



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
МАШИНСКИ ФАУЛТЕТ – СКОПЈЕ



м-р Анита Сашко Василева Љуботенска, дипл. машински инженер

**Развој на методологија за анализа и проценка на состојбата на
мостовска дигалка по сеизмичко дејство**

*Development of a methodology for analysis and condition assessment of an
overhead crane after seismic action*

-докторски труд-

Ментор:

Проф. д-р Кристина Јакимовска

Скопје, 2026 година

м-р Анита Сашко Василева Љуботенска

РАЗВОЈ НА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА АНАЛИЗА И ПРОЦЕНА НА СОСТОЈБАТА НА МОСТОВСКА ДИГАЛКА ПО СЕИЗМИЧКО ДЕЈСТВО

Ментор:

Проф. д-р Кристина Јакимовска
Машински факултет - Скопје

Членови на комисијата:

Проф. д-р Јанко Јанчевски, УКИМ,
Машински факултет – Скопје, претседател

Проф. д-р Кристина Јакимовска, УКИМ,
Машински факултет - Скопје, ментор

Проф. д-р Виктор Стојмановски, УКИМ,
Машински факултет – Скопје, член

Проф. д-р Александра Богдановиќ, УКИМ,
Институт за земјотресно инженерство и
инженерска сеизмологија - Скопје, член

Проф. д-р Кемал Едип, УКИМ,
Институт за земјотресно инженерство и
инженерска сеизмологија - Скопје, член

Научна област:
МАШИНСТВО

АПСТРАКТ

Во овој докторски труд е разработена сеопфатна методологија за анализа и проценка на состојбата на мостовска дигалка по сеизмичко дејство. Истражувањето произлегува од недостигот на јасно дефинирани постапки за постсеизмичка проценка на мостовските дигалки во постојните стандарди и потребата од реална проценка на нивната безбедност и понатамошна експлоатација. Во рамките на трудот е извршено експериментално модално мерење на реална двогредна мостовска дигалка при различни состојби на оптоварување и позиции на количката. Врз основа на добиените резултати е развиен и верификуван нумерички модел во софтверот *ANSYS*, со примена на методот на конечни елементи (MKE), модална анализа и временски зависна динамичка анализа. Анализирани се сценарија на нормална работа и различни нивоа на сеизмичко дејство, при состојби без товар и со товари од 2 t и 7 t. За процена на состојбата на мостовската дигалка се дефинирани повеќе индикатори, меѓу кои сопствени фреквенции, модална усогласеност, максимални забрзувања, поместувања, енергетски параметри и осцилации на товарот. Врз основа на нив е развиена *MATLAB*-алатка со кориснички интерфејс за обработка на резултатите и донесување одлуки за состојбата на мостовската дигалка по сеизмичко дејство. Резултатите покажуваат дека комбинацијата од експериментални и нумерички методи овозможува проценка на состојбата на мостовските дигалки, како и откривање на критичните зони каде се јавуваат најголеми поместувања и напрегања. Развиената методологија претставува основа за понатамошен развој на пристапи за следење на состојбата, инспекција и постсеизмичка процена на мостовски дигалки во сеизмички активни подрачја.

Клучни зборови: мостовска дигалка, сеизмичко дејство, анализа по метод на конечни елементи, индикатори за процена на состојба, *MATLAB*-алатка, *ANSYS*.

ABSTRACT

This doctoral dissertation presents a comprehensive methodology for the analysis and condition assessment of an overhead bridge crane subjected to seismic action. The research arises from the lack of clearly defined procedures for the post-earthquake assessment of bridge cranes in existing standards and the need for a reliable evaluation of their safety and continued operation. Within the scope of the study, experimental modal testing was performed on a real double-girder overhead bridge crane under different loading conditions and trolley positions. Based on the obtained results, a numerical model was developed and validated in ANSYS using the Finite Element Method (FEM), modal analysis, and time-history dynamic analysis. Scenarios representing normal operating conditions and different levels of seismic excitation were analyzed for unloaded conditions as well as for payloads of 2 t and 7 t. Several indicators were defined for the assessment of the crane condition, including natural frequencies, modal correlation, peak accelerations, displacements, energy-based parameters, and load oscillations. Based on these indicators, a MATLAB-based tool with a graphical user interface was developed for processing the results and supporting decision-making regarding the condition of the bridge crane after seismic events. The results demonstrate that the combination of experimental and numerical methods enables an effective assessment of bridge crane condition, as well as the identification of critical structural zones characterized by the highest displacements and stresses. The proposed methodology provides a foundation for the further development of approaches for condition monitoring, inspection, and post-earthquake assessment of bridge cranes located in seismically active regions.

Keywords: overhead crane, seismic action, Finite Element Method (FEM), condition assessment indicators, MATLAB tool, ANSYS.

Благодарности

Изразувам благодарности до сите кои на кој било начин придонесоа за успешната изработка на оваа докторска дисертација.

Упатувам благодарности до менторката, **проф. д-р Кристина Јаковска**, за стручните насоки и забелешки во текот на изработката на овој докторски труд.

Искрено им благодарам на членовите на Комисијата – **проф. д-р Јанко Јанчевски, проф. д-р Виктор Стојмановски, проф. д-р Александра Богдановиќ и проф. д-р Кемал Еѓић**, за одвоеното време и стручните забелешки што придонесоа за подобрување на трудот.

Големо благодарам упатувам до професорите и колегите од **Машински факултет – Скопје**, особено до професорите и колегите од **Институтот МКМВ**, за поддршката и помошта во текот на изработката на дисертацијата.

Упатувам голема благодарности до вработениите во Одделот за динамички испитувања и информатика при **Институтот за земјопресно инженерство и инженерска сеизмологија (ИЗИИС)**, за нивната стручна помош и поддршка при реализацијата на експерименталните испитувања.

На крај, од сè срце му благодарам на моето семејство за неизмерната љубов, терпение, разбирање и безрезервна поддршка во текот на целиот процес. Ви благодарам што бевте покрај мене.

Авторката

СОДРЖИНА

Список на слики.....	x
Список на табели.....	xiii
Номенклатура.....	xiv
1. ВОВЕД	2
1.1. Предмет на истражувањето.....	4
1.2. Цели на истражувањето	5
1.3. Хипотези.....	6
1.4. Тек и методологија на истражувањето во докторската теза	6
1.4.1. ФАЗА 1 – Идентификација на истражувачкиот јаз.....	7
1.4.2. ФАЗА 2 – Експериментални мерења.....	11
1.4.3. ФАЗА 3 – Нумеричко моделирање и верификација на мостовската дигалка	11
1.4.4. ФАЗА 4 – Динамичка анализа	12
1.4.5. ФАЗА 5 – Одредување на индикатори	12
1.4.6. ФАЗА 6 – Изработка на <i>Matlab</i> -алатка	13
1.5. Значење и придобивки од истражувањето	15
КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 1	17
2. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА	20
2.1. Преглед на релевантна литература од областа на мостовски дигалки	20
2.1.1. Мостовски дигалки - аналитички и нумерички пристапи.....	22
2.1.2. Динамички ефекти и сеизмичко дејство кај мостовските дигалки	24
2.1.3. Динамичкото однесување на мостовските дигалки	27
2.1.3.1. Динамички фактори.....	30
2.1.3.2. Разгледување на систем со еден степен на слободно движење	31
2.1.3.3. Динамички модели на мостовски дигалки	32
2.1.4. Индикатори за степенот на деформација на мостовските дигалки.....	39
2.1.5. Експлоатациони и безбедносни аспекти на мостовските дигалки	43
2.1.6. Откази кај мостовските дигалки	44
2.1.7. Инспекција и одржување на мостовските дигалки	47
2.2. Преглед на стандарди, закони и правилници за мостовски дигалки.....	48
2.2.1. Национални регулативи.....	50
2.2.2. Меѓународни и европски стандарди.....	53
2.2.3. Сеизмички стандарди	56
2.2.4. ISO стандарди	59
2.3. Климатско влијание врз индустриските системи	61
2.3.1. Климатските промени како фактор на ризик за индустриската инфраструктура	61
2.3.2. Хидрометеоролошки хазарди.....	65
2.3.2.1. Температурни дејства како резултат на климатски влијанија врз конструктивните елементи	65
2.3.2.2. Геофизички хазарди	69
2.3.3. Влијание на сеизмичко дејство врз индустриски конструкции	73
2.3.3.1. Сеизмичко дејство врз мостовски дигалки.....	75
2.4. Сеизмички хазарди во Р. Северна Македонија.....	78
2.4.1. Тектонска положба и сеизмотектоника на Р. Северна Македонија	79
2.4.2. Историски преглед на земјотреси на територијата на Р. Северна Македонија	82
КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 2	84

3. ИСТРАЖУВАЧКИ ЈАЗ	91
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТУВАЊЕ НА РЕАЛНА МОСТОВСКА ДИГАЛКА	94
4.1. Опис на експерименталната поставка	94
4.2. Мерна опрема	95
4.3. Позиционирање на акцелометрите	96
4.4. Фази на експерименталното испитување	97
4.4.1. Фаза 1 – Испитување без товар	98
4.4.2. Фаза 2– Испитување со товар од 2 t	98
4.4.3. Фаза 3 – Испитување со товар од 7 t	99
4.4.4. Контрола на вертикалното поместување на главниот носач	100
4.5. Обработка на податоците	101
4.5.1. Фаза 1 – претставување на резултатите без товар	102
4.5.2. Фаза 2 – резултати при товар од 2 t	104
4.5.3. Фаза 3 – резултати при товар од 7 t	106
4.6. Споредбена анализа	107
КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 4	111
5. НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ И ВЕРИФИКАЦИЈА НА МОСТОВСКАТА ДИГАЛКА	112
5.1. Основи на методот на конечни елементи	112
5.1.1. Видови на анализа применети во рамките на анализата по метод на конечни елементи	116
5.1.1.1. Модална анализа	116
5.1.1.3. Статичка анализа	119
5.1.1.3. Динамичката анализа на временски зависно однесување на системот	120
5.1.2. Постапка за спроведување анализа по МКЕ	121
5.1.2.1. Дефинирање на проблемот и целта на анализата	122
5.1.2.2. Поедноставено претставување на конструкцијата	122
5.1.2.3. Дефинирање на геометријата и материјалните карактеристики	123
5.1.2.4. Избор на конечни елементи	124
5.1.2.5. Формирање на мрежата	124
5.1.2.6. Дефинирање на оптоварувањата	125
5.1.2.7. Дефинирање на граничните услови	125
5.1.2.8. Спроведување на пресметката	126
5.1.2.9. Обработка на резултатите	127
5.1.2.10. Проверка и анализа на добиените резултатите	127
5.2. Модална и статичка верификација на моделот	127
5.2.1. Фаза 1 – претставување на резултатите од модалната анализа без товар	130
5.2.1.1. Фаза 1 - Положба на количката на средина, без товар	130
5.2.1.2. Фаза 1 - Положба на количката на позиција 5, без товар	131
5.2.2. Фаза 2 – претставување на резултатите од модалната анализа со товар од 2t	132
5.2.2.1. Фаза 2 - Положба на товарот 2t на позиција 1	132
5.2.2.2. Фаза 2 - Положба на товарот 2t на средина (позиција 3)	134
5.2.2.3. Фаза 2 - Положба на товарот 2t во позиција 5	135
5.2.3. Фаза 3 – претставување на резултатите од модалната анализа со товар од 7t	136
5.2.3.1. Фаза 3- Положба на товарот 7t на позиција 1	136
5.2.3.2. Фаза 3- Положба на товарот 7t на позиција 3	137
5.2.3.3. Фаза 3- Положба на товарот 7t на позиција 5	138
5.3. Претставување на резултатите од статичката верификација на моделот	139
5.4. Споредба на резултатите и заклучоци	140
КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 5	142

6. ДИНАМИЧКА АНАЛИЗА	144
6.1. Дефинирање на влезни податоци	144
6.2. Дефинирање на временски записи	144
6.2.1. Анализа на просторниот одговор на моделот	146
6.2.2. Развој на надграден 3D модел	146
6.3. Споредбени сценарија	147
6.3.1. Сценарио А – Нормална работа.....	148
6.3.1.1. Состојба без товар.....	148
6.3.1.2. Состојба со товар 2t.....	149
6.3.1.3. Состојба со товар 7t	150
6.3.2. Сценарио Б – Слабо до умерено сеизмичко дејство	151
6.3.2.1. Состојба без товар	151
6.3.2.2. Состојба со товар 2t	152
6.3.2.3. Состојба со товар 7t.....	153
6.3.3. Сценарио В – Силно сеизмичко дејство	154
6.3.3.1. Состојба без товар	155
6.3.3.2. Состојба со товар 2t	156
6.3.3.3. Состојба со товар 7t.....	157
6.4. Анализа на резултатите	158
6.4.1. Основен модел	158
6.4.2. Надграден модел	159
6.5. Споредба на моделите и резултатите	159
КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 6.....	162
7. ИНДИКАТОРИ ЗА ПРОЦЕНА НА СОСТОЈБАТА НА МОСТОВСКИТЕ ДИГАЛКИ	163
7.1. Дефинирање и класификација на индикатори.....	163
7.2. Опис и гранични вредности на избраните индикатори.....	166
7.2.1. Индикатор за ефективна вредност.....	166
7.2.2. Индикатор за максимално забрзување	167
7.2.3. Индикатор за поместување	169
7.2.4. Индикатор за максимално еквивалентно напрегање	170
7.2.5. Енергетски индикатор	172
7.2.6. Индикатор за осцилации на товарот.....	173
7.3. Интерпретација на индикаторите	175
КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 7.....	178
8. АЛАТКА ЗА ПОСТСЕИЗМИЧКА ПРОЦЕНА НА СОСТОЈБАТА НА МОСТОВСКАТА ДИГАЛКА	180
8.1. Претворање на индикаторите во одлука.....	180
8.2. MATLAB-алатка за процена	181
8.2.1. Влезни податоци.....	183
8.2.2. Алгоритам.....	183
8.2.3. Интерфејс и имплементација.....	184
9. ДИСКУСИЈА	188
9.1. Дискусија на резултатите од експерименталното модално испитување и верификацијата на моделот.....	188
9.2. Дискусија на резултатите од експерименталното статичко испитување	190
9.3. Дискусија на резултатите од динамичката анализа	191
9.4. Дискусија на избраните индикатори и нивната примена во MATLAB-алатката	194
10. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ ЗА ПОНАТАМОШНИ ИСТРАЖУВАЊА.....	196

10.1. Главни резултати и верификација на хипотезите	196
10.2. Придонес.....	197
10.2.1. Научен придонес.....	197
10.2.2. Практичен придонес	199
10.3. Насоки за идни истражувања	199
ПРИЛОЗИ	201
Прилог 1.....	201
Прилог 2.....	202

СПИСОК НА СЛИКИ

Слика бр. 1.1 Тек на докторскиот труд

Слика бр. 2.1 Етапи при дигањето на товар

Слика бр. 2.2 Приказ на мостовска дигалка со два степени на слобода

Слика бр. 2.3 Динамички модели на мостовски дигалки: (а) просторен модел на мостовска дигалка со висечки товар; (б) поедноставен просторен модел за анализа на осцилациите на висечкиот товар

Слика бр. 2.4 Различни положби на мостовските дигалки во хоризонтална рамнина при движење

Слика бр. 2.5 Видови на различни оштетувања кај шините

Слика бр. 2.6 Деформации на носечката конструкција поради изложеност на високи температури

Слика бр. 2.7 Клучни хазарди и нивната меѓусебна поврзаност што може да се разгледа во рамки на сеопфатен пристап за ризик

Слика бр. 2.8 Карта на сеизмогени зони на територијата на Р. Северна Македонија

Слика бр. 2.9 Зависност на врвното забрзување на тлото a_g од растојанието и магнитудата на земјотресот

Слика бр. 2.10 Приказ на Африканска и Европска тектонска плоча

Слика бр. 2.11 Тектонска карта на Динаридите и Панонскиот басен со прикажани главни тектонски зони и раседи, како потенцијални извори на сеизмичка активност

Слика бр. 2.12 Сеизмички зонирачки карти на Р. Северна Македонија

а) според макросеизмички интензитет (I°); б) според максимално забрзување на тлото (PGA , agR) согласно Eurocode 8

Слика бр. 2.13 Просторна распределба на епицентри на земјотреси регистрирани во Р. Северна Македонија

Слика бр. 4.1 Мостовската дигалка во ИЗИИС

Слика бр. 4.2 Мерен систем (*National Instruments NI cDAQ-9178 CompactDAQ*)

Слика бр. 4.3 Софтверски пакет *LabVIEW Virtual Instrument*

Слика бр. 4.4 Поставеност на петте акцелометри вдоль главниот носач на мостовската дигалка

Слика бр. 4.5 Позиции на акцелометрите (1, 2, 3, 4 и 5)

Слика бр. 4.6 Мерење без товар на средина на распонот (а) и во крајна лева позиција од распонот (б)

Слика бр. 4.7 Испитување со товар од $2t$ во позиции 1,2,3,4 и 5

Слика бр. 4.8 Приказ на товарот од $7t$ и негово закачување, осигурување и дигање

Слика бр. 4.9 Испитување со товар од $7t$ во позиции 1,2,3,4 и 5

Слика бр. 4.10 Мерење на растојание од подлогата до долната страна на главниот носач без товар и со товар од $7t$

Слика бр. 4.11 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 и количката е во $L/2$ и е без товар

Слика бр. 4.12 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 и количката е во позиција 5 и е без товар

Слика бр. 4.13 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 при товар од $2t$ во позиција 1

Слика бр. 4.14 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 при товар од $2t$ во позиција 3

Слика бр. 4.15 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 при товар од $2t$ во позиција 5

Слика бр. 4.16 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1,3 и 5 при товар од $7t$ и поставен во позиција 1

Слика бр. 4.17 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1,3 и 5 при товар од $7t$ поставен во позиција 3

Слика бр. 4.18 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1,3 и 5 при товар од $7t$ во позиција 5

Слика бр. 4.19 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1,3 и 5, без товар, со товар од $2t$ и $7t$

Слика бр. 5.1 Дискретизација на конструкцијата во конечни елементи и формирање на мрежа

Слика 5.2 Основни видови конечни елементи и примери на соодветни елементи во софтверот ANSYS

Слика 5.3 Приказ на мрежа од конечни елементи

Слика 5.4 Распределба на максималното главно напрегање при статичка структурна анализа во ANSYS

Слика бр. 5.5 Споредба помеѓу резултатите од модел 1 и модел 2

Слика бр. 5.6 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на нумеричкиот модел на мостовската дигалка: (а) облик на вибрирање 2 ($f = 6.14 \text{ Hz}$) и (б) облик на вибрирање 5 ($f = 9.53 \text{ Hz}$)

Слика бр. 5.7 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на нумеричкиот модел на мостовската дигалка: (а) облик на вибрирање 2 ($f = 6.14 \text{ Hz}$) и (б) облик на вибрирање 8 ($f = 17.22 \text{ Hz}$)

Слика бр. 5.8 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од $2t$ поставен на позиција 3: (а) облик на вибрирање 1 ($f = 3.12 \text{ Hz}$), (б) облик на вибрирање 2 ($f = 7.92 \text{ Hz}$) и (в) облик на вибрирање 3 ($f = 10.99 \text{ Hz}$)

Слика бр. 5.9 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од $2t$ поставен на позиција 5: (а) облик на вибрирање со фреквенција 7.88 Hz и (б) облик на вибрирање со фреквенција 10.92 Hz

Слика бр. 5.10 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од $7t$ поставен на позиција 1: (а) облик на вибрирање со фреквенција 7.88 Hz и (б) облик на вибрирање со фреквенција 10.92 Hz

Слика бр. 5.11 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од $7t$ поставен на позиција 3: (а) облик на вибрирање со фреквенција а) 4.20 Hz , (б) 7.92 Hz и в) 10.99 Hz

Слика бр. 5.12 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од $7t$ поставен на позиција 5: (а) облик на вибрирање со фреквенција 4.2 Hz и (б) облик на вибрирање со фреквенција 7.88 Hz в) облик на вибрирање со фреквенција 10.92 Hz

Слика бр. 5.13 Вертикалното поместување при дигање а) без товар (0.41 mm) б) со товар од $7t$ (9.89 mm)

Слика бр. 5.14 Споредба на експерименталните и нумеричките резултати за сите три фази

Слика бр. 6.1 Временска историја на земјотресниот запис *El Centro*

Слика бр. 6.2 Приказ на вертикалните поместувања (UY) на главниот носач без товар: (а) количка во позиција 1, (б) количка во позиција 3 и (в) количка во позиција 5

Слика бр. 6.3 Приказ на вертикалните поместувања (UY) при товар од $7t$, а) позиција 1, б) позиција 3 и в) позиција 5

Слика бр. 6.4 Приказ на вертикалните поместувања (UY) при слабо сеизмичко дејство и без товар: (а) количка во позиција 1, (б) количка во позиција 3 и (в) количка во позиција 5

Слика бр. 6.5 Приказ на вертикалните поместувања (UY) при слабо сеизмичко дејство со товар $2t$: (а) количка во позиција 1, (б) количка во позиција 3 и (в) количка во позиција 5

Слика бр. 6.6 Приказ на вертикалните поместувања (UY) при товар од $7t$ и слабо сеизмичко дејство: а) позиција 1, б) позиција 3 и в) позиција 5

Слика бр. 6.7 Приказ на вертикалните поместувања (UY) на мостовската дигалка при дејство на земјотресниот запис *El Centro* во Y насока, без висечки товар: а) позиција 1, б) позиција 3 и в) позиција 5

Слика бр. 6.8 Распределба на вертикалните поместувања (UY) при дејство на земјотресниот запис *El Centro* во Y насока за товар од $2t$: а) позиција 1; б) позиција 3; в) позиција 5

Слика бр. 6.9 Распределба на вертикалните поместувања (UY) при товар од $7t$ и сеизмичко дејство *El Centro* во Y -насока: а) позиција 1; б) позиција 3; в) позиција 5

слика бр.7.1 Избрани индикатори за определување на пост сеизмичката состојба на мостовска дигалка

Слика бр.7.2 Приказ на мерните места за определување на динамичкиот одговор на мостовската дигалка

Слика бр.7.3 Приказ на определувањето на максималното вертикално поместување на мостовската дигалка

Слика бр.7.4 Приказ на определувањето на максималниот еквивалентен напон во конструкцијата на мостовската дигалка

Слика бр.7.5 Приказ за определувањето на енергетскиот индикатор од временскиот сигнал на забрзувањето

слика бр.7.6 Приказ за определувањето на максималното релативно хоризонтално поместување на товарот во однос на количката

Слика бр.7.7 Шематски приказ на методологијата за процена на состојбата на мостовска дигалка врз основа на индикатори

Слика бр. 7.8 Приказ на методологијата за процена на состојбата на мостовска дигалка врз основа на индикатори

Слика бр. 8.1 Блок-дијаграм на алгоритмот за донесување одлука врз основа на индикаторите

Слика бр. 8.2 Шематски приказ на алгоритмот на алатката за постсеизмичка процена на состојбата на мостовска дигалка

Слика бр. 8.3 Излез од алатката *MATLAB* во случај кога мостовската дигалката е безбедна за употреба

Слика бр. 8.4 Излез од алатката *MATLAB* во случај кога е потребно следење на состојбата на мостовската дигалка

Слика бр. 8.5 Излез од алатката *MATLAB* во случај кога е потребна детална проверка на мостовската дигалка

Слика бр. 8.6 Излез од алатката *MATLAB* во случај кога дигалката не е безбедна за употреба

Слика бр. 9.1 Влијание на масата на товарот врз првата природна фреквенција на главниот носач

Слика бр. 9.2 Максимално еквивалентно напрегање за различни сценарија – позиции 1, 3 и 5

Слика бр. 9.3 Максимално еквивалентно напрегање за различни сценарија – позиции 1, 3 и 5

СПИСОК НА ТАБЕЛИ

Табела бр. 1.1 Преглед на литература од транспортна механизација

Табела бр. 1.2 Клучни зборови и нивната улога во анализата

Табела бр. 1.3 Преглед на важечките нормативни документи во однос на сеизмичката и постојателната сеизмичка безбедност на мостовските дијалки

Табела бр. 2.1 Преглед на најважните безбедносни уреди, можни општеувања како резултат на сеизмичко дејство

Табела бр. 2.2 Конструктивни елементи на мостовска дијалка и инспекција на сеизмичко дејство

Табела бр. 2.3 Преглед на стандарди, закони и правилници

Табела бр. 2.4 Улоги на стандардите по фази

Табела бр. 2.5 Историски преглед на земјотреси на територијата на Р.Северна Македонија

Табела бр. 3.1 Преглед на издвинати научни трудови од областа на динамичката, сеизмичката анализа и постојателната сеизмичка процена на мостовските дијалки

Табела бр. 3.2 Преглед на релевантните стандарди и регулативи за мостовски дијалки

Табела бр. 4.1 Основни технички карактеристики на испитуваната мостовска дијалка

Табела бр. 4.2 Поставеност на акцелометрите

Табела бр. 4.3 Прв глобален облик на вибрирање – сценарио без товар

Табела бр. 4.4 Прв глобален облик на вибрирање – товар 2t

Табела бр. 4.5 Прв глобален облик на вибрирање – товар 7t

Табела бр. 5.1 Сопоредба на добиените резултати за фаза 1, количката на средина

Табела бр. 5.2 Сопоредба на добиените резултати за фаза 1, количката на позиција 5

Табела бр. 5.3 Сопоредба на добиените резултати за фаза 2, товар од 2t на позиција 3

Табела бр. 5.4 Сопоредба на добиените резултати за фаза 2, товар од 2t на позиција 5

Табела бр. 5.5 Сопоредба на добиените резултати за фаза 3, товар од 7t на позиција 1

Табела бр. 5.6 Сопоредба на добиените резултати за фаза 3, товар од 7t на позиција 3

Табела бр. 5.7 Сопоредба на добиените резултати за фаза 3, товар од 7t на позиција 5

Табела бр. 6.1 Сопоредени резултати од динамичката анализа при различни експлоатациони и сеизмички сценарија

Табела бр. 7.1 Листа на индикатори за процена на состојбата

Табела бр. 7.2 Референтни RMS вредности на вертикално забрзување

Табела бр. 7.3 Референтни вредности на максималното вертикално забрзување

Табела бр. 7.4 Референтни вредности на максималното вертикално поместување

Табела бр. 7.5 Референтни вредности на максималното еквивалентно најреѓање

Табела бр. 7.6 Референтни вредности на енергетскиот индикатор

Табела бр. 7.7 Референтни вредности на индикаторот за осцилирање на товарот

Табела бр. 7.8 Критериуми за интерпретација на состојбата на мостовската дијалка

НОМЕНКЛАТУРА

a	–	забрзување
$a(t)$	–	временски зависно забрзување
a_g	–	максимално хоризонтално забрзување на подлогата
A	–	амплитуда
E	–	модул на еластичност
f	–	фреквенција
f_n	–	сопствена (природна) фреквенција
F	–	сила
F_{max}	–	максимална сила
g	–	земјино забрзување
H	–	висина на подигнување на товарот
I	–	момент на инерција на пресек
k	–	крутост
L	–	распон на мостовската дигалка
m	–	маса
M	–	момент на свиткување
N	–	број на примероци во FFT анализата
Q	–	концентрирана сила (товар)
q	–	рамномерно распределено оптоварување
RMS	–	ефективна вредност на сигналот
t	–	време
T	–	период на осцилирање
u	–	поместување
u_{max}	–	максимално поместување
v	–	брзина
x, y, z	–	координатни оски
Δf	–	фреквентна резолуција
Δt	–	временски чекор
δ	–	нагиб (деформација)
ε	–	релативна деформација
σ	–	напон
σ_{max}	–	максимален напон
ω	–	кружна фреквенција
ρ	–	густина на материјалот

1. ВОВЕД

Во последните години континуирано се воведуваат системи за подобрување и надградување на технологиите што се применуваат кај мостовските дигалки. Основната цел на овие системи е насочена кон зголемување на безбедноста, како и кон подобрување на ефикасноста и продуктивноста при нивната експлоатација. Во Р. Северна Македонија, моментално важечките закони и правилници ги дефинираат неопходните прегледи и инспекции кои мора да се спроведат пред пуштањето во употреба на дигалките, но и во текот на нивната редовна експлоатација. Овие нормативи претежно се фокусираат на услови на нормална работа, додека во одредени делови се истакнува потребата од вонреден технички преглед на дигалката, со кој се потврдува дека се отстранети недостатоците утврдени со првиот или периодичниот технички преглед, или постапка со која се потврдува дека се правилно избрани и заменети делови од дигалката (*Правилник за корисење на дигалки и индустриски транспортери*, 2009).

Од друга страна, во научно-истражувачката литература значително внимание се посветува на нумерички анализи за оптимизација на носечката конструкција, насочени кон намалување на масата, но истовремено задржување на потребната крутост и носивост (*Izurriaga Lerga*, 2011). Многубројни се и истражувањата кои опфаќаат нумерички анализи за одредување на напрегањата и деформациите на конструкциите на дигалките, при различни статички и динамички работни услови (*Јакимовска*, 2021), (*Gašić*, 2017), (*Ostrić*, 2009)). Целта на ваквите истражувања е проектирање на побезбедни и поефикасни дигалки, како и постигнување поекономични и оптимални решенија при проектирањето и експлоатацијата на дигалките. Значаен дел од истражувањата е насочен кон локалните критични зони поради високите концентрации на напони и можноста за иницирање пукнатини. Во поновите истражувања се става акцент и на потребата од процена на отказите во зависност од бројот на циклуси и староста на дигалката (*Sydorenko et al.*, 2025). Дополнително, дел од авторите истакнуваат дека безбедноста на дигалките мора да се разгледува и во услови на променливи експлоатациски режими, стареење на конструкцијата и појава на вонредни дејства (*Šostakov & Zelić*, 2014). Во таа насока, сè побројни се истражувањата поврзани со анализа на замор и одредување на надежноста засновани на експериментални испитувања и аналитички методологии за процена на оштетувања (*Давчев*, 2009), (*Moskvicheva & Chernyakova*, 2020)).

Прегледот на литературата покажува дека истражувачите сè почесто ги вклучуваат и модалните параметри како значаен индикатор за конструктивна стабилност и безбедност. Преку анализи по метод на конечни елементи (МКЕ) се врши процена на природните (сопствените) фреквенции и напрегањата во главните носечки елементи (*Vasileva Ljubotenska & Jakimovska*, 2025). Целта на овие истражувања е идентификација на потенцијални

резонантни состојби и подобрување на безбедноста на конструкцијата (Zhang, 2025). Ова е особено важно кај мостовските дигалки, бидејќи при поклопување на работните или сеизмичките побуди со сопствените фреквенции на конструкцијата може да дојде до значително зголемување на амплитудите на вибрациите, што може да предизвика повисоки напрегања, побрзо акумулирање на оштетувања од замор и зголемен ризик од конструктивен отказ.

Во последните децении, климатските промени се препознаваат како еден од клучните фактори што ја зголемуваат изложеноста на инфраструктурата и индустриските системи на екстремни природни настани. Зголемената зачестеност и интензитет на поплави, екстремни температури, свлечишта и други природни хазарди укажуваат дека инфраструктурата може да биде подложена на оптоварувања кои ги надминуваат првично предвидените гранични услови на оптоварување и напрегање. Во овој контекст, мостовските дигалки, како критични елементи на индустриските системи бараат посебно внимание во однос на нивната безбедност и функционалност под влијание на природни катастрофи ((Delforge et al., 2025), (UNDRR, 2015), (Krausmann et al., 2019)).

Паралелно, сè побројни се и истражувањата поврзани со сеизмичкото дејство и интеракцијата помеѓу мостовските дигалки и носечките конструкции на индустриските објекти. Аналитичките модели покажуваат дека дигалката може да се разгледува како дополнителен динамички подсистем кој има значајно влијание врз целокупниот сеизмички одговор на конструкцијата ((Belleri et al., 2017), (Ercolino et al., 2018), (Žižmond & Dolšek, 2016)). Овие истражувања укажуваат дека динамичкото и сеизмичкото однесување на дигалките претставува особено значајна област која мора да се земе предвид како при нивното проектирање, така и при нивната експлоатација. Во таа насока, се поставува прашањето дали постоечката нормативна рамка обезбедува соодветни упатства за сеизмичка анализа и проверка на мостовските дигалки. Па така, иако Eurocode 8 (EN 1998) (EC8) дефинира детални и систематизирани правила за сеизмичко проектирање на згради и одредени типови на градежни конструкции, анализата на неговите одредби покажува дека стандардот не содржи општа, ниту пак специфична методологија за сеизмичка анализа и проверка на дигалки. Стандардот примарно се фокусира на носечките конструкции и нивната интеракција со подлогата, додека дигалките како самостојни технички целини не се експлицитно опфатени. Како резултат на тоа, во случаите кога дигалките се поставени во индустриски објекти или се во склоп со носечките конструкции на индустрискиот објект, EC8 може да се примени само индиректно, односно за проверка на конструктивните елементи и темелите, но не и за сеизмичка процена на самата дигалка како механички самостоен систем. Па така, мостовските дигалки кои се интегрирани во индустриските објекти, не се директно и систематски опфатени со постоечките одредби на EC8. Од друга страна, постојните национални правилници и закони во Р. Северна Македонија не предвидуваат, ниту пак обезбедуваат јасна и специфична методологија за сеизмичка проверка при конструирање на дигалките, како и за процена на нивната состојба по природни катастрофи, како на пр.

земјотреси ((Закон за техничка инспекција, 2008), (Македонски стандарден институциј, 2015)). Овој нормативен јаз добива особено значење доколку се има предвид дека Балканскиот регион припаѓа на сеизмички најактивните подрачја во Европа, при што само на територијата на Р. Северна Македонија во периодот од 2010 до 2021 година се регистрирани над 15000 земјотреси ((Droghreshka & Najdovska, 2021), (Faculty of Natural Sciences and Mathematics, UKIM)).

Претходно цитираните истражувања укажуваат дека мостовските дигалки можат да покажат изразено нелинеарно однесување при сеизмичко дејство поради нивната специфична конструктивна конфигурација и присуството на подвижни маси, што дополнително го зголемува ризикот од несоодветна процена на нивната состојба во вакви услови.

Токму овој недостиг во постоечката научна и нормативна рамка претставува основна мотивација за изборот на тема за овој докторски труд. Со особено внимание е разгледуван главниот носач како елемент кој го презема најголемиот дел од вертикалните и хоризонталните оптоварувања, вклучително сопствената тежина, товарот, динамичките ефекти од движењето на количката, кочењето и забрзувањето, како и сеизмичките дејства (Vasileva Ljubotenska et. al. 2025). Во таа насока, истражувањето во овој докторски труд овозможува објективна процена на последиците од сеизмичкото дејство врз дигалките како и соодветна основа за развој на методологија која ќе придонесе за процена на состојбата на мостовските дигалки кои се во експлоатација, и за донесување одлуки за нивната понатамошна безбедна експлоатација по изложеност на сеизмичко дејство.

1.1. Предмет на истражувањето

Во последните години забележлив е значителен напредок во методите за анализа и следење на сложени инженерски системи изложени на динамички и сеизмички дејства. Развојот на напредни нумерички модели и експериментални техники за модална идентификација создаваат нови можности за подетално разбирање на однесувањето на конструкциите во реални услови на експлоатација ((Alshoaibi et al., 2021); (Lee & Lu, 2022)). Овие пристапи овозможуваат собирање, обработка и анализа на податоци од нумеричките симулации, со што се зголемува веродостојноста на проценките за состојбата на конструкциите.

Во рамките на овој современ пристап, сè поголемо значење добива поврзувањето на МКЕ, со цел конструкцијата реално да се моделира, симулира и анализира ((Hectors et al., 2022); (Pástor et al., 2022); (Sedmak, 2024)). На тој начин, се овозможува анализа на конструкцијата во периодот на конструирање, експлоатација, но се овозможува и предвидување на потенцијални промени во неговите динамички карактеристики како резултат на оштетувања или сеизмички дејства ((Belleri et al., 2017), (Delforge et al., 2025)).

Согласно прегледот на досегашната литература, интегрираната примена на нумерички симулации и експерименталните верификации за процена на состојбата на мостовските дигалки по сеизмичко дејство нема доволен број на продлабочени истражувања во оваа

област. Особено недостасува методологија која би ги поврзала резултатите од сеизмичката анализа, анализа на сопствени фреквенции и облици на вибрирање (модална анализа) за идентификација и процената на оштетувања во еден интегриран пристап.

Оттука произлегува потребата од проучување и анализа дали ваквата интегрирана методологија може да обезбеди подобро разбирање на динамичкото однесување на системите, да овозможи пообјективна процена на состојбите по сеизмичко дејство, како и да придонесе за поефикасно планирање на одржувањето и понатамошната безбедна експлоатација на мостовските дигалки.

Врз основа на претходно изнесеното, истражувањето е насочено кон идентификација на критичните конструктивни зони и фактори кои влијаат врз состојбата на мостовската дигалка, со посебен акцент на однесувањето на конструкцијата под дејство на екстремни динамички влијанија предизвикани од земјотреси.

Во овој докторски труд главниот носач на двогредна мостовска дигалка се разгледува како примарен носечки елемент што ги презема најзначајните статички и динамички и оптоварувања при различни експлоатациони состојби. Резултатите добиени од нумеричките анализи и експерименталната верификација претставуваат основа за процена на состојбата на елементите на мостовската дигалка по сеизмичко дејство, при што се дефинираат соодветни гранични состојби и критериуми за оценување на безбедноста.

Во таа насока, е составена алатка со кориснички интерфејс, која овозможува обработка на резултатите од нумеричките анализи по МКЕ и проценување на состојбата на дигалката. Ваквиот пристап нуди објективна и транспарентна процена на состојбата на дигалката по сеизмичко дејство.

Со тоа, истражувањето ќе придонесе кон проширување на научните сознанија за сеизмичкото однесување на мостовските дигалки, особено во сеизмички активни региони, и ќе создаде основа за развој на понапредни инженерски пристапи за нивно проектирање, оценување, инспекција и одржување.

1.2. Цели на истражувањето

Целите на овој докторски труд се:

- Да се добијат продлабочени знаења во областа на сеизмичкото однесување на мостовските дигалки, со посебен фокус на главниот носач како примарен носечки елемент и неговата динамичка реакција на сеизмичко дејство.
- Да се проучат, селектираат и применат современи нумерички методи (анализа по МКЕ, модална анализа) со цел анализа на нивното влијание врз процената на состојбата на мостовската дигалка по сеизмичко дејство.
- Да се развие и примени интегриран нумерички модел во софтверот *ANSYS* за статичка анализа, модална анализа и анализа на временски зависно однесување

- на системот под дејство на променливо оптоварување на главниот носач под реални сеизмички записи.
- Да се изврши експериментална верификација на нумеричкиот модел преку модални испитувања на реална мостовска дигалка, со цел споредба и калибрација на резултатите добиени со симулации по МКЕ.
 - Да се истражи влијанието на карактеристиките на земјотресниот запис врз динамичкиот одговор и потенцијалните оштетувања на главниот носач.
 - Да се развие практично применлива методологија која може да се користи во фазата на експлоатација на дигалката.
 - Да се имплементира *Matlab*-алатка за обработка на резултатите од софтверот *ANSYS*, процена на состојбата на главниот носач, како и поддршка при донесување на одлуки за понатамошна употреба на дигалката.

1.3. Хипотези

Имајќи ги предвид досегашните истражувања опфатени во овој предлог за докторски труд, можат да се издвојат следните хипотези:

Хипотеза 1: Интегрираната примена на нумерички модели по МКЕ и експерименталната модална анализа обезбедуваат попрецизна и објективна процена на сеизмичкото однесување на елементите кај мостовските дигалки во споредба со досегашните пристапи.

Хипотеза 2: Нумеричкиот модел на главниот носач развиен во софтверот *ANSYS* со доволна точност го репродуцира реалното динамичко однесување на реалната мостовска дигалка, при што неговата експериментална верификација значајно ја подобрува предиктивната процена на состојбата на конструкцијата.

Хипотеза 3: Карактеристиките на земјотресниот запис, вклучувајќи го времетраењето, фреквентната содржина, насоката и максималното забрзување на подлогата имаат суштинско влијание врз динамичкиот одговор и потенцијалните оштетувања на елементите кај дигалката.

Хипотеза 4: Интегрираната методологија базирана на анализа по МКЕ, експерименталната верификација и обработката на експерименталните и нумеричките податоци претставува практична водилка за процена на состојбата на мостовските дигалки во експлоатација по сеизмичко дејство.

1.4. Тек и методологија на истражувањето во докторската теза

За јасно прикажување на текот и методолошкиот пристап на истражувањето, целокупниот процес е структуриран во повеќе последователни фази, кои логички се надоврзуваат една на друга и водат од идентификација на истражувачкиот јаз до развој на практична алатка за инженерска процена.

1.4.1. ФАЗА 1 – Идентификација на истражувачкиот јаз

Првиот чекор во истражувањето е утврдување на истражувачкиот јаз во областа на мостовските дигалки. Во рамките на овој преглед се издвоени вкупно 618 релевантни научни и стручни дела од областа на транспортната механизација. Анализираниот литература опфаќа научни трудови објавени во меѓународни списанија и конференциски зборници, како и релевантни стручни списанија, магистерски трудови и докторски дисертации. Целта на ваквиот широк преглед е да се добие јасна слика за досегашните истражувачки активности и доминантните насоки во областа на транспортната механизација, како во нашата држава, така и во поширокиот регион. Во таа насока, прегледот на литературата е насочен кон одговор на следниве истражувачки прашања:

1. Што досега е истражувано во областа на транспортната механизација на национално ниво и во соседните држави?
2. Кои аспекти и сегменти од транспортната механизација биле најчесто во фокусот на досегашните научни истражувања?

За поголема прегледност, анализираниот литература е систематизирана и класифицирана според доминантната област на истражување, како што е прикажано во Табела бр.1.1.

Табела бр. 1.1 Преглед на литература од транспортна механизација

	Област на истражување	Број на трудови	Предмет на истражувањето
1	Општа транспортна механизација	≈131	Проектирање, експлоатација, класификација на машини
2	Трудови со поширок/интердисциплинарен карактер	≈234	Трудови поврзани со транспортната механизација, без јасно изразен доминантен истражувачки фокус
3	Машини за цикличен транспорт (општо)	≈5	Механизми, погонски системи, одржување
4	Дигалки – општ преглед	≈227	Типови на дигалки, носивост, регулативи
5	Мостовски дигалки	≈4	Статичка анализа, конструктивни решенија
6	Динамичко однесување на дигалки	≈10	Работни динамики, подвижни маси
7	Замор и долготрајна експлоатација	≈4	Заморен век
8	Надежност	≈3	Процена на надежност

Анализата на добиените резултати и одговорите на поставените прашања овозможи идентификација на главните истражувачки трендови и тематски насоки во областа. Врз

основа на ваквите согледувања, дигалките се издвоени како посебна група машини за цикличен транспорт со значајна и широка примена во индустриските постројки. Нивната застапеност во различни индустриски гранки, разновидноста на конструктивни решенија и комплексниот начин на работа ги прават особено погодни за подетално научно истражување.

Во рамките на групата дигалки, мостовските дигалки се идентификувани како најрепрезентативен и најчесто применуван тип во индустриската практика (Јакимовска, 2021). Поради нивната конструктивна конфигурација, големите распони и значајната улога што ја имаат во рамките на производните процеси, мостовските дигалки претставуваат соодветен и релевантен предмет на анализа во рамките на овој докторски труд.

Дополнително, во рамките на прегледот на литературата се разгледани и надворешните влијанија врз мостовските дигалки, вклучувајќи ги и ефектите од климатските промени и поврзаните природни катастрофи, како што се поплави, свлечишта, шумски пожари и земјотреси. Во тој контекст, посебно внимание е посветено на влијанието на екстремните дејства врз индустриските објекти и машините, при што мостовските дигалки се разгледуваат како составен дел од индустриските системи и како конструкции чија безбедност може значително да биде нарушена под вакви влијанија.

Во рамките на овие истражувања е согледано дека, иако постојат одредени анализи за различни видови екстремни оптоварувања, сеизмичкото дејство претставува еден од најкритичните и најмалку обработени аспекти, особено кога станува збор за мостовските дигалки. Анализата на литературата, особено за подрачјето на Балканот, покажа дека постои значителен недостиг од истражувања кои се однесуваат на однесувањето на мостовските дигалки по сеизмичко дејство, како и недостаток на систематски пристапи за постсеизмичка процена на нивната конструктивна состојба.

По одредувањето на мостовските дигалки како целна група на докторската теза, преку примена на хибриден метод кој комбинира метод на концептуално мапирање на научната литература (*анг. Conceptual Mapping Method*) и анализа на јазот во стандардите и регулативите (*анг. Standards-Gap Analysis*), е утврден истражувачкиот јаз во делот на мостовските дигалки. Ваквиот пристап овозможи паралелна и комплементарна анализа на научните истражувања и нормативната рамка, со цел да се утврди нивната меѓусебна усогласеност и покриеност во однос на реалните експлоатациони и безбедносни ризици кај мостовските дигалки.

Во рамките на методот на концептуално мапирање е спроведена систематска анализа на релевантната научна литература, при што се дефинирани клучни зборови и нивната улога во процесот на анализа, како што е прикажано во Табела бр. 1.2. Овој пристап овозможи структурирано разгледување на различните аспекти на истражувањата, како што се безбедноста, инспекцијата, динамичкото и сеизмичкото однесување, како и однесувањето под екстремни оптоварувања.

Табела бр. 1.2 Клучни зборови и нивнаа улога во анализата

Клучен збор	Фокус на пребарувањето	Улога во концептуалното мапирање
Мостовски дигалки	Идентификација на трудови кои директно се однесуваат на овој тип дигалки	Дефинирање на основата на литературата
Безбедност при управување со мостовски дигалки	Анализа на аспекти поврзани со безбедна експлоатација и работа	Покажува дека доминантниот фокус е на редовни работни услови
Инспекција на мостовски дигалки	Истражувања поврзани со контрола на состојбата и одржување	Укажува на нормативен и процедурален пристап кон оценување на состојбата
Конструктивно однесување на мостовски дигалки	Анализа на носечката конструкција и поединечни елементи	Овозможува издвојување на главниот носач како критичен конструктивен елемент
Динамичко однесување на мостовски дигалки	Истражувања под променливи и временски зависни оптоварувања	Покажува ограничена поврзаност со практична процена на состојбата
Сеизмичко однесување на мостовски дигалки	Анализа на влијанието на сеизмички дејства	Укажува на мал број трудови со фокус на сеизмички дејства
Оштетувања и хаварии кај мостовски дигалки	Истражувања поврзани со откази кај мостовските дигалки при природни катастрофи	Делумно ги опфаќа последиците од природни катастрофи
Ненадејни оптоварувања при природни катастрофи кај мостовските дигалки	Однесување на дигалката по ненадејни оптоварувања при природни катастрофи	Јасно го истакнува недостигот од систематски истражувања

Паралелно со анализата на научната литература е спроведена и анализа на важечките стандарди и регулативи, со цел да се оцени нивната покриеност во однос на различните аспекти на безбедноста на мостовските дигалки. Прегледот на овие нормативни документи е даден во Табела бр. 1.3. Од Табела бр. 1.3 јасно се согледува дека постојните стандарди се

првенствено насочени кон редовна експлоатација и периодична инспекција, додека влијанието на екстремни дејства, особено земјотресите, како и постсеизмичката процена на конструктивната состојба, не се соодветно опфатени.

Врз основа на наведеното, е утврден јасен истражувачки јаз кој се однесува на недостаток на интегриран пристап за анализа и процена на состојбата на мостовските дигалки по сеизмичко дејство. Овој недостиг претставува основна мотивација за развој на методологија која ќе ги поврзе нумеричките анализи, експерименталната верификација и практичната инженерска процена на состојбата, со цел обезбедување на сигурна основа за донесување одлуки во реални експлоатациони услови.

Табела бр. 1.3 Преглед на важечките нормативни документи во однос на сеизмичката и постсеизмичката безбедност на мостовските дигалки

Аспект на безбедност и анализа	Опфат во важечките стандарди и регулативи	Кратко објаснување
Редовна експлоатација на мостовски дигалки	✓	Детално дефинирани барања за нормални работни услови, управување и користење
Периодична техничка инспекција	✓	Пропишани интервали, визуелни и функционални проверки
Статичка носивост и проверка на елементи	✓	Проверки на носивост и основни напрегања при номинални оптоварувања
Динамички ефекти при нормална работа	Делумно	Индиректно земени предвид преку динамички коефициенти
Влијание на екстремни динамички дејства при природни катастрофи	✗	Не се разгледуваат екстремни временски зависни дејства
Сеизмичка анализа на мостовски дигалки	✗	Не се разгледуваат временски зависни дејства при природни катастрофи
Постсеизмичка процена на конструктивната состојба	✗	Не се дефинирани процедури за оценување по сеизмичко дејство
Критериуми за понатамошна експлоатација по сеизмичко дејство	✗	Не се дефинирани процедури за понатамошна експлоатација

Како што беше веќе потенцирано, нормативниот јаз добива посебна важност доколку се има превид дека Балканскиот регион припаѓа на најсеизмички активните области во Европа, во рамките на јужноевропскиот и медитеранскиот сеизмички појас. Во вакви услови, индустриските конструкции, вклучително и мостовските дигалки, реално можат да бидат изложени на сеизмичко дејство за време на нивниот работен век. Отсуството на јасни насоки за нивното однесување и процена по сеизмичко дејство претставува значаен ризик од аспект на безбедноста при користење на мостовските дигалки.

Со примена на хибридниот пристап е утврдено дека постои јасен недостиг од интегрирана методологија која ги поврзува нумеричките анализи со процената на постсеизмичката состојба и практични препораки за инспекција и понатамошна експлоатација на мостовските дигалки по сеизмичко дејство.

1.4.2. ФАЗА 2 – Експериментални мерења

Во оваа фаза се извршени експериментални мерења во Институтот за земјотресно инженерство и инженерска сеизмологија (ИЗИИС) во одделот за динамички испитувања и информатика. Експерименталните мерења се извршени на реална, постоечка мостовска дигалка, со цел верификација и калибрација на нумеричкиот модел. Експерименталните мерења се базираат на регистрација на динамичкиот одговор на конструкцијата во временски домен, преку мерење на забрзувањата во карактеристични точки на главниот носач.

Врз основа на измерениот динамички одговор, со примена на анализа во фреквентен домен, преку брза Фуријеова трансформација (*англ. Fast Fourier Transform (FFT)*), се врши трансформација на сигналот и се идентификуваат сопствените фреквенции и другите динамички карактеристики на системот. На овој начин, експерименталните мерења овозможуваат индиректно определување на модалните својства на конструкцијата.

Добиените резултати се користат за споредба со нумеричките резултати, при што се врши калибрација на моделот преку прилагодување на параметрите (крутост, маса, гранични услови), со цел да се постигне реалистично прикажување на однесувањето на конструкцијата. Со тоа се обезбедува веродостојност на нумеричкиот модел, кој понатаму се користи за детални анализи.

1.4.3. ФАЗА 3 – Нумеричко моделирање и верификација на мостовската дигалка

Во оваа фаза е развиен детален нумерички модел на мостовската дигалка во софтверскиот пакет ANSYS, базиран на МКЕ. Моделот ја опфаќа геометријата, материјалните својства и карактеристиките на конструктивните елементи, со посебен акцент на главниот носач како критичен носечки елемент.

Нумеричките анализи опфаќаат:

- статичка анализа,
- квазистатичка анализа,

- модална анализа
- динамичка анализа со временска историја.

Во рамките на статичката анализа се врши распределба на напрегањата и деформациите при различни работни режими и позиции на количката, со цел идентификација на критични зони. Квазистатичката анализа овозможува земање предвид на ефектите од работната динамика преку примена на динамички коефициенти.

Модалната анализа се користи за определување на природните фреквенции и облиците на вибрации, со што се добива увид во динамичките својства на конструкцијата.

Динамичката анализа со временска историја се применува за определување на одговорот на конструкцијата при сеизмичко дејство, при што се разгледува промената на сеизмичкото забрзување во текот на времето.

Верификацијата на моделот се врши преку споредба со резултатите од експерименталните мерења, односно со споредба на динамичкиот одговор и идентификуваните фреквенции, со што се потврдува неговата веродостојност.

1.4.4. ФАЗА 4 – Динамичка анализа

По верификацијата на нумеричкиот модел, спроведена е динамичка анализа на временски променливо оптоварување (анг. *Transient analysis*) во софтверот ANSYS, со примена на реални земјотресни записи.

Целта на оваа анализа е да се оцени временскиот одговор на конструкцијата по сеизмичко дејство и да се идентификуваат критичните максимални вредности на поместувањата, брзините, забрзувањата, напрегањата и деформациите.

Во рамките на анализата се следи:

- динамичкиот одговор на конструкцијата во временски домен,
- однесувањето на главниот носач и другите елементи,
- распределбата на напрегањата и деформациите во критичните точки.

Дополнително, се анализира интеракцијата помеѓу карактеристиките на земјотресниот запис (фреквенциски состав, амплитуда, траење) и динамичките својства на конструкцијата. Ова е особено значајно бидејќи поклопувањето на фреквенциите може да доведе до појава на резонантни ефекти и зголемен одговор.

1.4.5. ФАЗА 5 – Одредување на индикатори

Во оваа фаза, резултатите добиени од нумеричките анализи се трансформираат во репрезентативни индикатори кои овозможуваат поедноставена и јасна интерпретација на однесувањето на конструкцијата.

Индикаторите претставуваат параметри кои ја опишуваат:

- динамичката реакција на системот,
- напонско-деформациската состојба,
- промените во однесувањето на конструкцијата по сеизмичко дејство.

Со нивна примена, сложениот динамички одговор се сведува на мерливи и споредливи величини кои можат да се користат за процена на состојбата.

Во оваа фаза се врши:

- избор на релевантни индикатори,
- нивна пресметка,
- дефинирање на гранични вредности за нивна интерпретација.

Овие индикатори претставуваат основа за донесување инженерска одлука.

1.4.6. ФАЗА 6 – Изработка на *Matlab*-алатка

Во последната фаза, добиените резултати од експерименталните и нумеричките анализи, како и дефинираните индикатори, се интегрираат во *Matlab*-базирана алатка за автоматизирана процена на состојбата на мостовската дигалка.

