

## **ИЗСЛЕДВАНЕ НА СЕИЗМИЧНАТА ОСИГУРЕНОСТ ПРИ ВРЪЗКАТА МЕЖДУ МОСТ И НАСИП ПРИ СКОРОСТНИ ЖП ЛИНИИ**

**Коста Костов, Ивайло Лиловски**  
[kpetrov77@abv.bg](mailto:kpetrov77@abv.bg), [lilovski@abv.bg](mailto:lilovski@abv.bg)

**Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“  
ул. „Гео Милев“ 158, София 1574  
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ**

**Ключови думи:** *Мостове, земно-насипно тяло, железопътните линии, автомобилни пътища, сеизмичен риск, виброускорение, вибропреместване*

**Резюме:** *Значителният сеизмичен риск на който са изложени обектите от транспортната инфраструктура изискват разработването на съвременни надеждни процедури за дефиниране на сеизмичното въздействие и сеизмично микро райониране, особено за отговорни инженерни съоръжения, разположени в зони със сеизмичен коефициент  $K_c \geq 0,15$  и с очаквана макросеизмична интензивност VII – VIII степен. По-голямата част от територията на България е районирана със сеизмичен коефициент  $K_c \geq 0,15$ , като пътищата и железопътните линии са разположени именно в такива райони.*

*В доклада са изследвани влиянието на потенциалните сеизмични източници застрашаващи надеждността на преходните области при връзката между мостовете и земно-насипното тяло, като основа на железопътните линии и автомобилни пътища, както и анализиране и дефиниране на сеизмичните параметри с цел повишаване на сеизмичната осигуреност на конструкциите.*

*Това е необходимо, предвид това, че сеизмичните въздействия са непредвидими по време, място и сила и поради това причиняват големи по размер негативни последици също върху елементи и съоръжения от транспортната инфраструктура, които могат да доведат до сериозни материални щети и жертви например при скоростно влаково движение и последиците от разместване на железния път и последващо дерайлиране и/или изпадане от мост.*

*С цел да се изследва влиянието на потенциалните сеизмични източници застрашаващи надеждността на преходните области при връзката между мостовете и земно-насипното тяло, като основа на железопътните линии и автомобилни пътища, както и анализиране и дефиниране на сеизмичните параметри с цел повишаване на сеизмичната осигуреност на конструкциите е проведено измерване на виброускорение и вибропреместване от преминаващите влакове (пътнически и товарни) в преходната област при връзката между стоманобетонен мост и земно-насипното тяло зад устоя.*

## **1. ВЪВЕДЕНИЕ**

Сеизмичните въздействия са непредвидими по време, място и сила и поради това причиняват големи по размер негативни последици също върху елементи и съоръжения от транспортната инфраструктура, които могат да доведат до сериозни материални щети и жертви например при скоростно влаково движение и последиците от разместване на железния път и последващо дерайлиране и/или изпадане от мост.

Целта на настоящия проект е да се изследва влиянието на потенциалните сеизмични източници застрашаващи надеждността на преходните области при връзката между мостовете и земно-насипното тяло, като основа на железопътните линии и автомобилни пътища, както и анализиране и дефиниране на сеизмичните параметри с цел повишаване на сеизмичната осигуреност на конструкциите.

Голяма част от мостовите конструкции са подложени на значителни динамични товари. Това са въздействия, които се изменят бързо във времето по местоположение, големина, направление или посока. Те предизвикват значителни ускорения и инерционни сили, за които трябва да се държи сметка още при проектирането.

Според особеностите им динамичните товари могат да бъдат разделени на следните групи: подвижни, сеизмични, ветрови, неподвижни периодични, кратковременни /импулсни/, неподвижни ударни и др. За мостовите конструкции най – голямо значение имат първите три групи товари.

Създаването на възможно най – точен и прецизен компютърен модел около преходната област между съоръжение и земно – насипно тяло, както и между различни типови конструкции железен път с отчитане техническото състояние на подвижния жп състав, железния път и натоварването – динамично и сеизмично (по време на сеизмични въздействия), ще даде добра възможност за технологична оценка при изграждането на връзката между съоръжения и насипи при скоростни жп линии, както и възможност за създаване на антисеизмични мерки в определени области.

