенка.

Оптимизацијата се користи за да се најдат оптималните вредности на влезните променливи кои ќе резултираат со посакуваниот одговор, а валидацијата гарантира дека моделот точно го предвидува одговорот на системот за веќе познати вредности на влезните параметри и одговорот.

Методологијата на одговор вклучува создавање на мета-модел за предвидување на одговорот на мостовските конструкции кој зависи од голем број параметри, вклучувајќи ги распонот на мостот, рапавоста на подлогата, брзината на движење на возилата, нивната траекторија, тежина и број на оски.

5.2. Анализа на чувствителност

Постојат различни методи на анализа на чувствителност за идентификување на параметарот со најголемо влијание врз одговорот од интерес. Кога станува збор за релативно помал број променливи параметри коишто влегуваат во анализата на методологијата на површина на одговор, најчесто применувана е глобалната анализа на чувствителност со Собол индекси [7]. Глобалната анализа на чувствителност со Собол индекси се одвива според следниот редослед:

- Дефинирање на влезните параметри и нивната распределба;
- Генерирање на сет од влезни примероци користејќи метод за примероци (пр. Монте Карло);
- Проценка на одговорот за секој влезен примерок;
- Пресметка на вкупната варијанса на одговорот на моделот;
- Декомпозиција на вкупната варијанса за секој влезен параметар користејќи го изразот за декомпозиција на Собол.;
- Пресметка на вкупните и индексите од прв ред за секој влезен параметар;
- Толкување на резултатите за да се утврди кои влезни параметри имаат најзначаен ефект врз одговор на моделот.

Собол индексите од прв ред (рав. 6) го мерат придонесот за секој поединечен влезен параметар врз варијансата на одговорот на моделот.

$$S_i = \text{Var}(y|x_i) / \text{Var}(y) \quad (6)$$

Додека пак, за да се измери придонесот за секој поединечен влезен параметар (ефекти од прв ред) и за интеракцијата помеѓу сите параметри (ефекти од повисок ред) врз варијанса на одговорот на моделот се користат вкупните Собол индекси [8] (индекси од втор ред) и истите се пресметуваат според изразот даден во рав. 7:

$$S_i^T = \sum_s \text{Var}(y | X'_s) \cdot w'_s \quad (7)$$

$$S_i^T = \sum_{j \neq i} S_{ij} + S_i$$

5.3. Анализа на добиените резултати

Со примена на модулот OpenSeesPy во програмскиот јазик Python извршена е поедноставена нумеричка анализа на 27 216 гредни мостовски конструкции со статички систем проста греда. При анализата земени се предвид пет променливи параметри вклучувајќи го распонот на конструкција на мостот, модулот на еластичност на бетонот и моментот на инерција на вкупниот напречен пресек. Дополнително, во анализата е разгледано влијанието на четири различни возила, секое со различен број на оски, меѓуоскино растојание, бруто-тежина и прераспределба на тежината по оските. Во табела 2 даден е опсегот на вредности за секој од променливите параметри при нумеричката анализа.