Алатката овозможува:

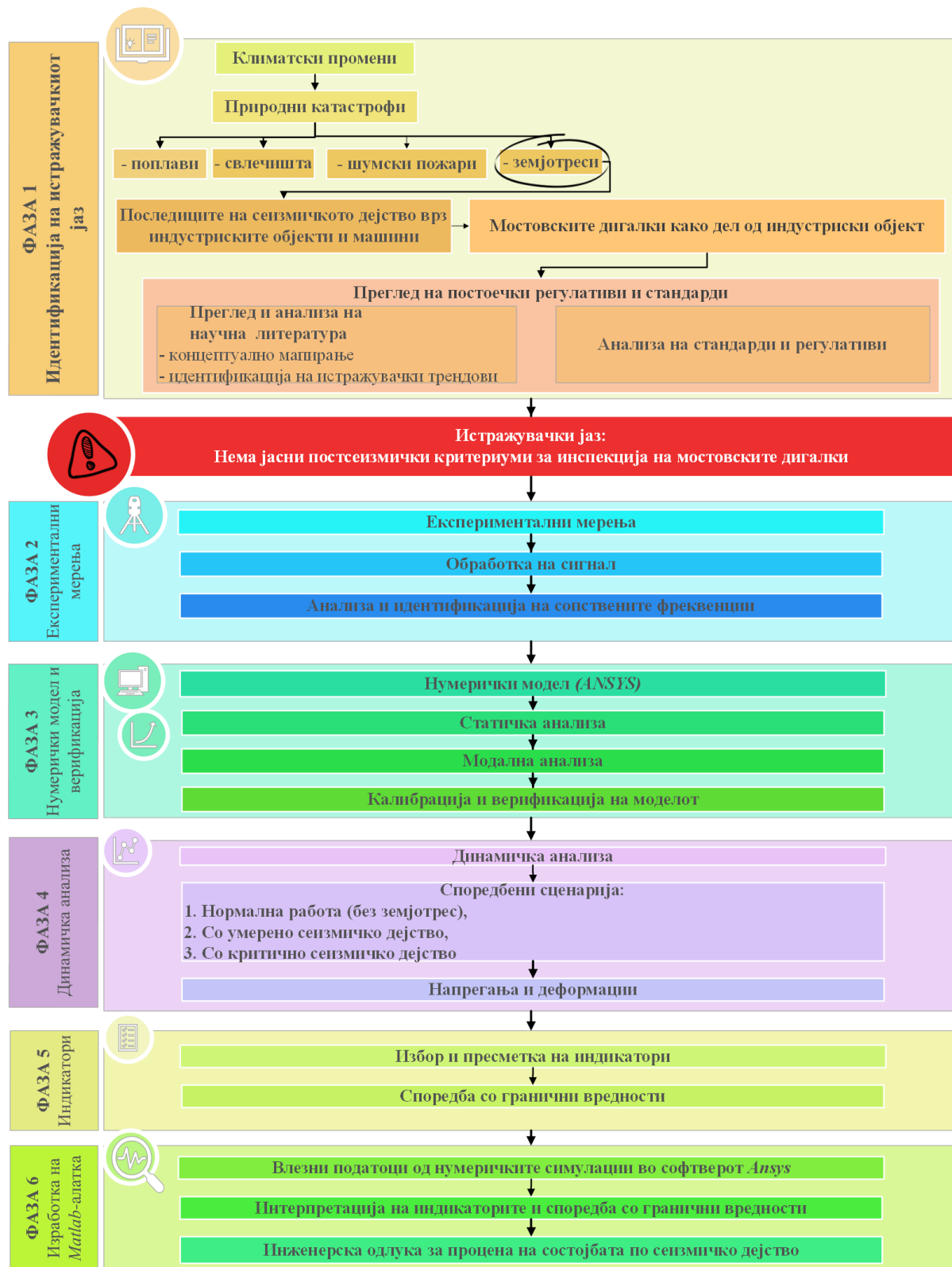
- внесување на податоци од анализите,
- автоматска пресметка на индикаторите,
- нивна споредба со гранични вредности,
- и генерирање на конечна процена на состојбата.

Врз основа на резултатите, се врши класификација на состојбата и се овозможува поддршка при инженерско одлучување во однос на:

- понатамошната експлоатација,
- потребата од дополнителни проверки,
- или интервенција на конструкцијата.

Со тоа, развиената *Matlab*-алатка претставува практичен инструмент кој ги поврзува резултатите од анализите со реалната инженерска примена и овозможува брза и објективна процена на состојбата по сеизмичко дејство.

Со цел појасно да се прикаже текот и редоследот на спроведените фази, на слика 1.1 е даден блок-дијаграм на методологијата на истражувањето.



Слика бр. 1.1 Тек на докторскиот труд

1.5. Значење и придобивки од истражувањето

Истражувањето што се спроведува во рамките на овој докторски труд има научна, инженерска и практична релевантност, особено при изложеност на мостовските дигалки на сеизмичко дејство. Основниот придонес на трудот произлегува од развојот и примената на интегрирана методологија која ги обединува аналитичките пресметки и нумеричките анализи во еден систематизиран пристап за процена на состојбата на елементите на дигалката по сеизмичко дејство.

Од научен аспект, истражувањето придонесува кон проширување на постојните сознанија за однесувањето на мостовските дигалки под екстремни динамички влијанија, со посебен фокус на главниот носач како примарен конструктивен елемент. Посебна вредност на трудот претставува развиената интегрирана методологија која врши поврзување на статичките и динамичките нумерички анализи со процената на состојбата во една целина. Овој пристап овозможува јасен и структуриран премин од анализа на конструктивното однесување кон објективна процена на безбедноста и поддршка при донесување инженерски одлуки, што досега не е истражувано за мостовските дигалки, особено во состојба на постсеизмичко дејство.

Од практичен аспект, резултатите од истражувањето имаат директна примена при инспекција на мостовските дигалки по сеизмичко дејство и процена на нивната понатамошна експлоатација. Развиената *Matlab*-алатка со кориснички интерфејс овозможува транспарентна и стандардизирана обработка на резултатите, што ја направи методологијата применлива и за други мостовски дигалки, со соодветна адаптација на влезните податоци. На овој начин, истражувањето претставува конкретна и практично употреблива поддршка за инженерите и инспекцијата.

Од друга страна истражувањето укажува и на постоењето на нормативен јаз во однос на сеизмичката и постсеизмичката процена на мостовските дигалки. Во литературата е укажано на недостигот од консолидирани методологии и алатки за анализа на ризикот поврзан со технолошки несреќи предизвикани од природни катастрофи, како и од потребата за периодично ажурирање на анализите на ризик врз основа на нови климатски и сеизмички податоци ((*IPCC*, 2021); (*UNDRR*, 2020)). Поаѓајќи од фактот дека Р. Северна Македонија и поширокиот Балкански регион припаѓаат на сеизмички активни подрачја, предложениот пристап може да претставува основа за развој на идни препораки, насоки и евентуална надградба на постоечките стандарди и правилници.

Истражувањето резултираше со развој и валидација на нумерички модел по МКЕ на елементите на мостовската дигалка, при што е постигната добра согласност помеѓу експерименталните мерења и нумеричките резултати. Дополнително, извршена е квантитативна процена на влијанието на сеизмичкото дејство врз конструктивната состојба на системот, преку анализа на динамичкиот одговор, напонско-деформациската состојба и релевантните индикатори. Во рамките на истражувањето е развиена и практично

применлива алатка за инженерска процена на состојбата, базирана на систематска обработка и интерпретација на повеќе индикатори. Оваа алатка овозможува брза и објективна процена на состојбата на дигалката по сеизмичко дејство, преку јасно дефинирана логика на одлучување. Понатаму, предложениот пристап придонесува кон подобро управување со ризикот кај индустриските системи во услови на природни катастрофи, вклучително и сценарија на технолошки несреќи предизвикани од нив. Ова се постигнува преку систематска анализа и визуелизација на релевантните индикатори, што овозможува навремено препознавање на потенцијални оштетувања и донесување соодветни инженерски одлуки. Со тоа, докторскиот труд дава значаен придонес кон унапредување на пристапот кон безбедноста и управувањето со ризик кај мостовските дигалки, нудејќи интегрирана методологија применлива во инженерската практика.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 1

- Давчев, Т. (2009) *Надежност и одржување на техничките системи*, НИП Студентски збор, Скопје
- Закон за техничка инспекција. (2008). Службен весник на Република Македонија, бр 88/2008.
- Јакимовска, К. (2021). *Машини за цикличен транспорт*, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Машински факултет-Скопје.
- Јанчевски, Ј. (2003). *Транспортни уреди*, Машински факултет – Скопје.
- Македонски стандарден институт. (2015). *МКС EN 13001-1:2015 – Кранови – Општи принципи за проектирање*. Скопје: МСИ.
- Правилник за користење на дигалки и индустриски транспортери. (2009). Службен весник на Република Македонија, бр. 32/2009.
- Alshoaibi, A. M., & Fageehi, Y. A. (2022). 3D modelling of fatigue crack growth and life predictions using ANSYS. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(4), 101636.
- Alshoaibi, A.; Ghazwani, M.; Hakami, M. Fatigue life and reliability assessment of metal structures. *Eng. Solid Mech.* 2021,9, 13–22.
- Atkinson, G. M. (2015). Ground-motion prediction equation for small- to moderate-magnitude events at short hypocentral distances, with application to induced-seismicity hazards. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 981–992. <https://doi.org/10.1785/0120140147>.
- Belleri, A., Labò, S., Marini, A., & Riva, P. (2017). The influence of overhead cranes in the seismic performance of industrial buildings. *Frontiers in Built Environment*, 3, 64.
- Delforge, D., Wathelet, V., Below, R., Lanfredi Sofia, C., Tonnelier, M., van Loenhout, J. A. F., & Speybroeck, N. (2025). EM-DAT: The Emergency Events Database. *Institute of Health and Society (IRSS), UCLouvain*.
- Drogheshka, K., & Najdovska, J. (2021, January). Seismicity in the republic of north macedonia during the period 2010-2020. In *Proceedings of the Fourth Congress of the Macedonian Geologists (No. INIS-MK--210001, pp. 65-71)*.
- Earthquake List. (n.d.). Earthquakes near North Macedonia. <https://earthquakelist.org/north-macedonia/> (приспаяено на: 04.02.2026)
- EN 1998-1: Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. *European Committee for Standardization (CEN)*.
- Ercolino, M., Petrone, C., Magliulo, G., & Manfredi, G. (2018). Seismic design of single-story precast structures for P-Δ effects. *ACI Structural Journal*, 115(4), 943–955. <https://doi.org/10.14359/51701915>
- Gašić, V. *Osnove metalnih konstrukcija u mašingradnji*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2017
- Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR 2015). *United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva*.

- Hectors, K., Chaudhuri, S., & De Waele, W. (2022). Fracture mechanics and hot spot stress-based fatigue life calculation: case study for a crane runway girder. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 45(9), 2662-2675.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Summary for policymakers. Working Group II contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Izurriaga Lerga, J. (2011). *Modelling and simulation research on the metal structure of bridge cranes*.
- Krausmann, E., Girgin, S., & Necci, A. (2019). Natural hazard impacts on industry and critical infrastructure: Natech risk drivers and risk management performance indicators.
- Lee, Y. F., & Lu, Y. (2022). Advanced numerical simulations considering crack orientation for fatigue damage quantification using nonlinear guided waves. *Ultrasonics*, 124, 106738.
- Mack, J. (2015, June). Michigan earthquake causes minor building damage near Galesburg epicenter. MLive
- Milevski, I. (2016a). Natural disasters in the Republic of Macedonia, with particular reference to the flood and the earthquake in Skopje this year. In *Proceedings of the event "November – Month of Science" (Book 1, pp. 21–37). Skopje. (In Macedonian)*.
- Milevski, I. (2017). Natural hazards in the Republic of Macedonia with special emphasis on flood and earthquake in Skopje in 2016. *Geographical Reviews (Географски прегледи)*, 50, 53–69.
- Moskvicheva, L. F., & Chernyakova, N. A. (2020). Research of Strength, Service Life and Reliability of Crane Metal Structures: Overview and Results. Journal of Siberian Federal University. *Engineering & Technologies*, 13(8), 933-955.
- Ostrić, D. (2009) *Dizalice*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.
- Pástor, M., Lengvarský, P., Hagara, M., & Kuřka, J. (2022). Experimental investigation of the fatigue life of a bridge crane girder using SN method. *Applied Sciences*, 12(20), 10319.
- Quinn, M. C. L., & Taylor, O.-D. S. (2014). Hazard topography: A visual approach for identifying critical failure combinations for infrastructure. *Natural Hazards Review*, 15(4), 04014012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000135](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000135).
- Sedmak, A. (2024). Fatigue crack growth simulation by extended finite element method: A review of case studies. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 47(6), 1819-1855.
- Šostakov, R., Zelić, A.: Bezbednost u radu sa dizalicama i regulative u Srbiji (Usvoen Pravilnik u bezbednosti mašina- šta dalje?), Zbornik radova sa 11. nacionalne konferencija sa međunarodni, učešćem „Unapređenje sistema zaštite na radu”, Savić, S., Spasić, D. (Eds), pp.46-55, Prolom Banja, FTN, Novi Sad(2014).

- Sydorenko, M., Kononov, V., & Kravchenko, E. (2025). Constructive methods for increasing the load-bearing capacity of connection joints between main and end girders of bridge cranes. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, (2). <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2025-2-8>
- Taylor, O.-D. S., Lester, A. P., & Lee, T. A. (2015). Hazard and risk potential of unconventional hydrocarbon development-induced seismicity within the central United States. *Natural Hazards Review*, 16(4), 04015008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.00001](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.00001)
- Taylor, O.-D. S., Lester, A. P., & Lee, T. A. (2015). Unconventional hydrocarbon development hazards within the central United States: Report 1: Overview and potential risk to infrastructure (ERDC/GSL TR-15-26). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory.
- Taylor, O.-D. S., Lester, A. P., Lee III, T. A., & McKenna, M. H. (2018). Can repetitive small magnitude-induced seismic events actually cause damage? *Advances in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2018/9681765>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2020). *Hazard definition and classification review: Technical report*. United Nations.
- University Ss. Cyril and Methodius, Faculty of Natural Sciences and Mathematics. (n.d.). Tectonic. Retrieved February 12, 2026, from <https://seismobsko.pmf.ukim.edu.mk/tectonic> (приспиајено на: 09.02.2026)
- Vasileva Ljubotenska, A., & Jakimovska, K. (2025). Failure mode and effect analysis-based risk assessment of a bridge crane main girder. *Mechanical Engineering – Scientific Journal*, 43(2), 111–119. <https://doi.org/10.55302/MESJ25432111v1j>
- Vasileva Ljubotenska, A., Jakimovska, K., Bogdanovic, A., & Edip, K. (2026). Numerical seismic analysis of the main girder of a double-girder bridge crane. *Scientific Journal of Civil Engineering*, 14(2)
- Zhang, W. (2025). Structural design and finite element analysis of a bridge crane main beam. *Journal of Physics: Conference Series*, 3043(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3043/1/012035>
- Žižmond, J., & Dolšek, M. (2016). Evaluation of factors influencing the earthquake-resistant design of reinforced concrete frames according to Eurocode 8. *Structure and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1117112>.

2. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА

Во современата индустрија, реализацијата на производните и логистичките процеси во голема мера зависи од примената на соодветни транспортни системи. Во таа насока, значајна улога имаат машините за цикличен транспорт, кои се користат за преместување и дигање на товари во различни фази од производството. За разлика од машините за континуиран транспорт, кај кои материјалот се движи непрекинато, кај машините за цикличен транспорт процесот се одвива во циклуси (Јакимовска, 2021).

Во групата машини за цикличен транспорт влегуваат широк спектар на уреди и механизми, при што нивната заедничка карактеристика е дека транспортот на товарот се реализира преку повторување на ист работен и празен циклус. Работниот циклус, по правило, ги вклучува фазите на прифаќање на товарот, негово дигање, хоризонтално и/или вертикално преместување, како и спуштање и ослободување на товарот на предвидената позиција. Поради ваквиот начин на работа, овие машини се особено погодни за примена во индустриски хали, складишта, монтажни линии и други објекти каде што е потребно ракување со товари (Јанчевски, 2003).

Во рамките на машините за цикличен транспорт, посебно значајно место заземаат дигалките, кои претставуваат најкомплексни и најбројни машини од оваа група. Нивната примена е незаменлива во случаи кога се бара дигање и преместување на тешки и габаритни товари, со високо ниво на безбедност и прецизност. Поради тоа, дигалките се предмет на интензивни истражувања од аспект на конструкцијата, напрегањата, експлоатацијата и работниот век (Ostrić, 2009).

2.1. Преглед на релевантна литература од областа на мостовски дигалки

При прегледот на литературата, голем дел од истражувањата се насочени кон носечката конструкција на мостовските дигалки, при што во повеќето главниот носач се разгледува како клучен елемент. Во такви трудови најчесто се применува 3D моделирање и симулации за да се определат напрегањата при различни работни режими. Се анализираат напрегањата во карактеристични точки, деформации и сопствени фреквенции, а често се прави и споредба со модифицирани конструкции, односно оптимизација на носечката конструкција, со цел намалување на масата при задржување на потребната крутост и носивост (J. Lerga, 2011).

Од друга страна, дел од истражувањата се фокусираат на локалните критични зони, односно на споевите и јазлите помеѓу главниот носач и челните носачи. Овие зони се препознаваат како чувствителни поради концентрации на напоните и можност за иницирање пукнатини. Во такви трудови се применува МКЕ со понапредни пристапи, а како резултат се предлагаат методи за подобрување на конструкцијата. Дополнително, се развиваат и модели

за процена на веројатноста за појави на откази во зависност од параметрите на дигалката, како што се: број на циклуси и старост на дигалката (*Michael Sydorenko, Vitaly Kononov, Evhen Kravchenko, 2025*).

Литературата содржи и трудови кои даваат поширок преглед на проблемите поврзани со откази кај мостовските дигалки, во доменот на пресметка на јакост, динамика, надежност и замор. Во овие трудови се прикажуваат експериментални испитувања на замор и се презентираат методологии за пресметка на отпорност на пукнатини и процена на преостанат работен век, со примери од карактеристични конструктивни елементи кај мостовски дигалки (*Lyudmila F. Moskvicheva, N. A. Chernyakova, 2020*).

Посебно корисни се и студиите на случај кои опишуваат реални оштетувања на главниот носач кај мостовски дигалки по долгогодишна експлоатација. Во вакви случаи се прикажува како оштетувања на заварени споеви можат да доведат до намалување на крутоста и носивоста, како и до неповолна прераспределба на напрегања. Вообичаено, пред и по извршената промена се прави јакосна анализа и анализа на замор, која често се поткрепува и со мерења. Ваквите трудови покажуваат дека, и кога е можна поправка, понатамошната употреба често е со ограничувања, односно намален капацитет и временски ограничувања, што ја нагласува важноста од објективна процена на состојбата на носечката конструкција (*P. Frankovský, I. Delyová, P. Sivák, P. Kuryło, E. Pivarčiová, Vojtech Neumann, 2020*).

Покрај безбедносните анализи, значителен дел од истражувањата се ориентирани кон оптимизација на конструкцијата на мостовските дигалки. Се применуваат методи за облик, големина и тополошка оптимизација, најчесто со поддршка по МКЕ, со цел да се намали масата и да се задржат статичките и јакосните барања. Во некои трудови оптимизацијата се разгледува и пошироко, со цел подобрување на ефикасноста и намалување на оптоварувањето врз структурата (*T. Yifei, Ye Wei, Yang Zhen, Li Dongbo, Li Xiangdong, 2013*) и (*Honghao Tien, Le Van Nghia, Tran Anh Son, 2021*).

Дел од литературата е насочена кон динамичкото однесување на мостовските дигалки, при што се нагласува дека почнување со работа, кочење, подигање на товарот и движење на количката вдолж носачот, можат да предизвикаат дополнителни динамички ефекти и зголемени напрегања. Во тие истражувања се развиваат математички модели со повеќе степени на слобода и еластични врски, а резултатите често се обработуваат нумерички во *Matlab*. Се анализираат параметри како брзина, забрзување, агол на јажето и промена на оптоварувањето со време, како и нивното влијание врз носечката конструкција (*I. R. Antipas, 2024*). Слично на оваа истражување, постои и истражување каде се потенцира дека дел од теоретските модели за подвижен товар не се секогаш директно применливи за реални дигалки, па затоа е важна врската меѓу теоретските решенија и практичните барања во современото проектирање (*Zrnić Nenad, G. Vlada, Bošnjak Srdan, Đorđević Momčilo, 2013*).

Во однос на причините за оштетувања, во литературата се наведува дека отказите кај мостовските дигалки не се резултат само на висок број циклуси и замор, туку можат да бидат поврзани и со споевите, технолошки пропусти при изработка при заварување или

недостатоци при проектирањето. Во истражувањето се врши анализа на причините за појава на несреќи кај различни видови на дигалки и одредување на причините кои ги поврзуваат овие несреќи (A. Korotkiy, A. Pavlenko, E. A. Panfilova, D. N. Simonov, 2022). Покрај тоа, постојат истражувања во кои се предлага оштетувањето да се проценува со собирање на ефектите од поединечните работни циклуси и со користење на таканаречено еквивалентно оптоварување, кое го претставува вкупното влијание на сите работни состојби (A. Akhtulov, O. Kirasirov, M. Kirasirov, 2019). Исто така, кај динамичките анализи на мостовските дигалки се разгледува заемното влијание помеѓу количката, товарот и флексибилноста на главниот носач, при што се покажува дека брзината на количката влијае на фреквенциските карактеристики, а нишањето на товарот главно влијае на амплитудите на вибрации и вертикалните поместувања (Zhongye Liu, Chuntong Liu, Zhen-xin He, Yuanying Gan, Bojian Li, 2021).

На крај, дел од истражувањата предлагаат и нови, алтернативни конструктивни решенија за мостовските дигалки, како на пример модуларни носачи. Овие решенија се резултат од практични проблеми поврзани со производството и транспортот на големи конструкции. Сепак, ваквите нови, алтернативни решенија воведуваат нови конструктивни карактеристики и потенцијални ризици кои не се целосно опфатени со постојните стандарди и нормативи (J. Oellerich, Keno Jann Büscher, 2023).

2.1.1. Мостовски дигалки - аналитички и нумерички пристапи

Во рамките на прегледот на литературата за мостовски дигалки и носечки конструкции, јасно се забележува дека најголем дел од истражувањата се насочени кон:

- аналитичка и нумеричка анализа по метод на конечни елементи за проверка на носивоста, напрегања и нагибите,
- моделирање на динамичко однесување (движење на количка, почетно движење, кочење на количката, вибрации),
- оптимизација на маса и конструктивни решенија и
- анализа на поединечни критични компоненти (пр. кука, тркала, шини).

Во продолжение, се издвоени дел од релевантни трудови, со акцент на тоа што тие придонесуваат за разбирање на конструктивното однесување на мостовските дигалки.

Најбројни се истражувањата кои вклучуваат споредба на аналитички пресметки со анализи по МКЕ, со цел да се потврди точноста на моделите и да се утврдат критичните напрегања и деформации. Според тоа, чести се примерите каде аналитичката и анализата по МКЕ ја потврдуваат во голем процент точноста на моделот, конкретно кранска кука (RSN 05 P – DIN 15401) која се користи кај едногредна мостовска дигалка со носивост од 500 kg, при што анализата по МКЕ дава околу 9,8% поголеми напрегања од аналитичката пресметка (D. Molnár, Miroslav Blatnický, Ján Dižo, 2021). Овој резултат е типичен и очекуван, бидејќи анализата по МКЕ обично подобро ги лоцира локалните концентрации на напрегања и влијанието на реалната геометрија, додека аналитичките модели често се базираат на поедноставени претпоставки. Слично, постои труд во којшто се изведени аналитички

пресметки и анализата по МКЕ на едногредна мостовска дигалка за определување на максимални напрегања од свиткување и нагиби. Моделот е изработен во CATIA и потоа е направена анализа по МКЕ (*Enis Muratović, Mirsad Čolić, Adil Muminović, Isad Šarić, 2021*). Во вакви пристапи, аналитиката се користи за верификација, а анализата по МКЕ како детална алатка за распределба на напрегања, нагибите и потенцијални критични зони.

Покрај анализа на реални конструкции, дел од трудовите се насочени кон развој на модели за лабораториско тестирање. На пример, аналитичка пресметка и анализата по МКЕ се користени за да се развие модел на двогредна мостовска дигалка која би се користела за идни лабораториски испитувања. И тука главен фокус се максималното напрегање од свиткување и нагибот, со модел изработен во CATIA V5 и анализиран по МКЕ (*Muamer Delić, Mirsad Čolić, Elmedin Mešić, Nedim Pervan, 2017*). Ваквите истражувања се важни бидејќи покажуваат како се поставува врската помеѓу реален инженерски проблем и контролирани тестирања, односно како да се добие модел кој е доволно репрезентативен за да се извлечат корисни заклучоци.

Друг значаен сегмент се истражувањата кои се занимаваат со споредба на едногредни и двогредни мостовски дигалки, особено во однос на динамичките ефекти. Во еден труд, преку анализа по МКЕ е покажано дека двогредните мостовски дигалки имаат помали динамички ефекти и можат да работат побрзо од едногредните при исти товари (*Ş. Yıldırım, Emir Esim, 2017*). Овој заклучок е важен, затоа што изборот на конструктивен тип, едногредна или двогредна мостовска дигалка, не е само прашање на носивост, туку и на динамички одговор, стабилност при движење на количката и општа безбедност во работата.

Во литературата се појавуваат и трудови кои одат чекор понатаму од класичната статичка проверка и се насочуваат кон анализа на вибрации и динамички одговор преку специјализирани модели. Еден пример е трудот во којшто се предлага нова аналитичка методологија со *Modelica* и *Dymola* за преддимензионирање на мехатронички системи, применета на мостовски дигалки за анализа на вибрационото однесување и динамичкиот одговор (*Ghazoi Hamza, M. Hammadi, M. Barkallah et. all, 2018*).

Еден друг дел од истражувањата се фокусираат на динамичките оптоварувања во системите со јажиња, особено при стартување и кочење, каде често се јавуваат осцилации што можат да бидат споредливи со статичките оптоварувања. Во овој дел, предложена е оптимизација на динамичките товари во системите за дигање преку математичко моделирање и анализа, со цел да се намалат осцилациите и да се подобри работниот век и безбедноста (*Y. Chovnyuk, L. Diachenko, Yevhen A. Ivanov, Nataliya Dichek, O. Orel, 2022*). Ваквите резултати се корисни бидејќи покажуваат дека динамиката не е спореден ефект, туку реален фактор што може да влијае врз заморот.

Во однос на анализите по МКЕ, во литературата се среќаваат различни софтверски алатки и пристапи. За мостовски дигалки, се применуваат анализи во софтверот *Ansys*, за определување на носивост и распределба на напрегања, со статичка и модална анализа и со цел да се најдат соодветни материјали, позиции и сценарија (*M. Ramamurthy, B. Nagababu,*

2019). За мостовски дигалки, многубројни се и анализите и во софтверот *Abaqus*, за проверка на јакоста под различни работни услови, со споредба помеѓу теоретските и нумеричките резултати по МКЕ (Z. Meng, T. Yifei, Li Xiangdong, 2018). Ова покажува дека, независно од софтверот, логиката е слична: 3D моделирање, дефинирање оптоварувања и гранични услови, и потоа проверка на напрегања, деформации или сопствените фреквенции.

Сепак, се забележува и еден јаз во литературата, односно не е доволно само да се направат анализи по МКЕ, туку важно е и како е моделирано. Еден труд посебно нагласува компаративна анализа на прачкасти и плочести конечни елементи за мостовски дигалки во контекст на јакост и сеизмичка отпорност, при што се укажува на потреба од нови методи (N. Panasenko, A. V. Sinelshchikov, 2019). Ова е важно, бидејќи изборот на типови на елементи може значително да влијае врз резултатите и врз реалната примена на моделот.

Во практиката, истражувањата често се поткрепуваат и со реални случаи. Еден труд ги обработува анализата и зајакнувањето на реална мостовска дигалка, каде што е направена теоретска и експериментална оценка на конструкцијата, а потоа е изведено делумно зајакнување, по што е дозволена ограничена понатамошна експлоатација (P. Frankovský, I. Delyová, et al., 2020). Значаен дел од литературата се однесува на поединечни компоненти кои често се критични поради концентрации на напрегања. Најчест пример е кранската кука. Во голем број трудови се прави аналитичка и анализа на крански куки за предвидување на концентрации на напрегања и продолжување на работниот век, при споредба на различни материјали (Dr. P. Ravikanth Raju, S. Upendar, 2018).

2.1.2. Динамички ефекти и сеизмичко дејство кај мостовските дигалки

Покрај статичките аспекти, дел од поновите трудови вклучуваат и модални параметри (сопствени фреквенции) како важен индикатор за стабилност и безбедност. Се споменуваат анализи по МКЕ на главен носач на мостовска дигалка, за природни фреквенции и напрегања при различни работни услови, со цел да се добијат насоки за подобрување на безбедноста и стабилноста (Weiwei Zhang, 2025). Во вакви трудови, динамичките карактеристики се разгледуваат како клучни затоа што можат да укажат на ризик од резонантни состојби или засилени вибрации при одредени режими на работа (Vasileva Ljubotenska et al., 2026).

Во поновата литература се среќаваат истражувања кои ја нагласуваат важноста на сеизмичкото дејство и сеизмичката поврзаност помеѓу мостовските дигалки и носечките конструкции на индустриските објекти. Таков пример претставува трудот на (Belleri et al. 2017), во кој е предложен аналитички, повеќестепен, динамички модел на мостовска дигалка инсталирана во индустриски објект, при што се разгледуваат главниот носач и висечкиот товар, а однесувањето на системот е опишано преку систем на диференцијални равенки. Авторите покажуваат дека мостовската дигалка може да се разгледува како дополнителен динамички подсистем кој има значително влијание врз целокупниот сеизмички одговор на конструкцијата. Иако нивната анализа е насочена кон целокупниот одговор на индустриски објекти со вградени дигалки, предложениот методолошки пристап претставува релевантна

основа за понатамошни истражувања насочени кон конструктивното однесување, заморот и надежноста на самата мостовска дигалка. Целта на нивното истражување била конкретно да се испита влијанието на мостовските дигалки и висечките товари врз сеизмичката отпорност на италијанските индустриски објекти, кои претрпеле значителни оштетувања за време на земјотресот во 2012 во северниот дел на Италија. Авторите во истражувањето посочуваат дека предложената методологија може да се примени и за анализа под други земјотресни записи. Исто така и други автори укажуваат дека присуството на мостовски дигалки во индустриските објекти може да влијае врз сеизмичкиот одговор на конструкцијата (Dolšek, 2016; Ercolino et al., 2016). Во ваквите објекти, дигалките најчесто се движат по шини ориентирани во надолжна насока, при што во текот на експлоатацијата на објектот тие пренесуваат различни вертикални и хоризонтални оптоварувања на носечката конструкција од индустрискиот објект. Како најзначајни хоризонтални дејства вообичаено се земаат силите предизвикани од забрзување и забавување на дигалката при нејзиното движење по шините, од забрзување и забавување на количката при движење по главниот носач, од т.н. косо движење на дигалката, како и од судирот со одбојници кои се поставени на крајот од шинската патека. Според EN 1991-3 (член 2.5.2.2.3), хоризонталните сили во контактната зона тркало-патека треба да се земат најмалку како 10% од максималното вертикално оптоварување на тркалото, вредност која често се прифаќа како референтна и во научните истражувања.

Понатаму, сеизмичкото дејство кое произлегува од осцилациите на висечкиот товар често се занемарува во инженерската практика. Под терминот „висечки товар“ се подразбира збирот од корисниот товар и подигнувачката опрема. Одредени автори (Canadian Institute of Steel Construction, 2005; Richard et al., 2009) укажуваат дека при сеизмичко дејство, масата на дигалката ќе влијае врз масата на носечката конструкција, но не навлегуваат подлабоко во анализата на влијанието на висечкиот товар. Од друга страна пак, Richard et al. (2009) ја анализираше сеизмичката отпорност на типичен индустриски објект изработен од заварена челична конструкција, при што го разгледувале еластичниот одговор во попречна насока со помош на 2D модел и се фокусирале на валидација на оптоварувањата добиени со методот на еквивалентни статички сили и анализата со спектар на одговор, без експлицитно моделирање на висечкиот товар. Причините за ваквото занемарување на висечкиот товар при сеизмичко проектирање најчесто се поврзуваат со неговите динамички карактеристики. Кога висечкиот товар се моделира како систем со нишало, времето потребно за извршување на една целосна осцилација зависи првенствено од должината на јажињата за подигнување на товарот. Со зголемување на должината на јажето се зголемува и периодата на осцилирање на товарот. Поради релативно долгите периоди на осцилирање, динамичкиот одговор на товарот најчесто се јавува во делот од спектарот што се карактеризира со приближно константни поместувања и пониски вредности на спектралното забрзување. Како последица на тоа, сеизмичките инерцијални сили што дејствуваат врз товарот се релативно мали, поради што неговото влијание често се занемарува при сеизмичките анализи. Според тоа,

неговото влијание врз целокупниот сеизмички одговор често се смета за секундарно, иако некои истражувања укажуваат дека оваа претпоставка не е секогаш конзервативна, и дека интеракцијата помеѓу дигалката, товарот и носечката конструкција заслужува подетално разгледување.

По истражувањата од Европа (*Belleri et al., 2017*), слични истражувања се спроведени и во подрачја со изразено висока сеизмичка активност, како што е Чиле. За детално опишување на однесувањето на конструкциите, во ваквите истражувања често се земаат предвид материјалната и геометриската нелинеарност. Материјалната нелинеарност се моделира преку употреба на соодветни конститутивни модели за челик по надминување на границата на еластично однесување, додека геометриската нелинеарност го опфаќа влијанието на големите поместувања врз целокупниот одговор на системот, познато како *P-Δ* ефект.

Сеизмичката процена најчесто се спроведува со комбинација на нелинеарна статичка и нелинеарна динамичка анализа. Нелинеарната статичка анализа се користи за да се утврди колкаво оптоварување може да издржи конструкцијата и колку ќе се деформира при зголемување на сеизмичкото дејство. Со оваа анализа се добива т.н. крива на капацитет, која ја прикажува врската помеѓу латералното поместување односно странично, хоризонтално поместување на конструкцијата, и вкупната хоризонтална сила што дејствува во подножјето на конструкцијата. Врз основа на оваа крива може да се процени како се однесува конструкцијата по сеизмичко дејство и да се определи степенот на оштетување. Според *Mulchandani et al. (2019)*, оценувањето на однесувањето на мостовската дигалка најчесто се врши преку нивоа на перформанси, кои го опишуваат очекуваното оштетување на конструкцијата и нејзината преостаната функционалност по сеизмичко дејство, и тоа:

- Непосредна употребливост (*анг. Immediate Occupancy (IO)*) – конструкцијата има мали оштетувања и останува функционална по сеизмичко дејство;
- Безбедност при користење (*анг. Life Safety (LS)*) – се јавуваат поголеми оштетувања, но конструкцијата сè уште не претставува опасност за корисниците;
- Спречување на колапс (*анг. Collapse Prevention (CP)*) – конструкцијата е сериозно оштетена, но не доаѓа до целосен колапс.

Динамичките анализи, пак, најчесто се спроведуваат со примена на реални земјотресни записи преку анализа во временски домен (*анг. time-history*), при што се анализира чувствителноста на конструкцијата во различни насоки и за различни сценарија на оптоварување. Резултатите од ваквите истражувања укажуваат дека одговорот на конструкцијата може значително да варира во зависност од насоката на дејство, геометријата на системот и распределбата на крутоста. Исто така, за мостовските дигалки, авторите често разгледуваат различни сценарија на оптоварување, при што максималниот и минималниот товар се применуваат во екстремни позиции на количката, со цел да се опфатат најнеповолните состојби за конструкцијата.

Општ заклучок што може да се изведе од ваквите истражувања е дека, иако товарите од мостовската дигалка во многу случаи имаат релативно мало влијание врз глобалниот

сеизмички одговор на објектот, методолошкиот пристап со комбинирана нелинеарна анализа и споредба на различни сценарија на оптоварување, претставува добра основа за подетални истражувања, особено кога фокусот е насочен кон однесувањето на поединечни конструктивни елементи, локалните концентрации на напрегања, заморот и процената на надежноста.

Во Јапонија, во една од најсеизмички активните области во светот, во 2002 година истражувачи спровеле обемно експериментално и нумеричко истражување на вертикалниот сеизмички одговор на мостовска дигалка со носивост од 150 t, при што користеле скалиран модел во размер 1/8 на вибрациона платформа и примениле нелинеарна анализа во временски домен. Моделот бил проектиран согласно размерот, при што дополнителни маси биле воведени за да се обезбеди динамичка еквиваленција со реалната конструкција. Во експериментот биле мерени забрзувања, поместувања, напрегања и реакции во тркалата, со примена на акселерометри, мерни ленти и сензори за поместување. Резултатите покажале дека при повисоки нивоа на вертикално возбудување може да дојде до одвојување на тркалата од шините, како последица на засилен одговор во вертикалната насока на осцилирање. Утврдена е критична вредност при забрзување (околу 1.8 g) при која започнува појавата на одвојување на тркалата од шината, а предложена е и едноставна аналитичка равенка за нејзино предвидување. Иако при повторниот контакт се јавува удар, било покажано дека реакционите сили во тркалата можат приближно да се проценат и со линеарна анализа, но авторите препорачуваат во проектирањето да се воведат дополнителен фактор на безбедност од околу 30% доколку постои можност за вакво однесување. Дополнително, спроведената нелинеарна симулација покажала добро согласување со експерименталните резултати. Овие резултати се особено значајни бидејќи во најголем дел од постојните норми за дигалки вертикалната сеизмичка компонента е занемарена или се разгледува само статички, при што исклучок претставува стандардот *ASME NOG-1 (anl.Rules for Construction of Overhead and Gantry Cranes)*, кој е наменет за надземни и портални дигалки во нуклеарни и други критични постројки и содржи посебни барања за сеизмичка анализа и проектирање (ASME, 2020). Оттука, овие истражувања укажуваат дека вертикалната компонента на земјотресот е важна за безбедноста на мостовските дигалки, особено кај системи со мала вертикална крутост и значителна маса на количката.

2.1.3. Динамичкото однесување на мостовските дигалки

Динамичките пресметки се многу значајни при проектирањето на било кој вид на дигалка. Со ваквиот вид на пресметка доаѓаме до прецизни резултати за напоните и нивната состојба кај механизмите и кај носечката конструкција. Освен тоа, динамичката пресметка ни овозможува заштеда на материјал при изработката на дигалките. Со заштедата на материјал всушност се овозможува и заштедување на масата на дигалката, а тоа резултира со намалена погонска енергија, како и намалување на габаритот потребен за поставување на дигалката.

Со други зборови, динамичката пресметка на мостовските дигалки, или воопшто на дигалките води кон економична конструкција (*Abdel-Rahman et al., 2003*).

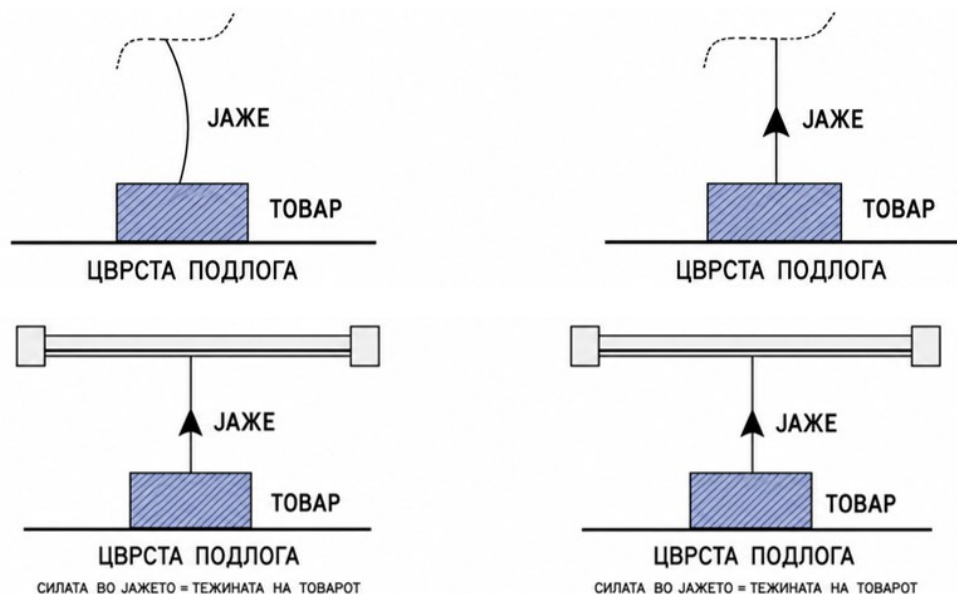
Бидејќи мостовските дигалки се сложени машини, во чии состав влегуваат многу елементи, движењата кои ги извршуваат механизмите на дигалката имаат нестационарен режим, па затоа природно е движењето на механизмите и носечката конструкција да бидат изложени на променливи оптоварувања. Се одредуваат напрегањата на носечката конструкција при дигање на товар, при нагло кочење и спуштање на товарот, како на цврста така и на еластична подлога.

Влијанието на динамичките сили е опфатено во сите стандарди. Пред повеќе од педесеттина години влијанието на динамичките сили најчесто се прикажувало преку статички коефициенти. Со развојот на технологијата, со конструирањето на дигалки кои се со носивост поголема од 800 t, со брзина на дигање поголема од 100 m/min, како и голем распон на движење, претставувањето на динамичката сила преку статички коефициенти повеќе не дозволува точно одредување и е инженерски неоправдано (*Шосијаков, Зелић, & Живанић, 2014*).

Мостовската дигалка се состои од два главни и два странични носачи, кои се цврсто меѓусебно поврзани и ја формираат носечката конструкција. По должината на главните носачи се поставени шини по кои се движи количката, на која се наоѓа механизмот за подигање на товарот. Движењето на мостот и количката се овозможува преку соодветни погонски механизми. Механизмот за дигање, како што е веќе прикажано во претходната точка, се состои од: мотор, еластична спојка, механички преносник (редуктор) и барабан, на кој се прицврстени јажиња, а на другиот крај (на долниот дел) е поставена куката со јажницата (*Sarraf & McGuire, 2020*).

Процесот на дигање на товарот во принцип се дели на два периоди, односно пред и после дигањето на товарот од подлогата, доколку за почетна положба се земе дека товарот е поставен на цврста подлога и дека јажето виси лабаво. Кога ќе се вклучи, моторот за дигање постепено делува со вртежен момент на барабанот кој го затегнува јажето. Првиот период, кој го дефинираме, почнува од моментот кога јажето е затегнато, но сè уште не дошло до напрегање во јажето. Во тој момент, кога јажето е затегнато, но притоа не е напрегнато, моторот за дигање има одреден број на вртежи. Почнувајќи од овој момент, силата во јажето почнува постепено да се зголемува, што предизвикува истегнување на жичките во страховите, односно истегнување на јажето, кое резултира со свиткување на носачот на дигалката. Во тој момент товарот, јажето, куката и подвижната макара се движат нагоре, додека во спротивен правец надолу, се придвижува количката заедно со носачот.

Силата во јажето почнува уште повеќе да се зголемува, достигнува сила која е еднаква со тежината на товарот. Во моментот кога силата во јажето ќе достигне вредност која ја преминува тежината на товарот, тогаш товарот се одлепува/одвојува од подлогата и со некоја х-брзина почнува да се движи нагоре. Сликвито е прикажано на слика бр.2.1 (*Ostrić & Tošić, 2005*).



Слика бр. 2.1 Етапи при дигањето на товар (Ostrić & Tošić, 2005)

Под влијание на физичките величини на системот, кои се учесници во овој процес, како и нивното меѓусебно дејствување, доаѓа до осцилаторни движења на товарот, како и до занишување на носечката конструкција. Во такви случаи се усвојува дека патеката на дигалката е бескрајно крута, а за материјал на носечката конструкција се усвојува изотропан, кој е подложен на Хуковиот закон, па истегнувањето е соодветно на тоа, односно рамномерно оптоварување. Кога станува збор за јаже, во повеќето случаи се усвојува дека истегнувањето е рамномерно оптоварено, но експериментално, однесувањето на јаже е во друг облик. Модулот на еластичност E е променлив и зависи од оптоварувањата на системот.

На крај, системот кој го сочинуваат товарот, количката, како и мостот имаат многу степени на слободно движење, па затоа теоретски е многу тешко да се проучат нивните меѓусебни влијанија, а уште потешко е да се опфатат почетните услови, кои во голем процент зависат од начинот на управување со дигалката (Ostrić & Tošić, 2005).

Од досега изнесеното може да се заклучи дека за разјаснување и добивање на динамички резултати за дигалките неопходно е упростување на системот. Затоа, системот може под одредени претпоставки да се претстави како систем со еден, два или пак три степени на слободно движење. Секако дека резултатите добиени со повеќе степени на слобода во поголем процент се приближни на реалните системи кои се испитуваат, но во вакви случаи пресметката е премногу долга, што е контрадикторно на основното барање за добивање на едноставно, но во пракса лесно и блиску до реалното - решение (Abdel-Rahman et al., 2003), (Sarraf & McGuire, 2020).

2.1.3.1. Динамички фактори

Во општ случај, динамичките фактори зависат од единаесет параметри, чишто влијанија треба едноставно да се сведат и да се изразат преку најмногу три параметри. Проблемот во поедноставувањето лежи токму во овој дел.

Во прилог ќе биде разгледан краток преглед на начинот за редуцирање, соодветно на (Ostrić & Tošić, 2005). Континуирано распоредената маса на носечката конструкција се редуцира во облик на точкеста маса, која заедно со својата пружина без маса (поради тоа што станува збор за крута носечка конструкција) има исти особини на осцилирање како и континуирано распоредената маса.

Сопствената кружна фреквенција на носачот, која е зглобно зацврстена на двете страни со маса m (која поради редуцијата ќе ја означиме како m_{red}) во средина, па според теоријата на осцилација би било (2.1):

$$\omega^2 = \frac{48 \cdot E \cdot J}{l^3 \cdot m_{red}} \quad (2.1)$$

Доколку станува збор за зацврстен носач со континуирано распоредена маса, кружната фреквенција е (2.2):

$$\omega^2 = n^4 \pi^4 \frac{E \cdot J}{l^3 \cdot m_{red}} \quad (2.2)$$

Каде што n е реден број на осцилации а масата $m = \rho PI$. Доколку $n=1$, се добива дека (2.3):

$$\omega^2 = \pi^4 \frac{E \cdot J}{l^3 \cdot m}, \quad (2.3)$$

па доколку ги изедначиме се добива (2.4):

$$\frac{48 \cdot E \cdot J}{l^3 \cdot m_{red}} = \pi^4 \frac{E \cdot J}{l^3 \cdot m} \quad (2.4)$$

и поделиме со $\frac{E \cdot J}{l^3}$, ќе се добие $\frac{48}{m_{red}} = \frac{\pi^4}{m}$, па (2.5):

$$m_{red} = \frac{48}{\pi^4} m = 0.493 \cdot m, \quad (2.5)$$

Со помош на енергетски методи, каде во разгледувањето се воведува и концентрираната маса на количката и се разгледува односот на масата на количката и масата на мостот, се доаѓа до заклучок дека факторот на редуција (k) е однос помеѓу масата на количката и мостот, односно станува збор за константна вредност.

Во понатамошната пресметка може да се истакне дека максималниот нагиб f кога имаме рамномерно распореден товар, се изразува како (2.6):

$$f_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{mgl^3}{EJ} = 0.0130 \frac{mgl^3}{EJ} \quad (2.6)$$

Според законите на динамиката, истите маси на различни места имаат различно влијание. Од друга страна, според динамиката масите со иста кинетичка енергија се еквивалентни. Редуцираната маса мора да има кинетичка енергија, која всушност претставува збир на кинетичките енергии на поединечните маси, или (2.7):

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \dots + \frac{m_n v_n^2}{2}$$

$$m = m_1 + \frac{m_2}{i_2^2} + \dots + \frac{m_n}{i_n^2} \quad [kg] \quad (2.7)$$

каде што $i_2, i_3, \dots$ се преносни односи на брзината на редуцираната маса.

На ист начин се прави и редуција на инерцијалниот момент, односно (2.8):

$$J = J_1 + \frac{J_2}{i_2^2} + \dots + \frac{J_n}{i_n^2} \quad (2.8)$$

Инерцијалниот момент е еднаков на сума од збир на масите m и квадратот од растојанието r од оската на ротација на секоја честичка која го сочинува телото, така што (2.9):

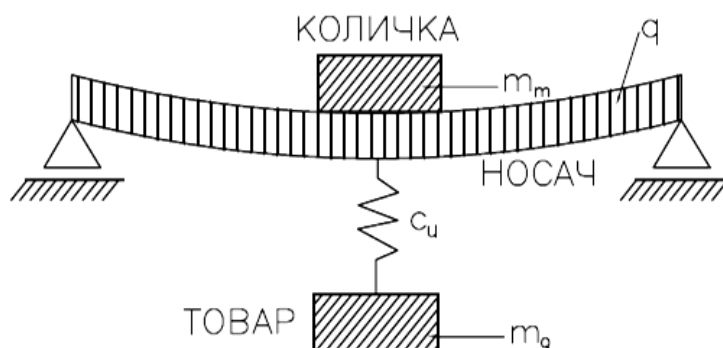
$$J = m \cdot r^2 \quad [kgm^2] \quad (2.9)$$

2.1.3.2. Разгледување на систем со еден степен на слободно движење

Динамичката сила која е резултат на осцилирање на масата, може да се пресмета преку:

- најважните физички својства на носечката конструкција
- погонскиот механизам и
- влијанието на товарот

Носечката конструкција на дигалката и товарот образуваат систем кој осцилира барем во вертикален правец и има најмалку два степени на слобода (слика бр.2.2.).



Слика бр. 2.2 Приказ на мостовска дигалка со два степени на слобода (Ostrić & Tošić, 2005)

Носечката конструкција е со крутост c_k , оптеретена е со сопствениот континуирано распореден товар q и се потпира на крути потпирачи, а на средина на носачот се наоѓа количката со маса m_m . Од друга страна, товарот m_Q е закачен на јаже со крутост c_u , кој на горниот крај е прицврстен за барабанот на количката.

Избрана е оваа положба поради тоа што:

- Патеката на дигалаката е земена како крута, што е најнеповолен случај за осцилирање;
- Положбата на количката на средината од распонот е најнеповолен случај за носачот.

Всушност се избрани најнеповолните услови за да се разгледа динамичноста на системот.

Масата на јажето е занемарливо мала во споредба со останатите маси на овој систем, па затоа не ја земаме во обзир. За јажето пресметуваме крутост кој е функција од модулот на еластичност E и должината на јажето. Се усвојува дека модулот на еластичност E е константна вредност, како и дека должината на јажето во разгледуваниот временски интервал е занемарливо мала. Соодветно на досегашните претпоставки следува дека крутоста на јажето е исто така константна вредност. Иако делумно системот е упростен, има можност уште повеќе да се поедностави (Ostrić & Tošić, 2005).

Континуирано распоредената маса на носечката конструкција може да се замени и со редуцираната концентрирана маса, која веќе е спомната и се бележи со m_{red} . Масата m_k е збир од масата на количката (m_m) и редуцираната маса на носачот (m_{red}).

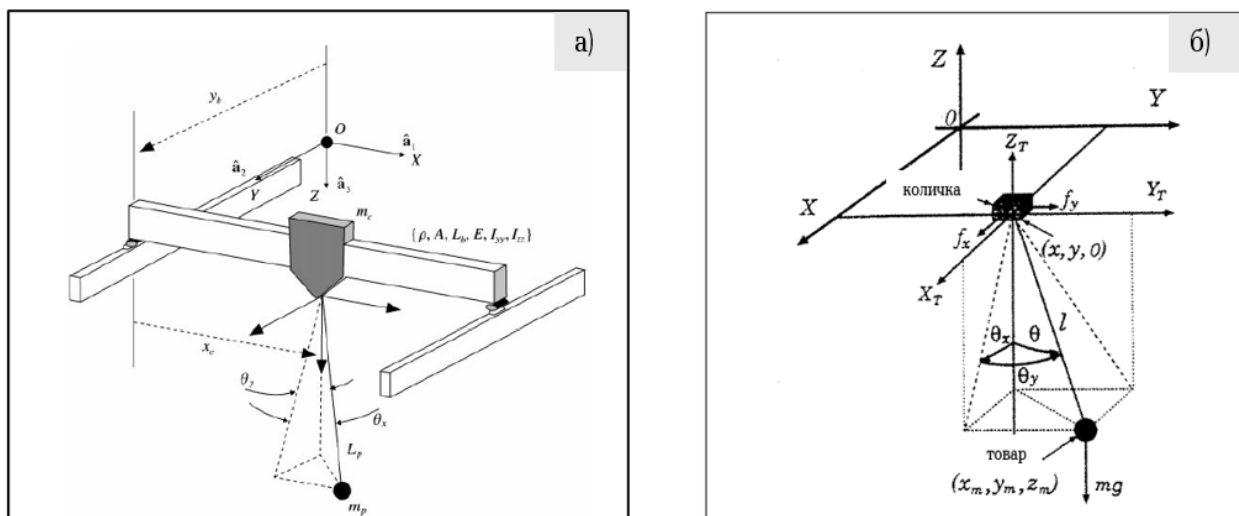
Поради различните експлоатациони услови и барања, точната висина на дигање на товарот не може да се одреди. Според тоа, постои слобода во претпоставката дека товарот виси во однос на јажето на минимална висина. Оваа претпоставка е наједноставна бидејќи кога е пократко јажето тоа има поголема крутост, односно амплитудата на основните осцилации е поголема кај кратките отколку кај долгите јажиња. По ваквите претпоставки следува дека редуцираната маса на носечката конструкција и товарот кој виси на јаже, осцилираат идентично. Од ова произлегува дека јажето се однесува како елемент со бескрајно голема крутост.

Помеѓу масите m_k и m_Q во овој случај постои круга врска, што значи дека масата m_k и масата m_Q може да се сврзат во една маса која ќе осцилира. Во таа насока може да се направи фузија и на крутоста на мостот c_k и крутоста на јажето, а сето тоа да резултира во систем со еден степен на слободно движење (Ostrić & Tošić, 2005).