В настоящия доклад е проучено експерименталното възбуждане на вибрациите /трептенията/ от преминаващия подвижен товар (железопътни возила) върху преходната област при връзката между мостовата конструкция и земно-насипното тяло зад крайните мостови опори.

## **2. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА СЕИЗМИЧНИ ИЗЧИСЛИТЕЛНИ МОДЕЛИ ЗА КОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗЕН ПЪТ ВЪРХУ МОСТОВЕ И В ПРЕХОДНИ ОБЛАСТИ**

Динамичното и сеизмично изследване на мостовите конструкции може да се проведе с равнинни, равнинно – пространствени и пространствени модели. Те се съсредоточават по дължината на мост, а при пространствените модели – и по ширина, най – вече при върховете на опорите.

Трябва да се отчитат не само хоризонталните, но и вертикалните сеизмични сили (особено за конструкции с отвори над 24m, хоризонтално наклонени конзоли, обекти в епицентралната зона и др.), а в някои случаи дори и сеизмичните огъващи и усукващи моменти от завъртането на големите концентрирани маси. По принцип следва да се използват пространствени модели с много степени на свобода и решението да се извърши с числени или полуаналитични методи по МКЕ на основата на спектралната теория.

Сеизмичното въздействие може да бъде идеализирано с различни модели. Приема се, че то се проявява върху основите на конструкцията в едно линейно направление (еднокомпонентно въздействие), което може да бъде произволно в пространството, но най – често се приема хоризонтално. С цел определяне на най-

неблагоприятното направление за различните усилия, трябва да се изследват поотделно за редица направления.

При мостовете често се получават кратни или близки собствени честоти, на които обаче съответстват различни собствени форми на трептене. Поради това един и същи динамичен или сеизмичен товар може да възбуди няколко собствени форми, при които трептенията взаимно се наслагват. Това причинява биения.

Основната цел на изследването на настоящия доклад е да се анализира въздействието на потенциалните сеизмични сили оказващи влияние на надеждността в преходните области при връзката между мостовете и земно-насипното тяло зад устоя, като основа на железопътните линии или автомобилните пътища.

Моделите са конструирани и изследвани по Метода на крайните елементи.

За целта е използвана програмата SAP2000 v.14.2.0 на Computers and Structures, Inc.

И за трите модела са използвани обемни (SOLID) и прътови (FRAME) крайни елементи. Земната основа и пластовете от горното строене са моделирани със SOLID елементи, релсовия път и траверсите са моделирани с FRAME елементи. SOLID елементите са 6-стенни с по 8 възела, всеки възел е с по 6 степени на свобода – 3 трансляционни и 3 ротационни. FRAME елементите са с по 2 възела с по 6 степени на свобода. Към всеки краен елемент (SOLID или FRAME) е асоцииран вида на материала, от който е изграден, с неговите свойства – обемно тегло, маса, модул на еластичност, коефициент на Поасон, коефициент на температурно разширение, модул на ъглова деформация и др. Освен това за прътовите елементи - релси и траверси – са въведени точните им напречни сечения.

Пластовете от горното строене за всеки вид конструкция са въведени с размери в план и дебелини. Дължините на крайните елементи за релсите са до 60 см и са съобразени с вида на конструкцията, общата ѝ дължина и силите от натоварването, така че максимално точно да се моделира съвместната им работа. В надлъжно направление отделните конструкции са моделирани като непрекъсната среда. Прекъсванията на средата (фуга) има само в прехода от една от една конструкция към друга. Това прекъсване е само в конструкцията, но не и в земната основа.

Пластовете на земната основа са моделирани с обща дебелина до 2 м.