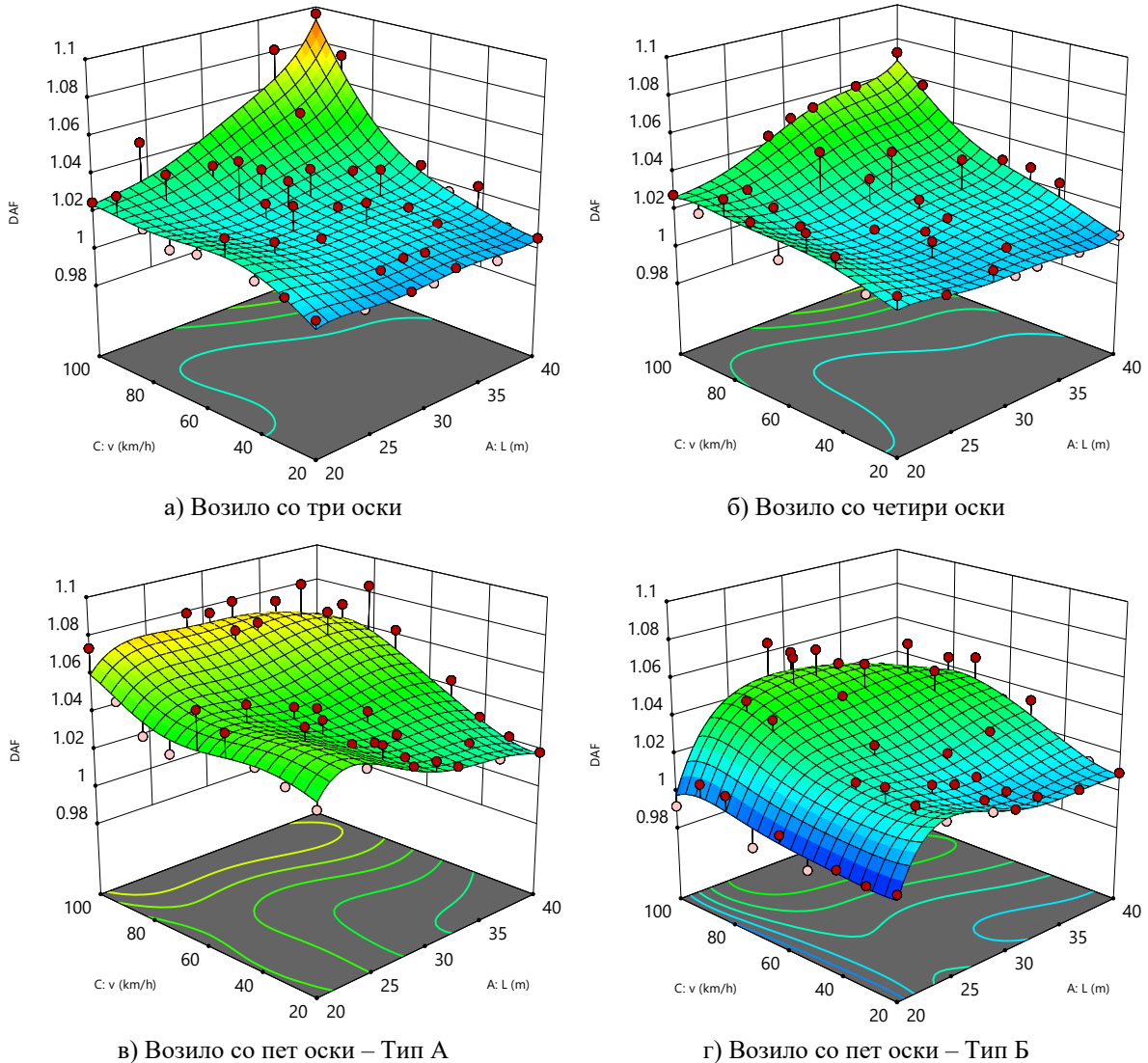
Табела 2. Критериуми за креирање база на податоци

	L	v	E	I
	[m]	[km/h]	[GPa]	[m ⁴]
min	20	20	31	1.57
max	40	90	39	5.7

Математичките модели на конструкцијата на мостот, како и на подвижното возило се поедноставени и истите се разгледувани дводимензионално како линиски елементи. Моделот на конструкцијата претставува линиски греден елемент потпрен на точки потпори со апсолутна

крутост. Моделот на возилото е разгледувано како подвижни осцилаторни сили и притоа земени се предвид крутоста и придушувањето на системот на суспензија на возилото.

Врз основа на базата на податоците креирана од резултатите добиени преку нумеричката анализа и вредностите за секој влезен променлив параметар генерирани се површини на одговор за четири различни подвижни возила, како што е прикажано на слика 10.



Сл. 10. Површини на одговор за четири возила со различен број оски

Од извршената регресиска анализа и разгледуваните статистички показатели како р-вредноста и коефициентите на детерминација R^2 , предложени се неколку полиномни равенки од различен ред, прикажани во табела 3.