2.1.3.3. Динамички модели на мостовски дигалки

За анализа на динамичкото однесување на мостовските дигалки во литературата се применуваат различни динамички модели, кои се разликуваат според степенот на идеализација и сложеноста на системот. Изборот на моделот зависи од целта на анализата и од динамичките појави кои треба да се опфатат, како што се осцилациите на товарот, интеракцијата помеѓу количката, товарот и носечката конструкција, како и влијанието на

надворешни динамички дејства. Најчесто товарот се моделира како висечка маса поврзана со количката преку јажето, при што се анализираат неговите осцилации и влијанието врз динамичкиот одговор на мостовската дигалка (*Oguamanam et al., 2001*). На слика бр. 2.3 се прикажани два карактеристични динамички модели на мостовски дигалки предложени во литературата. Моделот на *Lee (1998)* ја претставува мостовската дигалка како просторен систем составен од носечка конструкција, количка и висечки товар, при што се земаат предвид геометриските и масените карактеристики на конструкцијата. Од друга страна, моделот предложен од (*Oguamanam et al. (2001)*) е насочен кон опис на осцилациите на висечкиот товар преку аглиите θ_x и θ_y и нивната интеракција со движењето на количката. И покрај разликите во степенот на идеализација, двата модели овозможуваат анализа на основните динамички појави кои се јавуваат при експлоатација на мостовските дигалки.



Слика бр. 2.3 Динамички модели на мостовски дигалки:

- (а) просторен модел на мостовска дигалка со висечки товар (*Lee, 1998*);
 (б) поедноставен просторен модел за анализа на осцилациите на висечкиот товар (*Oguamanam et al., 2001*)

2.1.3.5. Најчести фактори за деформација на мостовските дигалки

Дигалката се движи по шини, кои се поставени на носечката патека. Сите надворешни оптоварувања кои се јавуваат при експлоатација со дигалката се прифатени од носечката конструкција на дигалката, а преку погонските и слободните тркала се пренесува на шините на мостовската дигалка.

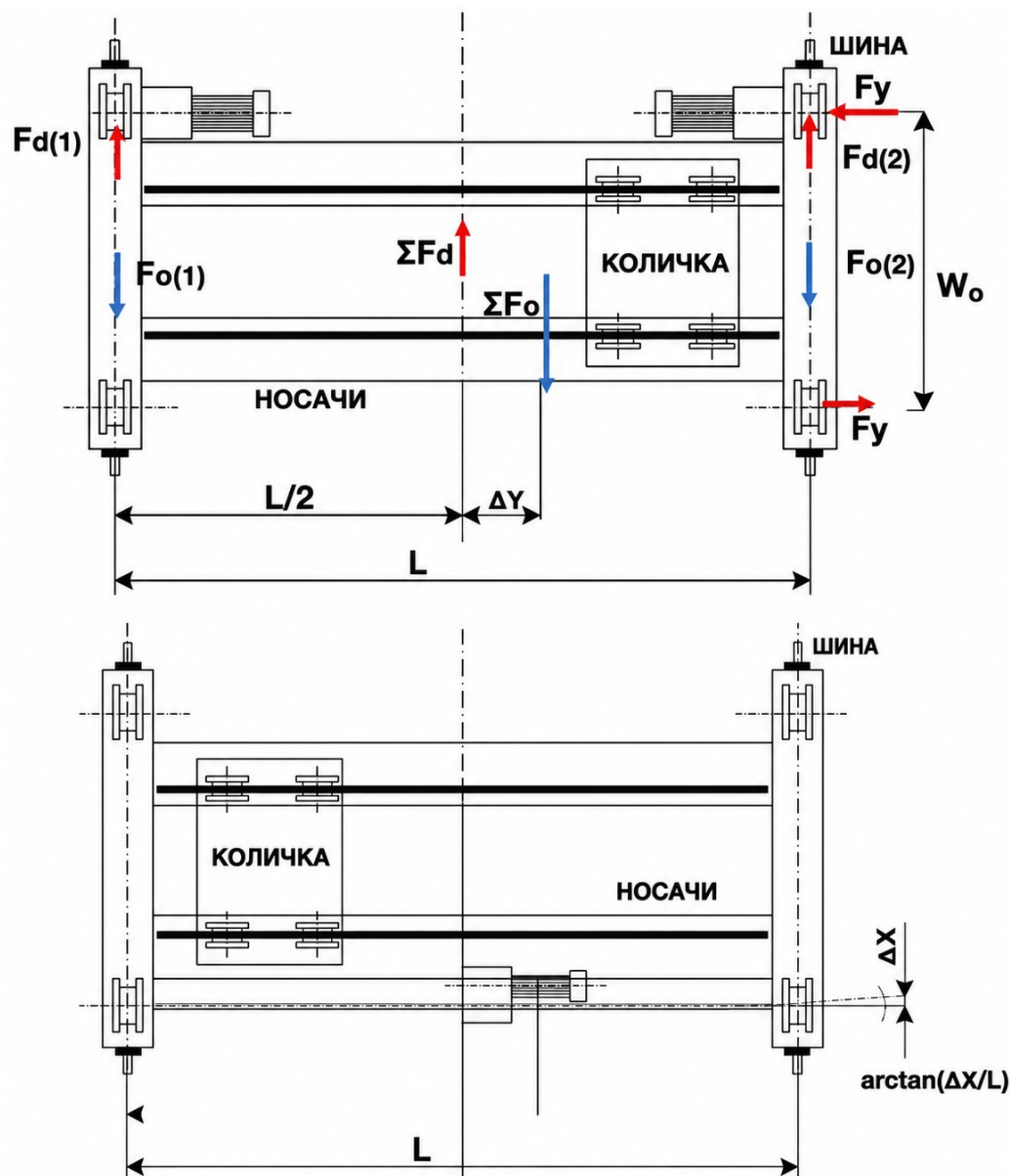
Во реални услови, нееднаквоста при движењето доведува до прекумерена деформација, која се манифестира преку:

- отежнато движење на дигалката, во некои случаи проследено и со звук на гребене или крцкање кои доаѓаат од лизгањето на тркалата по шините

- склоност кон искачување, односно поминување на определен пат од шинската патека во висинска разлика
- нестабилна работа на електромоторот за погонот за движење-односно зголемување на потребната моќност за движење на дигалката
- изразена изабеност на вертикалните тркала на дигалката и на главата од шината
- пластични деформации на шината и др.

На динамичките однесувања при движење на дигалката влијание имаат голем број на променливи параметри, кои се резултат на изразена промена на режимот на работа, но и самата геометрија на мостот, пр. многу голем распон. Овие вообичаени и други дополнителни појави, кои понекогаш не е лесно да се предвидат, се носители за одредување на динамиката на мостовската дигалка (Zelić, 2018).

При работа, како што веќе и е спомнато, мостовските дигалки немаат секогаш исто место за прифаќање и откачување на товарот. Како и да е, се менува положбата на количката во кој било случај. Доколку станува збор за симетрични конструкции, вертикалните оптоварувања на тркалата се приближно еднакви само во случај кога количката се наоѓа на средина од распонот (слика бр.2.4). Во сите други случаи има несиметрична распределба на масата, односно нема еднакви вертикални оптоварувања на тркалата, што резултира со нееднакви отпори на движење на тркалата и закосување на мостовската дигалка во хоризонталната рамнина. Оваа појава е посебно изразена кај мостовските дигалки кои имаат независни погони, но не е исклучено да се појави и кај дигалките со централен погон на движење. Кај независните погони, прикажано на слика бр.2.4 поради нееднаквото оптоварување се појавуваат отпорите на движење, кои на сликата се прикажани како ΣF_o , дејствуваат на некое растојание $\Delta \bar{x}$ од средината на мостот, а резултира со погонската сила ΣF_d која е еднаква, симетрично поставена во однос на електромоторите, делува на средината на распонот L . Овие сили се со ист интензитет, но со различна насока на дејствување. Моментот на нивниот спрег предизвикува деформација на мостовската дигалка. Од друга страна кај централно поставениот погон, погонскиот момент на моторот се распоредува по погонските тркала пропорционално. Според тоа, следува дека збирот на погонските сили е независен од положбата на количката. Но, при нееднакви оптоварувања на страните доаѓа до разлика во аглите на свиткувања на вратилата $\Delta \delta_s$, односно доаѓа до деформација на дигалката на почетокот од носачот, односно $\Delta \bar{x} = (D_w / 2) \cdot \Delta \delta_s \quad [mm]$.



Слика бр. 2.4 Различни положби на мостовските дигалки во хоризонтална рамнина при дивжење (Зелић 2018)

Во некои случаи, поединечните услови на околината, како на пример температурните промени и дејството на ветерот може да влијаат врз работата на дигалката, или пак да доведат до нејзино оштетување.

Општите принципи на сеизмичкото однесување на конструкции се базираат на фактот дека сеизмичкото дејство претставува динамичко возбуждавање кое предизвикува сложени интеракции помеѓу масата, крутоста и амортизацијата на конструкцијата. Под дејство на сеизмичките движења на подлогата, во конструктивните елементи се јавуваат дополнителни инерцијални сили и динамички вибрации, кои можат да доведат до значајни поместувања, локални напрегања и ударни ефекти. Како резултат на овие појави, кај конструктивните и

механичките системи може да се појават различни форми на оштетувања или нарушување на нивната функционалност.

Во услови на сеизмичко дејство најчесто се јавуваат следните ефекти:

Физички ефекти во горниот дел на тлото:

- инерцијални сили предизвикани од забрзувањето на конструкцијата;
- динамички вибрации на конструктивните и машинските елементи;
- удари и релативни поместувања помеѓу поединечни компоненти;
- локални напрегања во критичните делови на конструкцијата;

Како резултат на овие ефекти, кај конструктивните и механичките системи можат да се појават следните последици:

Типични последици врз конструктивните и механичките системи:

- поместување или дислокација на елементи;
- појава на деформации;
- оштетување или нарушување на работата на механизми;
- нарушување на калибрацијата на сензори и мерни уреди;
- појава на пукнатини во врските и споевите;

Овие принципи на однесување на конструкциите по сеизмичко дејство се широко опишани во *Eurocode 8*.

Врз основа на овие принципи, како и на инженерска анализа на динамичките влијанија врз механички и конструктивни системи, можат да се идентификуваат потенцијалните оштетувања кои би можеле да се појават кај безбедносните уреди на мостовските дигалки.

Во Табела бр. 2.1 е прикажан преглед на најважните безбедносни уреди кај мостовските дигалки, можните оштетувања кои можат да настанат како резултат по сеизмичко дејство, соодветните методи на инспекција и релевантните стандарди. Безбедносните уреди и методите на инспекција се извлечени од релевантните стандарди, додека можните сеизмички оштетувања се определени врз основа на инженерска анализа на динамичките влијанија врз механички и конструктивни системи.

Табела бр. 2.1 Преглед на најважните безбедносни уреди, можни оштетувања како резултат по сеизмичко дејство

Безбедносни уреди	Можни оштетувања по сеизмичко дејство	Метод на инспекција	Релевантен стандард
Уред за заштита од преоптоварување (анг. <i>Overload protection device</i>)	оштетување на сензори, губење на калибрација	функционален тест, проверка на сигнализација	<i>EN 15011</i> , <i>EN 13135</i>
Ограничувач / систем за следење на оптоварувањето (анг. <i>Load limiter / load monitoring system</i>)	неточни мерења поради вибрации или поместување	тест со контролен товар, калибрација	<i>EN 15011</i>

Граничен прекинувач за подигнување (анг. <i>Limit switch – hoisting</i>)	поместување или механичко оштетување	проверка на активација во крајна позиција	EN 15011, EN 60204-32
Граничен прекинувач за движење на количката (анг. <i>Limit switch – trolley travel</i>)	поместување на позицијата на прекинувач	функционален тест	EN 15011
Граничен прекинувач за движење на главниот носач (анг. <i>Limit switch – bridge travel</i>)	нарушена геометрија или оштетување	проверка на ограничување на движење	EN 15011
Копче за итно запирање (анг. <i>Emergency stop button</i>)	оштетување на електрични контакти	тест на системот за итно запирање	EN 60204-32
Систем за кочење на механизмот за подигнување (анг. <i>Braking system (hoisting brake)</i>)	намалена сопирачка сила или механичко оштетување	тест на сопирачка под товар	EN 15011
Сопирачки за механизмите за движење (анг. <i>Breaks for travelling mechanisms</i>)	намалена ефикасност на сопирачки	функционален тест	EN 15011
Крајни стопирачки (анг. <i>End stops</i>)	деформација или поместување	визуелна инспекција	EN 15011
Ударни амортизери (анг. <i>Buffers</i>)	оштетување на амортизирачки елементи	визуелна инспекција	EN 15011
Уреди за фиксирање на дигалката на шини (анг. <i>Rail clamps</i>)	деформација или блокирање	механичка проверка	EN 15011
Уреди за заклучување на шините при силен ветер (анг. <i>Storm locks</i>)	механичко оштетување или блокирање	проверка на механизам	EN 15011
Систем против судар (анг. <i>Anti-collision system</i>)	нарушување на сензори или систем	тест на систем	EN 15011
Систем за предупредување (сирена/светло) (анг. <i>Warning systems (horn/light)</i>)	оштетување на сигнални уреди	тест на светлосна/звучна сигнализација	EN 15011
Заштита од излегување на јажето од макаратата (анг. <i>Rope derailment protection</i>)	поместување на водилки	визуелна инспекција	EN 13001-3-2
Осигурувач на кука (анг. <i>Hook safety latch</i>)	механичко оштетување или деформација	визуелна и функционална проверка	EN 13135

Електрична заштита од преоптоварување (анг. <i>Electrical overload protection</i>)	оштетување на електрични заштитни елементи	електричен тест	EN 60204-32
Систем за следење на брзината на движење (анг. <i>Travel speed monitoring</i>)	губење на податоци или грешка во систем	проверка на систем и податоци	ISO 12482
Систем за следење на состојбата на дигалката (анг. <i>Crane monitoring system</i>)	следење на циклуси и оптоварување	Проверка на податоци и функционалност	EN 15011
Индикатори за одржување / инспекција (анг. <i>Maintenance / inspection indicators</i>)	сигнализација за потреба од инспекција	Дали сигнализацијата работи	EN 15011

Конструктивните елементи на мостовската дигалка и релевантните стандарди се идентификувани врз основа на европските стандарди за проектирање и безбедност на дигалки (EN 13001, EN 15011, EN 13135 и EN 14492). Методите на инспекција се базирани на стандардните процедури за инспекција на дигалки (ISO 9927). Покрај наведените европски стандарди, при дефинирањето на инспекциските активности разгледани се и препораките од ASME B30.2-2022 – *Overhead and Gantry Cranes*, кој ги дефинира барањата за инспекција, тестирање (функционална проверка на механизмите за кревање, сопирачките и безбедносните уреди), одржување и безбедна експлоатација на мостовските и порталните дигалки (ASME B30.2-2022). Мојните оштетувања од сеизмичко дејство се идентификувани врз основа на општите принципи на сеизмичко однесување на конструкции и инженерска анализа на динамичките влијанија врз механички и конструктивни системи, согласно принципите опишани во Eurocode 8. Овој преглед е прикажан во Табела 2.2.

Табела бр. 2.2 Конструктивни елементи на мостовска дигалка и инспекција по сеизмичко дејство

Конструктивен елемент (македонски)	Можни оштетувања по сеизмичко дејство	Метод на инспекција	Релевантен стандард
Главен носач (анг. <i>Main girder</i>)	локални деформации, појава на пукнатини, трајни деформации	визуелна инспекција, мерење на деформации	EN 13001-3-1 ISO 9927
Краен носач (анг. <i>End carriage</i>)	поместување, деформација на споеви	визуелна инспекција	EN 13001 ISO 9927
Заварени споеви (анг. <i>Welded joints</i>)	појава на пукнатини или оштетување на завар	визуелна инспекција, NDT методи	EN 13001 ISO 9927

Шини (анг. <i>rail system</i>)	поместување, деформација или нарушена геометрија	геометриска проверка на патека	EN 15011 ISO 9927
Тркала на дигалката (анг. <i>Crane wheels</i>)	абење, оштетување или неправилно водење	визуелна инспекција	EN 13001-3-3 ISO 9927
Рамка на количката (анг. <i>Trolley frame</i>)	деформации или нарушена стабилност	визуелна инспекција	EN 15011 ISO 9927
Механизам за подигнување (анг. <i>Hoisting mechanism</i>)	оштетување на механички елементи	функционален тест	EN 14492 ISO 9927
Челични јажиња (анг. <i>Wire ropes</i>)	абење, пукнатини или оштетување	визуелна инспекција	EN 13001-3-2 ISO 9927
Кука (анг. <i>Hook</i>)	деформација или пукнатини	визуелна инспекција, мерење	EN 13135 ISO 9927
Лежишта (анг. <i>Bearings</i>)	оштетување поради вибрации	функционален тест	EN 15011 ISO 9927
Електричен систем (анг. <i>Electrical system</i>)	оштетување на кабли или контакти	електрична проверка	EN 60204-32 ISO 9927

2.1.4. Индикатори за степенот на деформација на мостовските дигалки

Основните функции на носечката конструкција на дигалките се: физичко спојување на сите погонски механизми и формирање на функционална целина, како и пренесување, преку тркалата на шинската патека, на сите оптоварувања кои настануваат за време на експлоатацијата.

Носечката конструкција кај мостовските дигалки е изложена на различни оптоварувања, како на пр.: оптоварувања од тежината на товарот, оптоварувања од сопствената тежина, влијанија на работната средина итн. Кога се прави проверка на исправноста на конструкцијата се врши всушност проверка дали ќе дојде до деформација на носечките елементи при статичко испитување. Согласно член 43 од Правилникот за користење на дигалки и индустриски транспортери, кога се врши статичкото испитување се оптоварува дигалката со оптоварување кое е за 25% поголемо отколку номиналното пропишано оптоварување. Испитувањето се прави така што товарот е поставен да одговара на максималните напрегања на дигалката, значи се поставува на средина на дигалката. Времето за кое се врши испитувањето е повеќе од 10 min. Кога ќе се заврши проверката на носечките елементи при статичко испитување се врши проверка на динамичко оптоварување. При

динамичкото оптоварување носечките елементи се оптоваруваат со товар кој е за 10% поголем од номиналното оптоварување. За испитаната дигалка да ја означиме како исправна потребно е при мерењето на отклонот да не се забележат никакви трајни пластични деформации на дигалката (*Правилник, 2009*).

Од досега кажаното се издвоени причините кои се главни за деформација на носечката конструкција на дигалките и истите најпрвин ги поделивме во три групи:

- Експлоатациони влијанија
- Надворешни влијанија
- Човечки фактор

Во продолжение ќе бидат објаснети.

А) Експлоатациони фактори

Под експлоатациони влијанија би ги внеле:

- Односот на капацитетот наспроти бројот на вистински работни циклуси на час
- Истрошеноста на носечката конструкција

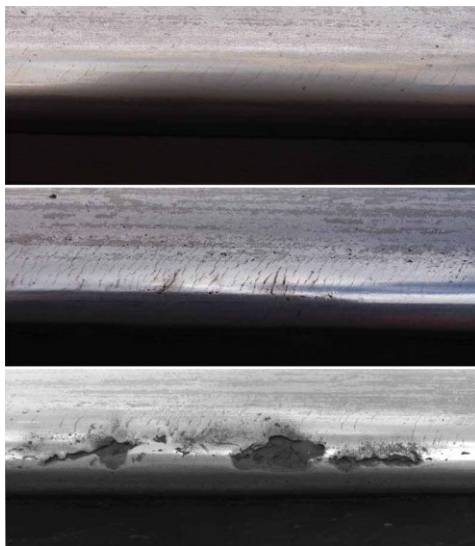
Односот помеѓу капацитетот и бројот на вистинските работни циклуси го определува оптоварувањето на дигалката со товар во границите на дозволения капацитет и во рамките на дозволения број вистински работни циклуси на час (*Sarraf & McGuire, 2020*), (*Шосџаков, Зелић, & Живанић, 2014*).

Истрошеноста на носечката конструкција го подразбира степенот на абеење, односно проверка дали при работата на дигалката се слушаат звуци на гребеење, дали тркалата се движат правилно по шинските патеки, дали абеењето на тркалата е симетрично, дали абеењето на шините е симетрично, колкав е степенот на абеење и сл. Исто така потребно е да се изврши проверка на споевите и профилите (слика бр. 2.5).

Треба да се земат предвид и хоризонталните сили. Во литературата под хоризонтални сили кои се јавуваат при движење на дигалки (портални и мостовски) се подразбира сила која дејствува во рамината во која доаѓа до допир помеѓу тркалото и шината.

Абеењето се појавува кај допирните површини и е последица на триењето што се случува при движење на тркалата по шините. Изабеноста на површината на шината и на венецот од тркалата најчесто настанува при адхезивно и абразивно абеење или поради трибохемиски реакции (пример корозија) која влегува во надворешни влијанија.

Важно е и во кој период од животниот век е дигалката според кривата на Када, односно зачестеноста на отказите.



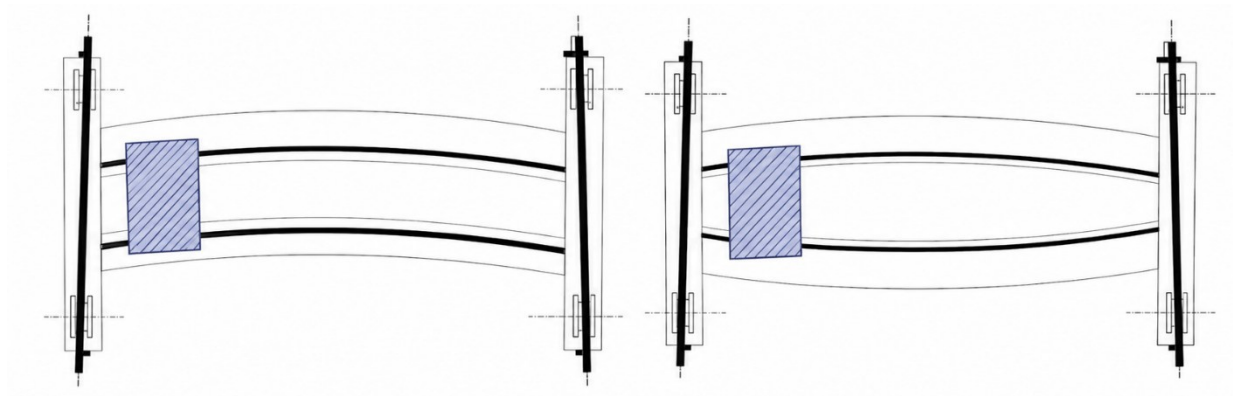
Слика бр. 2.5 Видови на различни оштетувања кај шините (Zelić, 2018)

Б) Надворешни влијанија

Деформација кај дигалките може да се случи и поради нееднакво загревање на лимовите на главните носачи, што може да биде последица на прекумерена изложеност на топлинско зрачење. Кога ќе кажеме топлинско зрачење не мислиме само на сончево зрачење, доколку разгледуваме случај дигалката да работи на отворено, исто вакво топлинско зрачење може да се случи и во затворени простории (пр. леарници) каде температурите се многу високи (Божић-Трефалић, Николић и Косић, 2013).

Затоа што бочните носачи имаат релативно голема крутост, температурната дилатација на еден од главните носачи во одреден интензитет има влијание и на промените на обликот кај другиот главен носач. На слика бр.2.6 се прикажани можните деформации поради изложеност на високи температури.

Доколку станува збор за долгорочна изложеност на високи температури или пак изложеност на многу високи температури може да дојде до деформации кои во голема мера може да имаат негативно влијание врз работата на дигалката. Во таа насока, поради настанатите отстапувања во распонот на шините и на главните носачи може да дојде до отежнато движење на количката.



Слика бр. 2.6 Деформации на носечката конструкција поради изложеност на високи температури (Шостаков, Зелић, & Живанић, 2014)

Како втор индикатор на надворешни влијанија би го издвоиле дејството на ветерот кај дигалките кои работат на отворено или пак кај простор кој е под некој агол накривен. Така кај оние дигалки кои имаат несиметрична конструкција, нееднаквите отпори на силата од ветерот на краевите од носачите може дополнително да доведе до деформација на дигалката (Шостаков, Зелић, & Живанић, 2014). Кај дигалките кои се користат на отворено кога има брзини на ветерот поголеми од оние кои се препорачани од производителот потребно е да се направи прекин на работата, посебно доколку станува збор за дигалки со голем распон бидејќи оптоварувањата на ветерот зависат од распонот на дигалката.

В) Човечки фактор

Според Правилникот за користење на дигалки и индустриски транспортери потребно е да се извршуваат периодични прегледи на дигалките. Според Правилникот постојат повеќе видови на технички прегледи кои се разликуваат во зависност од периодите на извршување на истите, како и од техничките карактеристики на дигалката. Според тоа, прегледите се поделени во четири групи (Божић-Трефалић, Николић и Косић, 2013):

- прв технички преглед
- периодичен, годишен технички преглед
- детален технички преглед
- вонреден технички преглед

Според Правилникот не е овластен секој да извршува промени на техничката опрема. Под поимот промени на дигалката подразбираме: променета брзина, измени во носивоста или капацитетот, измени во висината на дигање, промена на деловите кои фабрички не се со конструкцијата и сл. За извршување на наведените значителни промени овластување има:

- производителот - доколку претходно има комплетно изработена техничка документација за извршените промени

- монтажерт - според претходна изработена техничка документација за новонастанатите промени со упатство за нивно извршување
- сервисер - според претходна изработена техничка документација за новонастанатите промени со упатство за нивно извршување

Под редовно одржување се подразбира проверка на целокупната техничка опрема еден пат во три месеци, се разбира доколку во упатството не е пропишан друг временски интервал (Zelić, 2018).

Кога станува збор за проверка на исправноста на шините и тркалата всушност се мисли на проверка на движењето на количката вдолж главниот носач, односно дали дигалката ги извршува своите основни функции. Потребно е да се направи визуелен преглед на пукнатини на шините и пукнатини на целокупната носечка конструкција, да се провери дали постои изместување на тркалата, дали постои нагиб и дали движењето е без застој и пластични деформации. При прегледите е потребно и користење на соодветни исправни уреди (Јакимовска, 2021):

- Мерење на брзината на движење на дигалката се врши со уред за мерење на брзина. Според регулативата, брзината на движењето, кога станува збор за дигалки на електричен погон и за дигалки кои се управувани од подот не смее да надмине брзина поголема од 50 m/min
- Потребни се соодветен уред и техника при мерење на отклонот на дигалката кога работи
- Треба да се направат мерења на геометриските отстапувања како и да се изврши мерење на напонската состојба на носечката конструкција

При работа со дигалките, забрането е да се врши (ISO 9927-1):

- оптоварување со товари кои се поголеми од дозволените
- употреба на безбедносните уреди како постојани работни елементи
- дигање на товарот со неправилно поставено јаже - накосено јаже или верига
- непотребно задржување на товарот во подигната положба
- несоодветни или воопшто неспроведени технички мерки за заштита при пренесување на опасни товари

За сите извршени технички прегледи мора да постои документација, односно матична книга во која ќе се води евиденција за историјата на одржување на дигалката.

Технологијата на одржувањето ги дефинира начините на извршување на секоја постапка, потребните алати, редоследот како и начинот како да се изврши и провери квалитетот на одржувањето.

2.1.5. Експлоатациски и безбедносни аспекти на мостовските дигалки

Експлоатацијата на мостовските дигалки, како машини за цикличен транспорт, е поврзана со бројни фактори кои влијаат врз нивната безбедност и работен век. Променливите оптоварувања, динамичките ефекти, заморот на материјалот и абењето на

елементите претставуваат главни причини за намалување на безбедноста на системот со текот на времето.

Поради тоа, современиот пристап кон експлоатацијата на мостовските дигалки не се базира исклучиво на периодични прегледи, туку и на континуирано следење на состојбата на критичните елементи. Особено внимание се посветува на главниот носач, механизмите за дигање, јажињата, тркалата и сопирачките, бидејќи нивниот отказ може да има сериозни последици (*Moskvicheva & Chernyakova (2020)*).

2.1.6. Откази кај мостовските дигалки

Мостовските дигалки спаѓаат во машини со зголемено ниво на ризик, како резултат на тоа што нивната експлоатација подразбира дигање и преместување на товари со значителна маса, често во присуство на луѓе и друга опрема. За разлика од останатите машини за цикличен транспорт, кај мостовските дигалки потенцијалните последици од отказ не се ограничени само на економска штета, туку можат да вклучуваат сериозни повреди, па дури и губење на човечки животи. Поради тоа, прашањата поврзани со надежноста и безбедноста на овие системи се од суштинско значење.

За разлика од статички оптоварените конструкции, кај дигалките доминираат променливи напрегања, кои доведуваат до акумулација на оштетувања со текот на времето. Затоа, безбедноста не зависи само од моменталната носивост, туку и од историјата на оптоварувањата, бројот на извршени работни циклуси и начинот на користење на дигалката.

Дополнително, во инженерската практика, системите кај кои отказот може да има катастрофални последици се означуваат како безбедносно-критични системи (*анг. safety-critical systems*). Мостовските дигалки јасно припаѓаат на оваа категорија, бидејќи нивниот отказ може да резултира со неконтролирано паѓање на товарот, судир со конструктивни елементи или губење на стабилноста на системот (*Moskvicheva & Chernyakova (2020); Akhtulov et al. (2020)*).

Овој аспект на дигалките бара примена на повисоки фактори на безбедност, редовни инспекции и конзервативен пристап при димензионирањето на критичните елементи. Истовремено, тоа ја оправдува примената на напредни аналитички и нумерички методи за процена на однесувањето на конструкцијата под реални експлоатациските услови.

Ризикот кај мостовските дигалки произлегува од комбинација на повеќе фактори. Главни извори на ризик се:

- конструктивни недостатоци или ослабување на носечките елементи
- преоптоварување или неправилна распределба на товарот
- отказ на механизмите за дигање или кочење
- човечки фактор и несоодветно ракување

Важно е да се нагласи уште еднаш дека овие фактори ретко дејствуваат изолирано. Најчесто ризикот се зголемува кога повеќе неповолни услови се јавуваат истовремено, што ја

нагласува потребата од системски пристап кон процена на безбедноста (*Moskvicheva & Chernyakova (2020)*).

Како што е кажано досега, мостовските дигалки, како сложени машини за цикличен транспорт, во текот на својот работен век се изложени на голем број повторливи оптоварувања и неповолни експлоатациони влијанија. Овие влијанија постепено доведуваат до ослабување на поединечни конструктивни и функционални елементи, што може да резултира со појава на откази. Анализата на отказите не е само прашање на дијагностика, туку претставува основа за разбирање на вистинското однесување на дигалката во експлоатација и за развој на стратегии за зголемување на безбедноста (*Moskvicheva & Chernyakova (2020)*, *Ostrić (2009)*).

Отказите кај мостовските дигалки ретко се резултат на еден елемент. Најчесто тие се последица на долготрајно дејство на циклични напрегања, комбинација од статички и динамички оптоварувања, како и влијанија од околината и човечки фактор. Од друга страна пак, затоа што дигалката е составена од повеќе системи, меѓусебно поврзани, отказ кај еден елемент од некој систем брзо се пренесува на друг елемент од истиот систем, па понатаму ланчано и на другите системи. Поради тоа, современиот пристап кон анализата на откази ги разгледува мостовските дигалки како системи со зголемен ризик, кај кои е неопходно систематско идентификување на критичните точки (*Gorynin et al. (2018)*).

▪ **Откази кај главниот носач**

Главниот носач е конструктивен елемент со највисоко ниво на одговорност, бидејќи ја носи тежината на товарот, количката и сопствената тежина на мостовската конструкција. Во текот на работните циклуси, напрегањата во главниот носач се менуваат во зависност од положбата на количката, што доведува до појава на променливи свиткувачки моменти и деформации (*Akhtulov et al. (2020)*).

Најчести механизми на откази кај главниот носач се:

- појава на пукнатини од замор во зоните со концентрација на напрегања
- локална пластична деформација поради преоптоварување
- ослабување на материјалот поради корозија

Пукнатини од замор најчесто се иницираат во зони со концентрација на напрегања, како што се заварените споеви, отвори за прицврстување, ребра за зајакнување и места со нагла промена на геометријата на попречниот пресек. Овие пукнатини можат да растат забележливо во текот на подолг временски период, сè додека не достигнат критична должина (*EN 13001-3*).

Дополнителен фактор кој придонесува за ослабување на главниот носач е корозијата. Во индустриски средини со зголемена влажност, прашина или специфични гасови, корозијата може значително да го намали пресекот на носачот. Комбинацијата од корозија и замор претставува особено опасно оштетување, бидејќи корозијата ја олеснува иницијализацијата на пукнатини од замор.

Поради наведените причини, современиот пристап кон безбедноста на мостовските дигалки бара главниот носач да не се разгледува само преку статички пресметки, туку и преку анализа на неговото однесување во текот на целиот работен век. Ова вклучува процена на бројот на работни циклуси и динамичките коефициенти, како и редовно следење на состојбата на конструкцијата. Таквиот пристап овозможува навремено откривање на критични оштетувања и донесување информирани одлуки за продолжување или ограничување на експлоатацијата.

Од гледна точка на докторскиот труд, оваа анализа претставува логичен мост кон примената на напредни методи за процена на безбедноста, како што се нумеричките симулации, анализите на замор и методите за процена на надежноста. Главниот носач, како централна носечка компонента, претставува идеален елемент за вакви анализи, бидејќи неговото однесување во голема мера ја определува целокупната безбедност на мостовската дигалка како машина за цикличен транспорт.

▪ **Откази кај системот за дигање**

Системот за дигање, особено челичните јажиња и куката, се изложени на високи циклични оптоварувања. Кај челичните јажиња, најчести причини за отказ се заморот поради повторливи свиткувања, абењето и корозијата. Кај куката, критична е појавата на пукнатини од замор во закривениот дел, каде што се јавуваат највисоките напрегања (*ISO 12482*).

▪ **Откази кај челичните јажиња и куката**

Челичните јажиња и куката претставуваат елементи кои директно го пренесуваат товарот и поради тоа се изложени на високи напрегања. Кај челичните јажиња, најчести механизми на отказ се (*Ostrić, 2009*):

- замор поради повторливи свиткувања преку јажниците и барабаните
- абење на жиците поради меѓусебен контакт
- корозија, особено во внатрешните слоеви на јажето

Важно е да се нагласи дека оштетувањата кај јажињата често не се видливи на прв поглед. Внатрешните жици можат да бидат сериозно оштетени, додека надворешната површина изгледа релативно исправна. Поради тоа, визуелната инспекција мора да биде дополнетата со јасно дефинирани критериуми за замена, согласно стандарди и правилници (*ISO 4309; ISO 9927-1*).

Кај куката, критичен е развојот на пукнатини во закривениот дел, каде што се јавуваат највисоките напрегања. Овие пукнатини најчесто се резултат на замор, но можат да бидат поттикнати и од преоптоварување или несоодветно ракување со товарот. Отказот на куката претставува еден од најопасните сценарија, бидејќи може да доведе до ненадејно паѓање на товарот (*ISO 7597; ISO 9927-1*).

Од аспект на безбедноста, најважно е навремено да се утврди моментот кога јажето треба да биде заменето. Современите пристапи не се базираат исклучиво на временски интервали, туку на комбинација од бројот на работни циклуси, нивото на товарите и визуелните и

функционалните индикатори на оштетување. Овој пристап е во целосна согласност со концептот на управување со работниот век кај машините за цикличен транспорт.

- **Откази кај елементите за движење и кај сопирачките**

Елементите за движење, тркалата и шините, се изложени на повторливи контактни напрегања и абење. Кај тркалата најчеста е појавата на површински пукнатини и нерамномерно абење. Овие оштетувања влијаат врз стабилноста на движењето и можат да предизвикуваат дополнителни динамички оптоварувања во конструкцијата (*Zelić et al. (2018)*).

Сопирачките, од друга страна, се изложени на високи термички оптоварувања поради дисипацијата на енергијата при кочење. Прекумерното абење или неправилното подесување на сопирачките може да доведе до намалување на сопирачкиот момент, а со тоа да се појави зголемен ризик од откази.

Од аспект на безбедносните сценарија, особено важен е отказот на сопирачката кај механизмот за дигање. Во таков случај, постои ризик од неконтролирано спуштање на товарот, што може да доведе до сериозни несреќи. Поради тоа, кај современите мостовски дигалки често се применува концепт на двојна безбедност, при што покрај основната сопирачка се вградува и дополнителен задржувач (*Јакимовска, 2021*).

Анализата на отказите на сопирачките е важен дел од процената на ризикот кај машините за цикличен транспорт. Преку систематско идентификување на потенцијалните сценарија на отказ, може да се дефинираат соодветни мерки за превенција и подобрување на безбедноста.

2.1.7. Инспекција и одржување на мостовските дигалки

Инспекцијата и одржувањето претставуваат составен дел од безбедната експлоатација на мостовските дигалки како машини за цикличен транспорт. Нивната основна цел е навремено откривање на оштетувањата и спречување на појавата на откази, кои би можеле да доведат до несреќи или долги прекини во работата.

- **Превентивно и корективно одржување**

Превентивното одржување се базира на редовни прегледи и интервенции, со цел да се спречи појава на сериозни оштетувања. Корективното одржување, пак, се спроведува по настанување на отказ и обично е поврзано со повисоки трошоци и поголеми ризици. Кај мостовските дигалки, современиот пристап се стреми кон доминација на превентивното одржување (*Frankovský et al. (2020)*).

- **Инспекциски критериуми и периодични прегледи**

Инспекциските прегледи опфаќаат визуелна проверка, мерење на деформации, контрола на абење и испитување на заварени споеви. Особено внимание се посветува на критичните зони, како што се главниот носач, механизмите за дигање и сопирачките системи (*Правилник, 2009*).

2.2. Преглед на стандарди, закони и правилници за мостовски дигалки

Во оваа потточка е направен преглед на релевантните стандарди, правилници и закони што го регулираат проектирањето, употребата и оценувањето на мостовските дигалки. Опфатени се национални прописи, како и европски и меѓународни стандарди кои ги дефинираат барањата за безбедност, оптоварување, конструкција на дигалките, инспекција и сеизмичка анализа. Во Табела бр. 2.3 е направен преглед и кратко објаснување на сите документи коишто ќе бидат опфатени во ова поглавје, додека во Табела бр. 2.4 е дадена улогата на стандардите по фазите на истражувањето од овој докторски труд.

Табела бр. 2.3 Преглед на стандарди, закони и правилници

Група	Документ	Година	Краток опис	Улога во докторскиот труд
Закони и правилници (PCM)	Закон за техничката инспекција, Сл. Весник бр. 88/2008 (со измени)	2008	Опфаќа прегледи, надлежни органи, постапки за инспекција	Основа за вонреден технички преглед по сеизмичко дејство
	Правилник за користење на дигалки и индустриски транспортери, Сл. Весник бр. 32/2009	2009	Пропис за користење, одржување, периодични и вонредни прегледи	Директна поврзаност со процена на дигалка по сеизмичко дејство
МКС/EN стандарди за дигалки	<i>MKS EN 13001-1:2015 – General principles</i>	2015	Општи безбедносни барања за дигалки	Основна рамка за конструирање на дигалки
	<i>EN 13001-2:2014 – Loads</i>	2014	Ги дефинира оптоварувања и динамичките коефициенти	Стандард за определување на оптоварувањата кај мостовски дигалки
	<i>EN 1991-3:2006 – Actions induced by cranes</i>	2006	Нормативите за конструкциите на дигалките	Продолжување на 13001-2 во делот оптоварувања
	<i>EN 1993-6:2007 – Crane supporting structures</i>	2007	<i>Eurocode 3</i> – димензионирање на дигалките	Главен стандард за пресметка на главниот носач кај мостовска дигалка

Сеизмички стандарди	<i>EN 1998-1:2004</i>	2004	<i>Eurocode 8 – сеизмички дејства и правила</i>	Стандард за дефинирање на сеизмичко оптоварување
	<i>Eurocode 8 Worked Examples</i>	–	Примери по <i>EC8</i>	Поддршка во методологијата по сеизмичка состојба на мостовските дигалки

Табела бр. 2.4 Улога на стандардите по фази

	Фаза во анализата	Применети закони / стандарди	Улога во истражувањето
1	Законска рамка	Закон за техничка инспекција; Правилник 2009	Дефинирања кога и како се врши <i>вонредна инспекција</i>
2	Конструкција и оптоварувања на дигалката	<i>EN 13001-1, EN 13001-2, EN 1991-3</i>	Определување основни и динамички оптоварувања
3	Статичка/конструктивна анализа	<i>EN 1993-6</i>	Пресметка на напрегања и деформации на главниот носач
4	Сеизмичка анализа	<i>EN 1998-1-1:2024</i>	Дефинирање на влезните податоци за временски зависната динамичка анализа
5	Процена по сеизмичко дејство	<i>ISO 12482; ISO 9927-5:2017</i>	Процена на оштетување, работен век, потреба од санација на мостовската дигалка
6	Финална одлука	Комбинација од сите	Дали дигалката може безбедно да продолжи со работа

Нормативната рамка претставува основен предуслов за обезбедување на безбедно, контролирано и технички исправно функционирање на мостовските дигалки. Нејзината цел е да ги дефинира критериумите и процедурите според кои се проектира, користи и оценува оваа опрема, особено во услови кога е изложена на сложени оптоварувања и екстремни дејства како што е земјотресот. Стандардите, законите и правилниците имаат клучна улога во процесот на проценка, бидејќи ги утврдуваат барањата за носивост, безбедност, инспекција

и следење на состојбата на системот, со што овозможуваат единствена методолошка основа за техничка анализа. Националните прописи во Р. Северна Македонија обезбедуваат регулаторна структура за користење и инспекција на дигалките, додека европските и меѓународните стандарди ја надградуваат оваа рамка со детални технички насоки за проектирање, оптоварување, структурно однесување и сеизмичка отпорност.

2.2.1. Национални регулативи

- Закон за техничка инспекција (*Сл. Весник бр. 88/2008*)

Во законот за техничка инспекција (*Сл. весник бр. 88/2008*) се врши дефинирање на техничката опрема. Под техничка опрема спаѓаат: уреди, машини и инсталации кои се подложни на задолжителна инспекција. Во таа група се опфатени и мостовските дигалки, како машини за вршење на индустриска дејност. Поимите „производител“, „корисник“ и „користење“, во законот дават јасна поделба на одговорностите во текот на целиот животен циклус на дигалките, од проектирање и пуштање во употреба, до одржување и проверка. Посебно значајно е што користењето на техничката опрема се дефинира како опрема за која се потребни проверки и постапки по спроведени замени или пак дефекти, што укажува на обврската за повторна оценка на безбедноста по вонредни настани и замени. Во тој контекст, законот претставува клучна правна основа за спроведување на вонредна техничка инспекција и структурна процена на состојбата на дигалките по одреден вонреден настан.

- Правилник за користење на дигалки и индустриски транспортери (*Сл. весник бр. 32/2009*)

Правилникот за користење на дигалки и индустриски транспортери (*Сл. весник бр. 32/2009*) претставува основен национален акт кој детално ги уредува условите за безбедно користење, одржување, испитување како и техничка исправност на дигалките и општо за транспортна опрема. Овој Правилник ги дефинира обврските на корисниците, операторите како и овластените правни лица во текот на целиот работен век на дигалката, вклучувајќи пуштање во употреба, редовно работење, одржување, периодични проверки, како и постапки што се применуваат по настани кои можат да влијаат врз нејзината безбедност и конструктивна исправност. Целта на Правилникот е да се обезбедат протоколи за целиот работен век на дигалките, обврските во сите фази од користењето на дигалката, но и постапки што се применуваат по настани кои можат да влијаат врз нејзината безбедност и конструктивна неисправност. Протоколите се во насока да се овозможи зголемување на безбедноста при употреба на дигалките, како и намалување на откази на опремата.

Во рамки на Правилникот, дигалките се разгледуваат како техничка опрема со зголемено ниво на ризик. Во таа насока во Правилникот се пропишани строги барања за пуштање во употреба, како и за редовните и вонредните прегледи. Корисникот на дигалката има законска обврска да обезбеди таа да се користи исклучиво во состојба што гарантира безбедна работа, што подразбира редовно одржување, соодветна експлоатација и навремено

спроведување на пропишаните технички прегледи. Правилникот јасно разликува повеќе видови испитувања и прегледи, меѓу кои се издвојуваат:

- испитувањата при пуштање во употреба
- периодичните технички прегледи
- вонредните прегледи

Вонредните прегледи се со особена важност во контекст на овој докторски труд. Вонредните прегледи се задолжителни во случаи по изложување на дигалката на екстремни дејства, како што се земјотреси, удари, оптоварувања над дозволените граници или пак други настани што можат да предизвикаат оштетување на конструкцијата или на составните механизми (*Правилник, 2009*).

Безбедноста на дигалката не се оценува само врз основа на неколку фактори, туку врз основа на целокупната моментална состојба на конструктивните и функционалните составни системи и елементи (*Јакимовска, 2021*). Во случај да се утврдат оштетувања, деформации, или други појави што можат да влијаат врз намалување на безбедноста при користење, во Правилникот се наведени мерки кои вклучуваат ограничување на работата, привремено исклучување од употреба или отстранување на неправилностите пред повторно пуштање во работа.

Посебен акцент за темата на овој докторски труд има одредбата дека вонредните технички прегледи се задолжителни по настани што можат значително да влијаат на стабилноста и безбедноста на дигалката. Во Правилникот нема јасно дефиниран протокол за сеизмичка анализа на дигалките, но во Правилникот е потенцирана обврската за повторна проверка на техничката исправност по сеизмичко дејство, со што индиректно се наметнува потребата од детална структурна и динамичка процена. Од друга страна, во Правилникот се истакнува улогата на овластените правни лица и стручните служби кои ги вршат техничките прегледи и испитувања, при што се бара тие да располагаат со соодветна опрема и квалификуван кадар.

Сумирано, Правилникот за користење на дигалки и индустриски транспортери воспоставува јасни правила за безбедна експлоатација, контрола и инспекција на дигалките, при што вонредните прегледи претставуваат клучен елемент во обезбедувањето на сигурна работа, по одреден несакан настан. Во рамки на овој докторски труд, Правилникот претставува основна национална база за постапките при процена на состојбата на мостовските дигалки.

- Национални стандарди (*МКС EN*) применливи за дигалки

Националните стандарди *МКС - EN* претставуваат клучен дел од нормативната рамка за конструирање, користење и оценка на мостовските дигалки во Р. Северна Македонија. Овие стандарди се целосно усогласени со европските *EN* стандарди и официјално се усвоени како национални.

Стандардот *МКС EN 13001-1:2015 – Кранови – Општи принципи за проектирање* (*МКС EN 13001-1, 2015*) има важна улога, бидејќи ги дефинира основните концепти, принципи и безбедносни барања што мора да се исполнат при проектирањето и верификацијата на носечката конструкција на дигалките. Стандардот опфаќа делови кои се поврзани со безбедноста на дигалките, одредувајќи ги граничните услови кои се поврзани со безбедна употреба на конструкцијата и нејзините составни елементи во текот на предвидениот работен век.

Во *МКС EN 13001-1* се дефинирани општите принципи за проверка на носивоста, стабилноста и функционалноста на дигалките. Стандардот го разгледува однесувањето на конструкцијата под дејство на различни видови оптоварувања и влијанија, при што се нагласува потребата од вклучување на динамичките ефекти, повторливите работни циклуси и можните неповолни сценарија во текот на експлоатацијата. На овој начин, *МКС EN 13001-1* претставува основа врз која проектирањето на мостовските дигалки не се сведува само на статичка проверка, туку се разгледува како сложен систем изложен на временски променливи дејства и појава на оштетувања од замор со текот на времето.

Особено значајно за темата на овој докторски труд е тоа што стандардот ја нагласува важноста на претпоставените услови на користење и нивното влијание врз безбедноста на дигалката. Според *МКС EN 13001-1* се дефинираат работни сценарија и класи на користење, што значи дека безбедноста на конструкцијата на дигалките е пропорционална со условите на експлоатација на дигалката. Во случаи кога дигалката е изложена на дејства што не биле експлицитно земени предвид во фазата на проектирање, може да дојде до отстапување од предвидената состојба на дигалката. Оттука, стандардот индиректно ја нагласува потребата од повторна оценка на состојбата на дигалката по природни катастрофи, со цел да се утврди дали таа и понатаму ги исполнува основните безбедносни барања.

Како национално усвоен европски стандард, *МКС EN 13001-1 (EN 13001-3, 2014)* има значајна практична примена како во процесот на техничка инспекција, така и во донесувањето на одлуки за понатамошно користење на дигалките. Иако стандардот првенствено е наменет за фазата на проектирање, неговите принципи се широко применливи и при анализа на конструкцијата при експлоатација, особено кога се врши проверка на безбедноста под различни и непредвидливи услови на оптоварување. Во комбинација со националните законски и подзаконски прописи, *МКС EN 13001-1* обезбедува техничка основа врз која може да се темели стручна и аргументирана процена на состојбата на мостовските дигалки.

Во рамките на ова истражување, *МКС EN 13001-1* се користи како референтен документ за дефинирање на основните безбедносни принципи и инженерски критериуми што треба да ги исполнува мостовската дигалка. Овој стандард претставува суштинска врска помеѓу законската обврска за безбедноста при експлоатација, како и инженерската методологија за процена на конструктивната и функционалната состојба на мостовските дигалки по одредени неочекувани услови на оптоварување.

2.2.2. Меѓународни и европски стандарди

➤ Стандарди за крански товари и носечки конструкции

▪ EN 13001-3

Европскиот стандард *EN 13001-2:2025 – Crane safety – General design – Part 2: Load actions* претставува еден од клучните нормативни документи за дефинирање и моделирање на силите што влијаат врз дигалките за време на нивното работење. Овој стандард е составен дел од серијата *EN 13001* и се применува заедно со *EN 13001-1*. Основната цел на овој стандард е да ги селектира релевантните оптоварувања и нивните варијации со цел да се обезбеди безбедно и сигурно проектирање и верификација на конструкцијата на дигалките. Стандардот *EN 13001-2* ги опфаќа сите реални услови на експлоатација, динамичките ефекти и можните неповолни услови за работа, што можат да се појават при работа на дигалките.

Во рамки на стандардот, вертикалното оптоварување од подигнатиот товар не се разгледува како чисто статичко, туку се зголемува со динамички фактор кој ја зема предвид реалната работа на системот за дигање. Согласно *EN 13001-2*, вертикалното оптоварување може да се изрази со изразот (2.10):

$$Q = \varphi \cdot (Q_h + Q_t) \quad (2.10)$$

каде што,

Q_h ја претставува тежината на подигнатиот товар, Q_t тежината на елементите на системот за дигање, односно тежината од куката, јажниците и јажиња, додека φ е динамички фактор на подигање, кој зависи од условите на работа и карактеристиките на подигањето. Со воведување на овој фактор, стандардот обезбедува пореална процена на внатрешните сили и напрегања во носечката конструкција на мостовската дигалка.

Покрај вертикалните напрегања, стандардот *EN 13001-2* ги опфаќа и хоризонталните инерцијални сили, што се јавуваат при забрзување и забавување на количката. Овие оптоварувања се особено важни за мостовските дигалки, бидејќи директно влијаат врз напрегањата и напоните кои се јавуваат во главниот носач. Хоризонталното оптоварување што произлегува од забрзување или забавување може да се определи со основниот инерцијален израз (2.11):

$$H = m \cdot a \quad (2.11)$$

каде што,

m претставува маса на системот за дигање, а a соодветното забрзување.

Стандардот дополнително ги разгледува напрегањата што настануваат при движење на целата дигалка, вдоль шините, при што се земаат предвид коефициентите на триење, нерамнините на патеката и асиметрична распределба на масата. Во вакви случаи, хоризонталното напрегање може да се претстави преку релација во која се вклучуваат сопствената тежина на дигалката и вертикалното дејство од товарот, соодветно зголемени со коефициентот на триење. Овој пристап овозможува проверка на стабилноста на шините на дигалката и на носечката конструкција под нормални експлоатациони услови.

Во рамките на ова истражување, *EN 13001-2* се применува како основен документ за дефинирање на работните и динамичките оптоварувања на мостовската дигалка, кои претставуваат почетна основа за понатамошна структурна и сеизмичка анализа на мостовската дигалка.

- *EN 1991-3 – Actions induced by cranes and machinery*

Европскиот стандард *EN 1991-3:2006 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 3: Actions induced by cranes and machinery (EN 1991-3, 2006)* претставува документ за дефинирање на оптоварувањата што дигалката при експлоатација ги пренесува на шините и носечката конструкција на објектот. Стандардот е дел од системот на Еврокодови и се применува во комбинација со *EN 1990* и останатите делови од *Eurocode 1*. Во рамките на втората генерација на Еврокодovите, во 2026 година е објавена ревидирана верзија на *EN 1991-3*.

Стандардот врши класификација на оптоварувањата, при што променливите оптоварувања кои се разгледуваат произлегуваат од нормалната експлоатација и вклучуваат вертикални и хоризонтални оптоварувања од сопствената тежина на дигалката, товарот кој се крева, како и инерцијалните сили кои се јавуваат како резултат на забрзувањето на количката, забавувањето на количката и закосувањето на шините. Овие оптоварувања се разгледуваат од статички и од динамички аспект. На овој начин, *EN 1991-3* овозможува пореално претставување на нормалните работни услови на мостовските дигалки.

Посебно внимание во стандардот е посветено на вертикалните оптоварувања кои се јавуваат кај дигалките. Таквите видови на оптоварувања се дефинирани преку карактеристични вредности на оптоварување од тркалата на дигалката, земајќи ги предвид најнеповолните положби на товарот и количката. За таа цел, *EN 1991-3* пропишува различни распоредби на товарот со цел да се добијат максималните и минималните реакции во кранските патеки. Дополнително, се земаат предвид и силите кои се јавуваат кај шините, а се последица на закосувањето на шинската патека, затоа што имаат големо влијание врз локалните напрегања и стабилноста на патеките и носачите.

Стандардот, исто така, ги опфаќа и оптоварувањата, како што се ударите што се јавуваат во крајните ограничувачи. Овие оптоварувања се разгледуваат како сили кои можат да имаат значајно влијание врз конструкцијата и мора да се земат предвид. Вклучувањето на овие сили е особено важно за индустриски објекти каде што мостовските дигалки работат во ограничен простор и се изложени на ризик од ненадејни запирања и удари.