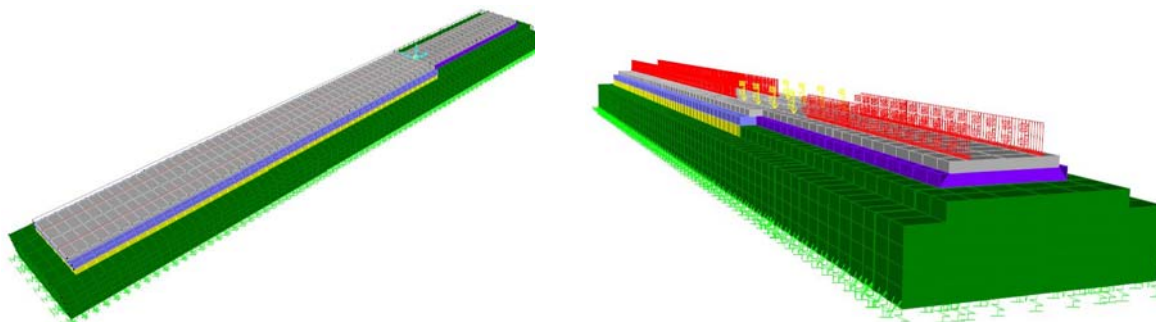
Видовете модели са:

**2.1. Модел Y-траверси върху асфалт - Стоманобетонова плоча - Баластова призма**

**2.2. Модел RHEDA - OBB**

**2.3. Модел OBB-PORR- RHEDA -Залепен баласт**

В доклада е показан модела RHEDA – OBB натоварен с подвижен товар LM71 и сеизмично въздействие (Фиг.1 и Фиг.2).



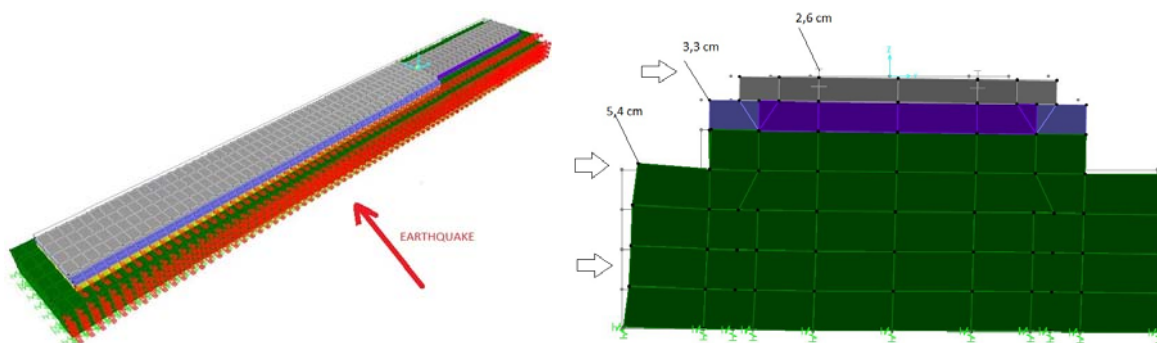
**Фиг.1. и Фиг.2. Аксонометричен изглед и модел на натоварването на връзката RHEDA – OBB**

Натоварването е от характеристикните стойности на силите и разпределения товар съгласно подвижен товар модел. Силите и разпределения товар са симетрични относно оста на пътя. Натоварването е приложено върху възлите и прътовите елементи моделиращи релсите. Оттам чрез взаимосвързаните възли на пластове на горното строене то се предава на пластове на земната основа. Така в един напречен разрез през цялата дълбочина на системата „конструкция - земна основа“ могат да се проследят напреженията и деформациите във всеки едни възел и елемент.

Движението на товарния модел се симулира чрез поставяне на силите му на различни места по протежението на конструкцията. В случая са поставени около фугата между двете преходни области, където се получават характерните скокове в деформациите и концентрация на напреженията.

С въведените стойности на характеристикните сили на натоварванията са съставени изчислителни комбинации, където те участват умножени с коефициентите 1,45 за претоварване,  $\alpha=1,33$  за класифициран вертикален товар и динамичния коефициент  $f=1,2$ . В същите комбинации участват и собствените тегла на елементите, умножени с коефициента за претоварване 1,35. Собствените тегла на елементите се отчитат автоматично от програмата според въведените им геометрични размери и обемните тегла на материалите..