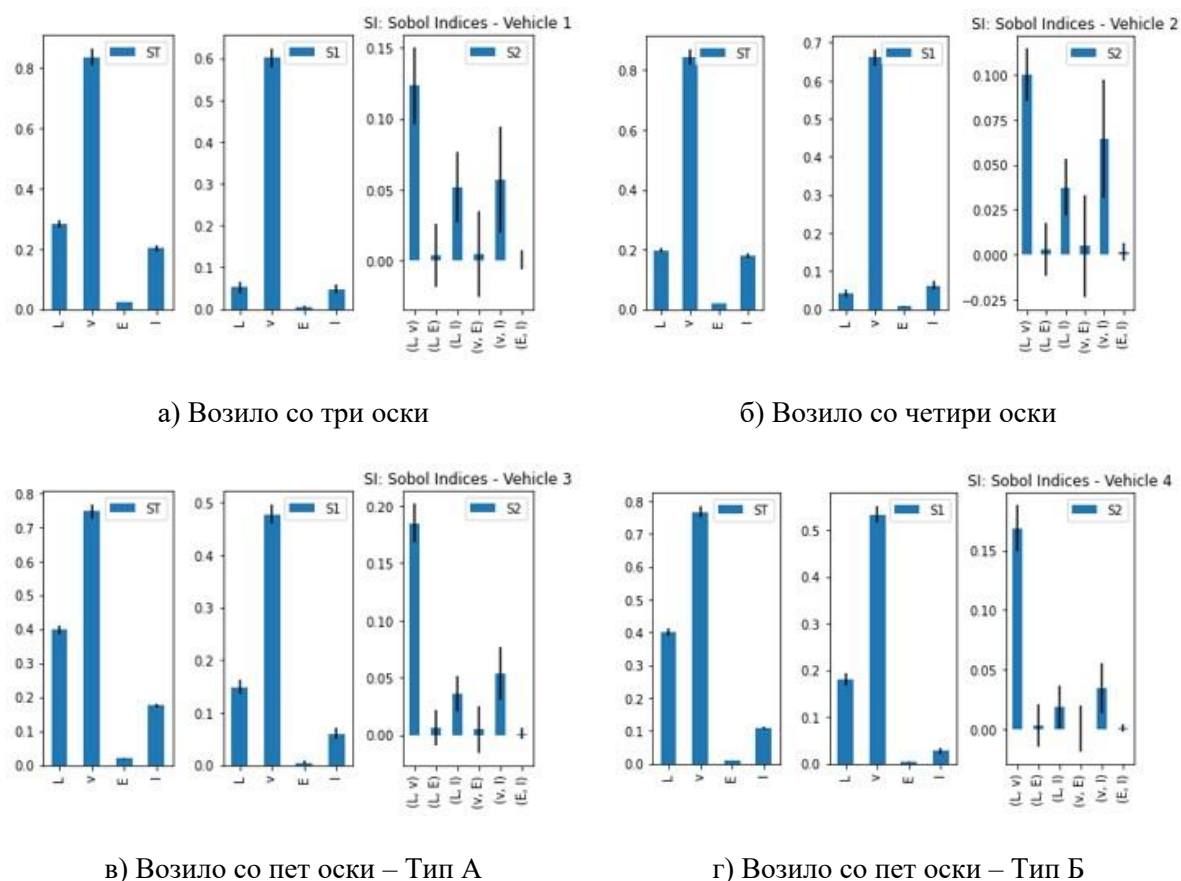
Табела 3. Модели добиени од регресиска анализа

Ред на полиномна р-ка	р – вредност на моделот	Приспособен R^2	Прогнозиран R^2
прв ред	< 0.0001	0.5358	0.5356
втор ред	< 0.0001	0.6642	0.6637
трет ред	< 0.0001	0.7042	0.7031
четврти ред	< 0.0001	0.748	0.7462
петти ред	< 0.0001	0.7824	0.7792
шести ред	< 0.0001	0.8072	0.8021

Предложен модел
Оштетен модел

Како најсоодветен предложен е моделот со полиномна равенка од петти ред. Подоцна со анализа на варијансата (ANOVA), а врз основа на р-вредноста за секој променлив параметар и нивната меѓусебна интеракција, извршено е исклучување на дел од членовите од полиномната равенка од петти ред со што е добиен редуциран модел.