Во рамки на *EN 1991-3* се дефинирани и оптоварувањата кои се јавуваат при замор, при што се земаат предвид повторливите работни циклуси и историјата на напрегања во кранските патеки и носечките елементи. Овој аспект е од особено значење за мостовските дигалки со долг работен век, бидејќи оштетувањата од замор можат значително да ја намалат носивоста и безбедноста на конструкцијата со текот на времето.

Иако *EN 1991-3* нема директна поврзаност со сеизмичка анализа, неговата примена има значајна улога во делот на процена на состојбата на мостовските дигалки по сеизмичко дејство. Дефинирањето на инерцијалните и динамичките оптоварувања, обезбедува основа за разбирање на однесувањето на носечката конструкција под временски променливи оптоварувања. Во услови на сеизмичко дејство, кога на конструкцијата на мостовската дигалка дејствуваат дополнителни хоризонтални инерцијални сили, податоците од стандардот *EN 1991-3* овозможуваат квалитативна и квантитативна процена на нивното влијание врз безбедноста и стабилноста на системот.

Во рамките на ова истражување, *EN 1991-3* се користи како клучен европски стандард за дефинирање на оптоварувањата што мостовската дигалка ги пренесува на носечката конструкција, при што тој претставува врска помеѓу стандардите од серијата *EN 13001* и конструктивните барања дефинирани во *Eurocode 3* и *Eurocode 8*.

- *EN 1993-6 – Crane supporting structures*

Европскиот стандард *EN 1993-6:2007 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 6: Crane supporting structures (EN 1993-6, 2007)* ги дефинира правилата за проектирање и верификација на челичните конструкции кои се користат кај системите на дигалките. Овој стандард е дел од *Eurocode 3* и ги надополнува општите правила за челични конструкции дефинирани во *EN 1993-1-1*, со посебен акцент на специфичните оптоварувања, гранични состојби кои се карактеристични за дигалките.

EN 1993-6 се применува за проектирање на крански патеки кај дигалките (*анг. runway beams*), главните носачи, челните носачи, делот на спојување, заварување и помошни елементи кои пренесуваат сили од дигалката кон носечката конструкција на објектот каде што е поставена дигалката. Стандардот опфаќа дигалки кои имаат внатрешни или пак надворешни крански патеки, како и монораил-колички. При тоа, самата дигалка како машина не е предмет на овој стандард, туку оптоварувата што таа ги создава се земаат согласно *EN 1991-3* и *EN 13001*.

Основната цел на *EN 1993-6* е да обезбеди солидно ниво на безбедност при употреба, како и голема надежност на конструкциите кои се изложени на сложени и повторливи напрегања предизвикани од работата на дигалките.

Особено значаен аспект на *EN 1993-6* е деталната анализа на локалните напрегања предизвикани од движење на количката долж главниот носач, како и движење на главниот носач долж халата. Овие локални напрегања се јавуваат во средината на главниот носач, како и во деловите на спојувањето на главниот носач со челните носачи. Стандардот дава аналитички модели за определување на локалните напрегања на смолкнување и локалните моменти на свиткување, кои можат да доведат до појава на локални оштетувања, пукнатини или забрзан замор. Овие ефекти се од особено значење кај постоечки конструкции, каде што акумулираните оштетувања можат да ја намалат преостанатата носивост на дигалката. Стандардот *EN 1993-6* ги разгледува и динамичките хоризонтални оптоварувања

предизвикани од забрзувањето, кочењето и нерамномерно движење на дигалката, познати како хоризонтална надолжна сила предизвикана од забрзување и забавување на мостовската дигалка (*анг. crane surge*).

Во однос на употребливоста, *EN 1993-6* пропишува гранични вредности за деформации и поместувања, со цел да се обезбеди непрекината употреба на дигалката, стабилност и прецизност при движење на количката по шините. Прекумерните деформации можат да доведат до изместување на тркалата, зголемено абеење, поради што контролата на деформациите е клучен дел од проверките.

Дополнително, стандардот посветува внимание на трајноста и одржливоста на носечките конструкции на дигалката, вклучувајќи влијанија од корозија, абеење на шините и потребата од редовно одржување и инспекција.

Во контекст на овој докторски труд, *EN 1993-6* има клучна улога, бидејќи претставува нормативна основа за анализа и оценка на носечката конструкција на мостовските дигалки. Стандардот овозможува поврзување на аналитичките и нумеричките резултати со формализирани критериуми за безбедност, употребливост и замор, што е особено важно при процена на конструкцијата под реални експлоатациони и непредвидени услови на оптоварување. Со тоа, *EN 1993-6* претставува суштинска алка помеѓу европската регулатива, инженерската практика и научниот пристап кон процена на безбедноста при употреба на мостовските дигалки. Во текот на изработката на ова истражување се користени важечките изданија на *Eurocode* стандардите. Во меѓувреме, во рамките на втората генерација на Еврокодските, објавени се ревидирани верзии на одделни стандарди, меѓу кои *EN 1993-6:2026*, кои содржи дополнителни подобрувања и ажурирани барања.

2.2.3. Сеизмички стандарди

- *EN 1998-1 – Општии правила и сеизмички дејствија*

Европскиот стандард *EN 1998-1:2004 – Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1, 2004)* претставува основа за дефинирање на принципите, методите и критериумите за проектирање и проверка на конструкции изложени на сеизмички дејства. Во 2024 година е објавена втората генерација на *Eurocode 8, EN 1998-1:2024*, со ревидирана структура и проширени правила за сеизмичко проектирање. Иако стандардот првенствено е насочен кон згради и градежни конструкции, неговите основни концепти за дефинирање на сеизмичкото дејство, комбинација на оптоварувања и проверка на граничните состојби се од директна важност и за индустриски објекти во кои се инсталирани мостовски дигалки.

EN 1998-1 ја поставува основната цел на сеизмичкото проектирање преку три клучни барања:

- заштита на човечки животи
- ограничување на оштетувањата
- зачувување на функционалноста на конструкции кои се од значење за цивилна заштита

Овие принципи се особено важни кај индустриските хали кои поседуваат мостовски дигалки, каде што појава на оштетувања или деформации може да доведе до прекин на производствениот процес и потенцијална секундарна штета на машинската опрема.

Во стандардот се дефинира начинот на претставување на сеизмичкото дејство преку забрзувања на тлото, еластични спектри на одговор, како и преку временски записи на земјотреси за напредни анализи. Посебно значење има можноста за примена на спектрална анализа и транзиентна анализа со временска историја, кои овозможуваат пореална процена на динамичкиот одговор на конструкцијата. Овие пристапи се од клучно значење при анализа на мостовски дигалки, бидејќи тие претставуваат масивни и флексибилни системи со изразени динамички карактеристики.

EN 1998-1 разликува два основни начини на проверка на конструкцијата по сеизмичко дејство, односно проверка дали конструкцијата ќе остане стабилна и нема да дојде до колапс, како и проверка дали по сеизмичко дејство таа ќе може понатаму нормално да се користи. Овие два аспекта во стандардот се дефинирани како гранична состојба на носивост (*анг. Ultimate Limit State – ULS*) и гранична состојба на ограничување на оштетувања (*анг. Damage Limitation State – DLS*). Во контекст на мостовските дигалки, оваа поделба е особено значајна, бидејќи иако носечката конструкција на објектот може да остане во зона на еластични деформации, дури и релативно мали трајни деформации можат сериозно да ја нарушат функционалноста на дигалката. Оттука, процената по сеизмичко дејство не смее да се заснова исклучиво на проверка на носивоста, туку мора да ја опфати и функционалната способност на системот, односно дали конструкцијата, кранските патеки и дигалката овозможуваат понатамошна безбедна и нормална експлоатација.

Стандардот нагласува дека сеизмичките оптоварувања мора да се разгледуваат во комбинација со другите оптоварувања, како што се сопствената тежина или променливите експлоатациони оптоварувања. Ова е директна врска со стандардите *EN 1991-3* и *EN 13001*, бидејќи овозможува интегриран пристап во кој се разгледуваат истовремено сеизмичките оптоварувања, како оптоварувањата од дигалката. Во практична смисла, ова значи дека при анализите по метод на конечни елементи на индустриски хали со мостовски дигалки, сеизмичките оптоварувања треба да се земаат предвид заедно со оптоварувањата на дигалката, со цел да се идентификуваат најнеповолните сценарија.

Преку факторот на однесување (q), *EN 1998-1* овозможува користење на намалени пресметковни сеизмички сили, земајќи ја предвид способноста на конструкцијата за контролирано нелинеарно однесување и дисипација на земјотресната енергија. Иако овој концепт е развиен главно за фазата на конструирање на носечките конструкции на згради, неговата примена е индиректно релевантна и за процена на постоечки конструкции, бидејќи овозможува разбирање на очекуваното ниво на оштетување при дадено сеизмичко дејство.

Од аспект на ова истражување, *EN 1998-1* претставува основа за дефинирање на сеизмичките сценарија што се користат во нумеричките анализи, како и за толкување на добиените резултати во контекст на надежност и безбедност при употреба. Иако стандардот

не дава директни правила за мостовски дигалки, неговата содржина дава јасни насоки за процена на состојбата на носечката конструкција на дигалката по сеизмичко дејство, особено преку анализата на деформации како и можните трајни оштетувања. На овој начин, *EN 1998-1* претставува важен мост помеѓу сеизмичката анализа и процената на состојбата на мостовските дигалки.

- *EC8 Worked Examples*

Документот *Eurocode 8: Seismic Design of Buildings – Worked Examples (Eurocode 8 Worked Examples (2012))* претставува технички и придружен документ на *EN 1998-1*, издаден од Заедничкиот истражувачки центар (*JRC*) на Европската комисија. Овој документ е предвиден со цел да се олесни практичната и правилната примена на одредбите на *Eurocode 8*. За разлика од стандардот, кој ги дефинира принципите и правилата на сеизмичко проектирање, овој документ преку детално разработени примери обезбедува јасен преглед во реална примена на сеизмичките концепти, методи на анализа и процедури за проверка на конструкциите.

Во таа насока, документот опфаќа низа карактеристични примери за армиранобетонски, челични и комбинирани конструкции, при што се прикажани сите важни чекори: дефинирање на сеизмичките оптоварувања, избор на соодветен модел на конструкцијата, спроведување на модална и спектрална анализа, комбинација на оптоварувања и проверка на граничните состојби. Посебно внимание е посветено на интерпретацијата на резултатите, што е од суштинско значење за инженерската процена на однесувањето на конструкцијата по сеизмичко влијание.

Иако овој документ првенствено е наменет за згради, може да биде водич и за сеизмичка анализа кај индустриски објекти со мостовски дигалки. Примерите прикажуваат како се дефинира сеизмичката маса и како се зема предвид влијанието на нефункционалните елементи врз однесувањето на конструкцијата. Дополнително, се прикажува начинот на оценување на деформациите и внатрешните сили, што е особено важно кај конструкции кај кои е важно да се зачува функционалноста и по сеизмичко дејство.

Во документот детално се прикажува примената на спектралната анализа со модална суперпозиција, вклучувајќи ја постапката за определување на сопствените периоди, ефективните маси и модалните облици. Овој пристап е директно применлив во нумеричките анализи по метод на конечни елементи, бидејќи овозможуваат реална процена на динамичкиот одговор на конструкцијата. Кај мостовските дигалки, каде што има подвижни системи со значајни маси, ваквиот пристап е клучен за идентификација на критичните вибрациони облици и потенцијалните зони на зголемени деформации.

Во документот исто така е нагласена важноста на проверка на граничната состојба на ограничување на оштетувањата (*анг. Damage Limitation State*). Акцентот е ставен на контрола на деформациите и релативните поместувања. Овој аспект е особено важен за процена на состојбата на мостовските дигалки по сеизмичко дејство, бидејќи дури и умерени трајни деформации на носечката конструкција или на кранските патеки можат да доведат до

нарушување на функционалноста на дигалката, иако носивоста не е надмината од пропишаната вредност.

Покрај тоа, преку практичните примери се прикажува начинот на комбинирање на сеизмичките оптоварувања со гравитационите и променливите оптоварувања, во согласност со *EN 1990* и *EN 1998-1*. Овој интегриран пристап е особено важен за индустриски хали со дигалки, бидејќи по сеизмичко дејство деформациите на конструкцијата можат да влијаат на начинот на кој дигалката работи под вообичаените оптоварувања.

Во контекст на ова истражување, *EC8 Worked Examples* служи како методолошка поддршка за правилна имплементација на сеизмичките анализи и за интерпретација на резултатите добиени по метод на конечни елементи. Документот *Worked Examples* претставува важен референтен извор при процена на конструктивната и функционалната состојба на мостовските дигалки по сеизмичко дејство, особено во делот на анализа на деформации, динамички одговор и потенцијални ограничувања во понатамошната експлоатација, како што се: намалување на работниот капацитет, ограничување на режимот на работа или потреба од санациски мерки.

2.2.4. ISO стандарди

- *ISO 12482 – Monitoring of crane design working period*

Меѓународниот стандард *ISO 12482:2014 – Cranes – Monitoring for crane design working period (ISO 12482, 2014)* опфаќа оценување на искористеноста на предвидениот работен век на дигалките, дефиниран уште во фазата на нивно проектирање. Основната цел на овој стандард е да обезбеди сеопфатен пристап за споредување на реалните експлоатациони услови со првично проектираните, со што се овозможува навремена идентификација на зголемен ризик од оштетувањата од замор и структурни откази.

Стандардот *ISO 12482* го воведува поимот проектиран работен период (*анг. design working period – DWP*), кој ја претставува временската рамка за која дигалката е проектирана да работи безбедно при дефиниран режим на користење, земајќи ги предвид бројот на работни циклуси, спектарот на товари и условите на експлоатација. За разлика од работниот век изразен во години, *DWP* се темели на бројот на работни циклуси и оптоварувањата, што е особено соодветно за дигалки со нерамномерен режим на користење.

Стандардот нагласува дека следењето на искористеноста на работниот век не ја заменува редовната техничка инспекција на дигалката. Напротив, следењето на искористеноста на работниот век на дигалката претставува дополнителна алатка која обезбедува квантитативни податоци за подобра процена на состојбата на критичните компоненти. Во тој контекст, *ISO 12482* ја поврзува процената на проектираниот работен период (*анг. DWP*) со инспекциските активности дефинирани во *ISO 9927-1*. Се препорачува оваа процена да се спроведува периодично, најчесто еднаш годишно, со цел навремено следење на состојбата на дигалката.

Една од клучните карактеристики на стандардот *ISO 12482* е дефинирањето на повеќе начини за евидентирање на работниот режим на дигалката. Овие методи опфаќаат автоматски системи за континуирано следење на работата, користење на бројачи и анализа врз основа на достапни производствени записи за начинот и интензитетот на користење на дигалката. Стандардот, исто така, дозволува и процена на работниот режим во случаи кога податоците се ограничени или целосно недостасуваат. За да се земе предвид можната неточност и непотполност на достапните податоци, стандардот воведува фактор на безбедност за броење на работниот режим, кој се користи при пресметка на *DWP* и обезбедува конзервативна процена на преостанатиот работен век.

ISO 12482 обезбедува јасна методологија за пресметка на *DWP*, при што се разгледуваат два основни аспекта: вкупниот број на работни циклуси и збирното влијание на различните нивоа на оптоварување. Овој пристап е тесно поврзан со класификацијата на дигалките според *ISO 4301-1* и овозможува оценка на тоа дали реалната експлоатација е во рамките на првично предвидената. Достигнувањето на проектната граница за кој било од овие параметри укажува на зголемена веројатност за појава на оштетувањата од замор и потреба од подетална анализа.

Во случаи кога процената на *DWP* покажува дека дигалката се приближува до, или ја надминува предвидената проектирана граница, *ISO 12482* предвидува спроведување на посебна процена (*анг. special assessment*). Оваа постапка вклучува теоретска анализа на преостанатиот работен век на критичните компоненти, како и детална практична инспекција, спроведена од стручно лице. Посебната процена може да резултира со препораки за корективни мерки, промена на режимот на користење или спроведување на генерални поправки (*анг. general overhaul*), со цел продолжување на експлоатацијата во рамките на безбедно работење.

Во овој докторски труд, стандардот *ISO 12482* се користи како поддршка при процена на состојбата на мостовските дигалки по сеизмичко дејство. Земјотресите, како природна катастрофа, претставуваат екстремни и непредвидливи настани кои можат значително да ја зголемат акумулираната оштетеност на конструкцијата и механизмите, без притоа веднаш да се појават јасно видливи оштетувања. Во такви услови, концептот на проектираниот работен период (*DWP*) овозможува заедничко разгледување на резултатите од анализите по метод на конечни елементи, инспекциските наоди и податоците за експлоатацијата. На овој начин може да се оцени дали, и во која мера, земјотресот влијаел врз преостанатиот работен век на дигалката.

Како меѓународен стандард, *ISO 12482* претставува важна врска помеѓу проектните стандарди *EN 13001*, инспекциските процедури и современите методи за процена на надежност. Неговата примена овозможува премин од исклучиво квалитативна процена на состојбата кон квантитативен, инженерски аргументиран пристап. Во тој дел всушност е важноста на стандардот *ISO 12482*, како насочувач за донесување одлуки за понатамошно

користење, ограничување или санација на мостовските дигалки под дејство на екстремни оптоварувања, вклучително и земјотреси.

2.3. Климатско влијание врз индустриските системи

2.3.1. Климатските промени како фактор на ризик за индустриската инфраструктура

Климатските промени претставуваат долгорочни промени во просечните вредности и варијабилноста на климатските параметри, предизвикани од природни процеси или од антропогени влијанија врз составот на атмосферата и начинот на користење на земјиштето. Се очекува нивното влијание да продолжи, при што се предвидуваат промени во зачестеноста, интензитетот, просторната распределба и времетраењето на екстремните климатски појави, како што се: топлотни бранови, обилни врнежи, суши и силни ветрови (IPCC, 2012).

Во инженерски контекст, ваквите појави претставуваат дополнителни надворешни влијанија кои можат да доведат до промена на работните услови, зголемени оптоварувања и постепено намалување на конструктивните и функционалните карактеристики на индустриските објекти и техничката опрема. Еден од главните показатели на климатските промени се екстремните временски и климатски настани, кои се јавуваат кога вредноста на одредена временска појава, како што се температурата, врнежите или брзината на ветерот, значително отстапува од нејзините вообичаени вредности забележани во подолг временски период. Во извештајот на *Joint Research Centre (JRC)* при Европската комисија, посветен на влијанието на климатските промени врз критичната инфраструктура, овие појави се идентификувани како еден од клучните ризици за безбедното функционирање на инфраструктурните системи (*European Commission, 2015*).

Ваквите настани можат да доведат до сериозни нарушувања во нормалното функционирање на техничките системи, односно до појава на катастрофи. Физичките настани кои доведуваат до катастрофи можат да бидат од природно или антропогено потекло, при што посебен акцент се става на хидрометеоролошките настани кои можат да претставуваат опасност во услови на изложеност и намалена отпорност на засегнатите системи ((*Germanwatch, 2026*); (*IPCC, 2012*) ; (*Li et al., 2018*)).

Поимот изложеност се однесува на присуството на инфраструктура или технички системи на локации кои можат да бидат погодени од опасни физички настани, при што постои потенцијал за нивно оштетување или нарушување на нивното функционирање. Нивото на изложеност не зависи само од локацијата на индустрискиот објект или машината, туку и од условите на нивната експлоатација и одржување. Достапноста на средства за редовно техничко одржување, примената на процедури за инспекција по дејство на екстреман настан, како и усогласеноста со важечките стандарди и прописи, можат директно да влијаат врз состојбата на конструктивните елементи и нивната способност да го издржат дејството на надворешни влијанија ((*Li et al., 2018*), (*Panteli & Mancarella, 2015*)).

Во услови на изложеност, степенот на негативните последици зависи од интеракцијата помеѓу опасниот физички настан и карактеристиките на засегнатиот систем, односно неговата отпорност на надворешни влијанија. Оваа отпорност се однесува на способноста на системот да го издржи дејството на надворешниот настан, да се прилагоди на настанатите услови и да го задржи своето функционално работење (*European Commission, 2015*).

Дополнително, климатските промени можат да доведат до отстапување од досегашните трендови во дејството на надворешните влијанија, што ја намалува безбедноста на проценките на ризик базирани на историски податоци ((*Germanwatch, 2026*); (*IPCC, 2012*)). Според (*OECD (2018)*), климатските промени предизвикуваат промени во интензитетот и зачестеноста на природните катастрофи, поради што проценката на ризикот не може секогаш да се потпира само на историски податоци.

Како што е прикажано на слика бр. 2.7, климатските промени не делуваат изолирано, туку во интеракција со изложеноста и карактеристиките на засегнатите системи (*UNDRR, 2022*). Бавните климатски процеси, како што се зголемување на температурата или подолг период на суши, можат да влијаат врз зачестеноста и интензитетот на екстремните временски настани, како што се обилни врнежи или силни ветрови ((*Germanwatch, 2026*); (*UNDRR, 2022*)). Истовремено, климатски условените хазарди можат да дејствуваат како поттикнувачки фактори за појава на други хазарди или да придонесат кон зголемување на изложеноста и намалување на отпорноста на индустриските системи. Во тој контекст, ризикот не произлегува исклучиво од дејството на опасниот настан, туку од динамичката интеракција помеѓу опасноста, изложеноста и конструктивните и функционалните карактеристики на техничките системи (*Showalter & Myers, 1994*).

Исто така, оштетувањата кај индустриските конструкции не се резултат исклучиво на дејството на природни катастрофи со висок интензитет, туку можат да настанат и како последица на кумулативното влијание на почести надворешни влијанија со помал интензитет. Повторливите температурни варијации, промените во влажноста на околината или долготрајната изложеност на динамички оптоварувања можат постепено да доведат до појава на корозија, замор на материјалот и намалување на крутоста на носечките елементи (*OECD, 2018*).

Според проекциите за медитеранскиот регион, кој ја опфаќа и територијата на Југоисточна Европа, се очекува зголемување на зачестеноста и интензитетот на екстремните топлотни настани, обилните врнежи, хидролошките суши и силните ветрови до средината на XXI век (*Germanwatch, 2026*).

Опасности поврзани со климата

Екстремни временски настани	
Топлина	Екстремна топлина; Топлотни бранови
Период без дождови	Суши
Период на дождови	Екстремни врнежи; Речни поплави
Ветер	Торнадо; Тропски бури
Снег и мраз	Снежни бури
Крајбрежно/океански области	Бурни плими
Промена на интензитетот, времетраењето или зачестеноста	
Процеси со бавен развој	
Топлина	Зголемување на температурата
Период без дождови	Зголемување на сувоста во почвата
Период на дождови	Намалување/зголемување/поголема променливост на врнежите
Снег и мраз	Намалување на глечерите, снежната покривка
Крајбрежно/океански области	Пораст на нивото на морето; Затопливање на океаните; Закиселување

Други опасности, влијанија, основни движечки фактори на ризик

Нагло-настанувачки (брзи) настани	
ГЕОЛОШКИ	ТЕХНОЛОШКИ
Земјотреси Свлечишта Цунами	Откажување/урнување на конструкции Откажување на инфраструктура (откажување на брана, прекин на електрично напојување, ...)
БИОЛОШКИ / ХЕМИСКИ	ОПШТЕСТВЕНИ
Штетници и болести (кај земјоделски култури) Инвазивни видови Инфективни болести (луѓе/животни) Морски токсини, цветање на алгив	Конфликт, постконфликтни состојби Финансиски шокови
ЕКОЛОШКА ДЕГРАДАЦИЈА	
Губење на екосистеми и биодиверзитет Дефорестација (обезшумување) Деградација на почвата, десертификација (опустинување), засолување Нарушувања (шумски пожари, пропаѓање на шуми, еутрофикација)	
Процеси со бавен развој (трендови)	

Слика бр. 2.7 Клучни хазарди и нивната меѓусебна поврзаност што може да се разгледа во рамки на сеопфатен пристап за ризик (UNDRR, 2022)

При разгледување на хазардите кои се појавуваат како резултат на климатските промени, како што се екстремните временски настани и долгорочните климатски процеси и трендови, неопходно е тие да не се анализираат изолирано, туку во меѓусебна поврзаност со други хазарди кои не се директен резултат на климатските промени (*European Commission, 2015*). Одредени долгорочни климатски процеси, како што се зголемување на нивото на морето или појавата на сушни услови, претставуваат хазарди сами по себе, но истовремено можат да влијаат врз промената на интензитетот, зачестеноста или времетраењето на екстремните временски појави (*IPCC, 2012*).

Дополнително, хазарди кои не се директно поврзани со климатските промени, како што се свлечишта предизвикани од земјотреси или пак деградација на земјиштето, можат да бидат иницирани или дополнително засилени од климатски условени настани. Во одредени случаи, овие хазарди се јавуваат како дел од комбинирани настани или дејствуваат како фактори кои ја зголемуваат изложеноста и ја намалуваат отпорноста на засегнатите системи кон климатските влијанија (*European Commission, 2015*).

Анализата на екстремните настани, заедно со долгорочните климатски трендови, во услови на климатски промени претставува значаен методолошки предизвик. Традиционалните веројатносни пристапи за проценка на ризик, кои се базираат на статистичка анализа на историски податоци, можат да бидат недоволно сигурни во услови на променлива клима. Поради тоа, се препорачува воведување на прагови на влијание поврзани со климатските дејства, како и примена на квалитативни индикатори, како што е сериозноста на последиците, со цел да се овозможи споредба помеѓу различни типови хазарди и нивните потенцијални влијанија.

При процената на изложеноста, потребно е да се разгледаат сите засегнати системи, вклучувајќи ги екосистемите, инфраструктурата, човечките животи и економските активности, со цел да се разберат последователните влијанија кои можат да се пренесат од природните системи кон техничките и општествените системи. Овој пристап подразбира проширување на традиционалната анализа, која најчесто е насочена само кон човечките загуби и материјалните штети (*Krausmann & Mushtaq, 2008*).

Изложеноста претставува динамичен фактор на ризик, кој зависи од тековните демографски, социоекономски и еколошки услови. Основните двигатели на ризик можат да влијаат врз нивото на изложеност и да придонесат за зголемување на климатски условениот ризик, понекогаш во поголема мера отколку поединечна опасност (*Krausmann & Mushtaq, 2008*); (*Marino et al., 2026*)).

Во контекст на климатските промени и катастрофите, ризикот се дефинира како потенцијал за појава на негативни последици врз човечките или еколошките системи, кои можат да бидат предизвикани директно или индиректно од опасни настани или долгорочни трендови. Овие последици може да се манифестираат како загуба на живот, повреди, оштетување или уништување на материјални средства, како и нарушување на функционирањето на екосистемите и природните ресурси (*Marino et al., 2026*).

Оттука, климатските и катастрофалните ризици не произлегуваат исклучиво од самата опасност, туку се резултат на динамичката интеракција помеѓу опасните настани, изложеноста и карактеристиките на засегнатите системи.

Во инженерски контекст, климатските промени се манифестираат преку зголемена зачестеност и интензитет на различни опасни природни појави, кои можат да доведат до дополнителни оптоварувања, деградација на материјалите и промена на работните услови на индустриските конструкции и техничката опрема. Овие влијанија најчесто се поврзани со хидрометеоролошки процеси, како што се екстремни температури, обилни врнежи, суши и силни ветрови, но во одредени случаи можат индиректно да придонесат и кон појава или интензивирање на геофизички процеси, како што се лизгање на земјиште или индуцирана сеизмичност (*Showalter & Myers, 1997*). Согласно тоа, за потребите на процена на ризик кај индустриската инфраструктура, климатските хазарди може да се групираат во хидрометеоролошки и геофизички хазарди, чие влијание врз конструктивната безбедност и функционалната способност на системите се разгледува во продолжение (*Brignone et al., 2025*).

2.3.2. Хидрометеоролошки хазарди

Хидрометеоролошките хазарди претставуваат природни процеси поврзани со атмосферските и хидролошките појави, како што се екстремни температури, обилни врнежи, суши, силни ветрови и поплави. Во услови на климатски промени, се очекува зголемување на нивната зачестеност, интензитет и времетраење, што може да доведе до дополнителни надворешни влијанија врз индустриската инфраструктура. Во инженерски контекст, овие појави влијаат врз работните услови на индустриските конструкции преку зголемување на механичките, температурните и корозивните оптоварувања. На пример, зголемената влажност и честите врнежи можат да доведат до забрзана корозија на челичните елементи, додека екстремните температурни варијации предизвикуваат дополнителни термички напрегања и промена на материјалните својства. Повторливото дејство на климатски условени оптоварувања, како температурни циклуси, ветрови или промена на влажноста, може да доведе до појава на замор кај конструктивните елементи, што со текот на времето ја намалува нивната носивост и безбедност при експлоатација (*European Commission, 2015*); (*Germanwatch, 2026*); (*IPCC, 2012*); (*Panteli & Mancarella, 2015*)).

2.3.2.1. Температурни дејства како резултат на климатски влијанија врз конструктивните елементи

Температурните дејства претставуваат променливи индиректни влијанија врз конструкцијата, кои настануваат како резултат на промени на температурата од околината или условите на експлоатација. За разлика од директните механички оптоварувања, тие не внесуваат сила директно, туку предизвикуваат дилатација (проширување) или контракција (скратување) на конструктивните елементи. Доколку овие деформации се слободни, тие не

предизвикуваат напрегања; меѓутоа, кога се ограничени од врски, лежишта или други конструктивни услови, се генерираат внатрешни напрегања и дополнителни поместувања, кои можат да влијаат врз носивоста и работната состојба на конструкцијата ((*OECD, 2018*); (*Showalter & Myers, 1994*)).

Температурното поле во рамките на еден конструктивен елемент може да се разгледува преку неколку основни температурни компоненти кои ја опишуваат распределбата на температурата во елементот. Овие компоненти вклучуваат (*IPCC, 2012*):

- просечна (рамномерна) температурна компонента, која ја претставува температурата на целиот елемент
- линеарно променлива температурна разлика околу главните оски на пресекот
- температурна разлика помеѓу различни конструктивни елементи

Нелинеарната температурна компонента претставува нерамномерна распределба на температурата низ пресекот на елементот, при што различни делови се деформираат различно, што доведува до појава на внатрешни, самобалансирани напрегања (со нулта резултант), иако не дејствува надворешен механички товар.

Варијациите на температурното поле во конструктивните елементи можат да бидат предизвикани од дневни и сезонски промени на температурата на воздухот, влијанието на сончевото зрачење, повторното зрачење од површините и други околишки фактори. Големината на температурните дејства зависи од локалните климатски услови, ориентацијата на конструкцијата, нејзината маса и материјалните својства, како и од присуството на термичка изолација или други завршни слоеви ((*Germanwatch, 2026*); (*OECD, 2018*)).

При проектирањето на конструктивните елементи потребно е да се земе предвид можноста за појава на гранични состојби како резултат на температурните движења или напрегања предизвикани од температурни промени. Во системи составени од повеќе слоеви, релативното поместување на поединечните слоеви треба да се разгледува при димензионирањето на приклучните елементи и врските помеѓу нив (*Showalter & Myers, 1994*).

Одредувањето на температурните дејства предизвикани од околишки промени се врши врз основа на варијацијата на температурата на воздухот и влијанието на сончевото зрачење. Дополнително, оперативните температурни влијанија кои се резултат на технолошки или индустриски процеси можат да бидат релевантни и треба да се земат предвид (*OECD, 2018*).

Климатските и оперативните температурни дејства врз конструктивен елемент се дефинираат преку основни температурни компоненти, кои опфаќаат просечна (рамномерна) температурна промена на целиот елемент, како и температурни разлики помеѓу различни површини на пресекот или помеѓу одделни делови на конструкцијата. Првата компонента доведува до глобална дилатација или контракција на елементот, додека температурните разлики предизвикуваат дополнителни деформации, како свиткување и појава на внатрешни напрегања. Вредностите на овие температурни компоненти се определуваат врз основа на регионалните климатски податоци, односно карактеристичните минимални и максимални

температури на воздухот во сенка, при што се земаат предвид и специфичните услови на експлоатација на конструкцијата (IPCC, 2012).

Максималните и минималните температури кои се развиваат на површините на конструктивните елементи зависат од нивната ориентација и апсорптивните својства на површините. Површините ориентирани кон запад или југозапад обично достигнуваат повисоки температури во текот на летниот период, додека површините ориентирани кон север достигнуваат пониски температури. Бојата и завршната обработка на површината влијаат врз апсорпцијата на сончевото зрачење, при што светлите површини апсорбираат помалку топлина во споредба со темните површини ((IPCC, 2012), (Panteli & Mancarella, 2015), (Showalter & Myers, 1994)).

Во простории без контрола на температурата, работните температури треба да се дефинираат како опсег кој ги опфаќа реалните горни и долни граници на експлоатационите услови. За конструктивни елементи со ниска топлинска инерција може да се земе предвид и ноќното ладење (IPCC, 2012).

Во случаи кога делови од конструкцијата се наоѓаат под нивото на околното земјиште, може да се применат различни температурни вредности во однос на оние за елементите изложени над земја.

Ефектите од климатските промени треба да се земат предвид при определување на температурните дејства врз конструкцијата. Во таа насока, карактеристичните вредности на минималната и максималната температура на воздухот можат да се модифицираат преку воведување на дополнителни температурни компоненти поврзани со климатските промени (CEN, 2024).

Промените во климатските параметри, како што се температурните екстреми, можат да доведат до промена на униформните и температурните градиенти во конструктивните елементи. Во услови на ограничено термичко ширење, ваквите варијации резултираат со дополнителни внатрешни напрегања и деформации, кои можат да влијаат врз носивоста, стабилноста и функционалната безбедност на носечките елементи на мостовските дигалки. Согласно EN 1991-1-5, ефектите од климатските промени треба да се земат предвид при определување на температурните дејства врз конструктивните елементи (CEN, 2004).

- Влијание на температурните варијации врз механичките својства на материјалите

Селекцијата на материјали за носечките челични конструкции треба да се изврши со цел да се избегне појава на лом, особено во услови на ниски температури. Според EN 1993-1-10, ризикот од лом е поврзан со комбинација од повеќе фактори, како што се (CEN, 2004):

- механичките својства на материјалот
- дебелината на елементите
- геометријата на конструктивните детали
- концентрациите на напрегања
- постоење на иницијални дефекти
- резидуални напрегања

- заморно оптоварување
- како и стапката на деформација при случајни дејства

При тоа, минималната работна температура на челичниот елемент претставува клучен параметар кој директно влијае врз карактеристиките на материјалот. Намалувањето на температурата доведува до транзиција од дуктилно кон кршливо однесување на челикот, при што се намалува неговата способност за апсорпција на енергија пред отказ ((*European Commission, 2015*); (*CEN, 2004*)).

Референтната температура на елементот се определува како функција од минималната амбиентална температура, како и дополнителни температурни разлики кои произлегуваат од:

- геометријата на елементот
- присуството на пукнатини
- напрегања од ограничено температурно ширење
- и ефекти од заморно оптоварување

Во такви услови, напрегањата кои произлегуваат од температурни промени можат да доведат до појава или ширење на пукнатини, особено во зони со концентрација на напрегања. Дополнително, температурните варијации можат да индуцираат напрегања поради ограничено ширење или собирање на материјалот, што треба да се земе предвид при процена на интегритетот на конструкцијата (*CEN, 2004*).

Овие ефекти се особено значајни кај конструкции изложени на циклични оптоварувања и променливи климатски услови, како што се мостовските дигалки, каде што комбинацијата од ниски температури и заморно оптоварување може да доведе до намалување на отпорноста на материјалот, ширење на пукнатини и предвремен отказ ((*European Commission, 2015*); (*CEN, 2004*); (*IPCC, 2012*); (*Panteli & Mancarella, 2015*)).

Во услови на климатски промени, кои се карактеризираат со појава на екстремни температурни вредности и поголеми температурни варијации, постои потенцијал за зголемен ризик од лом кај челичните конструктивни елементи. Ваквите промени можат да влијаат врз безбедноста и работниот век на индустриските конструкции, особено кај системи изложени на динамички и циклични оптоварувања, како што се мостовските дигалки (*CEN, 2004*).

Хидрометеоролошките хазарди можат да предизвикаат директни и индиректни влијанија врз конструктивното однесување на индустриските системи. Екстремните температурни варијации доведуваат до појава на дополнителни температурни напрегања како резултат на ограничено ширење или собирање на материјалот, што може да влијае врз состојбата на напрегање во конструктивните елементи. Долготрајната изложеност на високи температури и влажност може да го забрза процесот на корозија, што доведува до намалување на ефективниот пресек на носечките елементи и нивната носивост (*IPCC, 2012*).

Дополнително, климатските влијанија можат да предизвикаат промени во динамичките карактеристики на конструкцијата, како што се сопствените фреквенции и облиците на

вибрации, што е особено значајно кај конструкции изложени на циклични оптоварувања. Кај мостовските дигалки, ваквите промени можат да влијаат врз распределбата на напрегањата во главниот носач, со што се зголемува ризикот од појава и ширење на пукнатини од замор (UNDRR, 2022).

Во услови на климатски промени, кои се карактеризираат со зголемена зачестеност и интензитет на екстремни временски настани, постои потенцијал за промена на работните услови на индустриските конструкции, што може да доведе до намалување на нивниот работен век и безбедност. Ова укажува на потребата од интегрирање на климатските влијанија во процесот на процена на состојбата и безбедноста на конструктивните елементи ((Germanwatch, 2026); (IPCC, 2012)).

Наведените влијанија претставуваат значаен фактор кој треба да се земе предвид при процена на безбедноста и преостанатиот работен век на главниот носач на мостовската дигалка во услови на променливи климатски дејства.

2.3.2.2. Геофизички хазарди

За разлика од хидрометеоролошките хазарди, кои делуваат постепено и најчесто предизвикуваат долгорочни промени во состојбата на конструктивните елементи, геофизичките хазарди се карактеризираат со нагло дејство и краткотрајни, но интензивни оптоварувања ((Abbaszadeh Shahri et al.2011); (European Commission, 2015)). Во индустриски објекти, ваквите дејства можат да доведат до значајни динамички ефекти врз конструкциите и техничката опрема, при што сеизмичкото дејство претставува еден од најкритичните надворешни фактори кој може да влијае врз безбедноста и функционалноста на мостовските дигалки во експлоатација (Nascimbene, 2023).

Земјотресите се природни геофизички појави при кои се ослободува акумулирана енергија во земјината кора, создавајќи сеизмички бранови и вибрации на тлото. Овие движења на тлото предизвикуваат динамички оптоварувања врз инженерските конструкции, што може значително да влијае врз нивното однесување, стабилност и безбедност. Сеизмичкото дејство кое треба да се земе предвид при проектирање се базира на процена на очекуваното движење на тлото на дадена локација во иднина, односно на процена на сеизмичките хазарди (анг. *seismic hazard assessment*) ((Abbaszadeh Shahri et al., 2011); (CEN, 2004); (Nale et al., 2026)).

Сеизмичките хазарди најчесто се претставуваат преку т.н. криви на опасност (анг. *hazard curves*), кои ја прикажуваат веројатноста за надминување на одреден сеизмолошки параметар како на пр. максимално забрзување на тлото (анг. *Peak Ground Acceleration – PGA*), брзина или поместување за даден временски период на изложеност на одредена локација, обично под претпоставка на карпеста подлога (анг. *ground type A*) ((CEN, 2004) ; (Nale et al., 2026); (Nascimbene, 2023)).

Општо е прифатено дека врвните вредности на параметрите на движење на тлото, особено максималното забрзување на тлото, не претставуваат доволно добар индикатор за

сериозноста на земјотресот и неговите потенцијални последици врз конструкциите. Во таа насока, слабеењето на максималното забрзување на тлото во зависност од магнитудата на земјотресот M и епицентралното растојание R може да се опише со емпириски релации од типот (2.12) (CEN, 2004):

$$\log a_g = -1.48 + 0.27M - 0.92 \log R \quad (2.12)$$

Овој израз е применлив за:

- Умерени, до силни земјотреси, односно $4 < M < 7.3$ и за
- Локации од 3 km до 200 km од епицентарот ($3 \text{ km} < R < 200 \text{ km}$)

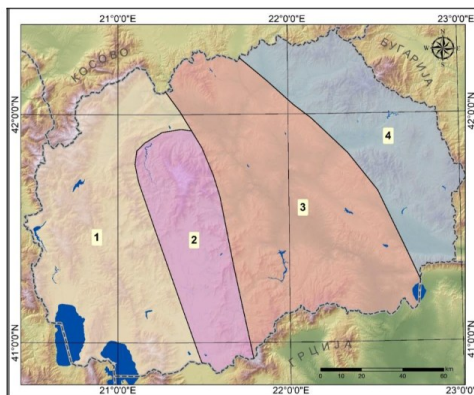
Поради ограничувањата на PGA како единствен параметар, современите пристапи се насочени кон опишување на сеизмичката опасност преку вредностите на спектралните ординати на одредени карактеристични периоди од спектрален одговор (*анг. response spectrum*). Сепак, поради поедноставување, во стандардот EN 1998-1 (*Eurocode 8*) сеизмичката опасност и понатаму се дефинира преку референтната вредност на максималното забрзување на тлото на подлога од тип А, означена како a_{gR} . Тип А претставува карпеста или многу цврста почва со минимално засилување на сеизмичките бранови (CEN, 2004).

За секоја држава, сеизмичката опасност се дефинира преку карти со зони изработени од страна на националните надлежни институции, при што националната територија се поделува на сеизмички зони во зависност од локалното ниво на опасност. Во рамки на една зона се претпоставува дека сеизмичката опасност е константна, односно дека референтното максимално забрзување на тлото a_{gR} има константна вредност ((Abbaszadeh Shahri et al., 2011),(CEN, 2004)).

Референтното максимално забрзување на тлото за секоја сеизмичка зона соодветствува на референтен повратен период T_{NCR} , избран од страна на националните власти за потребите на проверката на состојбата без колапс (*анг. no-collapse requirement*), при што препорачаната вредност е (2.13) (CEN, 2004):

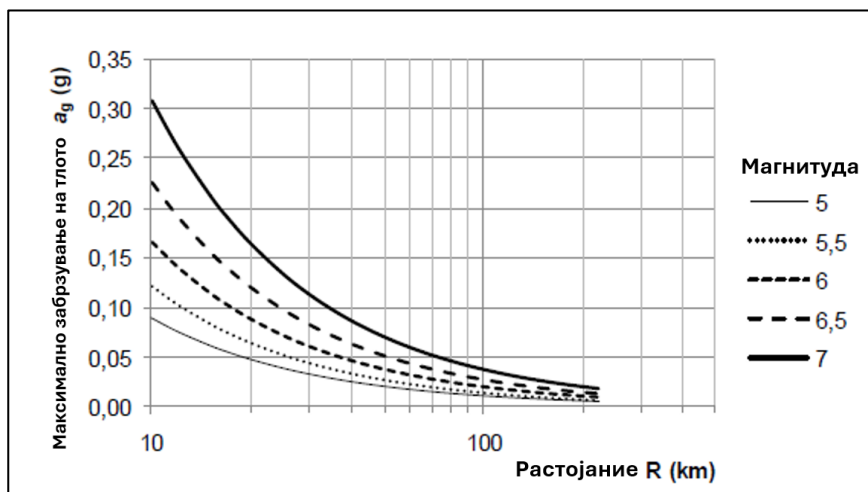
$$T_{NCR} = 475 \text{ години} \quad (2.13)$$

Вредноста $T_{NCR} = 475$ години произлегува од претпоставката дека постои 10% веројатност за надминување на референтното максимално забрзување на тлото во текот на 50 години, што приближно одговара на проектираниот работен век на градежните конструкции. Ова ниво на веројатност е усвоено во *Eurocode 8* за проверка на состојбата без колапс (*анг. no-collapse requirement*). Картите на сеизмички хазарди, од кои произлегуваат картите со зони, се добиваат врз основа на атенуациски релации кои ја опишуваат зависноста на интензитетот на движењето на тлото од магнитудата на земјотресот и растојанието од изворот. На слика 2.8 е прикажана картата на сеизмогени зони на територијата на Р. Северна Македонија (Jovanov & Drogreshka, 2024).



Слика бр. 2.8 Карта на сеизмогени зони на територијата на Р. Северна Македонија (Јоргановски Љ. и османлиџи, 1998)

Атенуациските релации претставуваат емпириски математички модели со кои се опишува постепеното намалување на сеизмичките ефекти, како што се забрзувањето и амплитудата на движењето на тлото, со зголемување на растојанието од епицентарот на земјотресот. На слика 2.9 е прикажана зависноста на забрзување на тлото a_g од растојанието од изворот на земјотресот R за различни вредности на магнитудата. Може да се забележи дека со зголемување на растојанието од изворот се намалува забрзувањето на тлото, што е резултат на атенуацијата на сеизмичките бранови ((Abbaszadeh Shahri et al., 2011), (CEN, 2004), (Nale et al., 2026)).



Слика бр.2.9 Зависност на врвното забрзување на тлото a_g од растојанието и магнитудата на земјотресот (Ambraseys, 1996)

А) Карактеристики на сеизмичкото дејство

■ Хоризонтален еластичен спектар

Движењето на тлото во стандардот EN 1998-1 е опишано со еластичниот спектар на забрзување $S_e(T)$, означен како „еластичен спектрален одговор“. Овој спектар ја претставува

зависноста на спектралното забрзување од периодот на осцилација на системот и се користи за процена на динамичкиот одговор на конструкциите при сеизмичко дејство (CEN, 2004).

Хоризонталното сеизмичко дејство се опишува со две меѓусебно ортогонални хоризонтални компоненти на движењето на тлото, кои се претпоставуваат како независни и се претставуваат со ист спектарален одговор ((Abbaszadeh Shahri et al., 2011), (CEN, 2004)).

Основната спектрална форма се состои од четири гранки: гранка со многу мал период, гранка со константно забрзување, гранка со константна брзина и гранка со константно поместување. Овие гранки се одделени со три „аголни“ периоди T_B , T_C и T_D , кои се национално определени параметри (NDPs) и овозможуваат прилагодување на спектралната форма кон сеизмолошките специфики на секоја држава (CEN, 2004).

Во овој поглед, треба да се напомене дека EN 1998-1 предвидува можност за користење на повеќе од една спектрална форма за дефинирање на сеизмичкото дејство. Ова е соодветно кога земјотресите кои влијаат на одредена локација се генерирани од значително различни извори, на пример во однос на магнитудата, растојанието од изворот или сеизмотектонските карактеристики на регионот. Во такви случаи треба да се разгледа можноста за користење на повеќе од една спектрална форма, со цел проектното сеизмичко дејство пореално да го претстави очекуваното движење на тлото. Потоа, различни вредности на a_g обично ќе бидат потребни за секој тип на спектар и за различни сценарија на земјотрес, што во практика може да значи користење на повеќе од една карта на зони на сеизмичка опасност (CEN, 2004).

Б) Вертикален еластичен спектар

Вертикалната компонента на движењето на тлото е опишана во EN 1998-1 со еластичен спектарален одговорот на забрзување на тлото S_{ve} , означен како „вертикален еластичен спектарален одговор“.

Спектарот е дефиниран со вредноста на максималното вертикално забрзување на тлото a_{vg} . За секоја сеизмичка зона ова вертикално забрзување е дадено преку односот a_{vg}/a_g , кој претставува национално определен параметар (англ. *Nationally Determined Parameters (NDP)*), што треба да биде дефиниран од страна на националните власти.

Основната форма на спектарот за вертикалната компонента е слична на онаа препорачана за хоризонталните компоненти, вклучувајќи четири гранки (ограничени со аголните периоди T_B , T_C и T_D , специфични за вертикалното дејство). Меѓутоа, во овој случај, спектралното засилување изнесува 3,0 наместо вредноста 2,5 усвоена за хоризонталните спектри.

Слично како и кај хоризонталните компоненти, во EN 1998-1 се препорачуваат две спектрални форми за вертикалните компоненти, една за земјотреси од Тип 1 и друга за земјотреси од Тип 2.

Препорачаните вредности за a_{vg}/a_g се: $a_{vg}/a_g = 0,9$ за сеизмичко дејство од Тип 1 (големи магнитуди) и $a_{vg}/a_g = 0,45$ за сеизмичко дејство од Тип 2 (мали магнитуди).

Понатаму, треба да се напомене дека, спротивно на она што е наведено за хоризонталните компоненти, се смета дека вертикалното движење на тлото не е значително засегнато од основните услови на тлото и затоа не се користи факторот на тло S ((Abbaszadeh Shahri et al., 2011); (CEN, 2004); (Nale et al., 2026)).

- Поместување на тлото и спектри на поместување

Како завршна напомена во однос на дефинирањето на сеизмичкото движење на тлото, во EN 1998-1 се наведува дека проектното поместување на тлото d_g , кое соодветствува на проектното забрзување на тлото a_g , може да се процени со следниот израз (2.14) ((Abbaszadeh Shahri et al., 2011); (Jovanov & Drogreshka, 2024); (Nale et al., 2026)):

$$d_g = 0,025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \quad (2.14)$$

каде што a_g , S , T_C и T_D се дефинирани како погоре.

Покрај поместувањето на тлото, EN 1998-1 вклучува и информативен анекс во кој е претставен еластичниот спектрален одговор на поместување $S_{De}(T)$. Тој го претставува релативното поместување (на конструкцијата во однос на тлото) и е наменет за конструкции со подолги периоди на вибрации, но исто така го опфаќа и опсегот на пократки периоди. Всушност, до гранката со константно поместување од спектарот, директна конверзија на еластичниот спектар на забрзување $S_e(T)$ во $S_{De}(T)$ се врши со изразот (2.15) (CEN, 2004):

$$S_{De}(T) = S_e(T) \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2 \quad (2.15)$$

Надвор од гранката, делот од спектралната крива, со константно поместување, се разгледуваат два дополнителни аголни периоди, T_E и T_F , за дефинирање на спектарот на релативно поместување.

Аголниот период T_E одговара на крајот на гранката со константно поместување. Потоа, помеѓу T_E и T_F , спектралните ординати се намалуваат и тежнеат кон поместувањето на тлото d_g . Понатаму, тие стануваат константни и еднакви на d_g . Може да се забележи дека при многу долги периоди, кои одговараат на многу флексибилни осцилатори со еден степен на слобода, релативното поместување е точно еднакво на поместувањето на тлото, бидејќи масата на осцилаторот останува во мирување ((Abbaszadeh Shahri et al., 2011); (CEN, 2004)).

2.3.3. Влијание на сеизмичко дејство врз индустриски конструкции

Општо е прифатено дека природните катастрофи можат да играат значајна улога во иницирањето на опасни сценарија во процесните постројки, предизвикувајќи директни и индиректни оштетувања на процесната опрема, животната средина или луѓето, односно работниците и населението кое живее во околните урбани области, особено кога во постројката се ракува со опасни материјали или тие се произведуваат. Во литературата

постојат бројни докази дека бројот на индустриски несреќи иницирани од надворешни природни катастрофи бележи континуиран раст во текот на последните децении ((Bosio et al., 2023); (European Commission, 2018); (Lisperguier et al., 2023)).

Како последица на тоа, поврзаноста помеѓу природните катастрофи и технолошките несреќи што се јавуваат во рамките на индустриските постројки, а кои можат да имаат последици и надвор од нивните граници, добива сè поголемо внимание во научната и инженерската јавност. Ваквите катастрофи се означуваат како *NaTech* (анг. *Natural Hazard Triggered Technological Accidents*) ((Bosio et al., 2023); (Cimmino et al., 2020); (Layadi, 2025); (Lisperguier et al., 2023)). Овие природни катастрофи се резултат на интеракцијата помеѓу природните хазарди и индустриските технолошки системи (Abbaszadeh Shahri et al., 2011).

Релевантноста на *NaTech* сценаријата е потврдена преку повеќе индустриски несреќи иницирани од природни катастрофи (Brignone et al., 2025). Таков е случајот во 1999 година кога силен земјотрес ја погоди индустриската област во Турција, при што дојде до ослободување на приближно 6500 тони акрилонитрил и повеќе од 50 тони гасно масло, како и до повеќе пожари и експлозии кои имаа значително влијание врз околната област и заливот Измит ((Brignone et al., 2025); (Krausmann & Mushtaq, 2008); (Marino et al., 2026); (Misuri et al., 2019)). Во 2002 година, како последица на поплава, во хемиската постројка Сполана во Р. Чешка се ослободени повеќе од 80 тони хлор, што резултираше со сериозни еколошки оштетувања и евакуација на населението (Sikorova and Bernatik, 2012). Дополнително, ураганот Катрина во 2005 година предизвика ослободување на значителни количини токсични супстанции и повеќе од 25.000 m^3 сурова нафта во животната средина (Krausmann & Mushtaq (2008)), додека земјотресот и цунамито во Јапонија во 2011 година доведоа до сериозни оштетувања на нуклеарната електрана Фукушима-Даичи (Novelli et al., 2024).

И покрај тоа што природните хазарди се препознаени како потенцијален извор на индустриски ризик, постојната регулатива не обезбедува доволно јасни насоки за нивно систематско интегрирање во процената на ризик. Во таа насока, истражувачите ((Nascimbene, 2023), (Yurii et al., 2023)), анализирајќи ги земјотресите ја нагласуваат потребата од подобро поврзување на природните хазарди во рамките на индустриското управување со ризик.

Присуството на природни хазарди во индустриските постројки може да резултира со сценарија кои значително се разликуваат од оние иницирани исклучиво од технолошки причини, како што се:

- појава на повеќекратни откази,
- недостапност на системите за итни случаи,
- зголемена веројатност за палење на запаливи облаци,
- отежнато спроведување на спасувачки и интервентни активности ((Belleri et al., 2017); (Misuri et al., 2019)).

Иако земјотресите не претставуваат најчеста причина за *NaTech* несреќи на целокупно ниво, тие се препознаваат како едни од највлијателните иницијални механизми поради нивниот потенцијал за предизвикување системски откази (Brignone et al., 2025). Влијанието

на сеизмичкото дејство врз индустриските постројки зависи од повеќе фактори, како што се: географската положба, локалните геолошки услови и конструктивните карактеристики на постројката. Во сеизмички активни региони, како што е италијанската територија, ваквите катастрофи имаат значајна улога во активирањето на технолошки несреќи (Bosio et al., 2023).

Со цел подобрување на безбедносните перформанси, Директивата 2012/18/EU (Seveso III), која ги регулира мерките за спречување на големи индустриски несреќи поврзани со опасни супстанции и ограничување на нивните последици врз луѓето и животната средина, ја препознава релевантноста на *NaTech* катастрофите и ја нагласува потребата од нивно вклучување во извештаите за безбедност кај индустриските постројки кои ракуваат со опасни супстанции ((Bosio et al., 2023); (Brignone et al., 2025); (Cimmino et al., 2020)).