Сеизмичното натоварване е въведено като статичен товар EARTHQUAKE от едната страна, във възлите на Solid елементите, моделиращи земната основа. Натоварването е за райони с интензивност  $I=VIII$  степен и  $K_s=0,15$  (Фиг.3 и Фиг.4).



Фиг.3. и Фиг.4. Сеизмично натоварване и деформации в напречна посока на модела

Натоварването може да се допълни с други хоризонтални въздействия – вятър, температурни разлики и т.н. Могат да се разработят варианти в райони с по-голям интензитет, варианти за конкретно микрорайониране, при земна основа с различни пластове и др.

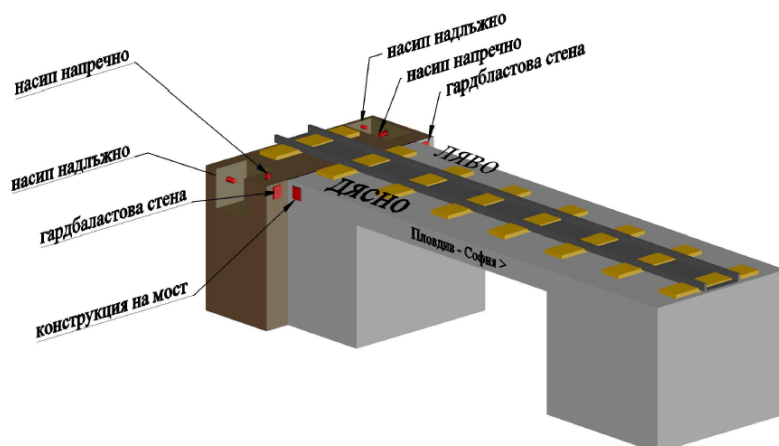
### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

С цел дефиниране и анализиране на примерни сеизмични параметри на 08.09.2023г. е проведено измерване на виброускорение и вибропреместване от преминаващите влакове (пътнически и товарни) в преходната област при връзката между източния устой на стоманобетонения мост на км 10<sup>+111</sup> по път №1 и земно-насипното тяло зад източния устой.

Измерването на виброускорението и вибропреместването е извършено с виброанализатор PULSE-FFT (Виброанализатор B&K PULSE 3560-B-140) с акселерометри CTC 101A. Използван е софтуер за обработка на данните B&K PULSE LabShop.

За определяне на виброускорението и вибропреместването в напречна и надлъжна посока са съставени 4 (четири) подварианта на разположение на сензорните

датчици, разположени в переходната област при връзката между стоманобетонения мост и земно-насипното тяло (Фиг.5). В доклада е представен само 1 (един) вариант, както следва:



Фиг.5. Аксонометричен изглед при връзката мост – насип

#### I. Вариант (Сн.1 ÷ Сн.4):

Дясно:

- Сензор на устой на гардбаластова стена на мост – надлъжно;
- Сензор на върхна конструкция на мост – напречно;
- Сензор на армировъчен прът в насип – напречно;
- Сензор на армировъчен прът в насип – надлъжно.



Сн.1



Сн.2



Сн.3



Сн.4

Преминали влакове:

- в 9,00 часа: Пътн.влак Сименс – Desiro от София за Карлово;
- в 9,17 часа: Бърз влак от Варна до София /с локомотив Смартрон/;
- в 9,22 часа: Товарен влак на DB Cargo.