Откако ќе се дефинира редуцираниот модел добиен од методологијата на површина на одговор, се преминува кон анализа на чувствителност на влезните променливи параметри. На слика 11 прикажани се графици од извршена анализа на чувствителност на параметрите со примена на Собол индексите.



Сл. 11. Анализа на чувствителност на параметри за четири возила со различен број оски

Вкупните Собол индекси (S^T) како и оние од прв ред (S_1) го мерат придонесот за секој поединечен влезен параметар врз варијансата на одговорот на моделот, додека Собол индексите од втор ред (S_2) го мерат придонесот на интеракцијата помеѓу влезните параметри.

6. ЗАКЛУЧОК

Проценката на динамичкото однесување на армиранобетонските мостови под дејство на подвижните товари е сложена работа што бара повеќедимензионален пристап, бидејќи повеќе меѓусебно поврзани параметри влијаат на динамичкиот одговор на армиранобетонските мостови. Со интегрирање на експерименталните испитувања како и техниките за нумеричко и аналитичко моделирање можно е со прифатлива точност да се определи влијанието од подвижните натоварувања врз конструкцијата на мостовите и да се увиди кој фактор има најголемо влијание врз динамичкиот одговор.

По спроведувањето на анализата и добиените површини на одговор, може да се забележи дека при исти влезни податоци, како што се брзината на движење и распонот на конструкцијата, се добиваат различни површини на одговор доколку на мостовската конструкција се движат возила со различен број оски и различна прераспределба на тежината по оските.

Преку анализата на чувствителност утврдено е дека одредени параметри имаат значително влијание врз динамичкиот одговор. Собол индексите од прв ред покажуваат дека распонот на конструкцијата и брзината на движење имаат најсуштински индивидуален ефект. Модулот на еластичност на бетонот, од друга страна, има занемарлив ефект и може да се замени со неговата средна вредност во полиномната равенка.

Покрај тоа, индексите на Собол од втор ред покажуваат дека интеракциите помеѓу распонот на конструкцијата и брзината на движење на возилото имаат најзначајно влијание врз динамичниот одговор. Потоа следат интеракциите помеѓу брзината и моментот на инерција на пресекот, како и оние меѓу распонот и моментот на инерција. Затоа, се препорачува другите интеракции во полиномната равенка да се заменат со нивните средни вредности за да се добие попрактичен и поедноставен израз.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Janev D., Arangjelovski T., Nakov D., Markovski G. (2022). Application of Different Methods for Determination of DAF from Moving Loads on Roadway Reinforced Concrete Bridges. In: Pellegrino C., Faleschini F., Zanini M.A., Matos J.C., Casas J.R., Strauss A. (eds) Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures. EUROSTRUCT 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 200. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4_141
- [2] Janev, D., Arangjelovski, T., Nakov, D., Markovski, G. (2022). Overview of Standards for Static and Dynamic Proof Load Testing of RC Bridges. In: Eurocodes – Gate to Europe, Proc. 19th MASE Int. Symp., ed. Cvetkovska, M., Macedonian Ass. Struct. Eng., 2022, pp. 714–723.
- [3] Yang, Y., Yau, J.D., & Wu, Y.S. (2004). Vehicle-bridge interaction dynamics: with applications to high-speed railways. <https://doi.org/10.1142/5541>
- [4] Zhu M., McKenna F., Scott, H. M. (2018). OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. In: SoftwareX. Volume 7, 2018, Pages 6-11, ISSN 2352-7110, <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.10.009>.
- [5] INTERNATIONAL STANDARD – ISO 8608 (2016). Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data, Geneva, Switzerland
- [6] Myers R. H. Montgomery D. C. & Anderson-Cook C. M. (2016). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments (Fourth). Wiley.
- [7] Sobol', I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. Mathematics and Computers in Simulation, Volume 55, Issues 1–3, 2001, Pages 271–280, ISSN 0378-4754, [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6).
- [8] Saltelli et al. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. Computer Physics Communications, Volume 181, Issue 2, 2010, Pages 259–270, ISSN 0010-4655, <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>.