Сеизмичката ранливост на индустриските компоненти најчесто се оценува преку примена на веројатносни методи, како што се кривите на кршливост (*англ. fragility curves*), кои ја претставуваат веројатноста за надминување на одредена гранична состојба при дадено сеизмичко оптоварување. Во таа насока, *Hazus* прирачникот претставува значаен референтен документ кој обезбедува криви на кршливост за повеќето конструктивни и неконструктивни системи, вклучително и нафтени и гасни инсталации ((Bosio et al., 2023); (Cimmino et al., 2020); (European Commission, 2018)).

Во последните години, значително внимание се посветува и на примената на пасивни и активни стратегии за намалување на сеизмичкиот одговор на индустриските конструкции. Пасивните системи за сеизмичка контрола претставуваат ефикасно средство за намалување на динамичкиот одговор, додека активните решенија, како што се интегрираните *SMART* сензори и *Safety Interlock Systems (SIS)*, овозможуваат рано предупредување и автоматско активирање на заштитни механизми ((Layadi, 2025); (Lisperguier et al., 2023); (Ozcan, 2024)).

Имплементацијата на вакви паметни системи при проектирањето на нови индустриски постројки, како и нивната примена во решенија за зајакнување или унапредување на постоечките конструкции, може значително да придонесе кон намалување на ризикот и ублажување на последиците од големи индустриски несреќи предизвикани од сеизмичко дејство (Lisperguier et al., 2023; Ozcan, 2024).

2.3.3.1. Сеизмичко дејство врз мостовски дигалки

Како што и веќе е познато, мостовските дигалки претставуваат критична индустриска опрема за подигање и транспорт на тешки товари во производствени хали, складишта, бродоградилишта и други индустриски капацитети. Нивната функција е директно поврзана со континуитетот на процесите, безбедноста на работата и економската одржливост на постројките. Во услови на земјотрес, дигалките се изложени на динамички влијанија кои можат да предизвикаат ((Abbaszadeh Shahri et al., 2011); (Annuar et al., 2018); (Belleri et al., 2017)):

- зголемени хоризонтални и вертикални реакции во тркалата и шините,
- појава на лизгање, триење и ударни дејства,
- опасни осцилации на висечкиот товар (нишало),

- локални оштетувања на шинските патеки, споевите и потпорните делови,
- секундарни ефекти врз конструкцијата на објектот (особено кај монтажни индустриски хали), како и потенцијално нарушување на неструктурни елементи (фасадни панели, инсталации).

Покрај основната подложност на индустриските објекти на сеизмичко дејство, присуството на мостовска дигалка во нив придонесува за дополнителна маса, подвижни товари и динамички интеракции, кои можат да ја изменат распределбата на силите и деформациите во објектот. Затоа, анализата на сеизмичкиот одговор на мостовските дигалки и нивната интеракција со индустриските конструкции станува значајна компонента во сеизмичката процена и управувањето со ризикот ((*Khairudin, 2020*); (*Nascimbene, 2023*); (*Otani et al., 2002*); (*Yurii et al., 2023*)).

Разгледувајќи ја работата на дигалките во нормална експлоатација, дигалката генерира вертикални и хоризонтални сили кои се пренесуваат преку тркалата кон шинските патеки и понатаму кон носечката конструкција. Хоризонталните сили најчесто се резултат на:

- забрзување/забавување на дигалката по шинската патека
- движење на количката по мостот
- косо движење или закосување на мостот на дигалката во однос на шините (*анг. skewing*)
- удар во амортизери/ограничувачи

Кај индустриските објекти, овие дејства се третираат со релевантни норми и прирачници. Посебно е значајно што според *EN 1991-3* хоризонталната сила во контактната зона тркало–шина треба да се земе најмалку 10% од максималното вертикално оптоварување на тркалото (*EN 1991-3, clause 2.5.2.2.3*) (*CEN, 2004*). Овој критериум често се користи како референтен минимум при дефинирање на хоризонтални дејства.

Според досега изнесеното, сеизмичкото дејство врз мостовските дигалки е специфично затоа што дигалката не е „обична“ статичка маса, туку таа е подвижен систем со:

- контактни нелинеарности (триење, лизгање, удар)
- можност за вертикално или локално подигање на тркалата
- висечки товар кој динамички се однесува како нишало и може да има сопствен период различен од периодите на објектот
- значајна зависност од позицијата на количката и конфигурацијата на товарот

Во пракса, дополнителен проблем е што во многу случаи сеизмичкото дејство на висечкиот товар се занемарува, а во одредени нормативни пристапи и вертикалното сеизмичко дејство е поедноставено или игнорирано ((*Belleri et al., 2017*); (*Bosio et al., 2023*)).

Едно од клучните прашања во рамките на сеизмичката анализа на индустриски објекти со мостовски дигалки се однесува на висечкиот товар, односно дали и на кој начин истиот треба да се земе предвид. Под „висечки товар“ се подразбира збирот од товарот и опремата за подигање. Во пракса, сеизмичкото оптоварување што произлегува од осцилациите на

висечкиот товар често се занемарува. Дел од истражувачите сметат дека масата на дигалката ќе има интеракција со масата на носечката конструкција, но не го разгледуваат детално влијанието на висечкиот товар. Занемарувањето најчесто се објаснува со тоа што фундаменталниот период на осцилација на товарот е релативно голем (нишало со должина еднаква на должината на јажето), па често спаѓа во дел од спектарот каде псевдо-забрзувањата можат да бидат помали. Сепак, ова не значи дека ефектите се занемарливи, бидејќи ((Bosio et al., 2023), (Khairudin, 2020)):

- локално може да се јават зголемени затегнувања во јажето,
- може да се зголемат реакции во тркалата,
- латералниот одговор на објектот може значително да се измени, особено при присуство на асиметрија на покривната конструкција или конструкција со недоволна рамнинска крутост која не обезбедува ефикасно пренесување и распределба на хоризонталните сили, поради што доаѓа до нерамномерна распределба на сеизмичките сили и појава на торзиони ефекти.

Во истражувања насочени кон италијански индустриски објекти се анализира влијанието на висечкиот товар врз структурниот одговор по сеизмичко дејство, при што се разгледуваат типични монтажни АБ објекти со еднопортални рамки. Изведени се равенки на движење и спроведени параметарски анализи врз поедноставени системи со три степени на слобода. Така сеизмичката серија што ја погоди Северна Италија во 2012 година, особено регионот Емилија-Ромања, предизвика значителни оштетувања на индустриски монтажни армирано-бетонски објекти (Layadi, 2025). Овој регион се карактеризира со големи индустриски зони, со монтажни објекти изградени претежно пред современите антисеизмички прописи и пред најновите класификации на сеизмичност. Бидејќи станува збор за индустриски објекти, мостовските дигалки се често присутни. Објектите првично биле проектирани најчесто за дејства од силни ветрови и/или дејства од дигалката во експлоатација, но не и за сеизмичко дејство. Во овие истражувања аналитички се решава систем со три степени на слобода (*анг. Three Degrees of Freedom (3DOF)*) кој ги репрезентира (Khairudin, 2020):

- хоризонтално поместување на покривот,
- вертикално поместување на мостовската дигалка,
- ротација/осцилација на висечкиот товар.

Резултатите, претставени преку кумулативни веројатносни функции укажуваат на негативно влијание на масата на висечкиот товар во одредени услови. Посебно се забележува зголемување на латералните поместувања на покривот за одредена компонента на земјотресното движење, во случај на фактор на однесување поголем од 2.5 – вредности кои се типични за индустриски монтажни објекти кои не се проектирани за сеизмички дејства (Nascimbene, 2023).

Развиена е и поедноставна постапка за моделирање во спектрални анализи, каде висечкиот товар се моделира преку хоризонтална еластична врска и концентрирана маса, при што крутоста на врската одговара на крутоста на систем на нишало. Ова ја прави

постапката применлива и за други типологии на објекти и други земјотресни записи ((Nale et al., 2026); (Nascimbene, 2023); (Novelli et al., 2024)).

Вертикалната компонента на земјотресот е особено важна кај мостовските дигалки бидејќи тие се системи кои не се вертикално ограничени, а нивната сопствена фреквенција во вертикална насока е релативно ниска. Во контекст на нормативите, се истакнува дека во стандардите за проектирање на мостовски дигалки единствено ASME NOG-1, американскиот стандард за проектирање и оценување на надземни и портални дигалки во нуклеарни и други високоризични индустриски постројки, го зема предвид динамичкото вертикално сеизмичко оптоварување, додека другите стандарди или не го земаат предвид, или го третираат како статичко оптоварување ((ASME, 2020); (Nale et al., 2026)).

Во Јапонија е проучуван метод за оценување на динамичкото вертикално сеизмичко дејство. За таа цел се спроведени тестови со возбудување на модел во размер 1/8, за мостовска дигалка со носивост од 150 тони (должина 35 m, тежина 330 тони). Дигалката е двогредна. Вертикалните облици на вибрирање покажуваат дека основната сопствена фреквенција во вертикална насока варира приближно од 3 до 5 Hz во зависност од положбата на количката, што ја карактеризира дигалката како „мека“ во вертикална насока.

Како сеизмички влез се користи динамички одговор на подот (анг. *floor response*) добиен од вештачки земјотрес, на нивото на кое е инсталирана дигалката. Во рамки на истражувањето се разгледува и појава на отскокнување/подигнување, при што е предложена поедноставена равенка потврдена експериментално. Потврдено е дека реакциските сили во тркалата може да се проценат со линеарна анализа иако по отскокнувањето од шините може да следи удар. Заклучено е дека при проектирање, ако се предвидува можност за отскокнување, потребна е дополнителна резерва (препорачано околу 30%) при оценување на реакциите во тркалата ((Rodríguez et al., 2022); (UNDRR, 2022)).

2.4. Сеизмички хазарди во Р. Северна Македонија

Сеизмичките хазарди претставуваат веројатност за појава на одредено ниво на сеизмичко дејство на дадена локација во дефиниран временски период. Картите на сеизмичките хазарди овозможуваат просторна распределба на очекуваните вредности на забрзување на тлото и претставуваат основа за дефинирање на сеизмичките оптоварувања во инженерската пракса. Тие не се користат директно за проектирање, туку како влезен параметар во националните прописи и стандарди, како што е *Eurocode 8*, каде што се дефинираат проектните вредности на сеизмичко дејство (Milutinovic et al., 2017).

Р. Северна Македонија се наоѓа во регион со умерена до зголемена сеизмичка активност, што е резултат на комплексната тектонска структура и присуството на активни раседи. Сеизмичката опасност не е рамномерно распределена, при што одредени подрачја се карактеризираат со повисоки вредности на очекувани забрзувања. Во овој контекст, дури и во области со релативно пониска сеизмичка опасност, може да се појават значителни

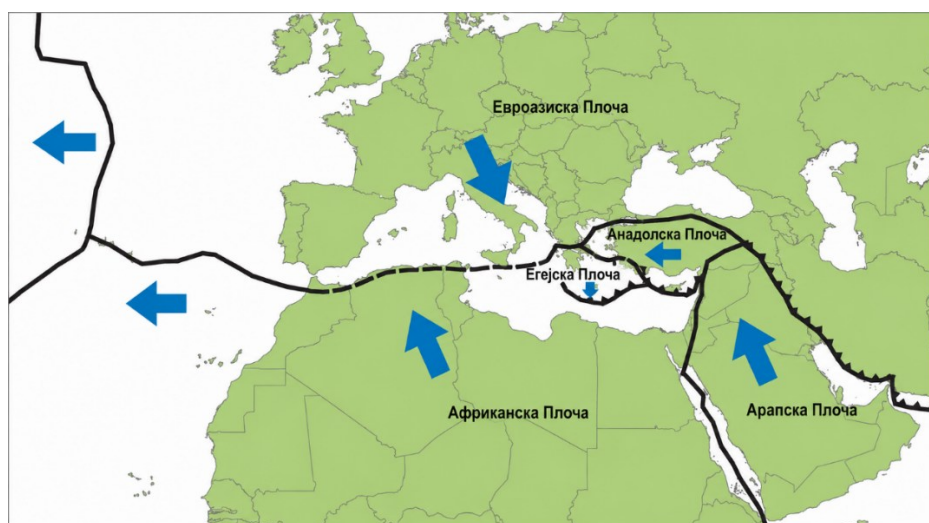
оштетувања, особено кај конструкции со зголемена чувствителност или недоволен сеизмички дизајн.

Дополнително, современите глобални и регионални модели на сеизмичка опасност овозможуваат детална проценка на очекуваните нивоа на сеизмичко дејство и нивна просторна распределба, што претставува значајна основа за понатамошни инженерски анализи и проценка на ризик (Lee & Trifunac, 2017).

Во таа насока, за подобро разбирање на сеизмичката опасност на територијата на Р. Северна Македонија, потребно е да се разгледа нејзината тектонска положба и сеизмотектонички карактеристики.

2.4.1. Тектонска положба и сеизмотектоника на Р. Северна Македонија

Територијата на Р. Северна Македонија се наоѓа во рамките на Медитеранскиот сеизмички појас, кој претставува една од најактивните сеизмички зони во Европа. Оваа активност е резултат на движењето и меѓусебното влијание на Африканската плоча и Евроазиската плоча. Африканската плоча се наоѓа јужно од Европа, односно под Медитеранот и северниот дел на Африка, и се движи кон север. Наспроти неа, Евроазиската плоча ја опфаќа Европа и голем дел од Азија, вклучувајќи го и Балканскиот Полуостров (слика бр. 2.10) ((Lee & Trifunac, 2017); (Jovanov & Drogreshka, 2024)). При движењето на Африканската плоча кон север, таа врши притисок врз Евроазиската плоча, што доведува до појава на различни тектонски процеси како компресија, делумно подвлекување и лизгање на блоковите. Овие процеси создаваат напрегања во земјината кора, кои се ослободуваат во форма на земјотреси. Поради тоа, Балканскиот регион се смета за сеизмички активен (Seismological Observatory Skopje, 2021).



Слика бр. 2.10 Приказ на Африканската и Европската тектонска плоча (Eurasia Tectonics)

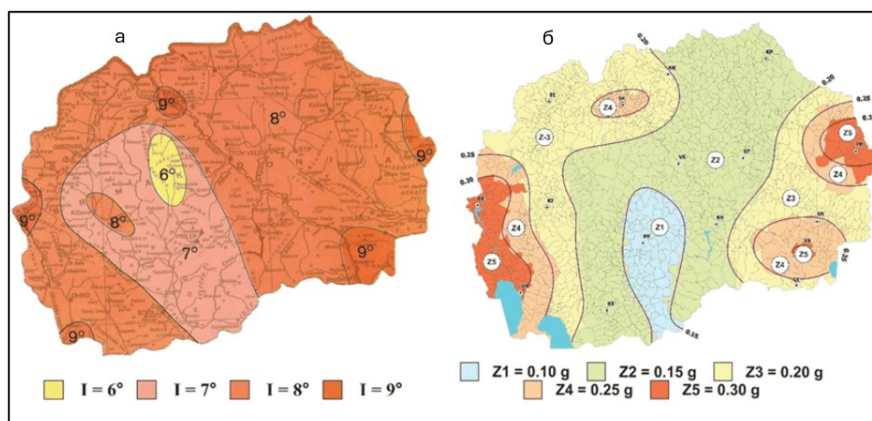
Балканскиот Полуостров има сложена геолошка структура, составена од повеќе тектонски и планински системи, како што се Динариди, Хеленида и Родопски масив. Овие структури се испресечени со бројни раседи, кои претставуваат слабости во земјината кора вдоль кои доаѓа до поместувања и појава на земјотреси (слика 2.11) (*Schmid et al. (2008)*). Во овој контекст, особено значајна е Вардарската зона, која претставува главен сеизмотектонски коридор во регионот. Таа се протега низ Македонија и претставува зона во која се концентрира голем дел од сеизмичката активност ((*Milutinovic et al., 2017*); (*Seismological Observatory Skopje, 2021*)).

Регионот на Скопје се наоѓа во рамките на Вардарската зона и се смета за еден од нејзините најактивни сегменти. Во овој регион се присутни повеќе локални активни раседи, кои најчесто се нормални (со вертикално поместување) и трансформни (со хоризонтално лизгање). Овие раседи постојано акумулираат напрегања, кои периодично се ослободуваат во форма на земјотреси. Поради тоа, Скопскиот регион има континуирана сеизмичка активност и потенцијал за појава на посилни земјотреси.



Слика бр. 2. 11 Тектонска карта на Динаридите и Панонскиот басен со прикажани главни тектонски зони и раседи, како потенцијални извори на сеизмичка активност (*Schmid et al. (2008)*)

На слика 2.12 се прикажани карти кои ја илустрираат еволуцијата на сеизмичкото зонирање во Р. Северна Македонија, од традиционален пристап базиран на макросеизмички интензитети кон современ пристап базиран на максимално забрзување на тлото (PGA) и веројатносна анализа, во согласност со *Eurocode 8*.



Слика бр. 2.12 Сеизмички зонирачки карти на Р. Северна Македонија (Milutinović et al., 2017)

а) според макросеизмички интензитет (I°);

б) според максимално забрзување на тлото (PGA , agR) согласно Eurocode 8

А) Причини за сеизмички hazard

Сеизмичките hazardи во Р. Северна Македонија се резултат на повеќе фактори (Jovanov & Drogreshka, 2024):

- Активни раседи:

Присуството на активни тектонски раседи во Вардарската зона и околните региони претставува примарен извор на земјотреси. Овие раседи се способни да генерираат земјотреси со средна до висока магнитуда.

- Плитки земјотреси:

Најголем дел од земјотресите во регионот се плитки (на длабочина до ~ 30 km), што резултира со посилен ефект на површината и поголеми оштетувања.

- Регионални влијанија:

Сеизмичките hazardи се дополнително зголемени поради влијанието на соседните активни региони, особено:

- Албанија – силна адријатска сеизмичност
- Грција – најактивен сеизмички регион во Европа
- Бугарија – регионални раседи и локална сеизмичност

Дополнително, иако на поголемо растојание, влијание имаат и длабоките земјотреси од Вранча (Романија), особено за подолги периоди на осцилација (Lee & Trifunac, 2017).

Територијата на Р. Северна Македонија се класифицира како регион со умерен до висок сеизмички hazard, што се должи на активната Вардарска сеизмотектонска зона, појавата на плитки земјотреси и влијанието на соседните сеизмички региони. За повратен период од 475 години, вредностите на максималното забрзување на тлото (PGA) се проценуваат на околу 0.30–0.35 g, што е во согласност со регионалните анализи и историските податоци.

2.4.2. Историски преглед на земјотреси на територијата на Р. Северна Македонија

Современите пристапи за проценка на сеизмичките hazards во Р. Северна Македонија се базираат на поврзување на историски податоци за земјотреси и нивна статистичка обработка со цел дефинирање на сеизмички модели. Во таа насока, се користат регионални каталози на земјотреси, како што се *BSHAP2 (Balkan Seismic Hazard Assessment Project – Phase 2)* и *ISC (International Seismological Centre)* каталозите ((Markusic et al., 2016); (ISC Bulletin, 2026)), кои опфаќаат податоци од античкиот период па сè до денес. Со цел унифицирање на податоците, сите магнитуди се трансформираат во моментна магнитуда (M_w), додека зависните настани (предудари и последователни удари) се отстрануваат преку процес на декластерирање.

Во продолжение е табела 2.5, со сеизмичка историја на силни и разорни земјотреси случени на територијата на денешна Р. Северна Македонија (*Seismological Observatory Skopje, 2021*).

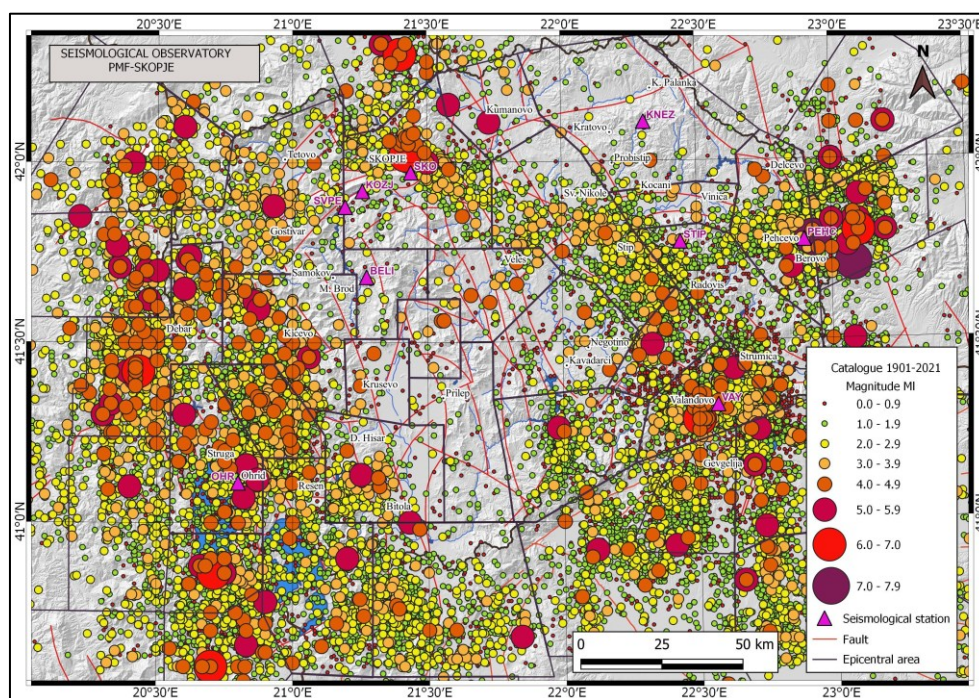
Табела бр. 2.5 Историски преглед на земјотреси на територијата на Р. Северна Македонија

Година	Регион/локација	Јачина / интензитет
518	Скупи	проценет интензитет до XII MCS
1555	Скопје	значителни оштетувања и делумно разрушување на градот
1890	Македонија/регионот	помалку документиран, но значаен земјотрес
1921	Мирковци	магнитуда 4.6÷5.1; интензитет VII–VIII MCS
1963	Скопје	магнитуда околу 6.1; интензитет до IX MCS; PGA 0.30÷0.42 g

Скопскиот земјотрес од 1963 година претставува еден од најобемно документираните сеизмички настани во сеизмолошката литература, кој поради својот разорен карактер претставува значајна пресвртница во развојот на градот, при што иницира суштински промени во архитектонските концепти и во пристапите кон проектирање и изведба на конструкциите (*Damaging Effects of the 1963 Skopje Earthquake, n.d.*).

Земјотресот од 26 јули 1963 година во Скопје претставува најзначаен сеизмички настан во поновата историја на Македонија ($M \approx 6.1$; I до IX MCS), со 1070 загинати, над 3300 повредени и околу 75% од населението останато без дом. Настанот предизвикал катастрофални оштетувања (над 80% од објектите уништени или тешко оштетени), при што најранливи се покажале сиданите и мешаните конструкции, додека армирано-бетонските објекти генерално покажале подобро однесување. Проценетото максимално забрзување на тлото

изнесувало $0.30 \div 0.42 g$, што укажува на висока сеизмичка побуда. Земјотресот претставува пресвртница во урбанистичкото и конструктивното планирање, иницирајќи систематски истражувања и воведување на сеизмичка микрозонизација, при што јасно е нагласено дека степенот на оштетување не зависи само од јачината на земјотресот, туку и од локалните услови, типот и квалитетот на конструкцијата, како и карактеристиките на сеизмичкото дејство (*Seismological Observatory Skopje, 2021*).



Слика бр. 2.13 Просторна распределба на епицентри на земјотреси регистрирани во Р.Северна Македонија (*Seismological Observatory, Faculty of Natural Sciences and Mathematics – Skopje, 2021*)

На слика бр. 2.13 е прикажана просторната распределба на епицентрите на земјотресите регистрирани на територијата на Р. Северна Македонија и поширокиот регион во периодот 1901–2021 година, врз основа на каталогот на Сеизмолошката опсерваторија при ПМФ – Скопје. Земјотресите се класифицирани според нивната магнитуда, при што со различна големина и боја на симболите е прикажана нивната јачина. На сликата се забележува изразена концентрација на сеизмичка активност вдоль главните тектонски структури и раседни зони, што укажува на високата сеизмотектонска активност на регионот. Дополнително, прикажаните сеизмолошки станици и раседи овозможуваат подобро разбирање на просторната поврзаност помеѓу сеизмичките извори и геолошките структури. Овие податоци ја потврдуваат изразената сеизмичка активност на територијата и ја нагласуваат потребата од детална анализа на сеизмичката опасност.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 2

- Закон за техничка инспекција. (2008). Службен весник на Република Македонија, бр. 88/2008.
- Македонски стандарден институт. (2015). МКС EN 13001-1:2015 – Кранови – Општи принципи за проектирање. Скопје: МСИ.
- Правилник за користење на дигалки и индустриски транспортери. (2009). Службен весник на Република Македонија, бр. 32/2009.
- Abbaszadeh Shahri, A. , Esfandiyari, B., & Hamzeloo, H. (2011). *Evaluation of a nonlinear seismic geotechnical site response analysis method subjected to earthquake vibrations (case study: Kerman Province, Iran)*. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(7), 1103-1116.
- Abdel-Rahman, E. M., Nayfeh, A. H., & Masoud, Z. N. (2003). *Dynamics and Control of Cranes: A Review*. *Journal of Vibration and Control*, 9(7), 863–908.
- Akhtulov, A. L., Kirasirov, O. M., & Kirasirov, M. O. (2020, November). *Assessment of the influence of variable loads on the strength of welded joints of metal structures of bridge cranes*. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 971, No. 5, p. 052070). IOP Publishing.
- Annuar, K. A. M., Hadi, N. A. A., Harun, M. H., Halim, M. F. M. A., Mirin, S. N. S., & Azahar, A. H. (2018). *Dynamic modelling and analysis of 3D overhead gantry crane system*. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3), 1257-1262.
- Antipas, I. R. (2024). *Modeling the Dynamic Loads Affecting a Bridge Crane during Start-Up*. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, 24(2), 190-197.
- ASME. (2020). *ASME NOG-1: Rules for Construction of Overhead and Gantry Cranes (Top Running Bridge, Multiple Girder)*. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2022). *ASME B30.2: Overhead and Gantry Cranes (Top Running Bridge, Single or Multiple Girder, Top Running Trolley Hoist)*. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers.
- Belleri, A. , Labò, S., Marini, A., & Riva, P. (2017). *The influence of overhead cranes in the seismic performance of industrial buildings*. *Frontiers in Built Environment*, 3, 64
- Bosio, M. , Di Salvatore, C., Bellotti, D., Capacci, L., Belleri, A., Piccolo, V., ... & Biondini, F. (2023). *Modelling and seismic response analysis of non-residential single-storey existing precast buildings in Italy*. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(4), 1047-1068.
- Brignone, M. , Santamato, F., Ravina, M., Busini, V., & Panepinto, D. (2025). *NaTech database and methodologies for its risk assessment: a review*. *Natural Hazards*, 121(17), 19565-19590.
- CEN. (2006). *EN 14492-2: Cranes – Power driven winches and hoists – Part 2: Power driven hoists*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN. (2012). *EN 13001-3-1: Cranes – General design – Part 3-1: Limit states and proof of competence of steel structures*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN. (2012). *EN 13001-3-2: Cranes – General design – Part 3-2: Limit states and proof of competence of wire ropes in reeving systems*. Brussels: European Committee for Standardization.

- CEN. (2014). *EN 13001-3-3: Cranes – General design – Part 3-3: Limit states and proof of competence of wheel/rail contacts*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN. (2016). *EN 13135: Cranes – Safety – Design – Requirements for equipment*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN. (2018). *EN 60204-32: Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 32: Requirements for hoisting machines*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN. (2020). *EN 15011: Cranes – Bridge and gantry cranes*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN. (2026). *EN 1998-1-2:2026 Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1-2: Buildings*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN).
- Chovnyuk, Y. V., Diachenko, L. A., Ivanov, Y. O., & Dichek, N. P. (2022). Optimisation of dynamic loads of rope systems of lifting mechanisms of bridge cranes during cargo handling. *Issue 51*, 59–73. <https://doi.org/10.54919/2415-8038.2022.51.59-73>
- Cimmino, M. , Magliulo, G., & Manfredi, G. (2020). Seismic collapse assessment of new European single-story RC precast buildings with weak connections. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(15). <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00952-7>
- Delić, M. , Čolić, M., Mešić, E., & Pervan, N. (2017). Analytical calculation and FEM analysis of main girder of a double girder bridge crane. *TEM Journal*, 6(1), 48–52. <https://doi.org/10.18421/TEM61-07>
- Deutsches Institut für Normung. (1982). *DIN 15401: Crane hooks; Single hooks; Unmachined hooks (RSN 05 P)*. DIN.
- Dynamics of a Three-Dimensional Overhead Crane System*. *Journal of Sound and Vibration*, 242(3), 411–426.
- European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2015). *Climate change and critical infrastructure – Floods*. Publications Office of the European Union.
- European Commission. (2018). *Innovative materials for seismic and energy retrofitting of the existing EU buildings (EUR 29184 EN)*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/091621>
- European Committee for Standardization (CEN). (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance–Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1)*. Brussels: CEN.
- European Committee for Standardization. (2006). *EN 1991-3:2006 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 3: Actions induced by cranes and machinery*. Brussels: CEN.
- European Committee for Standardization. (2007). *EN 1993-6:2007 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 6: Crane supporting structures*. Brussels: CEN.
- European Committee for Standardization. (2014). *EN 13001-3:2014 – Cranes – General design – Part 3: Limit states and proof of competence of steel structures*. Brussels: CEN.
- Frankovský, P. , Delyová, I., Sivák, P., Kurylo, P., Pivarčiová, E., & Neumann, V. (2020). Experimental assessment of time-limited operation and rectification of a bridge crane. *Materials*, 13(12), 2708.

- Fu, W. , & Liu, B. (2024). *Analysis of bridge-bearing capacity detection and evaluation technology*. *Journal of World Architecture*, (2), 129–133.
- Germanwatch. (2026). *Climate risk index 2026: Who suffers most from extreme weather events?* Germanwatch.
- Gorynin, A. D., Antsev, V. Yu., & Shaforost, A. N. (2018). *Dynamic loads during failure risk assessment of bridge crane structures*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 327(4), 042040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042040>
- Gutermann, M. , Slowik, V., & Steffens, K. (2003). *Experimental safety evaluation of concrete and masonry bridges*. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 45(12), 805-808.
- Hamza, G. , Hammadi, M., Barkallah, M., Choley, J. Y., Riviere, A., Louati, J., & Haddar, M. (2018, March). *Analytical based approach for vibration analysis in modelica: Application to the bridge crane system*. In *International Conference on Acoustics and Vibration* (pp. 83-91). Cham: Springer International Publishing.
- Hrabovský, L. , & Foltá, Z. (2021). *Detection of mechanical stress limiting effects of crane structure deformation*. *MM Science Journal*, 2021(6), 5396–5402. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_12_2021107
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX)*. Cambridge University Press.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 12482:2014 – Cranes – Monitoring of crane design working period*. Geneva: ISO.
- International Seismological Centre. (2026). *ISC Bulletin: On-line Bulletin*. Thatcham, United Kingdom. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- ISO. (2015). *ISO 9927-1: Cranes – Inspections – Part 1: General*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Jensen, J. S., Melbourne, C., Casas, J. R., Karoumi, R., Plos, M., & Patrón, A. (2006). *Development of a guideline for load and resistance assessment of existing European railway bridges*. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost*, 755.
- Jovanov, L. , & Drogreshka, K. (2024, September). *Реgefинирање на главниџе сеизможени зони на џерииџоријаџа на Р. С. Македонија. Во Пеџиџи конгрес на геолозиџе на Реџублика Северна Македонија (Ohrid)*.
- Kaczmarczyk, S., Iwankiewicz, R., & Terumichi, Y. (2015). *The Dynamic Analysis of Lifting Machines and Elevators*. Springer
- Khairudin, M. (2020). *Dynamic analysis and modeling of three-dimensional crane incorporating payload*. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1446, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
- Klyuev, S. , Abakarov, A. J., Lesovik, R. V., Tatlyev, R. Dz., & [Fifth Author]. (2019). *Optimal engineering of rod spatial construction*. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 16(1), 200–203. <https://doi.org/10.1166/jctn.2019.7723>

- Kramarchuk, A. , Ilnytskyi, B., Bobalo, T., & Lytvyniak, O. (2019, August). *The research bearing capacity of crane beams for possible establishment of bridge crane on them. In International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice-Rzeszów* (pp. 202-210). Cham: Springer International Publishing.
- Kumar, R. , Soni, K., & Bajaj, R. (2020). *Seismic Analysis of Modified Industrial Structure using Bracings and Dampers. International Journal of Scientific Research in Civil Engineering*, 4(5), 37-44.
- Lantsoght, E. , & Okumus, P. (2018). *Evaluation of concrete bridge behavior through load testing: international perspectives: held at the ACI fall 2017 convention ACI SP: Anaheim, California, USA, 15-19 October 2017.* (No Title).
- Layadi, I. (2025). *Investigating the Functional Vulnerability of an Industrial Building in Seismic Risk Management. Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(5), 27863-27871.
- Lisperguier, N. , López, Á., & Vielma, J. C. (2023). *Seismic performance assessment of a moment-resisting frame steel warehouse provided with overhead crane. Materials*, 16(7), 2815.
- Lisperguier, N. , López, Á., & Vielma, J. C. (2023). *Seismic performance assessment of a moment-resisting frame steel warehouse provided with overhead crane. Materials*, 16(7), 2815.
- Liu, Z. , Liu, C., He, Z., Gan, Y., & Li, B. (2021). *Analysis of coupled vibration and swing characteristics of bridge crane. Journal of Physics: Conference Series*, 2012(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2012/1/012016>
- Marino, A. , Berardo, G., & Ciucci, M. (2026). *Seismic NaTech early warning and monitoring in major hazard industries. Procedia Structural Integrity*, 78, 1753-1758.
- Markusic, S., Gülerce, Z., Kuka, N., Duni, L., Ivancic, I., Radovanovic, S., Glavatovic, B., Milutinovic, Z., Akkar, S., Kovacevic, S., Mihaljevic, J., & Salic, R. (2016). *An updated and unified earthquake catalogue for the Western Balkan Region. Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Meng, Z. , Yifei, T., & Xiangdong, L. I. (2018). *Finite element analysis of bridge crane metal structure based on ABAQUS. In MATEC Web of Conferences* (Vol. 198, p. 01004). EDP Sciences.
- Mijlaković, R. M., Marinković, Z.M., Jovanović, M.Lj.: *Dinamika i optimizacija dizalica (specijalno izdanje)-monografija Katedre za ransportnu tehniku i logistiku, MCAE biblioteka, Niš, 2002.*
- Misuri, A. , Landucci, G., & Cozzani, V. (2019). *Assessment of safety barrier performance in Natech scenarios. Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106597. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106597>
- Molnár, D. , Blatnický, M., & Dižo, J. (2022). *Design and strength analysis of a crane hook with a 500 kg lifting capacity. Perner's Contacts*, 16(2). <https://doi.org/10.46585/pc.2021.2.1702>
- Moskvicheva, L. F., & Chernyakova, N. A. (2020). *Research of Strength, Service Life and Reliability of Crane Metal Structures: Overview and Results. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 13(8), 933-955.
- Nale, M. , Accolli, M., & Minghini, F. (2026). *Rapid post-earthquake evaluation method for strategic hydraulic infrastructure in the Ferrara territory. Procedia Structural Integrity*. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.12.140>

- Nascimbene, R. (2023). *Seismic vulnerability assessment of structural and non-structural components in industrial plants*. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1289404.
- Novelli, F. , Pesce, F., & Bubbico, R. (2024). *Seismic risk in the chemical process industry: A semi-quantitative methodology for critical equipment identification*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 88, 105252.
- Oellerich, J. , & Büscher, K. J. (2023). *Application of segmented and prestressed supporting structures in bridge crane systems: Potentials and challenges*. *Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2018). *Infrastructure for a climate-resilient future*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264301028-en>
- Ostrić, D. , Tošić, S.: *Dizalice, Mašinski fakultet, Centar za mehanizaciju, m Beograd*. 2005.
- Otani, A. , Nagashima, K., & Suzuki, J. (2002). *Vertical seismic response of overhead crane*. *Nuclear Engineering and Design*, 212(1-3), 211-220.
- Ozcan, S. (2024). *Lifts and Earthquakes: EN 81-77*. *Elevator World*, 72(1).
- Panteli, M. , & Mancarella, P. (2015). *Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies*. *Electric Power Systems Research*, 127, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.012>
- Pavićević, N. , Tkachev, A., Tkachev, A., Dašić, P., & Kostina, M. (2022). *Static stiffness of the crane bridges under moving load distribution*. In *Advanced Manufacturing Processes III* (pp. xx-xx). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_5
- PDF_Literatura_doktorska disertacija\Krausmann, E. , & Mushtaq, F. (2008). *A qualitative Natech damage scale for the impact of floods on selected industrial facilities.pdf*
- Perevoznyk, I. A. (2025). *Determination of loads arising during movement of traveling wheels of bridge cranes*. *Engineering*, July. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-35-05>
- Pichugin, S. (2021). *Development of crane load codes on the basis of experimental research*. *Academic journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(56), 18-29.
- Pichugin, S. , Patenko, I., & Maslova, S. (2018). *Comparative analysis of loads from the travelling cranes of different producers*. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 36–39.
- Popov, I. P. (2024). *Hydraulic strengthening of the beam*. *Vestnik Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering)*. https://doi.org/10.35211/18154360_2024_4_68
- Prokopovych, I. , Tkachev, A., Myronenko, S., & Tkachev, O. (2024). *METHODS OF CREATING PRESTRESS IN SPAN STRUCTURES AND FEATURES OF THEIR CALCULATION*. *Proceedings of Odessa Polytechnic University/Odes' kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi*, 70(2).
- Raju, P. R., & Upendar, S. (2018). *Design and analysis of a crane hook*. *Semantic Scholar*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212594621>

- Rodriguez, J. , Reboul, J., González, P., Crespo, M., Borgerhoff, M., & Schneeberger, C. (2022). *Modelling of an Overhead Crane under Seismic Excitations (SOCRAT)*.
- Sarraf, R. , McGuire, M.P.: *Integration and Comparison of Multi- Criteria Decision Making Methods in Safe Route Planner*, Elsevier Ltd, 2020.
- Schmidt, J. W., Halding, P. S., Jensen, T. W., & Englund, S. (2018). *High magnitude loading of concrete bridges. Special Publication*, 323, 9-1.
- Showalter, P. S., & Myers, M. F. (1994). *Natural disasters in the United States as release agents of oil, chemicals, or radiological materials between 1980–1989: Analysis and recommendations. Risk Analysis*, 14(2), 169–182. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1994.tb00042.x>
- Showalter, P. S., & Myers, M. F. (1997). *Hazardous materials releases in the Northridge earthquake: Implications for seismic risk assessment. Risk Analysis*, 17(2), 147–156. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1997.tb00854.x>
- Sinelshchikov, A. V., & Panasenkov, N. N. (2019). *Comparative analysis of computable dynamic models of port cranes on the basis of one and two-dimensional finite elements. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2, 127-144.
- Spruogis, B. , Jakstas, A., Gican, V., Turla, V., & Moksins, V. (2018). *Further Research on an Anti-Swing Control System for Overhead Cranes. Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(1).
- Sydorenko, M. , Kononov, V., & Kravchenko, E. (2025). *Constructive methods for increasing the load-bearing capacity of connection joints between main and end girders of bridge cranes. New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, (2). <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2025-2-8>
- Tkachev, A. , Tkachev, O., & Prokopovych, I. (2022). *Operation of pre-stressed span beams of bridge cranes taking into account load combinations. Odes'kyi Politechnichniy Universytet Pratsi*, 1(65), 40–46. <https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.04>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2022). *Technical guidance on comprehensive risk assessment and planning in the context of climate change*.
- Vasileva Ljubotenska, A., Jakimovska, K., Bogdanovic, A., & Edip, K. (2026). *Numerical seismic analysis of the main girder of a double-girder bridge crane. Scientific Journal of Civil Engineering*, 14(2).
- Yifei, T. , Wei, Y., Zhen, Y., Dongbo, L., & Xiangdong, L. (2013). *Research on multidisciplinary optimization design of bridge crane. Mathematical Problems in Engineering*, 2013(1), 763545.
- Yıldırım, Ş. , & Esim, E. (2017). *A new approach for dynamic analysis of overhead crane systems under moving loads. In CONTROLO 2016 (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 402, pp. 471–481). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43671-5_40*
- Yurii, C. , Petro, C., Nataliia, S., & Sergey, K. *ANALYSIS OF DYNAMICS AND OPTIMISATION OF TRANSIENT MOTION MODES OF HOISTING MECHANISMS OF OVERHEAD URBAN CRANES*, 2023.

- Zelić, A. , Zuber, N., & Šostakov, R. (2018). *Experimental determination of lateral forces caused by bridge crane skewing during travelling*. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 20(1), 90–99. <https://doi.org/10.17531/ein.2018.1.12>
- Zhang, W. (2025). *Structural design and finite element analysis of a bridge crane main beam*. *Journal of Physics: Conference Series*, 3043(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3043/1/012035>
- Zoran Milutinovic, Z., Radmila Salic Makreska, R., & Daniel Tomic, D. (2017). *An overview on earthquake hazard and seismic risk management policies of Macedonia*. In *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE 2017)* (Paper No. 3726). Santiago, Chile, January 9–13, 2017.

3. ИСТРАЖУВАЧКИ ЈАЗ

Врз основа на извршениот обемен преглед на научната литература и важечката нормативна рамка, може да се констатира постоење на јасно изразен истражувачки јаз во областа на анализа и процена на состојбата на мостовските дигалки по сеизмичко дејство.

Во последните децении се објавени бројни истражувања поврзани со проектирање, анализа и оптимизација на мостовските дигалки. Најголем дел од овие истражувања се фокусирани на статичка анализа на носечките конструкции, определување на напрегања и деформации, анализа на замор, оптимизација на геометријата на конструктивните елементи, како и примена на методот на конечни елементи за оценување на носивоста и работниот век на дигалките. Дополнително, дел од истражувањата се насочени кон анализа на динамичкото однесување при нормални работни услови, осцилации на товарот, движење на количката и идентификација на модалните параметри.

Покрај значителниот број истражувања во оваа област, анализата покажува дека најголемиот дел од нив се однесуваат на состојби на редовна експлоатација и работни оптоварувања. Значително помал број трудови се занимаваат со влијанието на природни катастрофи врз мостовските дигалки, а особено со нивното однесување по сеизмичко дејство. Достапните истражувања најчесто се ограничени на анализа на одредени аспекти од динамичкиот одговор или на влијанието на дигалките врз индустриските конструкции во кои се вградени, додека самата мостовска дигалка ретко е предмет на детална постсеизмичка анализа.

Дополнителен недостаток во литературата претставува фактот што експерименталните испитувања и нумеричките анализи најчесто се разгледуваат одделно. Во повеќето случаи резултатите од модалните испитувања се користат исклучиво за идентификација на сопствените фреквенции и формите на осцилирање, без нивно понатамошно поврзување со процена на состојбата на конструкцијата. Од друга страна, нумеричките модели често се користат за анализа на напрегања и деформации, но без нивна експериментална верификација врз реални конструкции.

Во литературата може да се забележи и недостаток на истражувања во кои динамичките и модалните параметри се користат како индикатори за процена на состојбата на мостовските дигалки. Иако ваквиот пристап е широко распространет кај мостови, згради и други инженерски конструкции преку концептот (*анг. Structural Health Monitoring (SHM)*), неговата примена кај мостовските дигалки е ограничена и недоволно разработена. Особено недостасуваат истражувања во кои промените на модалните параметри се користат како основа за донесување инженерски одлуки по настанување на екстремни оптоварувања.

Резултатите од анализата на издвоените понови научни трудови се прикажани во Табела 3.1, од која може да се забележи дека најголемиот дел од истражувањата се насочени кон

динамичка и сеизмичка анализа, додека постсеизмичката процена на мостовските дигалки останува недоволно истражена.

Анализата на важечките стандарди и регулативи дополнително го потврдува постоењето на истражувачкиот јаз. Стандардите *EN 13001-1*, *EN 13001-2*, *EN 13001-3-1*, *EN 13001-3-2*, *EN 13001-3-3*, *EN 13135*, *EN 14492-2*, *EN 15011*, *EN 1991-3* (*Eurocode 1*), *EN 1993-6* (*Eurocode 3*), *EN 1998-1* и *EN 1998-1-1:2024* (*Eurocode 8*), *EN 60204-32*, *ISO 9927-1*, *ISO 9927-5*, *ISO 12482*, *ASME NOG-1* (2020) и *ASME B30.2* (2022) обезбедуваат правила за проектирање, верификација, инспекција, безбедност при употреба и следење на работниот век на мостовските дигалки (Табела 3.2). Сепак, овие документи се претежно насочени кон услови на нормална експлоатација и не содржат јасно дефинирани постапки за процена на состојбата на мостовските дигалки по изложеност на сеизмичко дејство. Оттука, при анализата на релевантните стандарди и правилници за мостовски дигалки, се идентификувани следните истражувачки недостатоци:

- не е дефинирана единствена методологија за постсеизмичка инспекција
- не се пропишани критериуми за оценување на можните оштетувања на мостовската дигалка
- не се дефинирани индикатори за процена на функционалноста на одделните системи
- не постојат јасни протоколи за понатамошна експлоатација на мостовската дигалка по сеизмичко дејство

Дополнително, во литературата не е идентификуван интегриран пристап кој истовремено би ги поврзал експерименталните испитувања, нумеричките анализи, динамичките параметри и инженерската процена на состојбата на мостовската дигалка. Најчесто овие активности се разгледуваат независно една од друга, без воспоставување единствена методологија за процена на состојбата на конструкцијата на мостовската дигалка.

Оттука, може да се заклучи дека постои потреба од развој на интегрирана и практично применлива методологија за процена на состојбата на мостовските дигалки по сеизмичко дејство. Таквата методологија треба да овозможи поврзување на резултатите од експерименталните испитувања, нумеричките модели, динамичката анализа во индикатори кои претставуваат единствен систем за поддршка при донесување на инженерски одлуки. Со ова се опишани недостатоците кои претставуваат основен мотив за спроведување на истражувањето во рамките на овој докторски труд.

Табела бр. 3.1 Преглед на издовени научни трудови од областа на динамичката, сеизмичката анализа и постсеизмичката процена на мостовските дигалки

Научни трудови	Фокус на истражувањето	Динамичка / сеизмичка анализа	Постсеизмичка процена
<i>Gorynin et al.</i> (2018)	Мостовска дигалка	✓	×
<i>Cimmino et al.</i> (2020)	Индустриски префабрикувани објекти	✓	×

<i>Liu et al. (2021)</i>	Мостовска дигалка при сеизмичко дејство	✓	✗
<i>Rodriguez et al. (2022)</i>	Мостовска дигалка при сеизмичко дејство	✓	✗
<i>Pavićević et al. (2022)</i>	Мостовска дигалка при сеизмичко дејство	✓	✗
<i>Bosio et al. (2023)</i>	Индустриски објект со мостовска дигалка	✓	✗
<i>Lisperguier et al. (2023)</i>	Индустриски објект со мостовска дигалка	✓	✗
<i>Novelli et al. (2024)</i>	Критична процесна опрема во хемиската индустрија	✓	✗
<i>Layadi (2025)</i>	Процена на индустриски објект при сеизмичко дејство	✓	✗
<i>Bella & Gonzalez-Drigo (2025)</i>	Сеизмичко однесување на мостовска дигалка	✓	✗
<i>Nale et al. (2026)</i>	Постсеизмичка процена на инфраструктура	✗	✓

Табела бр. 3.2 Преглед на релеванните стандарди и регулативи за мостовски дигалки

Стандард / регулатива	Област на примена	Постсеизмичка процена на мостовска дигалка
<i>EN 13001</i>	Проектирање на мостовски дигалки	✗
<i>EN 15011</i>	Безбедносни барања за мостовски дигалки	✗
<i>EN 13135</i>	Опрема на дигалки	✗
<i>EN 14492-2</i>	Винчови и погонски системи	✗
<i>EN 1991-3</i>	Оптоварувања од дигалки	✗
<i>EN 1993-6</i>	Челични конструкции за дигалки	✗
<i>EN 1998-1 / EN 1998-1-1:2024</i>	Сеизмичко проектирање	✗
<i>ISO 9927-1 / ISO 9927-5</i>	Инспекција на дигалки	✗
<i>ISO 12482</i>	Следење на работниот век кај дигалките	✗
<i>ASME NOG-1 (2020)</i>	Нуклеарни мостовски дигалки	✗
<i>ASME B30.2 (2022)</i>	Мостовски и портални дигалки	✗

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТУВАЊЕ НА РЕАЛНА МОСТОВСКА ДИГАЛКА

4.1. Опис на експерименталната поставка

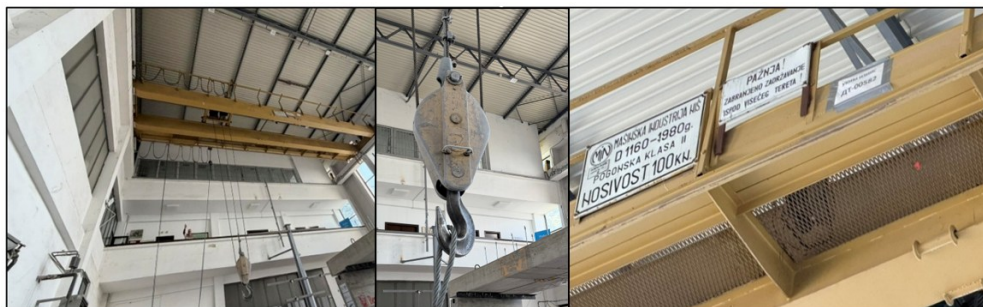
Со цел експериментална верификација на нумеричкиот модален модел на главниот носач на мостовската дигалка, извршено е модално испитување на реалната двогредна мостовска дигалка со распон од 16.25 m во лабораторијата на ИЗИИС (

Слика бр.4.1), (Табела 4.1). Куката со носивост од 12.5t овозможува прифаќање и подигнување на товарот и претставува составен дел од системот за подигнување на дигалката (слика бр.4.1). Испитувањето има за цел да го регистрира реалниот динамички одговор на конструкцијата при различни состојби на оптоварување и позиции на количката вдоль распонот на носачот.

Главниот носач претставува носечки конструктивен елемент на мостовската дигалка, преку кој се пренесуваат корисниот товар, сопствената тежина на количката и механизмите, како и динамичките оптоварувања што се јавуваат за време на работата. Поради неговата клучна улога во носивоста и динамичкото однесување на дигалката, токму на главниот носач се поставени акцелерометрите за регистрирање на динамичкиот одговор на конструкцијата. Измерените модални параметри претставуваат основа за експериментална верификација на нумеричкиот модел и за понатамошна анализа на состојбата на конструкцијата (Gašić, V., 2017).

Табела бр. 4.1. Основни технички карактеристики на испитуваната мостовска дигалка

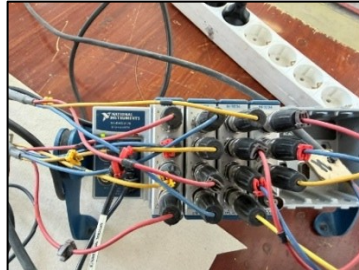
Параметар	Карактеристика
Тип на дигалка	Двогредна мостовска дигалка
Локација	Институт за земјотресно инженерство и инженерска сеизмологија (ИЗИИС), Скопје
Година на производство	1980
Распон	16.25 m
Номинална носивост	10 t (100 kN)
Носивост на куката	12.5 t
Погонска класа	Втора (II)
Материјал	S235JR



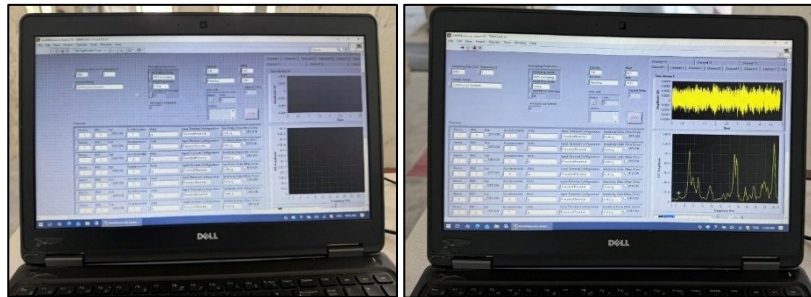
Слика бр.4.1 Мостовската дигалка во ИЗИИС

4.2. Мерна опрема

Преносот и аквизицијата на податоците од акцелометрите се реализирани преку мерниот систем *National Instruments NI cDAQ-9178 CompactDAQ* (слика 4.2), додека за снимање и обработка на сигналите е користен софтверскиот пакет *LabVIEW Virtual Instrument* (слика 4.3.). Времетраењето на секое мерење изнесуваше 5 минути. Всушност сигналот оди по следниот редослед: акцелометар, BNC кабел, DAQ модул и компјутерски софтвер (*LabView Virtual Instrument*).



Слика бр.4.2 Мерен систем (*National Instruments NI cDAQ-9178 CompactDAQ*)



Слика бр.4.3 Софтверски пакет *LabVIEW Virtual Instrument*

На слика 4.3 е прикажан корисничкиот интерфејс на софтверска апликација развиена во *LabVIEW*, наменета за запис и обработка на сигналите од акцелерометри поставени на испитуваниот систем. Во горниот дел е прикажан временскиот запис на забрзувањето (*анг. time history*), додека во долниот дел е прикажан амплитудно-фреквенцискиот спектар добиен со примена на брза Фуриева трансформација (*анг. Fast Fourier Transform (FFT)*). Во состојба без возбуда се регистрира нисконивоеен шум, без изразени пикови во спектарот (слика 3.3 лево), додека при динамичка возбуда се појавуваат осцилации во временскиот запис и пикови во *FFT* спектарот (слика 4.3 десно), кои одговараат на сопствените фреквенции на системот.