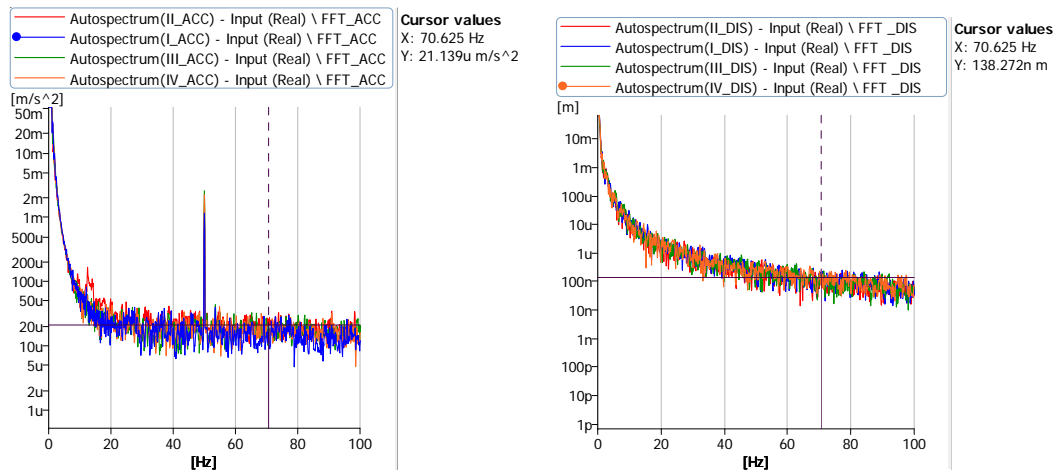
## 4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗВЪРШЕНОТО ИЗМЕРВАНЕ

### I. Вариант на разположение на сензорите:

Таблица 1

№	Разположение на сензорите
I	Сензор на устой на гардбаластова стена на мост – надлъжно; дясно
II	Сензор на връхна конструкция на мост – напречно; дясно
III	Сензор на армировъчен прът в насип – надлъжно; дясно
IV	Сензор на армировъчен прът в насип – напречно; дясно

Посока на разположение на датчиците: Пловдив - София



Фиг.6. и Фиг.7. Графично представяне на виброускорение и вибропреместване на „фон“ на изследвания обект

Най-ниски стойности при измерването на виброускорение на влак SIEMENS

Desiro:

- Гардбаластовата стена на моста надлъжно дясно (I)  $0,0325m/s^2$  при 5,250Hz,
- Връхна конструкция на моста напречно дясно (II)  $0,0530m/s^2$  при 3,250Hz;
- Насип надлъжно дясно (III):  $0,0257m/s^2$  при 7,625Hz;
- Насип напречно дясно (IV)  $0,120m/s^2$  при 8,750Hz.

Най-високи стойности при измерването на виброускорение на влак SIEMENS

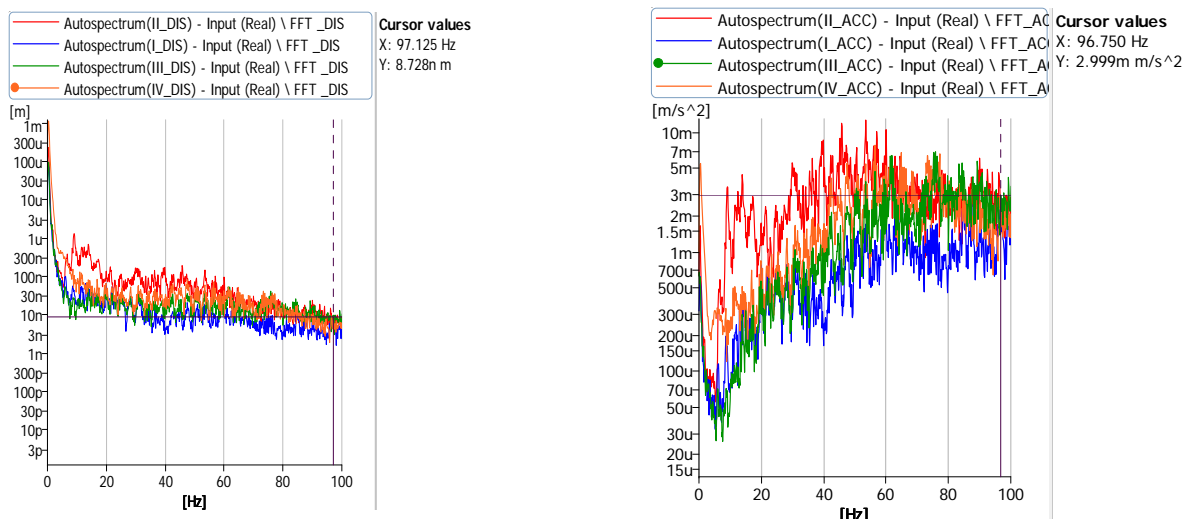
Desiro:

- Гардбаластовата стена на моста надлъжно дясно (I)  $2,962m/s^2$  при 64,500Hz;
- Връхна конструкция на моста напречно дясно (II) от  $12,747m/s^2$  при 53,500Hz;
- Насип надлъжно дясно (III)  $6,930m/s^2$  при 75,875Hz;
- Насип напречно дясно (IV)  $6,640m/s^2$  при 77,250Hz.