4.3. Позиционирање на акцелометрите

За експериментално определување на динамичкиот одговор на конструкцијата, најчесто се применуваат акцелерометри поставени на карактеристични позиции вдоль конструкцијата, со цел регистрирање на вибрационите сигнали и идентификација на природните фреквенции (Brincker & Ventura, 2015). Испитувањето е спроведено со поставување на пет триосни акцелометри на карактеристични позиции вдоль главниот носач, со цел да се регистрира динамичкиот одговор на конструкцијата во повеќе точки од распонот. Позициите на акцелерометрите се избрани така што рамномерно го покриваат целиот распон на главниот носач и овозможуваат регистрирање на неговиот динамички одговор во карактеристични мерни точки. Ваквиот распоред претставува вообичаена практика при експерименталните модални испитувања, бидејќи овозможува идентификација на доминантните модални форми и природните фреквенции на конструкцијата (Ewins, 2000; Brincker & Ventura, 2015). Акцелометрите се поставени на следните позиции (слика бр.4.5):

- Позиција 1: крајна десна позиција (L)
- Позиција 2: $3L/4$
- Позиција 3: средина на распонот ($L/2$)
- Позиција 4: $L/4$
- Позиција 5: крајна лева позиција (0)

Шематски приказ за поставеноста на акцелометрите е дадено и во Прилог 1. Секој од акцелометрите регистрира забрзувања во три меѓусебно ортогонални насоки (x , y и z), при што на излез се добиени вкупно 15 временски сигнали, со вкупно 600000 дискретни вредности. Соодветно, сигналите од позициите се организирани како (Табела 4.2):

Табела бр. 4.2 Поставеност на акцелометрите

Позиција	Локација	Канали (x, y, z)
1	L	1- x , 2- y , 3- z
2	$3L/4$	4- x , 5- y , 6- z
3	$L/2$	7- x , 8- y , 9- z
4	$L/4$	10- x , 11- y , 12- z
5	0	13- x , 14- y , 15- z



Слика бр.4.4 Поставеност на петте акцелометри вдолж главниот носач на мостовската дигалка



Слика бр.4.5 Позиции на акцелометрите (1, 2, 3, 4 и 5)

4.4. Фази на експерименталното испитување

Експерименталните модални испитувања на мостовски дигалки најчесто се спроведуваат при различни конфигурации на оптоварување и различни позиции на количката, со цел да се анализира нивното влијание врз динамичкиот одговор и модалните параметри на конструкцијата (Feau et al., 2015; Yildirim & Esim, 2019). Вообичаено, како референтна состојба најпрво се анализира конфигурацијата без товар, по што следуваат испитувања со различни нивоа на оптоварување и различни позиции на количката вдолж распонот. Согласно ваквиот пристап, и во рамките на ова истражување експерименталното испитување е реализирано во повеќе фази, при различни состојби на оптоварување и позиции на количката (Kusznir et. al, 2023).

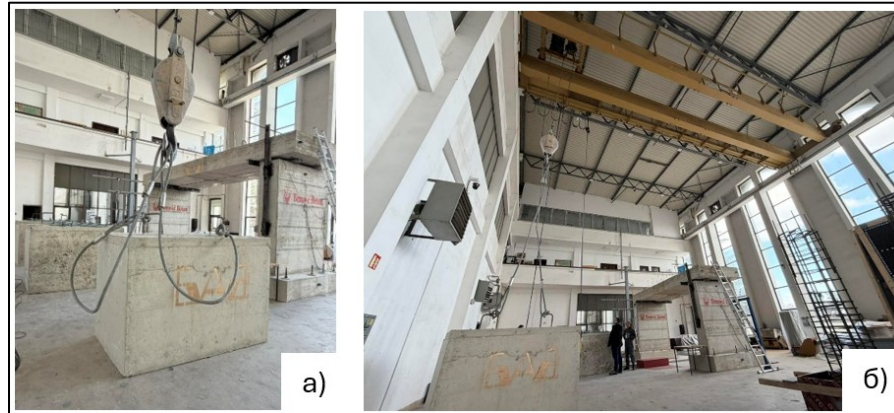
Согласно ваквиот пристап, и во рамките на ова истражување експерименталното испитување е реализирано во повеќе фази, при различни состојби на оптоварување и различни позиции на количката. Така, во овој докторски труд направени се вкупно 12 мерења. Сите резултати од извршените мерења се дадени во Прилог 2. Мерењата се организирани во три експериментални фази (Фаза 1, Фаза 2 и Фаза 3) со цел да се анализира влијанието на масата (товарот) врз динамичките карактеристики на конструкцијата.

4.4.1. Фаза 1 – Испитување без товар

Во оваа фаза е анализиран динамичкиот одговор на конструкцијата без закачен товар, при позиционирање на количката во:

- средина на распонот ($L/2$) (слика бр. 4.6)
- крајна лева позиција (слика бр. 4.6)

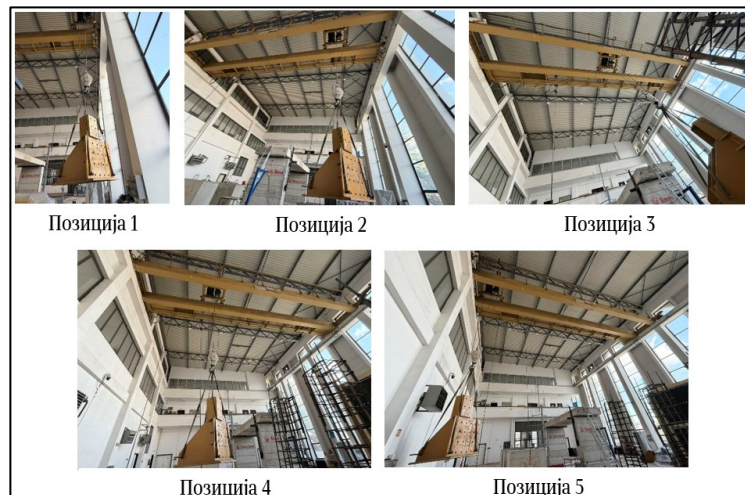
Овие мерења претставуваат референтна состојба на системот, неопходна за споредба со оптоварените состојби.



Слика бр. 4.6 Мерење без товар на средина на распонот (а) и во крајна лева позиција од распонот (б)

4.4.2. Фаза 2– Испитување со товар од 2 t

За испитувањето е применет товар од 2 t, подигнат на висина од 133 cm, при што мерењата повторно се извршени во сите пет позиции на количката: 0, $L/4$, $L/2$, $3L/4$ и L (слика бр. 4.7). Товарот е прицврстен со каиши на куката.



Слика бр. 4.7 Испитување со товар од 2t во позиции 1,2,3,4 и 5

4.4.3. Фаза 3 – Испитување со товар од 7 t

Во оваа фаза е применет товар од 7 t (слика бр.4.8), подигнат на висина од 133 cm од подлогата. Товарот е закачен и осигурен на кука со носивост 12500 kg, преку две челични јажиња. Со кренат товар на 133 cm се извршени мерења во сите пет позиции на количката вдолж распонот: 0 , $L/4$, $L/2$, $3L/4$ и L (слика 4.9).



Слика бр. 4.8 Приказ на товарот од 7 t и негово закачување, осигурување и дигање



Слика бр. 4.9 Испитување со товар од 7t во позиции 1,2,3,4 и 5

4.4.4. Контрола на вертикалното поместување на главниот носач

Покрај мерењата со акцелерометри, за време на експерименталното испитување е извршена и дополнителна контрола на вертикалното поместување на главниот носач со помош на ласерски далечиномер од типот *Ronix*. Мерењето на вертикалните поместувања претставува вообичаена експериментална постапка за проценка на конструктивното однесување и за верификација на нумеричките модели (*Feau et al., 2015; Ewins, 2000*). Овој уред е поставен на подлогата под главниот носач, при што е мерено растојанието помеѓу фиксна референтна точка на подот и долниот појас на носачот од иста позиција.

Целта на овие мерења е да се регистрира целокупното вертикално поместување на конструкцијата при различни состојби на оптоварување, односно да се обезбеди независна експериментална проценка на статичката деформација на носачот.

При мерењата без товар, регистрираното растојание изнесува (слика бр.4.10):

$$\min = 10.015 \text{ m}$$

$$\max = 10.017 \text{ m}$$



Слика бр.4.10 Мерење на растојание од подлогата до долната страна на главниот носач без товар и со товар од 7t

Додека при присуство на товар од 7t, измерените вредности се (слика бр. 4.10):

$$\min = 10.007 \text{ m},$$

$$\max = 10.008 \text{ m}$$

Намалувањето на измереното растојание во услови на оптоварување укажува на појава на вертикално поместување (нагиб) на главниот носач како резултат на дејството на товарот. Разликата помеѓу состојбата без товар и состојбата со товар изнесува приближно: $\Delta \approx 7 \div 9 \text{ mm}$, што претставува експериментално потврдено вертикално поместување на носачот во реални експлоатациските услови.

4.5. Обработка на податоците

По завршување на мерењата, сигналите се обработени во фреквентен домен со примена на брза Фуриеова трансформација (*FFT*). Сигналите се снимени со фреквенција на одбирање (анг. *sampling frequency*) $f_s = 2000 \text{ Hz}$, дефинирана во системот *NI CompactDAQ* при експерименталните мерења, што одговара на временски чекор $\Delta t = 0.0005 \text{ s}$, односно (4.1):

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{0.0005} = 2000 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

Иако секое мерење е со времетраење од 5 min , за *FFT* анализата се издвоени сегменти од $N = 4096$ последователни примероци. Изборот на овој број примероци е направен бидејќи *FFT* алгоритмот е најефикасен кога должината на сигналот е степен на бројот 2. Во конкретниот случај: $N = 4096 = 2^{12}$, што овозможува оптимална пресметковна ефикасност и минимизирање на нумеричките грешки при спектралната анализа (*Brigham, 1988; Oppenheim & Schaffer, 2010*). При фреквенција на одбирање од $f_s = 2000 \text{ Hz}$, анализираниот сегмент опфаќа временски интервал (4.2):

$$T = \frac{N}{f_s} = \frac{4096}{2000} = 2.048 \text{ s} \quad (4.2)$$

Односно, анализираниот сигнал има времетраење од 2.048 s . Овој временски прозорец обезбедува доволен број осцилациски циклуси за сигурна идентификација на доминантните сопствени фреквенции на конструкцијата, а истовремено овозможува соодветна фреквентна резолуција при спектралната анализа. Овој временски прозорец обезбедува доволен број осцилациски циклуси за сигурна идентификација на доминантните сопствени фреквенции на конструкцијата, а истовремено овозможува соодветна фреквентна резолуција при спектралната анализа (*Ewins, 2000; He & Fu, 2001*). Фреквентната резолуција (4.3) изнесува:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{2000}{4096} \approx 0.488 \text{ Hz} \quad (4.3)$$

Вредноста од 0.488 Hz за фреквентната резолуција значи дека соседните спектрални линии се оддалечени за приближно 0.49 Hz . Оваа резолуција е доволна за издвојување и идентификација на доминантните модални фреквенции на испитуваната мостовска дигалка (*Ewins, 2000; Oppenheim & Schaffer, 2010*). Пред *FFT* анализата од сигналите е отстранета средната вредност (анг. *demeaning*) со цел елиминација на *DC*-компонентата и избегнување на појава на вештачки пик при 0 Hz (*Brigham, 1988; Oppenheim & Schaffer, 2010*). Во понатамошната анализа спектрите се разгледувани во фреквентниот опсег од 0 до 20 Hz , во кој се очекува појава на првите глобални облици на вибрирање на конструкцијата.

При модалната анализа секој сопствен облик на вибрирање претставува карактеристичен начин на кој конструкцијата осцилира при одредена сопствена фреквенција. Првиот облик на вибрирање најчесто го опишува целокупното однесување на конструкцијата и е поврзан со најниската сопствена фреквенција. Вториот и третиот облик на вибрирање опишуваат

посложени форми на осцилирање, додека повисоките облици на вибрирање се карактеризираат со поголем број локални деформации и обично се почувствителни на начинот на моделирање, граничните услови и деталите на конструкцијата (Ewins, 2000; Chopra, 2017).

4.5.1. Фаза 1 – претставување на резултатите без товар

Во рамки на Фаза 1 е анализирано сценариото без применет товар, при што се разгледани две конфигурации: количка поставена во средината на распонот ($L/2$) и количка поставена во крајна положба. Во оваа потточка се прикажани резултатите за случајот кога количката е поставена во средината на распонот.

Анализата е извршена врз основа на сигналите на вертикалното забрзување (z -оска) регистрирани на три карактеристични позиции вдоль главниот носач: позиција 1 (ACC3), позиција 3 (ACC9) и позиција 5 (ACC15).

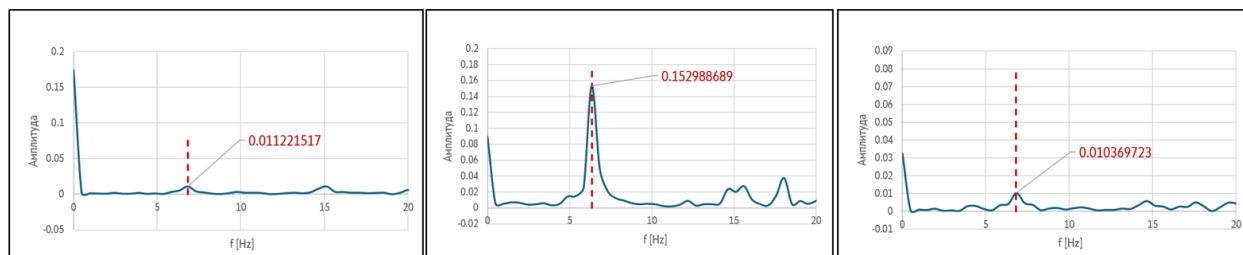
За потребите на анализата во овој докторски труд е воведена класификација на идентификуваните фреквентни компоненти според нивното значење за динамичкото однесување на мостовската дигалка, и тоа:

- Доминантен глобален облик на вибрирање – фреквентна компонента што одговара на најниската природна фреквенција на системот и се регистрира на повеќе мерни позиции, што укажува на учество на целата конструкција во вибрирањето.
- Повисоки глобални облици на вибрирање – фреквентни компоненти со повисоки природни фреквенции, кои исто така се регистрираат на повеќе мерни позиции и претставуваат повисоки модални облици на целата конструкција.
- Локални облици на вибрирање – фреквентни компоненти што се регистрираат само на поединечни мерни позиции и укажуваат на локално вибрирање на одделни конструктивни елементи.

А) Позиција на количката на средина на распонот (позиција 3)

На Слика бр. 4.11 се прикажани FFT спектрите за мерните позиции 1, 3 и 5 при поставеност на количката во средината на распонот (позиција 3), без товар. Кај сите три мерни позиции е идентификувана доминантна глобална фреквентна компонента во опсегот $6\div 7\text{ Hz}$, што укажува на присуство на доминантниот глобален облик на вибрирање на главниот носач. Најголема спектрална амплитуда е регистрирана на позиција 3 (акцелометар 9), каде доминантниот пик се јавува на 6.3477 Hz со амплитуда од 0.15299 m/s^2 . На позициите 1 и 5 е идентификувана доминантна фреквентна компонента од 6.8359 Hz , со значително помали амплитуди од 0.01122 m/s^2 и 0.01037 m/s^2 , соодветно. Ова покажува дека средината на распонот е најчувствителна мерна позиција за регистрирање на глобалниот динамички одговор на конструкцијата.

Покрај доминантниот глобален облик на вибрирање, во спектрите се идентификувани и повисоки глобални и локални облици на вибрирање во повисокиот фреквентен опсег (околу $14\div 19\text{ Hz}$), но со значително помали амплитуди. Ваквата распределба на амплитудите е во согласност со обликот на вибрирање кај гредни конструкции, при што максималните поместувања и забрзувања се јавуваат во зоната на средината на распонот, додека во близина на бочните носачи нивните вредности се значително помали (Ewins, 2000; Chopra, 2017).



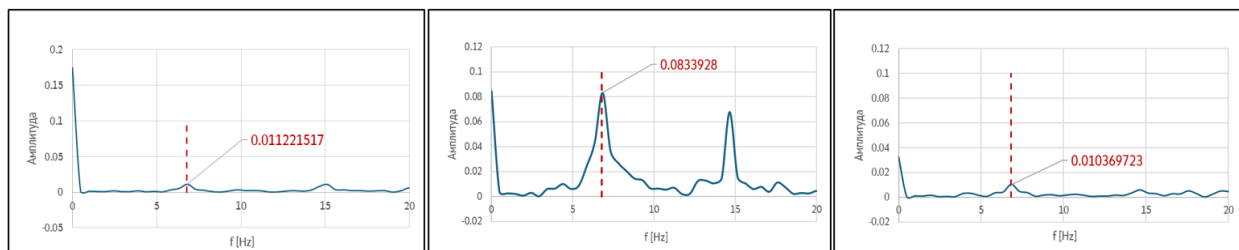
Слика бр. 4.11 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 и количката е во $L/2$ и е без товар

Б) Позиција на количката на крајот на распонот (позиција 5)

Во оваа потточка се прикажани резултатите од мерењето без товар, при што количката е поставена во крајна положба на распонот (позиција 5) (слика бр. 4.12). Целта е да се испита влијанието на положбата на количката врз динамичкиот одговор на главниот носач и да се изврши споредба со случајот кога количката е поставена во средината на распонот.

Од добиените *FFT* спектри се забележува дека и во овој случај доминантниот глобален облик на вибрирање е регистриран во фреквентниот опсег $6\div 7\text{ Hz}$ кај сите три мерни позиции. Најголема спектрална амплитуда е добиена на позиција 3 (акцелометар 9), каде при фреквенција од 6.8359 Hz е регистрирана амплитуда од 0.08339 m/s^2 . На позициите 1 и 5 е идентификувана истата доминантна фреквентна компонента, но со значително помали амплитуди од 0.01122 m/s^2 и 0.01037 m/s^2 , соодветно.

Покрај доминантниот глобален облик на вибрирање, кај позиција 3 се забележува и изразен повисок глобален облик на вибрирање во опсегот околу $14\div 15\text{ Hz}$, додека кај позициите 1 и 5 повисоките глобални и локални облици на вибрирање се значително послабо изразени. Во споредба со случајот кога количката е поставена во средината на распонот, поставувањето на количката во крајната положба доведува до намалување на амплитудата на доминантниот глобален облик на вибрирање, додека неговата фреквенција останува практично непроменета. Најизразениот динамички одговор и понатаму се регистрира во средината на распонот, што е карактеристично за глобалното свиткување на главниот носач.



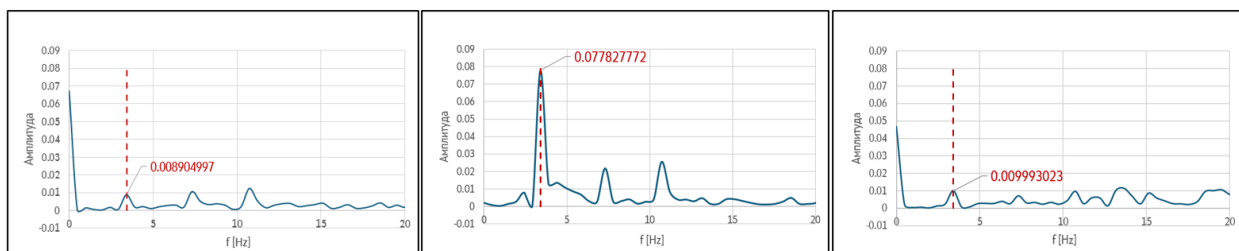
Слика бр. 4.12 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 и количката е во позиција 5 и е без товар

4.5.2. Фаза 2 – резултати при товар од 2 t

Во рамки на Фаза 2 е анализиран динамичкиот одговор на мостовската дигалка при товар од 2t подигнат на висина од 133 cm. Целта е да се оцени влијанието на товарот врз вибрационите карактеристики на главниот носач и да се изврши споредба со сценариото без товар. Анализата е извршена врз основа на сигналите на вертикалното забрзување (z-оска) регистрирани на позициите 1, 3 и 5, при што во продолжение се прикажани резултатите за различните положби на количката вдоль распонот.

А) Резултати при товар од 2 t во позиција 1

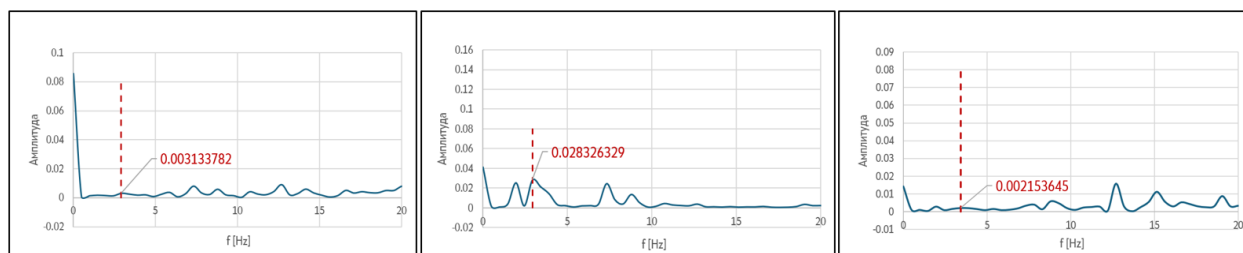
На слика бр. 4.13 се прикажани *FFT* спектрите за поставеност на акцелометрите на мерните позиции 1, 3 и 5 при товар од 2 t кој е поставен во позиција 1. Од добиените *FFT* спектри се забележува дека доминантниот глобален облик на вибрирање е идентификуван на 3.42 Hz кај сите три мерни позиции. Најголема спектрална амплитуда е регистрирана на позиција 3 (акцелометар 9) и изнесува 0.0778 m/s^2 . Од друга страна, на позициите 1 и 5 доминантниот глобален облик на вибрирање е регистриран со значително помали амплитуди од 0.0089 m/s^2 и 0.0100 m/s^2 , соодветно. Покрај него, кај овие мерни позиции се идентификувани и повисоки глобални и локални облици на вибрирање во повисокиот фреквентен опсег, но со значително помало учество во вкупниот динамички одговор. Добиените резултати покажуваат дека и при поставување на товарот во позиција 1, доминантниот глобален облик на вибрирање најјасно се регистрира во средината на распонот, додека во близина на бочните носачи е значително помало.



Слика бр. 4.13 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 при товар од 2t во позиција 1

Б) Резултати при товар од 2 t во позиција 3

На слика бр. 4.14 се прикажани *FFT* спектрите за позициите 1, 3 и 5 при товар од 2 t поставен во средината на распонот (позиција 3). Според добиените податоци од *FFT* спектрите се забележува дека доминантниот глобален облик на вибрирање повторно е идентификуван на 3.42 Hz кај сите три мерни позиции. Најголема спектрална амплитуда е регистрирана на позиција 3 (акцелометар 9) и изнесува 0.0283 m/s^2 . На позициите 1 и 5 доминантниот глобален облик на вибрирање е регистриран со значително помали амплитуди од 0.0031 m/s^2 и 0.0022 m/s^2 , соодветно. Покрај него, во повисокиот фреквентен опсег се идентификувани повисоки глобални и локални облици на вибрирање.

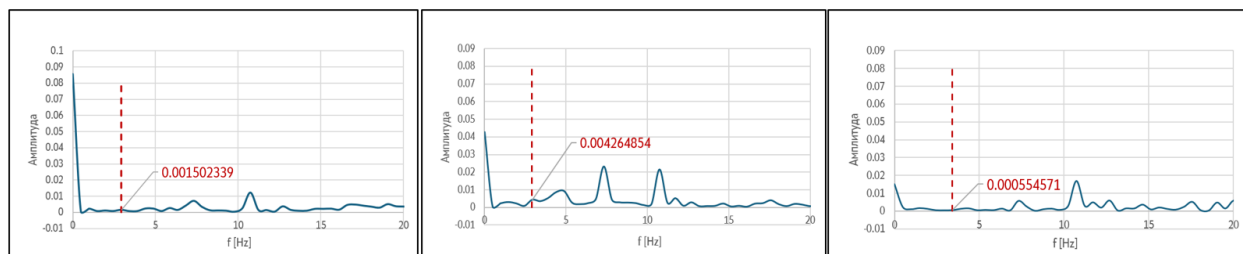


Слика бр. 4.14 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 при товар од 2t во позиција 3

В) Резултати при товар од 2 t во позиција 5

Во ова сценарио е анализиран динамичкиот одговор на мостовската дигалка при товар од 2t подигнат на висина од 133 cm, при што количката е поставена во позиција 5. На слика бр.4.15 се прикажани *FFT* спектрите за трите мерни позиции. Според *FFT* спектрите воочливо е дека доминантниот глобален облик на вибрирање е регистриран во нискофреквентниот опсег околу 3 Hz. Најголема спектрална амплитуда е добиена на позиција 3 (акцелометар 9), каде при фреквенција од 2.93 Hz е регистрирана амплитуда од 0.0043 m/s^2 . На позициите 1 и 5 доминантниот глобален облик на вибрирање е идентификуван при 3.42 Hz, но со значително помали амплитуди од 0.0015 m/s^2 и 0.0006 m/s^2 , соодветно.

Покрај доминантниот глобален облик на вибрирање, кај сите три мерни позиции се забележуваат повисоки глобални и локални облици на вибрирање во повисокиот фреквентен опсег, но со значително помало влијание во вкупниот динамички одговор.



Слика бр. 4.15 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 при товар од 2t во позиција 5

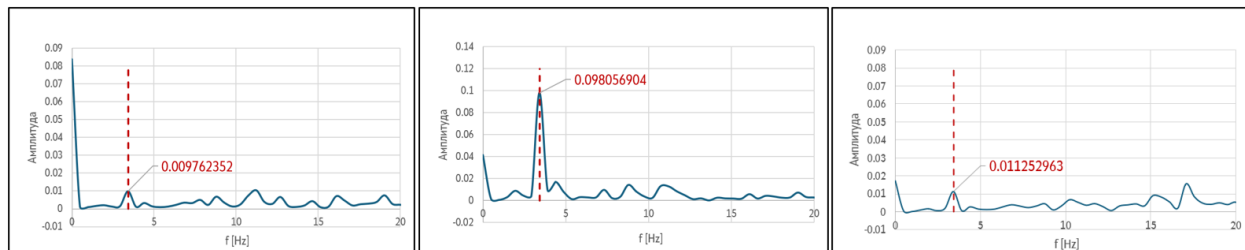
4.5.3. Фаза 3 – резултати при товар од 7 t

Во оваа фаза е анализиран динамичкиот одговор на мостовската дигалка при товар од 7t подигнат на висина од 133 cm. Анализата е извршена врз сигналите на вертикалното забрзување (z-оска) регистрирани во позициите 1, 3 и 5 вдолж главниот носач. Во продолжение се прикажани резултатите од фреквентната анализа и нивната споредба со резултатите добиени за случаите без товар и со товар од 2t.

А) Резултати при товар од 7 t во позиција 1

На слика бр. 4.16 се прикажани споредбените *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 при товар од 7t поставен во позиција 1.

Од *FFT* спектрите се гледа дека доминантниот глобален облик на вибрирање е идентификуван на 3.42 Hz кај сите три мерни позиции. Најголема спектрална амплитуда е регистрирана на позиција 3 (акцелометар 9) и изнесува 0.0981 m/s^2 , што повторно потврдува дека средината на распонот е најрепрезентативна мерна позиција за регистрирање на глобалниот динамички одговор на главниот носач. На позициите 1 и 5 доминантниот глобален облик на вибрирање е регистриран со значително помали амплитуди од 0.0098 m/s^2 и 0.0113 m/s^2 , соодветно. Во споредба со случаите без товар и со товар од 2 t, при товар од 7 t доминантниот глобален облик на вибрирање останува во нискофреквентниот опсег околу $3\div 4 \text{ Hz}$, при што неговата амплитуда е најизразена во средината на распонот.

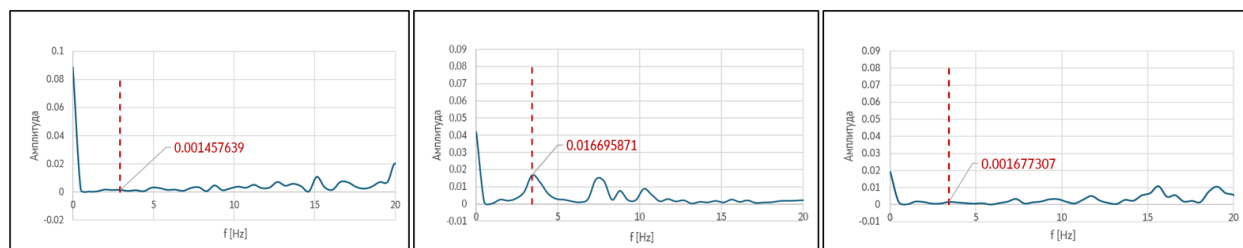


Слика бр. 4.16 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1,3 и 5 при товар од 7t и поставен во позиција 1

Б) Резултати при товар од 7 t во позиција 3

На Слика 4.17 се прикажани споредбените *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 при товар од 7t поставен во средината на распонот (позиција 3). Од добиените *FFT* спектри се забележува дека доминантниот глобален облик на вибрирање е идентификуван на 3.42 Hz кај сите три мерни позиции. Најголема спектрална амплитуда е регистрирана на позиција 3 (акцелометар 9) и изнесува 0.0167 m/s^2 , што потврдува дека средината на распонот и понатаму претставува најрепрезентативна мерна позиција за следење на глобалниот динамички одговор на главниот носач. На позициите 1 и 5 доминантниот глобален облик на вибрирање е регистриран со значително помали амплитуди од 0.0015 m/s^2 и 0.0017 m/s^2 , соодветно. Покрај

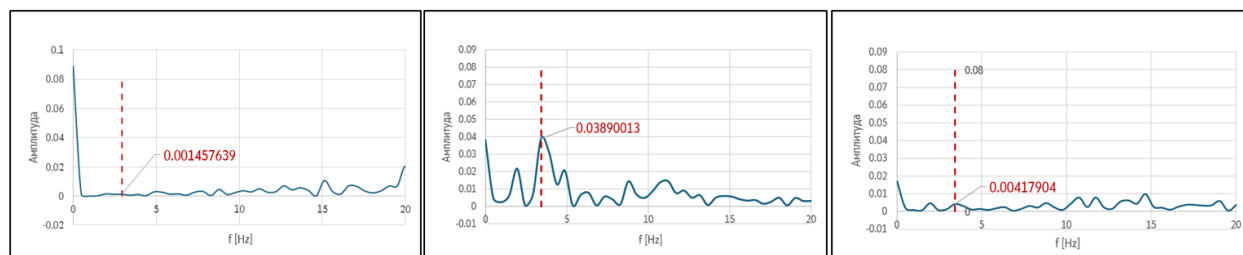
него, во повисокиот фреквентен опсег се идентификувани повисоки глобални и локални облици на вибрирање, но со значително помало учество во вкупниот динамички одговор.



Слика бр. 4.17 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1,3 и поставен во позиција 3

В) Резултати при товар од 7 t во позиција 5

На Слика 4.18 се прикажани споредбените *FFT* спектри за позициите 1, 3 и 5 при товар од 7t поставен во позиција 5. Од добиените *FFT* спектри се забележува дека доминантниот глобален облик на вибрирање повторно е идентификуван приближно околу 3.42 Hz кај сите три мерни позиции. Најголема спектрална амплитуда е регистрирана на позиција 3 (акцелометар 9) и изнесува 0.0389 m/s. На позициите 1 и 5 доминантниот глобален облик на вибрирање е регистриран со значително помали амплитуди од 0.0015 m/s² и 0.0042 m/s², соодветно. Покрај него, во повисокиот фреквентен опсег се идентификувани повисоки глобални и локални облици на вибрирање, но со значително помало учество во вкупниот динамички одговор.



Слика бр. 4.18 Споредбени *FFT* спектри за позициите 1,3 и 5 при товар од 7t во позиција 5

4.6. Споредбена анализа

Од резултатите прикажани во Табелите бр. 4.3÷4.5 може да се забележи дека во фаза 1 од мерењето, без товар, првиот глобален облик на вибрирање е идентификуван на фреквенција од 6.8359 Hz, при што најголема спектрална амплитуда е регистрирана на мерната позиција 3 (ACC9), односно во средината на распонот. Ова потврдува дека доминантниот глобален облик на вибрирање најјасно се регистрира во средината на распонот.

Табела бр. 4.3 Прв глобален облик на вибрирање – сценарио без товар

Позиција на товар	Мерна позиција	Акцел.	Фреквенција на првиот глобален облик на вибрирање [Hz]	Амплитуда
Позиција 3	Поз. 1	ACC3	6.8359	0.01122
Позиција 3	Поз. 3	ACC9	6.8359	0.15299
Позиција 3	Поз. 5	ACC15	6.8359	0.01037
Позиција 5	Поз. 1	ACC3	6.8359	0.01122
Позиција 5	Поз. 3	ACC9	6.8359	0.08339
Позиција 5	Поз. 5	ACC15	6.8359	0.01037

Со додавање на товар од 2t и 7t се забележува поместување на доминантната фреквентна компонента кон пониски вредности, при што првиот глобален облик на вибрирање е идентификуван на фреквенција од 3.42 Hz. Намалувањето на фреквенцијата е очекувано и претставува последица на зголемувањето на вкупната маса на системот, при што крутоста на конструкцијата останува практично непроменета.

Табела бр. 4.4 Прв глобален облик на вибрирање – товар 2t

Позиција на товар	Мерна позиција	Акцел.	Фреквенција на првиот глобален облик на вибрирање [Hz]	Амплитуда
Позиција 1	Поз. 1	ACC3	3.42	0.0089
Позиција 1	Поз. 3	ACC9	3.42	0.0778
Позиција 1	Поз. 5	ACC15	3.42	0.0100
Позиција 3	Поз. 1	ACC3	3.42	0.0031
Позиција 3	Поз. 3	ACC9	3.42	0.0283
Позиција 3	Поз. 5	ACC15	3.42	0.0022
Позиција 5	Поз. 1	ACC3	3.42	0.0015
Позиција 5	Поз. 3	ACC9	2.93	0.0043
Позиција 5	Поз. 5	ACC15	3.42	0.0006

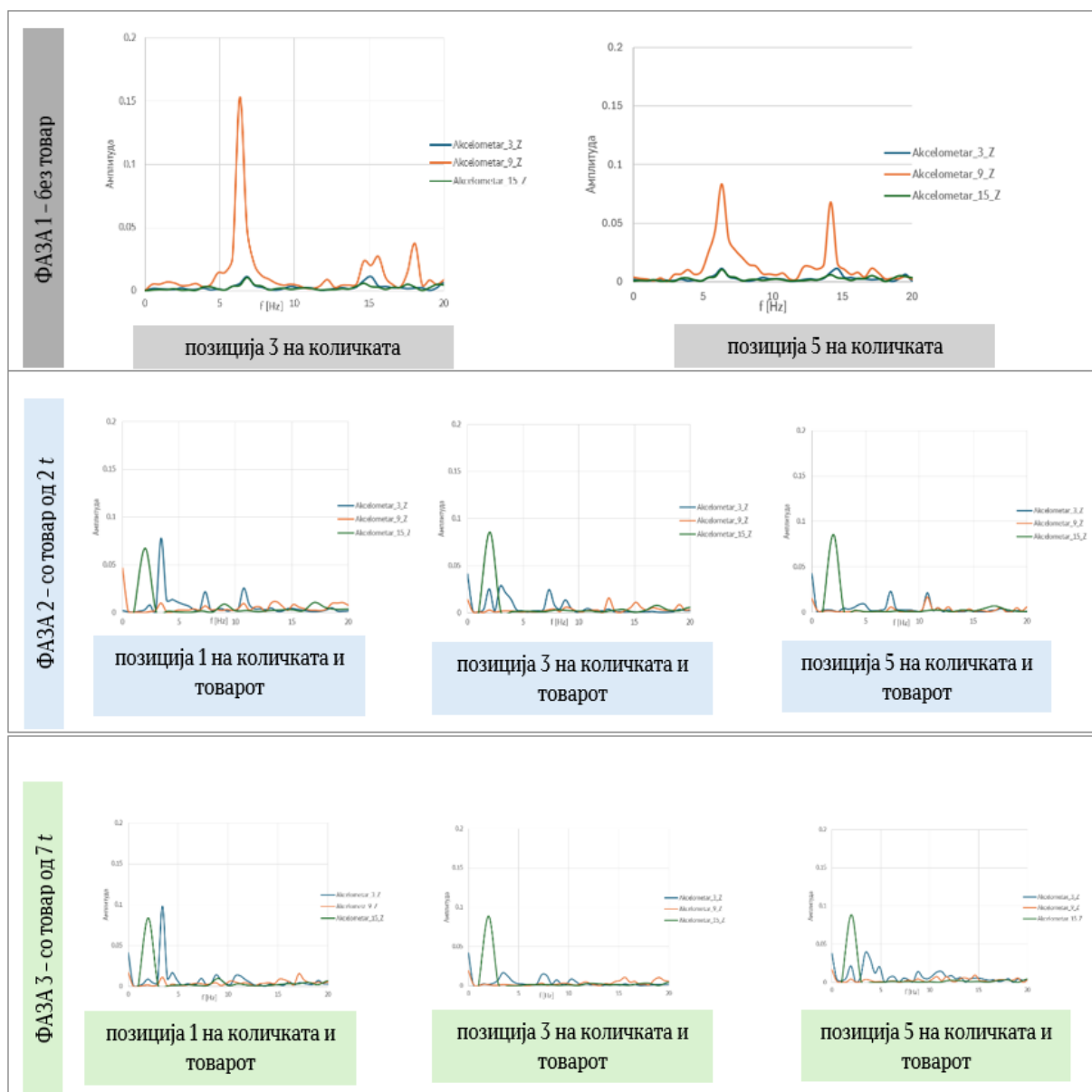
Во сценариото со товар од 2 t поставен во позиција 5, на мерната позиција 3 е идентификувана фреквенција од 2.93 Hz, која, имајќи ја предвид резолуцијата на FFT анализата, се поврзува со истиот прв глобален облик на вибрирање како и компонентата на 3.42 Hz.

Табела бр. 4.5 Прв глобален облик на вибрирање – товар 7t

Позиција на товар	Мерна позиција	Акцел.	Фреквенција на првиот глобален облик на вибрирање [Hz]	Амплитуда
Позиција 1	Поз. 1	ACC3	3.42	0.0098
Позиција 1	Поз. 3	ACC9	3.42	0.0981

Позиција 1	Поз. 5	ACC15	3.42	0.0113
Позиција 3	Поз. 1	ACC3	3.42	0.0015
Позиција 3	Поз. 3	ACC9	3.42	0.0167
Позиција 3	Поз. 5	ACC15	3.42	0.0017
Позиција 5	Поз. 1	ACC3	3.42	0.0015
Позиција 5	Поз. 3	ACC9	3.42	0.0389
Позиција 5	Поз. 5	ACC15	3.42	0.0042

Во крајните мерни позиции (позиции 1 и 5) доминираат повисоки фреквентни компоненти, најчесто во опсегот од 11 до 16 Hz, со релативно мали спектрални амплитуди. Овие компоненти може да се поврзат со повисоки модални форми или со локални динамички ефекти, додека најизразениот глобален динамички одговор доследно се регистрира во средината на распонот. Споредбените *FFT* спектри прикажани на слика бр. 4.19 покажуваат дека зголемувањето на товарот предизвикува поместување на првиот глобален облик на вибрирање од опсегот 6÷7 Hz (без товар) кон опсегот околу 3÷4 Hz (товар од 2 t и 7 t). Истовремено, положбата на количката влијае пред сè врз распределбата на спектралните амплитуди, додека фреквенцијата на првиот глобален облик на вибрирање останува практично непроменета за истото ниво на товар. Во сите анализирани сценарија најголема спектрална амплитуда е регистрирана на мерната позиција 3 (ACC9), што потврдува дека средината на распонот е најсоодветна мерна позиција за идентификација на доминантниот глобален облик на вибрирање на главниот носач.



Слика бр. 4.19 Споредбени *FFT* спектри за позиците 1,3 и 5, без товар, со товар од 2t и 7t

KORISTENA LITERATURA ZA POGLAVJE 4

- Aziz, A., Yousaf, M. Z., Renhai, F., Khan, W., Siddique, U., Ahmad, M., ... & Zaitsev, I. (2025). Advanced AI-driven techniques for fault and transient analysis in high-voltage power systems. *Scientific Reports*, 15(1), 5592.
- Bathe, K.-J. (1996). *Finite element procedures*. Prentice Hall.
- Brigham, E. O. (1988). *The fast Fourier transform and its applications*. Prentice Hall.
- Ewins, D.J. (2000). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd ed., Research Studies Press.
- Fu, Z.-F., & He, J. (2001). *Modal analysis*. Butterworth-Heinemann.
- Feau, C., Politopoulos, I., Kamaris, G. S., Mathey, C., Chaudat, T., & Nahas, G. (2015). Experimental and numerical investigation of the earthquake response of crane bridges. *Engineering Structures*, 84, 89–101.
- Gašić, V. *Osnove metalnih konstrukcija u mašingradnji*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2017
- Ghazwani, M. H., Alnujaie, A. H., Chandravanshi, M. L., Deepak, D., & Singh, C. (2022). Failure Analyses of Tower Crane using FEM and theoretical studies. *Yanbu Journal of Engineering and Science*, 19(2), 30-49.
- He, J., & Fu, Z.F. (2001). *Modal Analysis*, Butterworth-Heinemann.
- Kochmann, D. M. (2025). Introduction to finite element analysis. ETH Zurich.
- Lee, H.-H. (2021). Finite element simulations with ANSYS Workbench 2021: Theory, applications, case studies. SDC Publications.
- Lin, F. (2024). Modal and dynamic stress analysis of crane support frame based on CAE technology. *Vibroengineering Procedia*, 57, 99-105.
- MEREUTA, V. (2024). FEM ANALYSIS OF CRANE HOOKS WITH DIFFERENT CROSS SECTION. *INTERNATIONAL JOURNAL*, 12(11), 2468-2472.
- Molnár, D., Blatnický, M., Barta, D., & Grenčík, J. (2023). Design and strength analysis of the end carriage beam for the single girder bridge crane of a 500 kg load capacity. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*, 67(3), 89-94.
- Reddy, J. N. (2006). *An introduction to the finite element method* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Vanam, B. C. L., Rajyalakshmi, M., & Inala, R. (2012). Static analysis of an isotropic rectangular plate using finite element analysis (FEA). *Journal of Mechanical Engineering Research*, 4(4), 148–162.
- Kurowski, P. M. (2022). *Finite element analysis for design engineers*. Sae international.
- Kusznir, T., & Smoczek, J. (2023). Soft-Computing-Based Estimation of a Static Load for an Overhead Crane. *Sensors*, 23(13), 5842.
- Wang, J., Qin, H., Wang, B., & Xu, X. (2022, February). The FEM Analysis of the Height Protection Equipment of the Crane. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2200, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- Yıldırım, Ş., & Esim, E. (2019). Modal Analysis of Double Beam Overhead Type Crane Systems by Finite Element Method. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 7(Special Issue), 975–988.
- Zhang, P., He, Z., Cui, C., Xu, C., & Ren, L. (2023). An edge-computing framework for operational modal analysis of offshore wind-turbine tower. *Ocean Engineering*, 287, 115720.

5. НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ И ВЕРИФИКАЦИЈА НА МОСТОВСКАТА ДИГАЛКА

Динамичкиот одговор на системот може да се претстави како збир од поединечните природни облици на вибрацијата. Со овој пристап, сложеното динамичко однесување на конструкцијата се разложува на повеќе независни модални одговори, што претставува основа за понатамошна модална анализа (*Brincker, 2015*).

Овој теоретски пристап е од суштинско значење за определување на природните фреквенции и модалните облици на главниот носач на мостовската дигалка, кои подоцна се користат при нумеричката анализа во софтверот *ANSYS*, како и при експерименталната верификација преку мерења со акцелерометри на реалниот модел.

Природните фреквенции и модалните облици претставуваат основни динамички карактеристики на конструктивниот систем. Секоја природна фреквенција е поврзана со специфичен модален облик, кој ја опишува формата на деформација на конструкцијата при нејзино слободно осцилирање (*Brincker, 2015*).

Овие параметри зависат исклучиво од распределбата на масата и крутоста во системот, како и од неговите геометриски и материјални својства. Поради тоа, промените во природните фреквенции можат да укажат на евентуални промени во конструктивната состојба, како што се локално намалување на крутоста или појава на оштетувања.

Во случај на главниот носач на мостовска дигалка, определувањето на природните фреквенции и модалните облици овозможува определување на можни резонантни состојби, како и процена на неговото динамичко однесување под дејство на оперативни и сеизмички оптоварувања. Исто така, следењето на промените во овие параметри може да се користи како индикатор за процена на конструктивната состојба на системот по настанување на сеизмичко дејство (*Lin, 2024*).

5.1. Основи на методот на конечни елементи

Современите инженерски конструкции и машински системи во најголем број случаи имаат сложена геометрија, различни услови на потпирање и се изложени на повеќе видови оптоварувања. Поради тоа, определувањето на напоните, деформациите и слично не може секогаш доволно точно да се определи само со примена на класичните аналитички постапки (*Bathe, 1997*). Развојот на нумеричките методи овозможува ваквите проблеми да се анализираат со поголема точност и да се добие подобар увид во однесувањето на посложени конструкции (*Kochmann, 2025*).

Еден од најчесто применуваните нумерички методи во инженерството е методот на конечни елементи (MKE). Основата на методот се состои во поделба на сложената

конструкција на поголем број помали и поедноставни делови, наречени конечни елементи (Kochmann, 2025). Со решавање на равенките за секој елемент и нивно поврзување во заеднички систем се определува однесувањето на целата конструкција (Lee, 2021).

За спроведување анализи со методот на конечни елементи се развиени повеќе софтверски пакети. Еден од најпознатите и најчесто применуваните е ANSYS. Програмскиот пакет овозможува создавање геометриски модел, задавање материјални карактеристики, избор на соодветни конечни елементи, формирање на мрежа, дефинирање гранични услови и оптоварувања, спроведување на пресметката и обработка на добиените резултати (Nelson & Wang, 2004). Самото добивање нумерички резултати не е доволно за донесување правилни инженерски заклучоци. Потребно е резултатите внимателно да се проверат, обработат и споредат со аналитички пресметки, експериментални мерења, податоци од литературата или соодветни стандарди. Со ваквата проверка може да се утврди дали развиениот модел доволно точно го претставува реалното однесување на конструкцијата (Kurowski, 2022).

Во рамките на овој текст се прикажани основите на МКЕ, главните фази при развојот на нумерички модел и можностите на програмскиот пакет ANSYS (Lee, 2021). Однесувањето на носечките конструкции изложени на статички, динамички и сеизмички дејства се опишува со математички модели засновани на парцијални диференцијални равенки кои ја дефинираат нивната состојба. Бидејќи аналитичкото решавање на ваквите равенки е ограничено само на поедноставени случаи со идеализирана геометрија и гранични услови, во инженерската пракса се применуваат нумерички методи за нивно приближно решавање. Методот на конечни елементи (МКЕ) претставува една од најшироко користените нумерички техники за анализа на конструктивни системи со сложена геометрија и оптоварување (Bathe, 1996).

Во МКЕ, анализираниот систем се дели на помали делови наречени конечни елементи. Овие елементи се меѓусебно поврзани во точки наречени јазли, при што се формира мрежа (анг. *mesh*) која го претставува дискретниот модел на конструкцијата (Kochmann, 2025; Lee, 2021). Во рамките на секој елемент, полето на поместувања не се пресметува точно, туку се претставува приближно со помош на т.н. интерполациски функции. Овие функции се дефинирани локално, односно важат само во рамките на соодветниот елемент, а не низ целата конструкција. Со нивна помош, вредностите на поместувањата во елементот се изразуваат преку вредностите во јазлите. На овој начин, полето на поместување во разгледуваниот систем може да се претстави како (Kochmann, 2025):

$$u^h(x) = \sum_{a=0}^n u_a N^a(x) \quad (5.1)$$

каде што:

$u^h(x)$ претставува приближна вредност на поместувањето,

u_a се вредности на јазлите (степените на слобода),

$N^a(x)$ се интерполациски функции.

Со овој израз се покажува дека поместувањето во која било точка од системот се пресметува врз основа на вредностите на поместувањата во јазлите.

При дискретизација, анализираниот домен (Ω) се дели на конечен број на поддомени (Ω_e), т.н. конечни елементи (слика бр.5.1) (Kochmann, 2025; Nelson & Wang, 2004). Па според тоа:

$$\Omega_e \subseteq \Omega, \Omega = \cup_e \Omega_e, \quad (5.2)$$

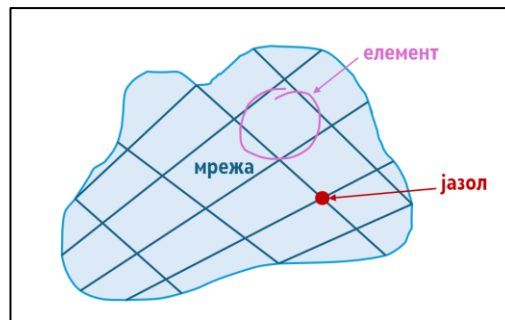
што значи дека целиот разгледуван систем е составен од збир на поединечни конечни елементи. За да може да се направи правилно спојување помеѓу елементите, интерполациските функции мора да го задоволат условот (Ghazwani et.al, 2022):

$$N^a(x_b) = \delta_{ab} \quad \forall a, b \in \{1, \dots, n\} \quad (5.3)$$

Овој услов е уште познат и како Кронекерова особина (англ. *Kronecker property*) и означува дека секоја функција на форма има вредност еднаква на 1 во соодветниот јазол, вредност 0 во сите останати јазли. Со тоа, вредноста на поместувањето во јазлите директно одговара на степените на слобода на системот.

Ваквиот пристап овозможува секој јазол да има сопствени степени на слобода (англ. *degrees of freedom*), кои директно одговараат на вредностите на поместувањата во тие точки. На овој начин, непознатите поместувања во целата конструкција се сведуваат на конечен број на непознати вредности во јазлите (Reddy, 2006).

Бидејќи секој конечен елемент е поврзан само со соседните елементи, тој влијае само на еден ограничен дел од конструкцијата. Поради тоа, голем број членови во целокупната матрица на крутост имаат вредност нула. Ова значително ја намалува пресметковната сложеност и овозможува ефикасно решавање на системот на равенки, особено кај конструкции со сложена геометрија и голем број степени на слобода. Дополнително, ваквата формулација овозможува едноставно воведување на гранични услови, бидејќи доделувањето на поместувања во одредени јазли директно значи додавање на вредностите на соодветните степени на слобода (Kochmann, 2025).



Слика бр. 5.1 Дискретизација на конструкцијата во конечни елементи и формирање на мрежа

Доколку апроксимираното поле на поместување $u^h(x)$ се пресметува во еден од јазлите x_b , тогаш се добива:

$$u^h(x_b) = \sum_{a=1}^n u^a N^a(x_b) = \sum_{a=1}^n u^a \delta_{ab} = u^b \quad (5.4)$$

Ова покажува дека коефициентот u^b ја претставува вредноста на поместувањето во соодветниот јазол. Со други зборови, степените на слобода се вредностите на поместувањата во јазлите (Kurowski, 2022).

Од друга страна, Кронекеровата особина (5.3) овозможува да се постави важен услов за точност на апроксимацијата. Доколку точното решение на проблемот е константно, односно:

$u(x) = c$, тогаш се очекува и приближното решение да ја задржи истата вредност, односно: $u^h(x) = c$. За да биде исполнет овој услов, сите врски помеѓу јазлите мора да имаат иста вредност, т.е. $u^a(x) = c$, што значи дека (5.5) (Fu & He, 2001):

$$u^h(x) = \sum_{a=1}^n u^a N^a(x) = \sum_{a=1}^n c N^a(x) = c \sum_{a=1}^n N^a(x) \quad (5.5)$$

Аналогно на тоа интерполациските функции мора да го задоволат условот:

$$\sum_{a=1}^n N^a(x) = 1, \text{ за сите } x \in \Omega \quad (5.6)$$

Овој услов обезбедува константните функции да се опишат точно, и е познат како услов на нулти ред на конзистентност (анг. *0th order consistency*). Па, при дефинирањето на интерполациските функции потребно е тие да бидат меѓусебно линеарно независни, што значи доколку: $u^h(x) = 0$ за сите $x \in \Omega$ тогаш мора да важи (Bathe, 1996):

$$n^b = 0 \quad \forall b = 1, \dots, n \quad (5.7)$$

При примената на МКЕ, точноста на приближното решение зависи од начинот на дискретизација на анализираниот модел, односно од големината на елементите и редот на интерполациските функции. Со цел да се подобри точноста на решението, во МКЕ се применуваат различни постапки на згуснување на мрежата (анг. *refinement*), меѓу кои најчесто се користат (Bathe, 1996; Kochmann, 2025; Lee, 2021):

- *h*-згуснување на мрежата (анг. *h-refinement*) – намалување на големината на елементите, без промена на интерполациските функции, при што се зголемува бројот на елементи во мрежата и се добива попрецизен модел.
- *p*-рафинирање (анг. *p-refinement*) – зголемување на редот на интерполациските функции во рамките на постоечката мрежа, без промена на бројот на елементи;

- *hp*-рафинирање (анг. *hp-refinement*) – комбинација од претходните два пристапи, односно истовремено намалување на големината на елементите и зголемување на редот на интерполациските функции;
- *r*-рафинирање (анг. *r-refinement*) – промена на положбата на јазлите во рамките на мрежата со цел нивно концентрирање во зони каде се очекуваат поголеми промени на напон или деформација.

Со примена на овие техники, приближното решение u^h постепено се приближува кон точното решение u , што значи дека со зголемување на точноста на дискретизацијата се подобрува и квалитетот на добиените резултати.

Во рамките на механичките проблеми, како што е анализата на носечки конструкции, слабата форма на равенките содржи изводи од прв ред. Поради тоа, интерполациските функции мора да бидат дефинирани најмалку како локално линеарни функции, со цел да се обезбеди конвергенција на решението (Bathe, 1996; Kochmann, 2025; Zhang et al., 2023).

5.1.1. Видови анализа применети во рамките на анализата по метод на конечни елементи

5.1.1.1. Модална анализа

Во изминатите децении, модалната анализа се истакнува како една од најзначајните анализи за определување, подобрување и оптимизација на динамичките карактеристики на различни конструкции (Fu & He, 2001).

Современите конструктивни системи, вклучително и носечките елементи на мостовските дигалки, се проектираат со цел да бидат полесни, пофлексибилни и истовремено доволно надежни. Намалувањето на масата на конструкцијата, иако е пожелно од аспект на ефикасност и економичност, ја зголемува чувствителноста на вибрации. Како резултат на тоа, динамичкото однесување на ваквите системи станува од особено значење за нивната безбедна експлоатација (Zhang, 2023). Па така, модалната анализа претставува метод за определување на сопствените динамички карактеристики на еден систем, како што се:

- сопствени (природни) фреквенции
- облици на осцилирање (модови на вибрации)
- коефициенти на пригушување

Овие параметри овозможуваат дефинирање на математички модел кој го опишува динамичкото однесување на конструкцијата.

Динамичкиот одговор на конструктивните системи може да се претстави како збир од поединечни хармониски осцилации кои одговараат на нивните природни облици на вибрирање. Секој облик на вибрирање се карактеризира со сопствена фреквенција и соодветен облик на деформација, при што овие параметри зависат од физичките својства на

системот, како што се масата, крутоста и пригушувањето, како и од нивната распределба во конструкцијата (Zhang, et al.,2023).

Во рамките на анализата на инженерските конструкции, модалната анализа се користи и за (Lin, 2024):

- откривање на потенцијални динамички проблеми (анг. *troubleshooting*)
- споредба помеѓу нумерички и експериментални резултати
- процена на влијанието на структурни модификации врз динамичкото однесување
- анализа на чувствителност на системот на промени во масата или крутоста
- поедноставување на математички модели со цел поефикасна динамичка анализа

Со примена на модалната анализа се обезбедува подетално разбирање на динамичкото однесување на конструкцијата, што претставува основа за понатамошна динамичка анализа на временски зависното однесување на конструкцијата при сеизмичко дејство (Lin, 2024).

Во рамките на динамичката анализа на инженерски конструкции, како што е главниот носач на мостовска дигалка, реалниот конструктивен систем не може да се разгледува како систем со еден степен на слобода. Поради сложената геометрија, распределбата на масата и еластичните својства, ваквите конструкции се однесуваат како повеќестепени динамички системи (анг. *Multi-Degree-of-Freedom - MDoF*) (Fu & He, 2001).

Повеќестепениот систем се карактеризира со повеќе независни координати кои се потребни за целосно опишување на неговото движење. Бројот на овие независни координати се дефинира како број на степени на слобода на системот. За систем со n степени на слобода, динамичкото однесување може да се опише преку систем од n диференцијални равенки на движење кои ја претставуваат рамнотежата помеѓу:

- инерцијалните сили,
- еластичните сили,
- силите на пригушување,
- надворешните динамички дејства.

Во општ случај, равенките на движење на повеќестепен динамички систем можат да се запишат во следниов облик (Zhang, et al.,2023):

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (5.8)$$

Каде што:

$[M]$ – матрица на маса,

$[C]$ – матрица на пригушување,

$[K]$ – матрица на крутост,

$\{x(t)\}$ – вектор на поместување,

$\{\dot{x}(t)\}$ – вектор на брзини,

$\{\ddot{x}(t)\}$ – вектор на забрзување,

$\{F(t)\}$ – вектор на надворешни сили.

Матриците на маса и крутост ги содржат инерцијалните и еластичните својства на системот и директно зависат од неговите геометриски и материјални карактеристики. Во контекст на оваа истражување, овие матрици се добиваат врз основа на дискретизиран нумерички модел добиен со примена на МКЕ (*Zhang, et al., 2023*).

Во случаи кога системот не е изложен на надворешно динамичко оптоварување и ефектите од пригушувањето се занемарени, равенката на движење може да се поедностави и да се претстави како (*Zhang, et al., 2023*):

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (5.9)$$

Со цел да се определи динамичкиот одговор на системот се претпоставува дека решението има хармониска форма, односно:

$$\{x(t)\} = \{X\}\sin(\omega t) \quad (5.10)$$

Доколку се направи двојно диференцирање по време се добива:

$$\{\ddot{x}(t)\} = -\omega^2\{X\}\sin(\omega t) \quad (5.11)$$

Доколку овој израз се замени во равенката на движење, се добива:

$$[M](-\omega^2\{X\}\sin(\omega t)) + [K]\{X\}\sin(\omega t) = \{0\} \quad (5.12)$$

Со претворање, равенката се сведува на проблем на сопствени вредности, кој има решение различно од нула само доколку:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (5.13)$$

Решенијата на оваа карактеристична равенка ги даваат сопствените кружни фреквенции ω_i , односно природните фреквенции на системот (*Fu & He, 2001*):

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (5.14)$$

Во присуство на надворешно динамичко дејство, како што е сеизмичкото оптоварување или динамичко дејство од подвижен товар кај мостовската дигалка, равенката на движење ќе биде како израз (5.8).

Динамичкиот одговор на системот може да се претстави како збир од поединечните природни облици на вибрирање. Со овој пристап, сложеното динамичко однесување на

конструкцијата се разложува на повеќе независни модални одговори, што претставува основа за понатамошна модална анализа (Kurowski, 2022).

Овој теоретски пристап е од суштинско значење за определување на природните фреквенции и модалните облици на главниот носач на мостовската дигалка, кои подоцна се користат при нумеричката анализа во софтверот ANSYS, како и при експерименталната верификација преку мерења со акцелерометри на реалниот модел (Kochmann, 2025).

Природните фреквенции и модалните облици претставуваат основни динамички карактеристики на конструктивниот систем. Секоја природна фреквенција е поврзана со специфичен модален облик, кој ја опишува формата на деформација на конструкцијата при нејзино слободно осцилирање (Lin, 2024).

Овие параметри зависат исклучиво од распределбата на масата и крутоста во системот, како и од неговите геометриски и материјални својства. Поради тоа, промените во природните фреквенции можат да укажат на евентуални промени во конструктивната состојба, како што се локално намалување на крутоста или појава на оштетувања (Lin, 2024).

Во случај на главниот носач на мостовска дигалка, определувањето на природните фреквенции и модалните облици овозможува определување на можни резонантни состојби, како и процена на неговото динамичко однесување под дејство на оперативни и сеизмички оптоварувања. Исто така, следењето на промените во овие параметри може да се користи како индикатор за процена на конструктивната состојба на системот по настанување на сеизмичко дејство (Fu & He, 2001).

5.1.1.3. Статичка анализа

Статичката анализа претставува основен чекор во процесот на нумеричка процена на конструктивното однесување на инженерските системи под дејство на работни оптоварувања. Со нејзина примена се овозможува определување на распределбата на напони и поместувања во конструкцијата во услови на статичко оптоварување (Vanam et al., 2012).

Во рамките на МКЕ, статичката анализа се спроведува преку формирање на систем од линеарни алгебарски равенки кои го опишуваат однесувањето на конструкцијата повторно преку поделба на конечни елементи. Врз основа на геометриските карактеристики, материјалните својства и применетите гранични услови, се формира матрица на крутост на системот, при што условот за рамнотежа на системот може да се запише како (Vanam et al., 2012):

$$[K]\{u\}=\{F\} \quad (5.15)$$

каде што:

$[K]$ – матрица на крутост

$\{u\}$ – вектор на поместувања

$\{F\}$ – вектор на надворешни сили

Решението на оваа равенка овозможува определување на поместувањата во јазлите на моделот, врз основа на кои понатаму се пресметуваат деформациите и напоните во елементите на конструкцијата.

Во претходни истражувања, статичката анализа со примена на МКЕ е успешно користена за процена на деформациите и напонските состојби кај конструктивни елементи под дејство на различни типови оптоварувања и гранични услови. Добиените нумерички резултати покажуваат добро совпаѓање со аналитичките решенија, што ја потврдува применливоста на методот за анализа на конструктивни системи со сложена геометрија (Ghazwani, 2022).

5.1.1.3. Динамичката анализа на временски зависно однесување на системот

Претходно разгледаната модална анализа овозможува определување на сопствените динамички карактеристики на конструктивниот систем, односно неговите природни фреквенции и модални облици на вибрација. Овие параметри претставуваат основа за понатамошна динамичка анализа, особено во услови на временски променливи надворешни влијанија. Во случај на сеизмичко дејство, кое се карактеризира со временски зависно оптоварување, неопходно е да се определи временскиот одговор на системот, што се постигнува со примена на динамичка анализа на временски зависно однесување на системот (анг. *Transient analysis*) (Vanam, 2012). Овој вид на анализа претставува нумеричка постапка за определување на временскиот одговор на конструктивните системи изложени на временски-зависни оптоварувања. За разлика од статичката анализа, кај која се разгледува состојбата на статичка рамнотежа, во динамичката анализа на временски зависно однесување на системот се зема предвид влијанието на инерцијалните сили и пригушувањето, што овозможува пореално моделирање на динамичкото однесување на конструкцијата (Wang et al., 2022).

Во услови на сеизмичко дејство, конструкцијата на мостовската дигалка е изложена на временски променливи инерцијални сили, што доведува до појава на динамички поместувања, брзини и забрзувања. Динамичкото однесување на континуален конструктивен систем може да се опише преку диференцијалната равенка на движење (Wang et al., 2022):

$$\rho \ddot{u}_i - \sigma_{ij,j} = f_i \quad (5.16)$$

каде што:

ρ е густината на материјалот,

$\ddot{u}_i$ е забрзувањето,

σ_{ij} е матрицата на напрегања,

f_i е векторот на надворешни сили.

Во МКЕ, системот се заменува со упростен нумерички модел составен од конечен број елементи и јазли. Поместувањето во рамките на елементот се приближува преку вредностите во јазлите со помош на интерполациски (*анг. shape*) функции (*Molnár et al., 2023*).

$$u_i(t, x) = u_i^N(t) \Phi_N(x) \quad (5.17)$$

каде:

$u_i^N(t)$ се вредностите во јазлите на поместувањето,
 $\Phi_N(x)$ се обликувани функции.

Со примена на ова приближување и варијациите на принципите на механиката (Хамилтонов принцип), равенката на движење се сведува на систем од алгебарски равенки во матрична форма (5.9).

Во случај на сеизмичко оптоварување, векторот на надворешни сили $\{F(t)\}$ се дефинира преку запис на забрзување на подлогата, при што равенката на движење може да се изрази во форма (*Vanam et al., 2012*):

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g(t) \quad (5.18)$$

каде што:

$\ddot{u}_g(t)$ е забрзувањето на подлогата,
 $\{r\}$ е векторот на влијание.

Решавањето на оваа равенка овозможува определување на временскиот одговор на конструкцијата во форма на поместувања, брзини и забрзувања во секој временски чекор. Ваквиот пристап претставува основа за спроведување на динамичка анализа на временски зависно однесување на системот во софтверски пакети базирани на МКЕ, како што е ANSYS, при што како влезен податок се користи реален сеизмички запис (*анг. time-history*) (*Kochmann, 2025*).

5.1.2. Постапка за спроведување анализа по МКЕ

Спроведувањето анализа по МКЕ претставува постапка која се спроведува во неколку фази, како што веќе е кажано, се со цел реалниот физички систем да се замени со соодветен нумерички модел. На крај, нумеричкиот модел е приближно решение, а неговата точност зависи од начинот како сме го претвориле реалниот модел во нумерички, односно, како сме ги поставиле типот и големината на конечните елементи, материјалниот модел, зададените оптоварувања и граничните услови (*Bathe, 1996*).

Во општ случај, постапката за спроведување анализа по МКЕ ги опфаќа следните фази (*Lee, 2021; Lee, 2023; Mereuta, 2024*).

- дефинирање на проблемот и целта на анализата

- поедноставено претставување на конструкцијата
- внесување на геометријата и својствата на материјалот
- избор на конечни елементи
- формирање на мрежата
- задавање на оптоварувањата и потпирањата
- спроведување на пресметката
- обработка на резултатите
- проверка и анализа на добиените резултати

Во продолжение секоја од фазите ќе биде подетално објаснета.

5.1.2.1. Дефинирање на проблемот и целта на анализата

Првиот чекор се состои во дефинирање на физичкиот проблем и резултатите што треба да се добијат со анализата. Во зависност од целта, може да се анализираат нагиби, деформации, напрегања, реакции во потпорите, природни фреквенции, модални облици или одговорот на конструкцијата во текот на времето (Bathe, 1996; Kochmann, 2025; Kurowski, 2022).

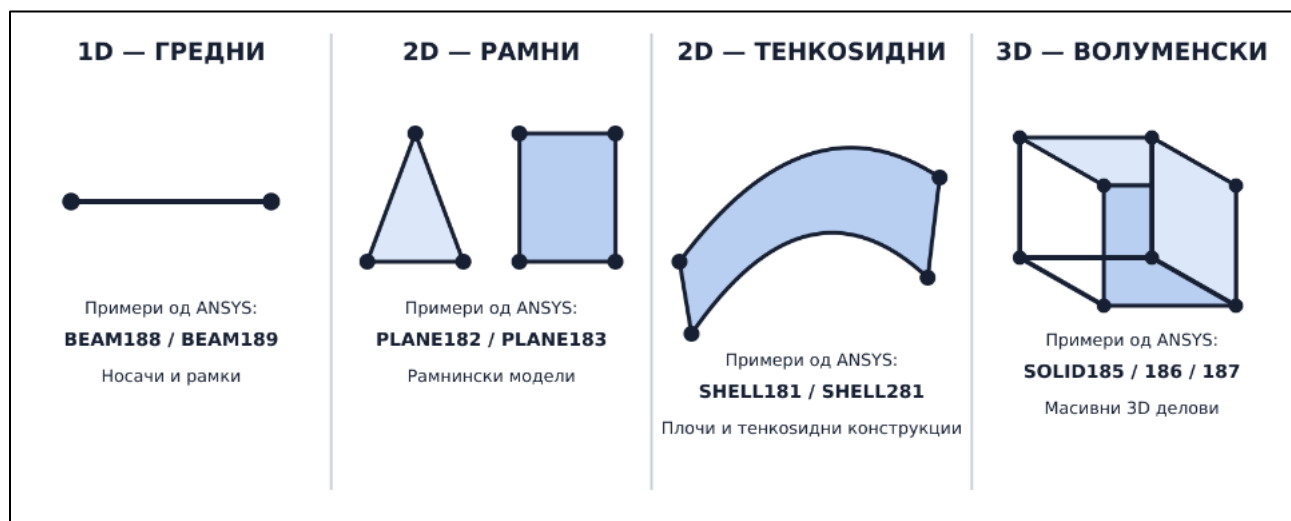
Во оваа фаза се определува и видот на анализата. Кога оптоварувањата не се менуваат значително со текот на времето и инерцијалните ефекти може да се занемарат, се спроведува статичка анализа. Ако работната динамика се зема предвид преку соодветни динамички коефициенти, проблемот може да се разгледува со квази-статички пристап. За определување на природните фреквенции и облиците на осцилирање се применува модална анализа, додека временски променливите оптоварувања, како што е сеизмичкото дејство, се анализираат со динамичката анализа на временски зависно однесување (Nelson & Wang, 2004).

5.1.2.2. Поедноставено претставување на конструкцијата

Следниот чекор по дефинирањето на проблемот и целта на анализата е пристапот кон поедноставување на реалниот физички систем и негово претставување во облик погоден за нумеричка анализа. Реалните конструкции обично содржат голем број геометриски детали, споеви, механизми и контактни површини. Вклучувањето на сите детали од реалниот модел може значително да ја зголеми сложеноста на моделот, без притоа секогаш да обезбеди суштинско подобрување на резултатите. Исто така подеталните нумерички модели бараат и повеќе време за изработка на анализата (Mereuta, 2024; Molnár et al., 2023, Nelson & Wang, 2004).

При формирањето на моделот се вклучуваат елементите и карактеристиките што имаат значајно влијание врз делот што се анализира. Елементите што не се поврзани со предметот на анализата и не влијаат врз неговото однесување може да се изостават, додека останатите

може соодветно да се поедностават (Srinivas et al., 2010; Wang et al., 2022; Zilic de Arcos, 2015). Притоа, поедноставениот модел треба реално да ја претставува конструкцијата, без значително да се нарушат распределбата на масата, крутоста и оптоварувањето. Во зависност од геометријата и целта на анализата, конструктивните делови може да се моделираат со: линиски/гредни (анг. *beam elements*), плочести (анг. *plate elements*) тенкосидни површински (анг. *shell elements*) или волуменски елементи (анг. *3D solid elements*). На слика бр.5.2 се прикажани сите овие видови на моделирање на геометриите и примери на соодветните елементи конкретно во софтверот ANSYS (Ansys, 2017).



Слика бр.5.2 Основни видови конечни елементи и примери на соодветни елементи во софтверот ANSYS (Ansys, 2017)

5.1.2.3. Дефинирање на геометријата и материјалните карактеристики

По поедноставувањето на конструкцијата се формира геометрискиот модел. Тој може да се изработи директно во софтверот за МКЕ анализа, како што се ANSYS и ABAQUS, или да се преземе од софтвер за компјутерски потпомогнато проектирање, како што се SOLIDWORKS, CATIA или Autodesk Inventor. При директното моделирање потребно е правилно да се внесат димензиите, должините, попречните пресеци и врските меѓу конструктивните делови. Доколку моделот е преземен од друг софтвер, треба да се проверат неговата геометрија, мерните единици и поврзаноста на составните делови (Reddy, 2006).

Покрај геометријата, се задаваат и својствата на материјалот. Кај линеарно-еластичната анализа најчесто се внесуваат модулот на еластичност (E) и Поасоновиот коефициент. За динамичка анализа се задава и густината на материјалот, бидејќи таа влијае врз матрицата на маса и природните фреквенции на системот. При анализа на јакоста се внесуваат и потребните јакосни карактеристики, како што се границата на течење и слично (Lee, 2021; Lee, 2023, Zhang et al., 2023).

5.1.2.4. Избор на конечни елементи

Изборот на соодветен тип на конечен елемент претставува еден од најважните чекори во формирањето на нумеричкиот модел. Секој конечен елемент е дефиниран со определен број јазли, интерполациски функции и степени на слобода. Видот на елементот треба да одговара на геометријата, очекуваниот начин на деформирање и видот на оптоварување на моделираниот дел (Ansys, 2017, Ansys, 2025).

Еднодимензионалните елементи се применуваат кога доминантни се аксијалните сили, додека гредните елементи овозможуваат моделирање на аксијално истегнување, свиткување, торзија и деформации од смолкнување. Плочестите и тенкосидните елементи се користат кај тенкосидни конструкции, а 3D волуменските елементи кај делови со сложена тридимензионална геометрија или кога е потребна подетална анализа на локалната напонска состојба (Ansys, 2017).

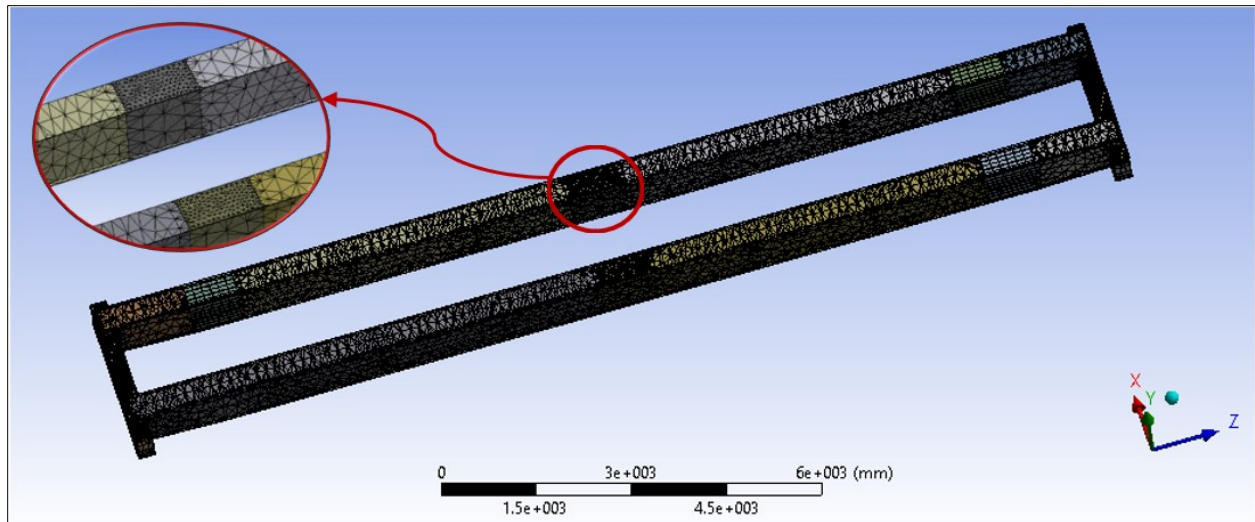
Во еден модел може да се применат повеќе видови елементи. Покрај елементите со кои се претставуваат носечките делови, можат да се користат концентрирани маси, пружини, контактни елементи и други специјализирани елементи. При поврзувањето на елементите треба да се обезбеди правилно пренесување на силите, моментите и поместувањата.

5.1.2.5. Формирање на мрежа

Формирање на мрежата претставува поделба на геометрискиот модел на конечен број помали поддомени, односно конечни елементи, кои меѓусебно се поврзани во јазли (Lee, 2023; Srinivas, 2010). Системот од елементи и јазли ја формира мрежата на моделот. Како што веќе е кажано и покажано на слика бр. 5.1.

Големината и обликот на елементите имаат непосредно влијание врз точноста на решението. Погустата мрежа вообичаено овозможува попрецизно претставување на геометријата и промените на поместувањата и напрегањата, но истовремено го зголемува бројот на степени на слобода и потребното време за пресметување (Nelson & Wang, 2004; Reddy, 2006; Wang et al., 2022). Поради тоа, потребно е да се воспостави рамнотежа помеѓу точноста и пресметковната ефикасност (слика бр.5.6).

Мрежата не мора да има еднаква густина низ целиот модел. Погуста мрежа се применува во деловите каде што се очекуваат поголеми напрегања, промени во геометријата, концентрирани сили, потпирања или споеви. Во деловите со едноставна геометрија и рамномерни напрегања може да се користи поретка мрежа (Lee, 2021).



Слика бр. 5.3 Приказ на мрежа од конечни елементи

5.1.2.6. Дефинирање на оптоварувањата

Оптоварувањата во моделот треба реално да ги претставуваат оптоварувањата на конструкцијата при нејзината работа. Тие можат да се зададат како концентрирани сили и моменти, распоредени сили, притисок, забрзувања како и температурните влијанија (Lee, 2023).

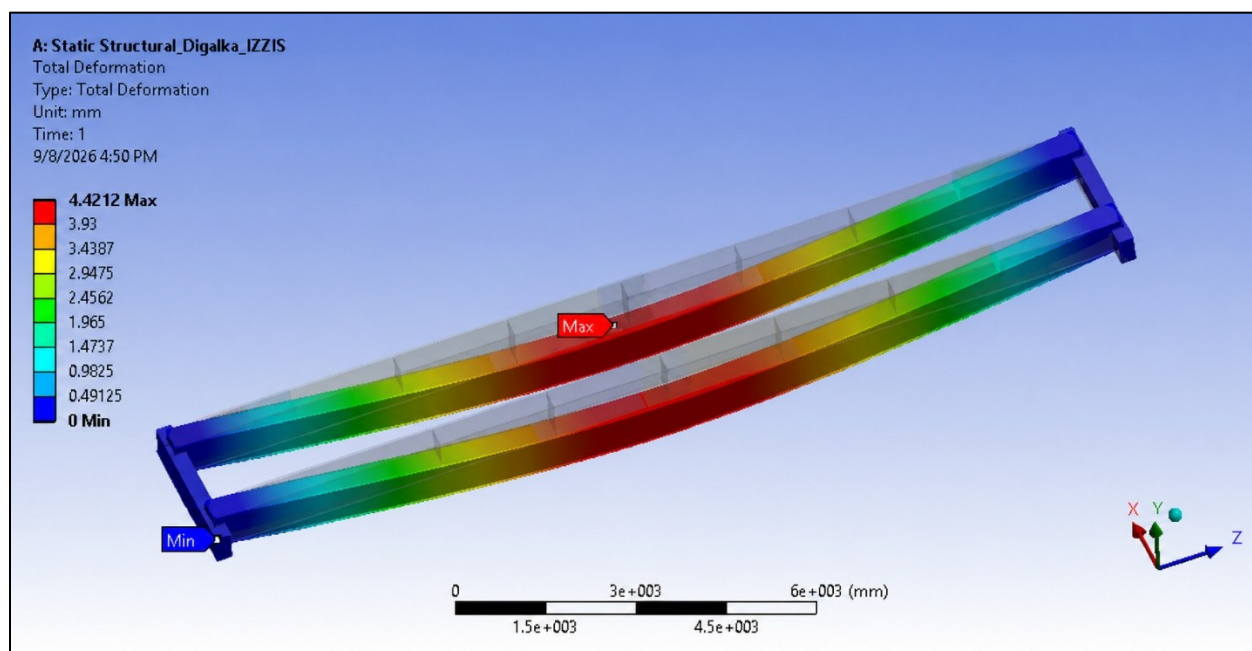
Важно е оптоварувањата правилно да се зададат во моделот. Ако силата се внесе само во еден јазол, може да се појават нереално високи напрегања. Затоа, кога реалното оптоварување дејствува на површина или на повеќе точки, на истиот начин треба да се претстави и во нумеричкиот модел (Ansys, 2025).

5.1.2.7. Дефинирање на граничните услови

Граничните услови го определуваат начинот на кој моделираниот систем е поврзан со останатите елементи во реалноста. Тие се задаваат преку ограничување на определени трансляциони и ротациони степени на слобода или преку дефинирање еластични потпори и врски. Со нив се претставуваат реалните потпирања, споеви и можности за движење на конструкцијата (Lee, 2021; Mereuta, 2024; Zhang et al., 2023).

Правилното задавање на граничните услови е еден од најважните чекори за добивање физички оправдано решение. Ако на моделот му се зададат премногу ограничувања, тој може да стане нереално крут и да покаже помали поместувања од реалните. Ако, пак, нема доволно ограничувања, моделот може слободно да се поместува како целина, поради што анализата не може правилно да се изврши (Nelson & Wang, 2004).

Затоа, пред да се започне со анализата на МКЕ моделот, треба да се провери дали моделот е правилно ограничен во просторот. Потпорите треба да го спречат неговото слободно движење, но истовремено да ги овозможат поместувањата и ротациите што се јавуваат кај реалната конструкција. Притоа, неподвижните и подвижните потпори треба правилно да се зададат, без воведување дополнителни ограничувања што не постојат во реалниот систем. На сликата 1.7 е прикажана распределба на максималното главно напрегање (анг. *Maximum Principal Stress*) во кружен елемент со централен отвор, добиена со статичка структурна анализа во ANSYS. Неподвижната потпора го ограничува поместувањето, додека подвижната потпора овозможува поместување во надолжна насока. Со тоа се спречува слободното движење на моделот, без да се воведуваат нереални ограничувања (Reddy, 2006; Srinivas, 2010, Vanam et al., 2012).



Слика бр. 5.4 Распределба на вкупната деформација на конструкцијата на мостовската дигалка при статичка структурна анализа во ANSYS

5.1.2.8. Спроведување на пресметкаџа

По дефинирањето на геометријата, материјалните својства, конечните елементи, мрежата, оптоварувањата и граничните услови се започнува со решавање на МКЕ моделот. Софтверот ги формира матриците на поединечните елементи и ги поврзува во глобален систем равенки за целиот модел.

Кај статичката анализа, со решавање на системот се определуваат поместувањата на јазлите, врз основа на кои понатаму се пресметуваат деформациите, напрегањата и реакциите во потпорите (Vanam, 2012, Zhang et al., 2023).

Кај динамичката анализа се земаат предвид и масата и пригушувањето на конструкцијата. Во зависност од видот на анализата, се определуваат природните фреквенции и модалните облици или временскиот одговор на конструкцијата. Равенката на движење и постапката за определување на природните фреквенции се подетално објаснети во потточката 5.1.1.1.

5.1.2.9. Обработка на резултатите

Во фазата на обработка на резултатите, во зависност од видот на анализата, се разгледуваат поместувањата, деформациите, напрегањата, реакциите во потпорите, природните фреквенции, модалните облици, забрзувањата и промената на избраните величини со текот на времето (Bathe, 1996).

При толкувањето на резултатите не треба да се разгледува само најголемата вредност прикажана во софтверот. Треба да се провери каде се појавува и дали е реална. Високите вредности во близина на потпорите, наглите промени на геометријата или местата каде што дејствуваат концентрирани сили може да бидат последица на начинот на моделирање (Kochmann, 2025).

Затоа, добиените резултати треба да се споредат со очекуваното однесување на конструкцијата, аналитичките пресметки, дозволените вредности од стандардите или експерименталните резултати. На тој начин може да се провери дали резултатите се реални и правилно протолкувани (Srinivas, 2010).

5.1.2.10. Проверка и анализа на добиените резултати

Последната фаза е проверка на добиените резултати. Анализата се повторува со погуста мрежа. Ако резултатите не се променат значително, мрежата се смета за доволно точна.

Потоа се проверува дали оптоварувањата, потпорите, мерните единици и материјалните својства се правилно зададени. Добиените реакции треба да бидат во рамнотежа со зададените оптоварувања.

Кога е можно, нумеричките резултати се споредуваат со аналитички пресметки или експериментални мерења. Ако се појават поголеми разлики, потребно е повторно да се проверат претпоставките и начинот на моделирање (Bathe, 1996; Kochmann, 2025, Lee, 2023).

5.2. Модална и статичка верификација на моделот

Во ова поглавје е извршена верификација на резултатите добиени од модалната и статичката анализа на реалната мостовска дигалка, преку нивна споредба со резултатите од нумерички модел. За таа цел, сите експериментални мерења прикажани во претходните поглавја се моделирани со единствен нумерички модел, при што се направени ограничени

измени поврзани со работните услови. Овие измени се однесуваат на позицијата на количката, присуството и големината на товарот, како и на начинот на моделирање на механизмот за дигање.

Нумеричкиот модел е формиран со цел да ја прикаже реалната конструкција на мостовската дигалка со соодветна геометриска и механичка точност. Моделот опфаќа два главни носачи (главни греди), дефинирани со нивните реални геометриски димензии и меѓусебно растојание. Количката е моделирана како систем кој се потпира во четири карактеристични точки, односно по две точки на секој од носачите, со што се овозможува реална распределба на товарот врз двете греди. Во зависност од разгледуваното сценарио, количката е позиционирана или во средината на распонот, или на крајните позиции (позиција 1 и позиција 5), со што се опфаќаат различни работни состојби на дигалката.

Со цел пореално претставување на интеракцијата помеѓу количката и главните носачи, количката е идеализирана како концентрирана маса поставена во нејзиниот геометриски центар, која е поврзана со четирите точки на потпирање (позиции на тркалата) преку еластични врски. На овој начин се овозможува пренос на товарот кон носачите без воведување на нереално висока локална крутост. Контактот помеѓу тркалото и шината не е експлицитно моделиран како систем тркало–шина, туку е претставен приближно преку овие еластични врски, со соодветно избрана крутост која ја заменува ефективната крутост на системот тркало–шина. Ваквиот пристап овозможува подобро претставување на реалните услови на потпирање и придонесува за подобра компатибилност помеѓу нумеричките и експерименталните резултати, особено во доменот на пониските глобални облици на вибрации.

Товарот е моделиран како концентрирана маса, поставена на вертикална координата што одговара на висина од $1,33\text{ m}$ над референтното ниво на подот, со што се симулира реалната положба на подигнатиот товар. Во реалните услови, при дигање на товар се користат различни елементи – каиш за помал товар ($2t$) и челично јаже за поголем товар ($7t$), кои се карактеризираат со различни механички својства. Со цел оваа разлика соодветно да се опфати во нумеричкиот модел, применети се различни вредности на крутост на елементот што го претставува механизмот за дигање. Поточно, каишот е моделиран со помала крутост, додека челичното јаже со поголема крутост, со што индиректно се репрезентира нивното различно однесување. На овој начин се овозможува пореално моделирање и доследна споредба помеѓу нумеричките и експерименталните резултати во различни работни сценарија.

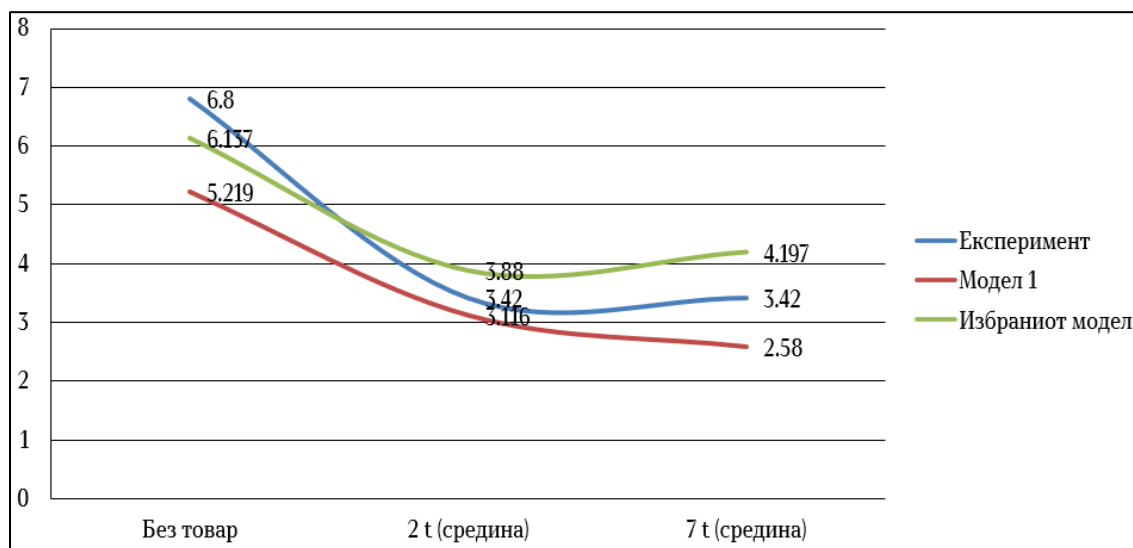
Во процесот на развој на нумеричкиот модел се разгледани повеќе варијанти на моделирање, со различен степен на идеализација. Како најсоодветни се издвојуваат две варијанти: поедноставен (идеализиран) модел, во кој количката е претставена преку директно внесување на маси во точките на потпирање, и усвоениот модел, во кој количката е моделирана како централизирана маса поврзана со носачите преку еластични врски. Основната разлика помеѓу овие два пристапи е во начинот на пренос на товарот и во

репрезентацијата на системот тркало-шина. Додека идеализираниот модел доведува до покруго локално однесување и ограничена способност за репрезентација на реалната распределба на оптоварување, усвоениот модел овозможува поприродно распределување на силите и посоодветно опфаќање на флексибилноста на системот. Како резултат на тоа, усвоениот модел покажува подобра компатибилност со експерименталните резултати, особено кај пониските глобални облици на вибрирање, поради што е избран како референтен модел за понатамошните анализи.

Нумеричкиот модел е дополнително калибриран со цел да се постигне што е можно подобра согласност со измерените податоци. Процесот на калибрација опфаќа прилагодување на параметрите поврзани со механичките карактеристики на каишот и јажето, како и со масата и крутоста на количката. Како репрезентативна вредност за масата на количката е усвоена вредност од 300 kg, врз основа на повеќекратни нумерички анализи и нивна споредба со експерименталните резултати.

Од сликата бр.5.5 може да се забележи дека црвениот модел дава подобро поклопување за одделни сценарија, особено кај помали товари, додека зелениот модел покажува подобра општа применливост и поголема конзистентност во сите разгледувани случаи. Ваквото однесување укажува дека зелениот модел подобро го претставува целокупното динамичко однесување на системот во различни работни услови.

Поради тоа, зелениот модел е избран како референтен модел за понатамошните анализи, бидејќи покажува најдобра компатибилност со експерименталните резултати и најреално го претставува динамичкото однесување на мостовската дигалка.



Слика бр. 5.5 Споредба помеѓу резултатите од модел 1 и модел 2

5.2.1. Фаза 1 – претставување на резултатите од модалната анализа без товар

Во оваа фаза е извршена анализа на динамичкото однесување на мостовската дигалка без товар. Резултатите од нумеричкиот модел се споредени со експерименталните мерења, со цел да се оцени точноста на моделот и неговата способност да го репрезентира реалното однесување на конструкцијата.

5.2.1.1. Фаза 1 - Положба на количката на средина, без товар

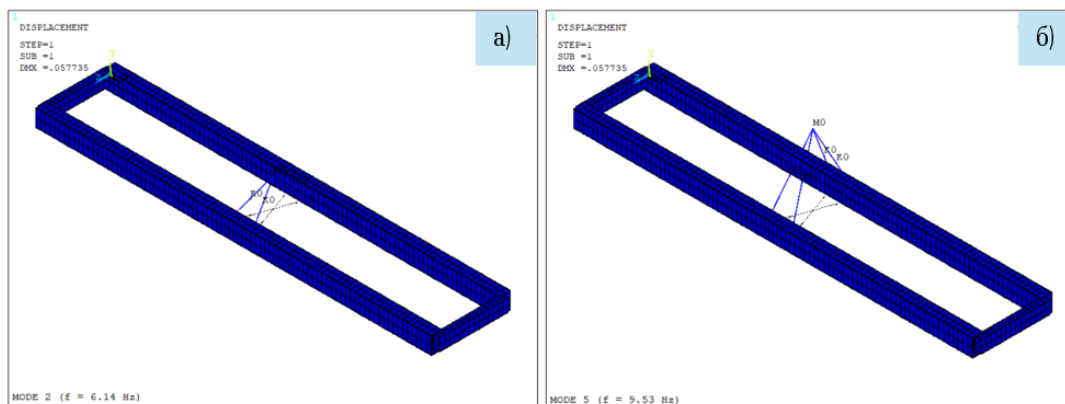
Во оваа фаза е извршена модална верификација на нумеричкиот модел без присуство на товар, при што количката е поставена во средината на распонот (позиција 3). Нумеричкиот модел е дефиниран во *Ansys Parametric Design Language (APDL)* и ги опфаќа геометријата, масените карактеристики и граничните услови на реалната мостовска дигалка.

Иако модалната анализа генерира повеќе сопствени облици на вибрирање, за верификација се избрани оние што покажуваат најдобра усогласеност со експериментално идентификуваните облици на вибрирање. Со модалната анализа се добиени првите сопствени фреквенции на системот: 6.137 Hz, 7.922 Hz, 8.452 Hz, 9.342 Hz и 9.530 Hz. Од нив, за понатамошна анализа се издвоени обликот на вибрирање 2 (6.137 Hz) и обликот на вибрирање 5 (9.530 Hz), бидејќи покажуваат најдобро совпаѓање со експериментално идентификуваните сопствени облици на вибрирање и нивните природни фреквенции. Ваквиот пристап е вообичаен при верификација на нумерички модели, бидејќи споредбата на облиците на вибрирање и природните фреквенции претставува еден од најсигурните показатели за точноста на моделот (Ewins, 2000; He & Fu, 2001).

На слика бр. 5.6 прикажани се карактеристичните сопствени облици на вибрирање. Обликот на вибрирање 2 претставува прв глобален облик на виткање на главните носачи, при што максималните поместувања се јавуваат во средината на распонот. Обликот на вибрирање 5 претставува повисок сопствен облик на вибрирање со посложена деформациска форма.

За верификација на моделот е извршена споредба со експериментално определените сопствени фреквенции (Табела бр.5.1). Притоа, обликот на вибрирање 2 покажува отстапување од $6\div 8\%$ во однос на експериментално определените опсег $6.42\div 6.67$ Hz, додека обликот на вибрирање 5 покажува отстапување од $5\div 6\%$ во однос на експериментално регистрираниот опсег околу $9\div 10$ Hz. Според препораките од литературата, споредбата на природните фреквенции и модалните форми претставува една од основните постапки за верификација и ажурирање на нумерички модели на конструкции (Friswell & Mottershead, 1995; Ewins, 2000).

Добиената компатибилност помеѓу нумеричките и експерименталните резултати потврдува дека моделот обезбедува прифатливо прикажување на динамичкото однесување на мостовската дигалка и може да се користи за понатамошни динамички анализи. Ваквиот пристап е широко применуван при верификација на модели развиени со MKE за динамички анализи на инженерски конструкции (Friswell & Mottershead, 1995; Brincker & Ventura, 2015).



Слика бр. 5.6 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на нумеричкиот модел на мостовската дигалка: (а) облик на вибрирање 2 ($f = 6.14 \text{ Hz}$) и (б) облик на вибрирање 5 ($f = 9.53 \text{ Hz}$)

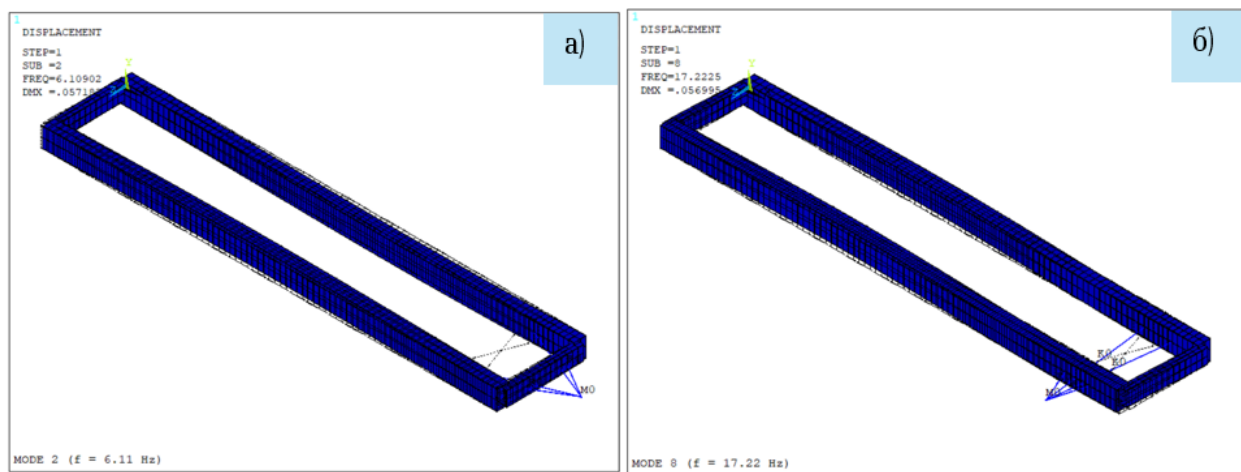
Табела бр. 5.1 Спорежба на добиените резултати за фаза 1, количката на средина

Тип на облик на вибрирање	Експеримент [Hz]	ANSYS [Hz]	Отстапување [%]
Облик на вибрирање 2	6.84	6.137	10.3%
Облик на вибрирање 5	~9÷10	9.53	5% до 6%

5.2.1.2. Фаза 1 - Положба на количката на позиција 5, без товар

Во оваа фаза извршена е модална анализа на нумеричкиот модел без присуство на товар, при што количката е поставена во крајната положба (позиција 5) (слика бр.5.7). Со модалната анализа се добиени сопствените фреквенции од 6.109 Hz , 7.877 Hz , 7.922 Hz , 9.021 Hz и 9.342 Hz . За верификација на моделот се анализирани облиците на вибрирање што покажуваат најдобро совпаѓање со експериментално идентификуваните облици на вибрирање. Првиот глобален облик на вибрирање со фреквенција од 6.109 Hz покажува отстапување од приближно 11% во однос на експериментално добиената вредност од 6.84 Hz .

Резултатите потврдуваат дека нумеричкиот модел обезбедува реална репрезентација на динамичкото однесување на конструкцијата и при крајна положба на количката. Споредбата на експерименталните и нумеричките резултати е прикажана во Табела бр. 5.2.



Слика бр. 5.7 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на нумеричкиот модел на мостовската дигалка: (а) облик на вибрирање 2 ($f = 6.14 \text{ Hz}$) и (б) облик на вибрирање 8 ($f = 17.22 \text{ Hz}$)

Табела бр. 5.2 Споредба на добиените резултати за фаза 1, количката на позиција 5

Тип на облик на вибрирање	Експеримент [Hz]	ANSYS [Hz]	Отстапување [%]
Прв глобален облик на вибрирање	6.8	6.109	$\approx -11\%$
Висок облик на вибрирање	17÷19	17.223	$\approx -5\%$

5.2.2. Фаза 2 – претставување на резултатите од модалната анализа со товар од 2t

Во ова сценарио е разгледано дигање на товар со маса од 2t. Во нумеричкиот модел товарот е поставен во положба што одговара на неговата експериментална положба (1.33 m од подот), а механизмот за дигање е идеализиран преку еластичен елемент со крутост што ја репрезентира флексибилноста на каишот.

Оваа идеализација е реализирана преку избор на соодветна вредност на аксијалната крутост на елементот за дигање, при што во нумеричкиот модел е усвоена вредност која ја претставува флексибилноста на каишот. Ваквиот пристап е вообичаен при нумеричко моделирање на системи со подигнат товар, каде елементите за дигање се претставуваат преку еквивалентни еластични елементи со соодветна аксијална крутост (Shabana, 2013; Rao, 2017).

5.2.2.1. Фаза 2 - Положба на товарот 2t на позиција 1

Во оваа фаза е извршена модална анализа на нумеричкиот модел при товар од 2 t, поставен на експерименталната висина од 1.33 m над нивото на подот, при што механизмот за дигање е моделиран со еластичен елемент што ја репрезентира крутоста на каишот. Со модалната анализа се добиени сопствените фреквенции од 3.116 Hz, 6.111 Hz, 7.922 Hz, 9.018 Hz, 9.342 Hz и 10.920 Hz. Во споредба со моделот без товар, првиот глобален облик на вибрирање се поместува од 6.137 Hz на 3.116 Hz, што е последица на зголемувањето на

вкупната маса на системот поради воведувањето на товарот. Ваквиот тренд е очекуван, бидејќи со зголемување на масата природните фреквенции на конструкцијата се намалуваат (Chopra, 2017).

Од облиците на вибрирање прикажани на сликата бр. 5.3 може да се забележи дека првиот облик на вибрирање претставува доминантен глобален облик на вибрирање со изразено вертикално осцилирање на главните носачи, при што најголемите амплитуди се јавуваат во зоната на количката и средината на распонот. Повисоките облици на вибрирање покажуваат покомплексни облици на деформација, со изразено влијание на висечкиот товар и локалните ефекти поврзани со неговото осцилирање.

Вториот облик на вибрирање со фреквенција од 6.111 Hz е многу близок до првиот глобален облик на вибрирање добиен кај моделот без товар (6.137 Hz), што укажува дека основната форма на виткање на главните носачи останува присутна и по воведувањето на товарот. Ова е карактеристично за конструкции кај кои воведувањето на дополнителна маса не ја менува суштински формата на глобалниот облик на вибрирање, туку предизвикува појава на дополнителни облици на вибрирање поврзани со осцилирањето на висечкиот товар (Ewins, 2000; Chopra, 2017).

Со цел верификација на нумеричкиот модел, добиените резултати се споредени со експериментално идентификуваните сопствени фреквенции, при што споредбата е прикажана во Табела бр.5.3. Од анализата може да се заклучи дека првиот глобален облик на вибрирање од нумеричкиот модел (3.116 Hz) покажува многу добра усогласеност со експерименталниот опсег ($\approx 2.9 \div 3.4$ Hz). Вториот облик на вибрирање (7.922 Hz) исто така покажува добра усогласеност со експерименталната вредност од 7.32 Hz, при што отстапувањето изнесува околу 8%.

Кај повисоките облици на вибрирање се забележуваат поголеми разлики, при што обликот на вибрирање околу 10.920 Hz е нешто понизок во однос на експерименталниот облик на вибрирање од 12.7 Hz, со отстапување од приближно 14%, додека облиците на вибрирање во повисокиот фреквентен опсег (14÷17 Hz) не се јасно издвоени во нумеричкиот модел. Ваквите разлики се очекувани, бидејќи повисоките облици на вибрирање се почувствителни на локалните крутости, граничните услови и претставувањето во нумеричкиот модел, па нивното совпаѓање со експерименталните резултати обично е послабо во споредба со првите глобални облици на вибрирање (Ewins, 2000; Friswell & Mottershead, 1995).

Поголемите отстапувања кај повисоките облици на вибрирање се должат на идеализацијата на системот тркало–шина преку еластични врски, како и на поедноставеното моделирање на каишот како линеарно еластичен елемент. Дополнително, локалните крутости и комплексната интеракција помеѓу количката, товарот и носачите не се целосно опфатени со овој пристап, што доведува до поголеми разлики кај повисоките облици на вибрирање.

Генерално, добиените резултати покажуваат дека нумеричкиот модел обезбедува добра репрезентација на динамичкото однесување на мостовската дигалка, особено за првите глобални облици на вибрирање. Кај повисоките облици на вибрирање се забележуваат поголеми отстапувања, што е очекувано поради применетите идеализации во моделот и поголемата чувствителност на овие облици на локалните конструктивни карактеристики.

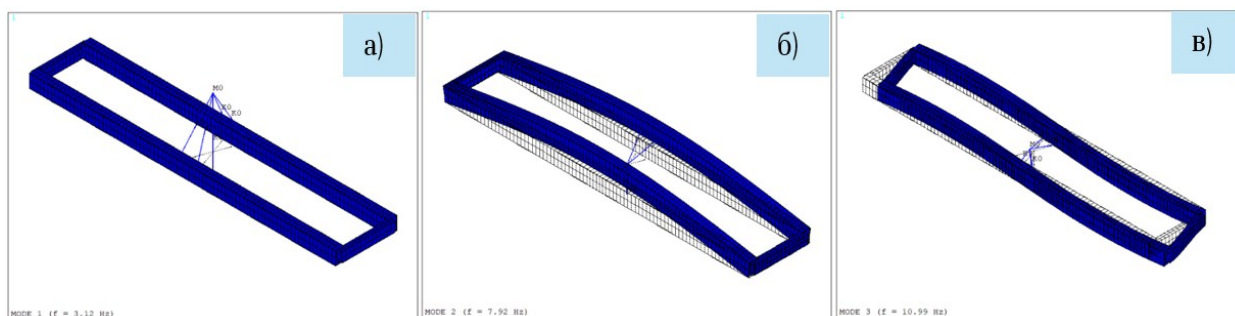
5.2.2.2. Фаза 2 - Положба на товарот $2t$ на средина (позиција 3)

Во оваа фаза е разгледуван товар од $2t$, поставен на експерименталната висина од 1.33 m над нивото на подот, при што механизмот за дигање е моделиран со еластичен елемент што ја репрезентира крутоста на каишот, а количката е поставена во средината на распонот (позиција 3). Со извршената модална анализа се добиени сопствени фреквенции од 3.116 Hz , 7.922 Hz и 10.989 Hz .

На слика бр. 5.8 се прикажани карактеристичните облици на вибрирање на конструкцијата. Првиот облик на вибрирање претставува прв глобален облик на вибрирање, при што главните носачи осцилираат со доминантно вертикално свиткување. Повисоките облици на вибрирање се карактеризираат со посложени деформациски форми и со поизразено влијание на висечкиот товар.

За верификација на моделот е извршена споредба со експериментално определените сопствени фреквенции (Табела бр.5.3). Првиот облик на вибрирање покажува отстапување од околу 9%, вториот облик на вибрирање околу 8%, додека најдобра усогласеност е добиена кај третиот облик на вибрирање, каде што нумерички добиената вредност од 10.989 Hz отстапува за само околу 2% од експериментално измерената вредност од 10.74 Hz .

Добиените резултати покажуваат добра усогласеност помеѓу нумеричкиот и експерименталниот модел, што ја потврдува соодветноста на применетиот пристап за моделирање на системот со висечкиот товар.



Слика бр. 5.8 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од $2t$ поставен на позиција 3: (а) облик на вибрирање 1 ($f = 3.12\text{ Hz}$), (б) облик на вибрирање 2 ($f = 7.92\text{ Hz}$) и (в) облик на вибрирање 3 ($f = 10.99\text{ Hz}$)

Табела бр. 5.3 Споредба на добиените резултати за фаза 2, товар од 2t на позиција 3

Тип на облик на вибрирање	Експеримент [Hz]	ANSYS [Hz]	Отстапување [%]
Прв глобален облик на вибрирање	3.42	3.116	≈9%
Втор облик на вибрирање	7.32	7.922	≈8%
Трет облик на вибрирање	10.74	10.989	≈2%

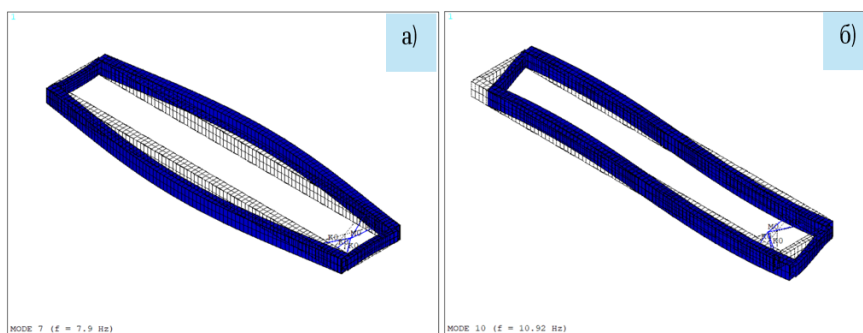
5.2.2.3. Фаза 2 - Положба на товарот 2t во позиција 5

Во оваа фаза е разгледан товар од 2 t, поставен на експерименталната висина од 1.33 m над нивото на подот, при што механизмот за дигање е моделиран со еластичен елемент што ја репрезентира крутоста на каишот, а количката е поставена во позиција 5. Со извршената модална анализа се добиени сопствени фреквенции од 3.116 Hz, 7.877÷7.922 Hz и 10.92 Hz.

За верификација на нумеричкиот модел е извршена споредба со експериментално определените сопствени фреквенции, а резултатите се прикажани во Табела бр.5.4. Облиците на вибрирање во опсегот околу 7.9 Hz и 10.92 Hz покажуваат добра усогласеност со експерименталните резултати, при што најмало отстапување е добиено кај облик на вибрирање со фреквенција од 10.92 Hz (≈1.5%).

На слика бр.5.9 се прикажани карактеристичните сопствени облици на вибрирање кои покажуваат најдобра компатибилност со експерименталните мерења. Облик на вибрирање со фреквенција од околу 7.9 Hz претставува глобален облик на осцилирање на конструкцијата, додека облик на вибрирање со фреквенција од околу 10.92 Hz претставува повисок облик на осцилирање со поизразена динамичка интеракција помеѓу главните носачи и системот количка-товар.

Добиените резултати потврдуваат дека нумеричкиот модел обезбедува добро претставување на динамичкото однесување на конструкцијата и при позиционирање на количката во близина на бочните носачи.