A1 Пътнически влак SIEMENS Desiro от София за Карлово

№	Разположение на сензорите
I	Сензор на устой на гардбаластова стена на мост – надлъжно; дясно
II	Сензор на връхна конструкция на мост – напречно; дясно
III	Сензор на армировъчен прът в насип – надлъжно; дясно
IV	Сензор на армировъчен прът в насип – напречно; дясно

Посока на разположение на датчиците: Пловдив – София



**Фиг.8. и Фиг.9. Графично представяне на вибропреместване и виброускорение на влак SIEMENS Desiro**

Най-ниски стойности при измерването на вибропреместване на влак SIEMENS Desiro:

- Гардбаластовата стена на моста надлъжно дясно (I) 1,573 $\mu$ m при 98,125Hz;
- Връхна конструкция на моста напречно дясно (II) 3,305 $\mu$ m при 97,250Hz;
- Насип надлъжно дясно (III) 3,004 $\mu$ m при 97,500Hz;
- Насип напречно дясно (IV) 1,870 $\mu$ m при 95,875Hz.

Най-високи стойности при измерването на вибропреместване на влак SIEMENS Desiro:

- Гардбаластовата стена на моста надлъжно дясно (I) 65,376 $\mu$ m при 19,875Hz;
- Връхна конструкция на моста напречно дясно (II) 1,299mm при 9,125Hz;
- Насип надлъжно дясно (III) 52,708 $\mu$ m при 61,875Hz;
- Насип напречно дясно (IV) 129,7 $\mu$ m при 11,000Hz.

## **5. ПРАКТИЧЕСКО ПРИЛОЖЕНИЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ, ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ**

С цел създаване на възможно най – точен и прецизен модел около преходната област между транспортно съоръжение (мост, тунел) и земно – насипно тяло, както и между различни типове конструкции железен път с отчитане само на натоварването – динамично и сеизмично, както и въз основа на проведените измервания, резултатите, получени от теоретико – практичното изследване биха могли да послужат за:

➤ Намаляване на вертикалните деформации в преходните участъци с допълнителни мероприятия за увеличаване стойността на еластичния модул при преминаване между различни конструкции на монолитна подрелсова основа, въпреки различията в еластичните и деформационни свойства в тази област;

➤ Могат да се направят или допълнят изводи за поведението на безбаластови конструкции при изграждането на бъдещи преходни области и гранични условия;

➤ Подобряване се еднородната структура на конструктивните елементи от горното строене на железния път при различните конструкции на монолитна подрелсова основа в областта на прехода;

➤ При подходяща организация за провеждане на повече експерименти може да се регистрира поведението на системата и в двете релси и с подходящ анализ на повече и достатъчни на брой измервания да се следи поведението на монолитната подрелсова система в тези преходни участъци;

➤ Запознаване на проектантите и строителите с възможностите на прилагането на преходни плочи към мостови съоръжения по отношение на осигуряването на изискванията на нормативните документи отнасящи се до корав железен път;

➤ От създадените компютърни модели при връзката на различни типови монолитна подрелсова основа с земно – насипното тяло и определените деформации в земната основа при хоризонтално сеизмично въздействие е установено, че са по – големи в сравнение с тези в конструкцията на горното строене на железния път;

➤ Аналогично и напреженията в преходните зони при хоризонтални сеизмични въздействия са по-големи около крайните области на конструкцията на горното строене на железния път в сравнение с тези от подвижен товар LM 71.

➤ С цел да се извършат динамични и геотехнически изпитания с определяне на вероятната стойност на вибрациите, предизвикваща сеизмично въздействие върху земно-насипното тяло на обекти от транспортната инфраструктура е проведено натурно измерване на виброускорение и вибропреместване от преминаващите влакове (пътнически и товарни) в преходната област при връзката между източния устой на стоманобетонния мост на км 10+111 по път №1 и земно-насипното тяло зад източния устой;

➤ За изследване на сеизмичната осигуреност на мостовата конструкция и насипното тяло, резултатите са обобщени с компютърни модели с достатъчен брой зададени геометрични характеристики на строежа и идентификация на конструктивната система;

Съобразно нормативната уредба в Р България за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони, при изграждането на земно-насипното тяло за горното строене на железопътните линии, следва де се спазват следните изисквания:

➤ В райони със сеизмичен коефициент  $K_c \geq 0,27$  и с височина на насипите (дълбочина на изкопите), по-голяма от 4 m, откосите на земното тяло от нескални почви се приемат с наклон 1:(b + 0,25), където 1:b е наклонът на откосите, проектирани в несеизмични райони. Откоси с наклон 1:2,25 и по-полегати от тях се проектират при спазване на цитираните норми;

➤ Допуска се откоси на изкопи, разположени в скални почви, както и откоси на насипи от скални почви със съдържание на по-малко от 20 на сто запълнител, да се проектират по същия начин както за несеизмични райони;

➤ Площадката на земното тяло върху склоновете се разполага изцяло върху тераса, изрязана в склона, или изцяло върху насипа. Преходните участъци се проектират с минимална дължина;

➤ В райони със сеизмичен коефициент  $K_c \geq 0,15$  железопътните насипи, разположени върху склонове при скални терени с наклон, по-голям от 1:1, се укрепват.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

[1] Костов К., Безбаластови конструкции за горното строене на железния път върху земно платно и изкуствени съоръжения, София, ВТУ „Тодор Каблешков“, 2021.

[2] Лалов И., Христов Х., Стоманобетонни мостове, София, ВВТУ, 1999.

[3] БДС EN 1990:2002. ЕВРОКОД: Основи на проектиране на строителни конструкции.

[4] БДС EN 1990:2002/A1:2005: ЕВРОКОД: Основи на проектиране на строителни конструкции.

[5] БДС EN 1991-2:2006. ЕВРОКОД 1: Въздействия върху строителни конструкции. Част 2: Подвижни натоварвания от трафик върху мостове.



[6] НАРЕДБА № РД-02-20-2 от 27 януари 2012 г. за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони , Обн., ДВ, бр. 13 от 2012 г.; попр., бр. 17 и 23 от 2012г.

[7] Darr E., Fiebig W., Feste Fahrbahn: Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2006.

## **STUDY OF SEISMIC ASSURANCE AT THE CONNECTION BETWEEN A BRIDGE AND AN EMBANKMENT IN HIGH-SPEED RAILWAY LINE**

**Kosta Kostov, Ivailo Lilovski**  
[kpetrov77@abv.bg](mailto:kpetrov77@abv.bg), [lilovski@abv.bg](mailto:lilovski@abv.bg)

***Todor Kableshkov University of Transport  
Sofia, 158 Geo Milev Str.  
THE REPUBLIC OF BULGARIA***

***Key words:*** Bridges, railways, roads, seismic risk, vibration acceleration, vibration displacement

***Abstract:*** The significant seismic risk to which the transport infrastructure sites are exposed requires the development of modern reliable procedures for defining the seismic impact and seismic microzoning, especially for responsible engineering facilities located in areas with a seismic coefficient of 0.15 and with an expected macroseismic intensity of VII – VIII degree. Most of the territory of Bulgaria is zoned with a seismic coefficient of 0.15, and roads and railways are located in such areas.

The report examines the impact of potential seismic sources that threaten the reliability of transition areas in the connection between bridges and the earth embankment, as the basis of railways and roads, as well as analyzing and defining seismic parameters in order to increase the seismic reliability of structures.

This is necessary given that seismic impacts are unpredictable in time, place and intensity and therefore cause large negative consequences also on elements and facilities of the transport infrastructure, which can lead to serious material damage and casualties, for example, in high-speed train traffic and the consequences of shifting the railway track and subsequent derailment and/or falling off a bridge.