Слика бр. 5.9 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од 2t поставен на позиција 5: (а) облик на вибрирање со фреквенција 7.88 Hz и (б) облик на вибрирање со фреквенција 10.92 Hz

Табела бр. 5.4 Споредба на добиените резултати за фаза 2, товар од 2t на позиција 5

Тип на облик на вибрирање	Експеримент [Hz]	ANSYS [Hz]	Отстапување [%]
Втор облик на вибрирање	7.30	7.877÷7.922	≈ 8%
Трет облик на вибрирање	≈ 10.76	10.92	≈1.5%

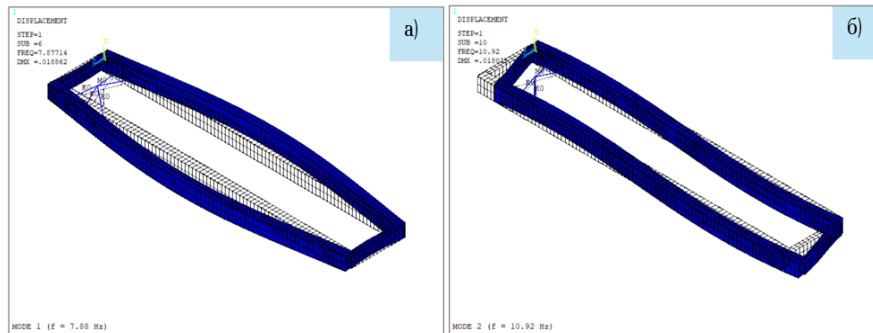
5.2.3. Фаза 3 – претставување на резултатите од модалната анализа со товар од 7t

Во ова сценарио е разгледано дигање на товар со маса од 7t, при што во реалните услови товарот е подигнат со челично јаже. Со цел да се обезбеди пореалистична репрезентација на системот, во нумеричкиот модел е извршена измена во однос на елементот за дигање. Поточно, наместо претходно користениот модел со каиш, применета е зголемена крутост на елементот што го моделира јагето.

Оваа измена е спроведена преку прилагодување на параметарот за аксијална крутост на елементот за дигање, при што е усвоена вредност која подобро го прикажува однесувањето на челично јаже. Притоа, останатите параметри на моделот (геометрија, маса на количка, гранични услови) се задржани непроменети, со цел да се овозможи усогласена споредба со претходните сценарија.

5.2.3.1. Фаза 3- Положба на товарот 7t на позиција 1

Во оваа фаза е разгледан товар од 7 t, поставен на експерименталната висина од 1.33 m над нивото на подот, при што механизмот за дигање е моделиран со еластичен елемент што ја репрезентира крутоста на челичното јаже, а количката е поставена во позиција 1. Со модалната анализа се добиени повеќе карактеристични сопствени фреквенции, меѓу кои најзначајни за споредба со експерименталните резултати се облици на вибрирање во опсегот 7.877÷7.921 Hz и 10.920 Hz. Во експерименталните резултати е идентификувана нискофреквентна компонента од околу 0.12 Hz, која се поврзува со осцилацијата на подигнатиот товар. Бидејќи оваа компонента не е предмет на понатамошната верификација, споредбата е извршена врз основа на облиците на вибрирање што покажуваат најдобра усогласеност помеѓу експерименталниот и нумеричкиот модел. Споредбата на нумеричките и експерименталните резултати е прикажана во Табела бр.5.5. Обликот на вибрирање во опсегот 7.877÷7.922 Hz покажува добра усогласеност со експериментално идентификуваната фреквенција од околу 7.32 Hz, при што отстапувањето изнесува приближно 8%. Најдобра усогласеност е добиена кај повисокиот облик на вибрирање, каде нумерички добиената вредност од 10.920 Hz се наоѓа во експерименталниот опсег од 10.74 до 11.23 Hz. На слика бр.5.10 се прикажани карактеристичните сопствени форми на осцилирање за двата облици на вибрирање со најдобра согласност со експерименталните резултати.



Слика бр. 5.10 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од 7t поставен на позиција 1: (а) облик на вибрирање со фреквенција 7.88 Hz и (б) облик на вибрирање со фреквенција 10.92 Hz

Табела бр. 5.5 Споредба на добиените резултати за фаза 3, товар од 7t на позиција 1

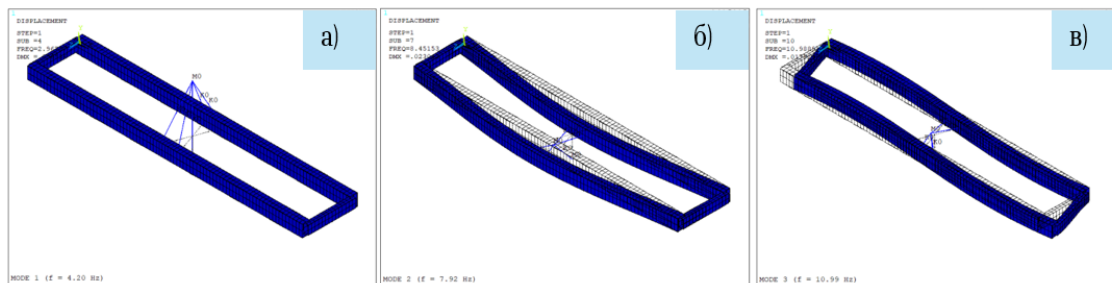
Тип на облик на вибрирање	Експеримент [Hz]	ANSYS [Hz]	Отстапување [%]
Втор глобален облик на вибрирање	~7.32	7.877÷7.922	≈ 8 %
Повисок облик на вибрирање	10.74÷11.23	10.920	≈ 3%

5.2.3.2. Фаза 3- Положба на товарот 7t на позиција 3

Во оваа фаза е разгледан товар од 7 t, поставен на експерименталната висина од 1.33 m над нивото на подот, при што механизмот за дигање е моделиран со еластичен елемент што ја репрезентира крутоста на челичното јаже, а количката е поставена во средината на распонот (позиција 3). Со модалната анализа на нумеричкиот модел се добиени повеќе сопствени фреквенции, при што првите три вредности, блиски до 0 Hz, не се земени предвид бидејќи претставуваат движење на целокупниот систем без значајни деформации на конструкцијата. За споредба со експерименталните резултати како најзначајни се издвоени облици на вибрирање со фреквенции 4.197 Hz, 7.922 Hz и 10.989 Hz.

Споредбата на експерименталните и нумеричките резултати е прикажана во Табела бр. 5.6. Обликот на вибрирање со фреквенција од 4.197 Hz покажува добра усогласеност со експериментално регистрираниот облик на вибрирање околу 3.91 Hz, со отстапување од околу 7%. Облици на вибрирање со фреквенции од 7.922 Hz и 10.989 Hz исто така покажуваат задоволителна усогласеност со експерименталните вредности, со отстапување од приближно 8% и 7%, соодветно.

На слика бр. 5.11 се прикажани карактеристичните сопствени форми на осцилирање за трите издвоени облици на вибрирање. Добиените резултати укажуваат дека нумеричкиот модел обезбедува соодветна репрезентација на динамичкото однесување на конструкцијата при товар од 7t поставен во средината на распонот.



Слика бр. 5.11 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од 7t поставен на позиција 3: (а) облик на вибрирање со фреквенција а) 4.20 Hz, (б) 7.92 Hz и в) 10.99 Hz

Табела бр. 5.6 Споредба на добиените резултати за фаза 3, товар од 7t на позиција 3

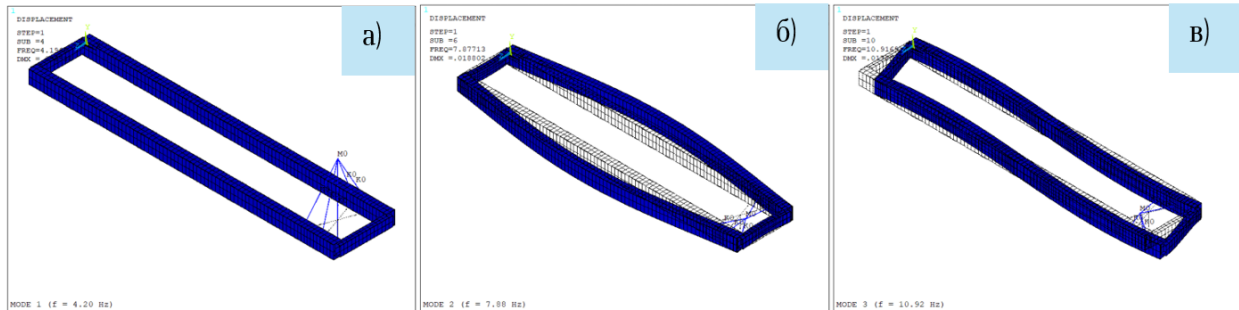
Тип на облик на вибрирање	Експеримент [Hz]	ANSYS [Hz]	Отстапување [%]
Прв глобален облик на вибрирање	~3.91	4.197	≈ +7.3%
Втор облик на вибрирање	~7.32	7.922	≈ +8.2%
Трет облик на вибрирање	~10.25	10.989	≈ +7.2%

5.2.3.3. Фаза 3- Положба на товарот 7t на позиција 5

Во оваа фаза е разгледан товар од 7 t, поставен на експерименталната висина од 1.33 m над нивото на подот, при што механизмот за дигање е моделиран со еластичен елемент што ја репрезентира крутоста на челичното јаже, а количката е поставена во позиција 5. Со модалната анализа на нумеричкиот модел се добиени повеќе сопствени фреквенции, од кои како најзначајни за споредба со експерименталните резултати се издвоени облиците на вибрирање со фреквенции 4.1965 Hz, 7.877÷7.922 Hz и 10.917 Hz.

Споредбата со експерименталните резултати е прикажана во Табела бр. 5.7. Облиците на вибрирање во опсегот околу 7.9 Hz и 10.9 Hz исто така покажуваат добра усогласеност со експериментално определените фреквенции. Поради поголемото отстапување кај обликот на вибрирање со фреквенција од 4.1965 Hz, во Табела бр. 5.7 се прикажани само облиците на вибрирање што покажуваат подобра усогласеност со експерименталните резултати.

На слика бр. 5.12 се прикажани карактеристичните сопствени облици на вибрирање. Добиените резултати потврдуваат дека нумеричкиот модел обезбедува задоволително претставување на динамичкото однесување на конструкцијата и при позиционирање на товарот во близина на крајот на распонот.



Слика бр. 5.12 Карактеристични сопствени облици на вибрирање на конструкцијата за товар од 7t поставен на позиција 5: (а) облик на вибрирање со фреквенција 4.2 Hz и (б) облик на вибрирање со фреквенција 7.88 Hz в) облик на вибрирање со фреквенција 10.92 Hz

Табела бр. 5.7 Споредба на добиените резултати за фаза 3, товар од 7t на позиција 5

Тип на облик на вибрирање	Експеримент [Hz]	ANSYS [Hz]	Отстапување [%]
Втор облик на вибрирање	~7.32	7.8771÷7.9217	≈ +7.6% до +8.2%
Трет облик на вибрирање	10.74÷11.72	10.917	≈ +1.6% до -6.9%

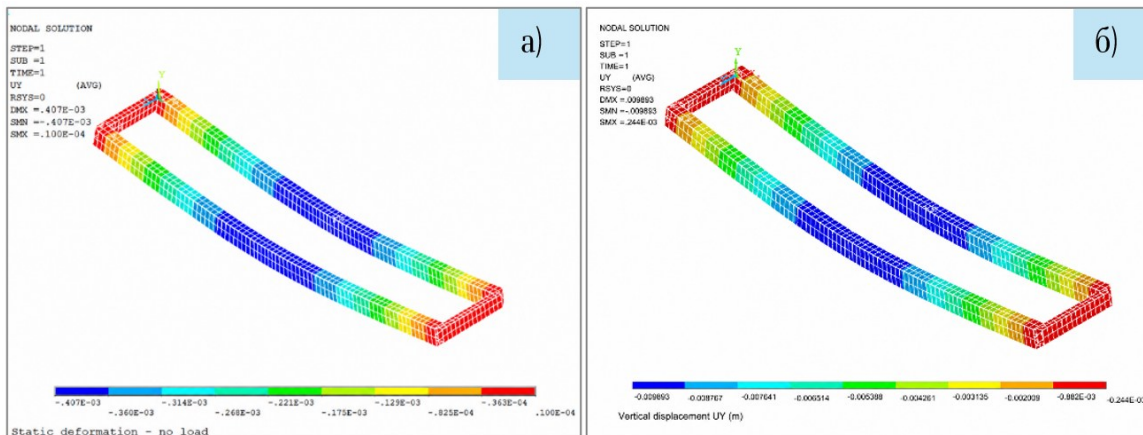
5.3. Претставување на резултатите од статичката верификација на моделот

Покрај верификацијата на модалните карактеристики, извршена е и дополнителна верификација на нумеричкиот модел преку споредба на вертикалното поместување на главниот носач добиено со експериментално статичко мерење и со статичка нумеричка анализа.

Експериментално, со помош на ласерски далечиномер, како што веќе е покажано, е измерено растојанието помеѓу фиксна референтна точка на подот и долниот појас на главниот носач. При состојба без товар се добиени вредности во опсег од 10.015 m до 10.017 m, додека при присуство на товар од 7 t измереното растојание изнесува од 10.007 m до 10.008 m. Врз основа на средните вредности, експериментално утврденото вертикално поместување изнесува приближно 8.5 mm (5.19):

$$\Delta_{EXP} = 10.016 - 10.0075 = 0.0085 \text{ m} = 8.5 \text{ mm} \quad (5.19)$$

Во нумеричкиот модел е спроведена статичка анализа со еквивалентно статичко оптоварување. Притоа, за состојбата без товар е добиено вертикално поместување во средината на распонот од приближно 0.41 mm (слика бр.5.13, а), а за состојбата со товар од 7t е добиено вертикално поместување од 9.89 mm (слика бр.5.13, б). Односно, нумерички определената разлика помеѓу двете состојби изнесува 9.48 mm.



Слика бр. 5.13 Вертикалното поместување при дигање а) без товар (0.41 mm)
б) со товар од 7t (9.89 mm)

Споредбата покажува дека нумеричкиот модел ја зголемува деформацијата во однос на експерименталното мерење, при што отстапувањето изнесува околу 11.5% (5.20).

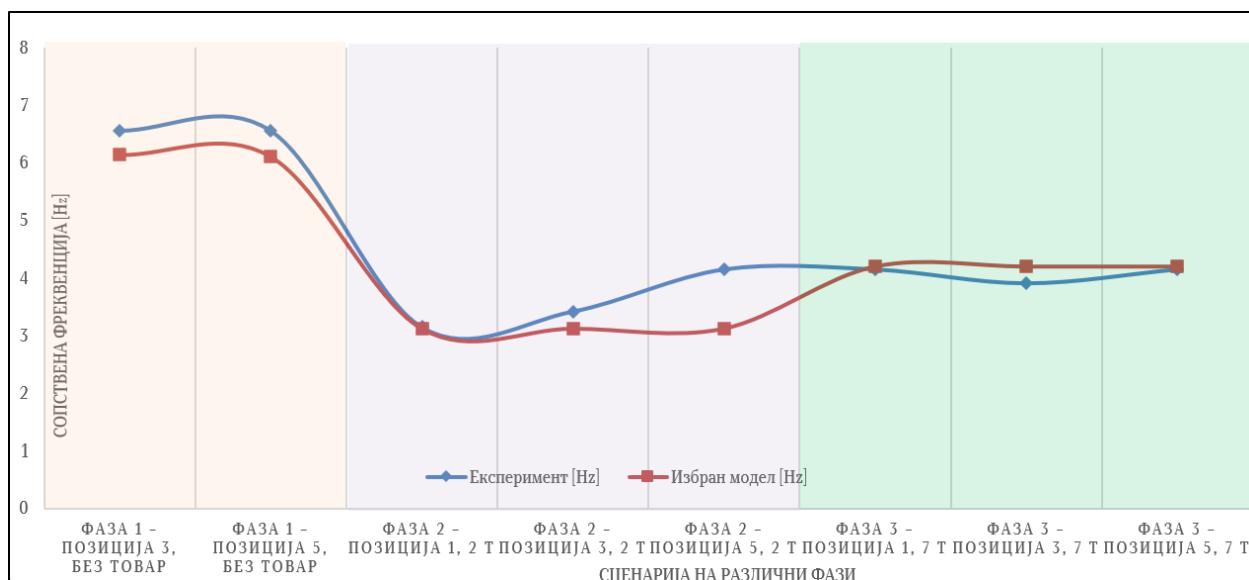
$$\frac{9.48-8.5}{8.5} \cdot 100 \approx 11.5\% \quad (5.20)$$

5.4. Споредба на резултатите и заклучоци

Во оваа потточка е извршена споредбена анализа на резултатите добиени од трите разгледувани фази (фаза 1 – без товар, фаза 2 – товар од 2t и фаза 3 – товар од 7t), со цел да се согледа влијанието на товарот врз динамичкото однесување на мостовската дигалка. Од анализата на резултатите може јасно да се забележи дека со зголемување на товарот доаѓа до намалување на сопствените фреквенции на системот. Највисоки вредности на сопствените фреквенции се добиваат во случајот без товар, додека со воведување на товар од 2t и понатамошно зголемување на товарот на 7t, фреквенциите постепено се намалуваат.

Ова однесување е физички очекувано и може да се објасни преку основниот однос помеѓу масата и крутоста на системот. Сопствената фреквенција на конструкцијата зависи од односот помеѓу крутоста и масата, при што со зголемување на масата, односно со додавање на товар, се намалува фреквенцијата. Во конкретниот случај, дополнителниот товар делува како концентрирана маса која ја зголемува инерцијата на системот, без значително зголемување на крутоста, што резултира со намалување на сопствените фреквенции.

Со цел појасно визуелно прикажување на оваа зависност, изработен е споредбен график (слика бр. 5.14), во кој се прикажани експерименталните и нумеричките вредности на првиот глобален облик на вибрирање за трите разгледувани фази. Од графичкиот приказ јасно се согледува трендот на намалување на сопствената фреквенција со зголемување на товарот, како и добрата усогласеност помеѓу експерименталните и нумеричките резултати.



Слика бр. 5.14 Споредба на експерименталните и нумеричките резултати за сите три фази

Покрај тоа, од споредбата може да се заклучи дека:

- нумеричкиот модел обезбедува добра усогласеност со експерименталните резултати кај пониските глобални облици на вибрирање
- отстапувањата се зголемуваат кај повисоките облици на вибрирање, што е резултат на поедноставниот начин на моделирање на системот
- изборот на модел за елементот за дигање има значително влијание врз резултатите
- избраниот модел покажува најдобра конзистентност во сите разгледувани сценарија, поради што е усвоен како референтен модел

Генерално, може да се заклучи дека применетиот нумерички модел успешно го претставува целокупното динамичко однесување на мостовската дигалка и може да се користи како сигурна основа за понатамошни анализи.

KORIŠTENÁ LITERATURA ZA POGLAVJE 5

- ANSYS, Inc. (2017). Summary of element types. In ANSYS Mechanical APDL element reference (Release 18.2). https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_CH3_2.html
- Ansys, Inc. (2025). Library of element types. Ansys Help. https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v251/en/ans_wid/Hlp_UI_etadd.html
- Aziz, A., Yousaf, M. Z., Renhai, F., Khan, W., Siddique, U., Ahmad, M., ... & Zaitsev, I. (2025). Advanced AI-driven techniques for fault and transient analysis in high-voltage power systems. *Scientific Reports*, 15(1), 5592.
- Bathe, K.-J. (1996). *Finite element procedures*. Prentice Hall.
- Brincker, R., & Ventura, C. (2015). *Introduction to operational modal analysis* (2nd ed.). Wiley.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (5th ed.). Pearson.
- Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: Theory, practice and application* (2nd ed.). Research Studies Press.
- Friswell, M. I., & Mottershead, J. E. (1995). *Finite element model updating in structural dynamics*. Kluwer Academic Publishers.
- Fu, Z.-F., & He, J. (2001). *Modal analysis*. Butterworth-Heinemann.
- Ghazwani, M. H., Alnujaie, A. H., Chandravanshi, M. L., Deepak, D., & Singh, C. (2022). *Failure Analyses of Tower Crane using FEM and theoretical studies*. *Yanbu Journal of Engineering and Science*, 19(2), 30-49.
- He, J., & Fu, Z.-F. (2001). *Modal analysis*. Butterworth-Heinemann.
- Kochmann, D. M. (2025). *Introduction to finite element analysis*. ETH Zurich.
- Kurowski, P. M. (2022). *Finite element analysis for design engineers*. Sae international.
- Lee, H.-H. (2021). *Finite element simulations with ANSYS Workbench 2021: Theory, applications, case studies*. SDC Publications.
- Lee, H.-H. (2023). *Finite element simulations with ANSYS Workbench 2023*. SDC Publications. https://books.google.com/books?id=HaK_EAAAQBAJ
- Lin, F. (2024). Modal and dynamic stress analysis of crane support frame based on CAE technology. *Vibroengineering Procedia*, 57, 99-105.
- MEREUTA, V. (2024). FEM ANALYSIS OF CRANE HOOKS WITH DIFFERENT CROSS SECTION. *INTERNATIONAL JOURNAL*, 12(11), 2468-2472.
- Molnár, D., Blatnický, M., & Dižo, J. (2022). Design and strength analysis of a crane hook with a 500 kg lifting capacity. *Perner's Contacts*, 16(2), 1-9.
- Molnár, D., Blatnický, M., Barta, D., & Grenčík, J. (2023). Design and strength analysis of the end carriage beam for the single girder bridge crane of a 500 kg load capacity. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*, 67(3), 89-94.
- Nelson, T., & Wang, E. (2004). Reliable FE-modeling with ANSYS. In *Proceedings of the 2004 International ANSYS Conference*. CADFEM GmbH.
- Rao, S. S. (2017). *Mechanical vibrations* (6th ed.). Pearson.
- Reddy, J. N. (2006). *An introduction to the finite element method* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Shabana, A. A. (2013). *Dynamics of multibody systems* (4th ed.). Cambridge University Press.
- Srinivas, P., Sambana, K. C., & Datti, R. K. (2010). *Finite element analysis using ANSYS 11.0*. PHI Learning.

- Vanam, B. C. L., Rajyalakshmi, M., & Inala, R. (2012). Static analysis of an isotropic rectangular plate using finite element analysis (FEA). *International Journal of Physical Sciences*, 7(4), 603–611.
- Wang, J., Qin, H., Wang, B., & Xu, X. (2022, February). The FEM Analysis of the Height Protection Equipment of the Crane. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2200, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- Wang, X., Zhang, Y., & Liu, H. (2022). *Transient dynamic analysis of engineering structures using finite element methods*. *Applied Sciences*, 12(15), 7654.
- Zhang, P., He, Z., Cui, C., Xu, C., & Ren, L. (2023). *An edge-computing framework for operational modal analysis of offshore wind-turbine tower*. *Ocean Engineering*, 287, 115720.
- Zilic de Arcos, F. S. (2015). *Desarrollo de vehículo submarino autónomo (AUV) para exploración oceanográfica (DID N° S-2014-34)* [Tesis de ingeniería, Universidad Austral de Chile].

6. ДИНАМИЧКА АНАЛИЗА

6.1. Дефинирање на влезни податоци

За потребите на динамичката анализа е дефиниран нумерички модел на мостовската дигалка во софтверот ANSYS, при што како влезни податоци се користени геометриските карактеристики на конструкцијата, материјалните својства, масите и граничните услови. Притоа, како почетна основа е искористен истиот нумерички модел кој е развиен и верификуван во претходното поглавје, во рамките на анализата за верификација на нумеричкиот модел.

Материјалот на конструктивните елементи е дефиниран како конструкциски челик, со соодветни вредности за модулот на еластичност, Поасонов коефициент и густина. Геометријата на главните носачи и попречните греди е моделирана преку гредни конечни елементи, додека масата на количката и товарот е внесена како концентрирана маса во соодветните јазли.

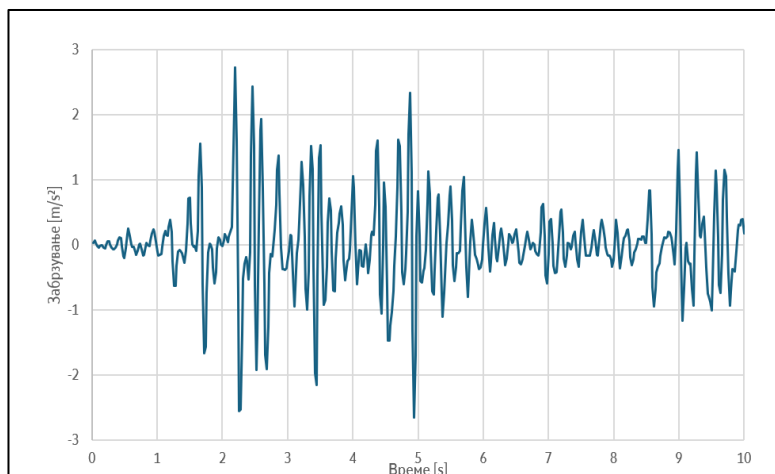
Граничните услови се поставени така што ја претставуваат реалната потпора на дигалката, односно крајните јазли се ограничени во соодветни насоки за да се симулира начинот на кој дигалката е потпрена и водена по шините (EN 1991-3; EN 1993-6; EN 15011).

Посебно внимание е посветено на дефинирањето на масите, при што се разгледувани повеќе работни состојби: без товар, со товар од 2t и со товар од 7t, со цел да се опфати реалниот опсег на експлоатациони услови.

Иако почетниот модел покажува добра усогласеност со експерименталните резултати, за потребите на динамичката анализа беше извршена негова дополнителна надградба со цел пореално претставување на просторниот динамички одговор на мостовската дигалка (Abdel-Rahman et al., 2003; Oguamanam et al., 2001).

6.2. Дефинирање на временски записи

Динамичката анализа е спроведена со примена на реален земјотресен запис, при што е користен земјотресот *ElCentro*. Овој запис е широко применуван во научни и инженерски истражувања како репрезентативен пример за силно сеизмичко дејство, со магнитуда во опсег од приближно 6.9 до 7.1 степени (Chopra, 2017). На слика бр. 6.1 е прикажана временската историја на забрзувањето на земјотресниот запис *El Centro*, кој е употребен како влезно сеизмичко оптоварување во спроведената транзиентна анализа.



Слика бр. 6.1. Временска историја на земјотресниот запис *El Centro*

Со цел да се обезбеди систематска анализа на однесувањето на мостовската дигалка под различни услови на оптоварување, разгледувани се три карактеристични сценарија на динамичко дејство:

- Сценарио А – Нормално динамичко дејство (работни услови)

Ова сценарио го опфаќа однесувањето на дигалката при редовна експлоатација, без присуство на сеизмичко дејство. Динамичките ефекти во овој случај се резултат на работата на системот, односно движењето на количката, подигањето и спуштањето на товарот, како и можните вибрации предизвикани од експлоатационите услови. Ова сценарио претставува референтна состојба, врз основа на која се врши споредба со сеизмичките случаи.

- Сценарио Б – Слабо до умерено сеизмичко дејство

Во ова сценарио е користен земјотресниот запис *ElCentro*, но со намалена амплитуда за 30%, односно за фактор 0.7. Скалирањето на реални земјотресни записи претставува широко применувана практика во сеизмичките анализи, со цел испитување на одговорот на конструкцијата при различни нивоа на интензитет на сеизмичко дејство, при задржување на фреквентната содржина и временската структура на оригиналниот запис ((*Mulchandani et al., 2019*); (*Fayaz et al., 2023*)). Изборот на факторот 0.7 не претставува нормативно пропишана вредност, туку е избран за потребите на параметарска анализа на влијанието на интензитетот на земјотресното дејство врз динамичкиот одговор на конструкцијата. Со ова се симулира земјотрес со понизок интензитет, кој одговара на слабо до умерено сеизмичко дејство. Примената на ист запис, но со скалирана амплитуда, овозможува задржување на неговата реална фреквентна содржина и временска структура, што е од особено значење за реална динамичка анализа. Намалувањето од 30% овозможува премин од силно кон умерено сеизмичко дејство, при што се добива реално намалување на амплитудата на сигналот.

- Сценарио – В – Критично (силно) сеизмичко дејство

За ова сценарио е применет оригиналниот запис на земјотресот *El Centro (1940)*, преземен од базата на земјотресни записи на ИЗИИС – Скопје. Записот е еден од најчесто користените земјотресни записи во динамичките анализи и верификацијата на нумерички модели (*Hudson, 1979*). Овој запис ја претставува реалната јачина на земјотресот и се користи за анализа на однесувањето на конструкцијата во услови на екстремно оптоварување. Целта е да се идентификуваат критичните состојби, максималните напони и деформации, како и потенцијалните зони на оштетување.

Земјотресниот запис е внесен во моделот како временски зависно забрзување $a(t)$, кое се применува како базично возбудување на конструкцијата. Анализата е спроведена во подолжна (X) и вертикална (Y) насока, со цел да се оцени влијанието на насоката на дејство врз динамичкиот одговор на системот.

6.2.1. Анализа на просторниот одговор на моделот

Со цел да се добие подетален увид во динамичкото однесување на дигалката, извршена е анализа на просторниот одговор на моделот, при што се следени карактеристични точки вдоль распонот на главниот носач.

Посебно се анализираат одговорите во три карактеристични позиции: во близина на бочните (странични) носачи и во средината на распонот, што овозможува идентификација на критичните зони на конструкцијата. Во овие точки се анализираат промените на поместувањата, забрзувањата и напоните во текот на времето, како и нивните максимални вредности.

Анализата покажува дека динамичкиот одговор значително зависи од насоката на дејство на земјотресот. Иако подолжната (X) насока влијае на целокупното однесување на конструкцијата, вертикалната (Y) насока доведува до поизразени деформации и напони, особено во случај на посилено сеизмичко дејство. Ова се должи на фактот што вертикалните забрзувања директно влијаат на носивоста на главните греди и предизвикуваат дополнителни динамички ефекти, особено во присуство на концентрирани маси како што се количката и товарот.

Дополнително, вертикалната компонента на земјотресот директно делува врз масата на системот и предизвикува зголемување на инерцијалните сили. Ова доведува до појава на поголеми напони, особено во критичните делови на конструкцијата, како што се средината на распонот или зоните во близина на бочните носачи (*Chopra (2017)*).

6.2.2. Развој на надграден 3D модел

Првично развиениот нумерички модел покажува многу добра согласност со експерименталните резултати во рамките на статичката анализа. Сепак, при спроведување на динамичката анализа е утврдено дека истиот модел е премногу поедноставен за реално

прикажување на динамичкото однесување на системот. Главното ограничување на основниот модел произлегува од неговата неспособност да ги опфати сложените интеракции помеѓу конструкцијата, количката и товарот, особено во услови на временско зависно оптоварување.

Со цел да се надминат овие ограничувања, моделот е надграден преку воведување на дополнителни елементи и подобрување на репрезентацијата на масите и нивната меѓусебна поврзаност. Притоа, товарот е моделиран како висечка маса поврзана со количката преку еластичен елемент, со што се симулира реалното однесување на јажето и се овозможува земање предвид на релативните движења помеѓу товарот и конструкцијата. Овие релативни движења имаат значително влијание врз динамичкиот одговор на системот.

Со наведените, релативно мали, но суштински измени, моделот е значително подобрен во однос на неговата способност да ги претстави реалните динамички ефекти. Надградениот 3D модел овозможува пореалистична анализа на однесувањето на мостовската дигалка по сеизмичко дејство, особено во однос на распределбата на напоните и деформациите. Во претходното поглавје е извршена верификација на нумеричкиот модел преку споредба со експериментални резултати, при што е избран модел кој најдобро ги репродуцира измерените динамички карактеристики.

Сепак, дополнителната анализа покажува дека и овој модел, иако соодветен за опис на вертикалното флексурално однесување, има ограничена способност за репродукција на просторниот (3D) динамички одговор по сеизмичко дејство. Конкретно, при примена на сеизмичко возбудување во различни насоки, значаен одговор се јавува претежно во вертикалната насока, додека поместувањата во X и Z насока остануваат занемарливи (Chopra, 2017; Bozorgnia & Bertero, 2004).

Ова укажува дека моделот, базиран на гредести елементи и поедноставени гранични услови, не ја опфаќа во доволна мера реалната интеракција помеѓу тркалата и шините. Поради тоа, за потребите на понатамошната сеизмичка анализа е развиен дополнително надграден нумерички модел, во кој се земени предвид еластични потпорни врски (пружини) во повеќе насоки, пореалистична распределба на масата, како и подобрена просторна поврзаност на елементите. Со овој пристап се постигнува подобро усогласување на нумеричката симулација со реалниот просторен (3D) динамички одговор на мостовската дигалка по сеизмичко дејство.

6.3. Споредбени сценарија

Со цел да се изврши систематска процена на однесувањето на мостовската дигалка под различни услови на оптоварување, дефинирани се три карактеристични сценарија. Овие сценарија овозможуваат споредбена анализа помеѓу нормалната експлоатација и однесувањето на системот под различни нивоа на сеизмичко дејство, при што се задржува конзистентност во применетиот временски запис.

Изборот на ист земјотресен запис, со соодветно скалирање, овозможува директна споредливост на резултатите, при што разликите во однесувањето на системот се должат

исклучиво на интензитетот на дејството, а не и на различна фреквентна содржина на сигналот.

6.3.1. Сценарио А – Нормална работа

Ова сценарио ја претставува работната состојба на дигалката при редовна експлоатација, без присуство на сеизмичко дејство. Во овој случај, динамичките ефекти произлегуваат од работата на системот, односно движењето на количката и присуството на товар.

Анализата е спроведена за повеќе работни состојби (без товар, со товар од $2t$ и со товар од $7t$), при што се следи однесувањето на конструкцијата под влијание на сопствената тежина и експлоатационите оптоварувања. Ова сценарио служи како референтна основа за понатамошна споредба со сеизмичките случаи.

6.3.1.1. Состојба без товар

А) Позиција 1

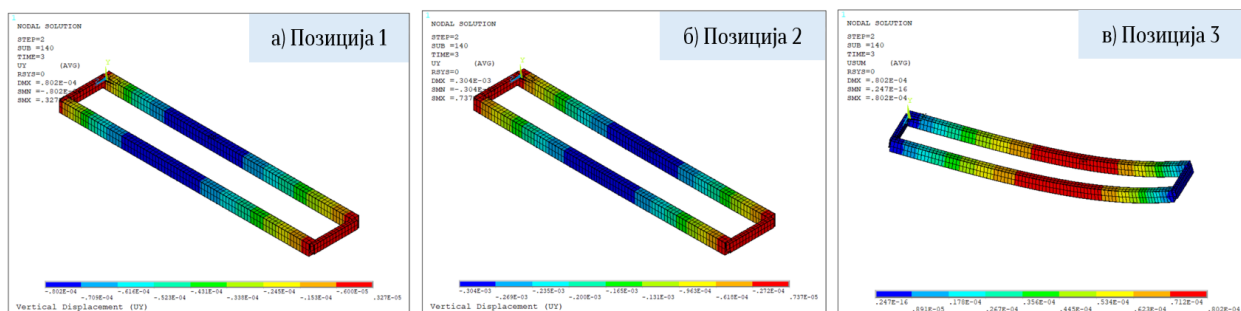
При позиционирање на количката во близина на бочниот носач (позиција 1), максималното вертикално поместување во позиција 1 е 0.88 mm (слика бр.6.2). Иако количката е во позиција 1, максималното вертикално поместување на носачот е регистрирано во средината на распонот. Распределбата на еквивалентното напрегање покажува дека максималните напрегања се јавуваат во близина на бочните носачи и изнесуваат приближно: $\sigma_{max} \approx 1.39\text{ MPa}$, што е значително под границата на течење на конструктивниот челик.

Б) Позиција 3

При позиционирање на количката во средината на распонот (позиција 3), добиено е максимално вертикално поместување од 1.01 mm . Ова покажува дека средината на распонот претставува критична зона од аспект на деформациите. Максималниот еквивалентен напон изнесува приближно: $\sigma_{max} \approx 5.92\text{ MPa}$, при што и во овој случај конструкцијата работи во целосно еластичен режим.

В) Позиција 5

Поради геометриската симетрија на конструкцијата, резултатите добиени за позиција 5 се практично идентични со резултатите за позиција 1. Максималното вертикално поместување изнесува приближно 0.88 mm , додека максималното еквивалентно напрегање е околу 1.39 MPa . Во овој случај најголемите вертикални поместувања се јавуваат во средината на распонот, додека максималните напрегања остануваат значително под границата на течење на материјалот. На слика бр.6.4 е прикажана споредбата на распределбата на вертикалните поместувања за позициите 1, 3 и 5.



Слика бр. 6.2 Приказ на вертикалните поместувања (U_Y) на главниот носач без товар: (а) количка во позиција 1, (б) количка во позиција 3 и (в) количка во позиција 5

6.3.1.2. Состојба со товар $2t$

А) Позиција 1

При поставување на количката во близина на бочниот носач (позиција 1), вертикалното поместување во зоната под количката изнесува приближно 0.52 mm , додека најголемото вертикално поместување повторно се јавува во средината на распонот. Максималната вредност на еквивалентното напрегање изнесува приближно 8.45 MPa . Добиените напрегања се значително под границата на течење на материјалот, што укажува дека конструкцијата работи во еластичен режим.

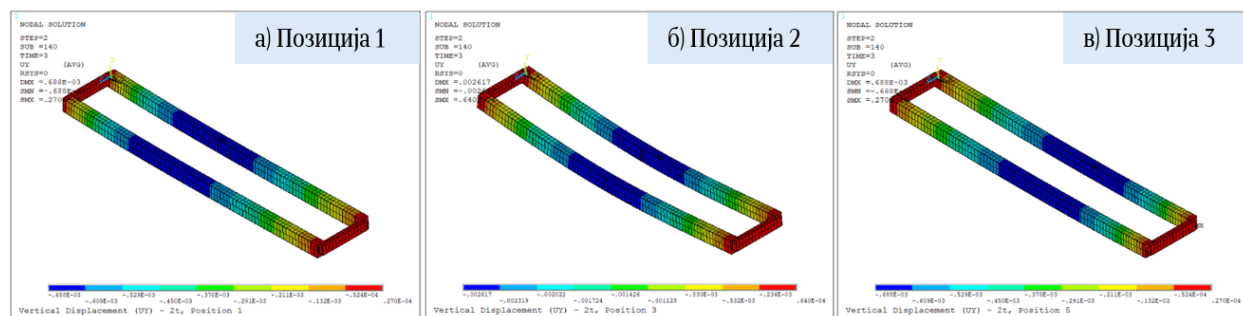
Б) Позиција 3

При поставување на количката во средината на распонот (позиција 3) е добиено максимално вертикално поместување од приближно 6.01 mm . Максималното еквивалентно напрегање изнесува приближно 35.40 MPa . Во овој случај повторно конструкцијата работи во еластичен режим, без појава на пластични деформации.

В) Позиција 5

При поставување на количката во позиција 5, најголемо вертикално поместување повторно се јавува во средината на распонот, додека вертикалното поместување под количката изнесува приближно 0.52 mm .

Максималната вредност на еквивалентното напрегање изнесува приближно 8.45 MPa , што е идентично со случајот кога количката е поставена во позиција 1. Ова е очекувано поради геометриската симетрија на конструкцијата. На слика бр.6.2 е прикажана споредбата на распределбата на вертикалните поместувања за позициите 1, 3 и 5.



Слика бр. 6.2 Приказ на вертикалните поместувања (U_Y) на главниот носач со товар 2t: (а) количка во позиција 1, (б) количка во позиција 3 и (в) количка во позиција 5

6.3.1.3. Состојба со товар 7t

А) Позиција 1

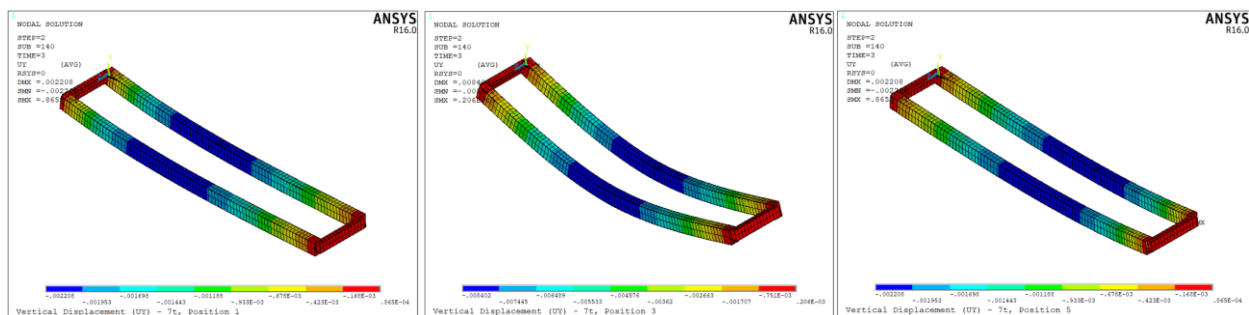
При поставување на количката во близина на бочниот носач (позиција 1), вертикалното поместување во зоната под количката изнесува приближно 1.61 mm, додека најголемото вертикално поместување повторно се јавува во средината на распонот и изнесува приближно 4.82 mm. Резултатите покажуваат дека и при товар од 7t најголемите деформации се концентрирани во средината на главниот носач. Максималната вредност на еквивалентното напрегање изнесува приближно 26.3 MPa. Добиените напрегања остануваат значително под границата на течење на материјалот, што укажува дека конструкцијата и во овој случај работи во еластичен режим.

Б) Позиција 3

При поставување на количката во средината на распонот (позиција 3), добиено е максимално вертикално поместување од приближно 18.51 mm. Максималното еквивалентно напрегање изнесува приближно 109 MPa. И покрај значително поголемите вредности во споредба со претходните случаи, конструкцијата и понатаму работи во еластичен режим, бидејќи добиеното напрегање е значително помало од границата на течење на материјалот.

В) Позиција 5

При позиционирање на количката во позиција 5, најголемото вертикално поместување во точката под количката изнесува 1.61 mm. Максималната вредност на главното напрегање изнесува приближно 26.3 MPa, што е идентично со случајот кога количката е поставена во позиција 1. На слика бр.6.3 е прикажана споредбата на распределбата на вертикалните поместувања за трите позиции на количката.



Слика бр. 6.3 Приказ на вертикалните поместувања (U_Y) при товар од 7t, а) позиција 1, б) позиција 3 и в) позиција 5

6.3.2. Сценарио Б – Слабо до умерено сеизмичко дејство

Во ова сценарио се анализира однесувањето на дигалката под влијание на земјотрес со понизок интензитет. За таа цел, како што веќе е наведено, применет е записот од земјотресот *ElCentro*, при што неговата амплитуда е намалена за 30%.

Со ова скалирање се задржува реалната динамичка природа на сигналот, додека се намалува неговото сеизмичко влијание врз конструкцијата. Овој пристап овозможува анализа на однесувањето на системот во услови кои се поблиски до почести, умерени земјотреси, при кои не се очекуваат сериозни оштетувања, но сепак можат да се јават зголемени динамички ефекти.

Ваквиот пристап е особено релевантен за условите во Р. Северна Македонија, која се карактеризира со честа појава на слаби земјотреси и поретка појава на умерени и силни земјотреси, како последица на нејзината активна тектонска поставеност (*Drogreshka & Chernih-Anastasovska, 2019*).

6.3.2.1. Состојба без товар

А) Позиција 1

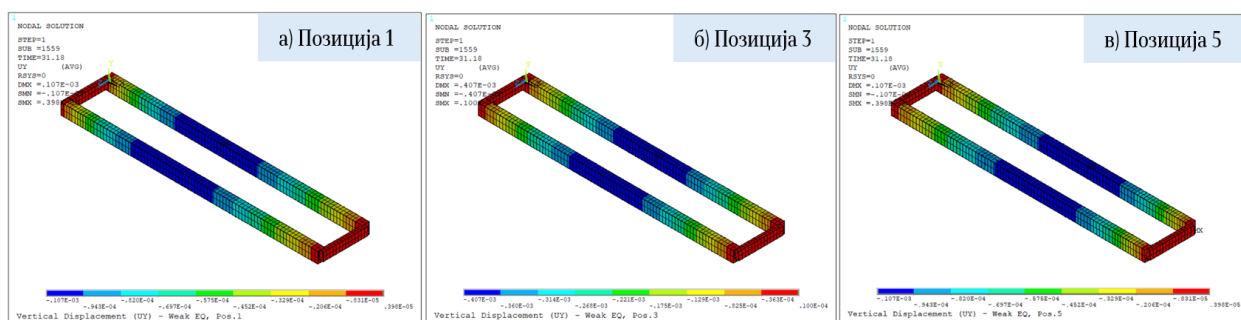
При поставување на количката во близина на бочниот носач (позиција 1), вертикалното поместување во зоната под количката изнесува приближно 0.10 mm (слика бр. 6.4). Иако количката е поставена во позиција 1, најголемото вертикално поместување повторно се јавува во средината на распонот. Максималната вредност на еквивалентното напрегање изнесува приближно 1.07 MPa. Добиените напрегања се значително под границата на течење на материјалот, што укажува дека конструкцијата работи во еластичен режим.

Б) Позиција 3

При поставување на количката во средината на распонот (позиција 3), добиено е максимално вертикално поместување од приближно 0.75 mm. Ова покажува дека средината на распонот претставува најчувствителна зона од аспект на вертикалните деформации. Максималното еквивалентно напрегање изнесува приближно 4.42 MPa. И во овој случај конструкцијата работи во целосно еластичен режим.

В) Позиција 5

Поради геометриската симетрија на конструкцијата, резултатите добиени за позиција 5 се практично идентични со резултатите за позиција 1. Вертикалното поместување во зоната под количката изнесува приближно 0.10 mm , додека најголемото вертикално поместување повторно се јавува во средината на распонот. Максималната вредност на еквивалентното напрегање изнесува приближно 1.07 MPa . Во овој случај најголемите вертикални поместувања се јавуваат во средината на распонот, додека максималните напрегања остануваат значително под границата на течење на материјалот. На слика бр.6.4 е прикажана споредбата на распределбата на вертикалните поместувања за позициите 1, 3 и 5.



Слика бр. 6.4 Приказ на вертикалните поместувања (UY) при слабо сеизмичко дејство и без товар: (а) количка во позиција 1, (б) количка во позиција 3 и (в) количка во позиција 5

6.3.2.2. Состојба со товар $2t$

А) Позиција 1 и позиција 5

При слабо сеизмичко дејство и товар од $2t$, кога количката е поставена во близина на бочниот носач (позиција 1), најголемото вертикално поместување во точката под количката изнесува околу 1.5 mm , додека најголемото вертикално поместување повторно се јавува во средината на распонот.

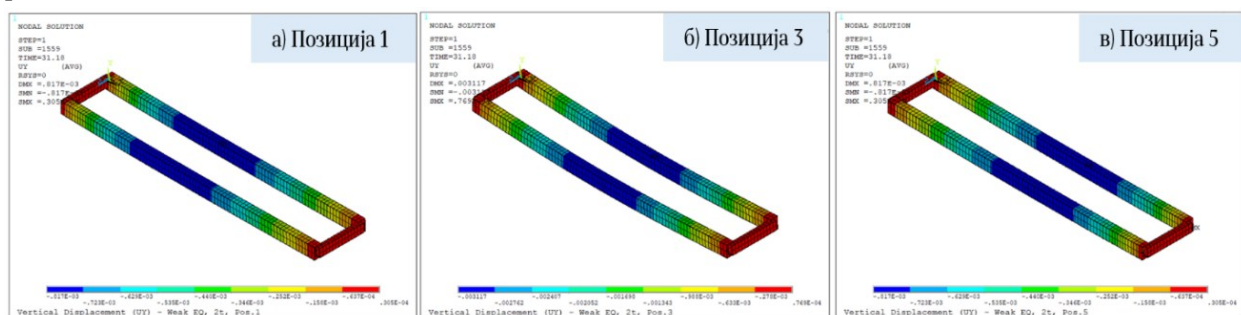
Добиените резултати покажуваат дека и при слабо сеизмичко дејство најизразениот динамички одговор на конструкцијата се јавува во средината на главниот носач, што ја потврдува оваа зона како најчувствителна од аспект на вертикалните деформации.

Максималната вредност на еквивалентното напрегање изнесува приближно $\sigma_{max} \approx 8.19 \text{ MPa}$, што е значително под границата на течење на конструктивниот челик. Оттука може да се заклучи дека конструкцијата работи во еластичен режим и не се очекуваат оштетувања при вакво ниво на сеизмичко дејство. Поради симетричната геометрија на конструкцијата, резултатите за позиција 5 се практично идентични со резултатите за позиција 1, па затоа не се разгледуваат одделно.

Б) Позиција 3

При поставување на количката во средината на распонот (позиција 3), добиено е најголемо вертикално поместување од приближно $|UY|_{max} \approx 5.75 \text{ mm}$. Во крајните делови на носачот (позиции 1 и 5) се добиени значително помали поместувања од околу 1.46 mm .

На слика бр.6.5 е прикажана споредбата на распределбата на вертикалните поместувања за позициите 1, 3 и 5. Може да се забележи дека најголемите деформации се јавуваат кога количката е поставена во средината на распонот, додека кај крајните позиции се регистрирани значително помали вредности. Максималната вредност на еквивалентното напрегање за позиција 3 изнесува приближно $\sigma_{max} \approx 33.9 \text{ MPa}$. Иако оваа вредност е значително поголема во однос на крајните позиции, таа сè уште е помала од границата на течење на материјалот, што укажува дека конструкцијата и во овој случај работи во еластичен режим.



Слика бр. 6.5 Приказ на вертикалните поместувања (UY) при слабо сеизмичко дејство со товар 2t: (а) количка во позиција 1, (б) количка во позиција 3 и (в) количка во позиција 5

6.3.2.3. Состојба со товар 7t

А) Позиција 1

При слабо сеизмичко дејство и товар од $7t$, кога количката е поставена во близина на бочниот носач (позиција 1), вертикалното поместување во зоната под количката изнесува приближно 1.59 mm , додека најголемото вертикално поместување повторно се јавува во средината на распонот и изнесува 4.75 mm . На слика бр. 6.6 може да се забележи дека најголемите деформации се концентрирани во централниот дел на носачот, додека поместувањата во близина на страничните носачи се значително помали. Ова потврдува дека средината на распонот претставува критична зона од аспект на деформациите.

Максималната вредност на еквивалентното напрегање изнесува приближно $\sigma_{max} \approx 26 \text{ MPa}$, при што конструкцијата и понатаму работи во еластичен режим.

Б) Позиција 3

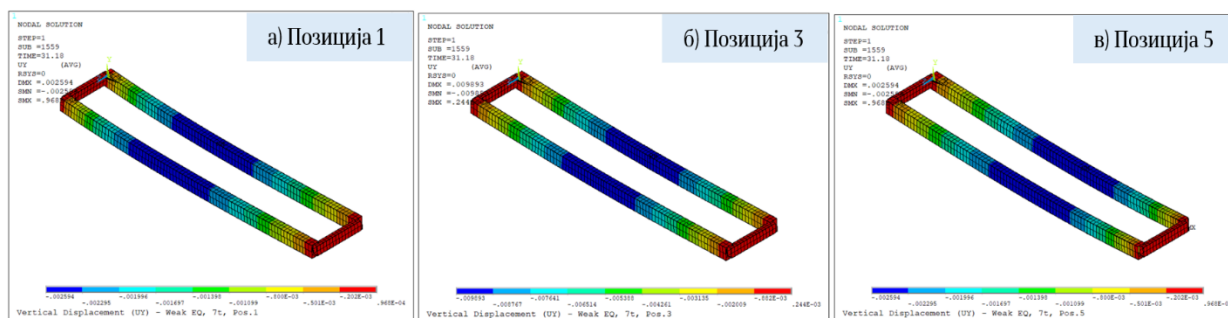
При позиционирање на количката во средината на распонот (позиција 3), добиено е максимално вертикално поместување од приближно $|UY|_{max} \approx 18.3 \text{ mm}$. Во крајните делови на носачот (позиции 1 и 5) поместувањата се значително помали и изнесуваат околу 4.64 mm .

Од приказот на слика бр. 6.6 јасно се забележува дека поставувањето на товарот во средината на распонот предизвикува најизразен севкупен одговор на конструкцијата. Во споредба со позициите 1 и 5, кај позиција 3 е добиена приближно четирикратно поголема вредност на максималното вертикално поместување.

Максималната вредност на еквивалентниот напон изнесува приближно $\sigma_{max} \approx 108 \text{ MPa}$, при што највисоките напрегања се јавуваат во средниот дел на главните носачи, каде што се концентрирани и најголемите деформации.

В) Позиција 5

Поради геометриската симетрија на конструкцијата, позициите 1 и 5 претставуваат симетрични крајни положби на количката. Како што може да се забележи на слика бр. 6.6, распределбата на вертикалните поместувања е практично идентична со онаа добиена за позиција 1. Максималното вертикално поместување во средината на распонот изнесува приближно 4.75 mm , додека во точката под количката е добиена вредност од околу 1.59 mm . Соодветно, и распределбата на напрегањата покажуваат речиси идентични вредности со оние добиени за позиција 1, што претставува дополнителна потврда за исправноста на нумеричкиот модел.



Слика бр. 6.6 Приказ на вертикалните поместувања (UY) при товар од 7t и слабо сеизмичко дејство: а) позиција 1, б) позиција 3 и в) позиција 5

6.3.3. Сценарио В – Силно сеизмичко дејство

Во ова сценарио се анализира однесувањето на мостовската дигалка под силно сеизмичко дејство, со цел да се оцени однесувањето на конструкцијата во екстремни услови на оптоварување.

За таа цел е применет реалниот запис од земјотресот *El Centro*, без скалирање, со што се задржува неговата оригинална амплитуда. Овој запис претставува репрезентативен пример за силно сеизмичко дејство и е еден од најчесто користените записи во земјотресното инженерство. Земјотресот има моментна магнитуда $M_w = 6.9$ и овозможува реалистична симулација на влијанието на интензивни земјотреси врз индустриски конструкции (Housner, 1959; Chopra, 2017).

Целта на ова сценарио е да се идентификуваат критичните состојби во конструкцијата, односно:

- максималните деформации
- највисоките напрегања
- потенцијалната појава на нелинеарно однесување или оштетувања

Анализата повторно е спроведена за различни работни состојби на дигалката (без товар, со товар од $2t$ и со товар од $7t$), како и за различни позиции на количката, со што се овозможува целосна оценка на влијанието на сеизмичкото дејство врз однесувањето на системот.

6.3.3.1. Состојба без товар

А) Позиција 1 и позиција 5

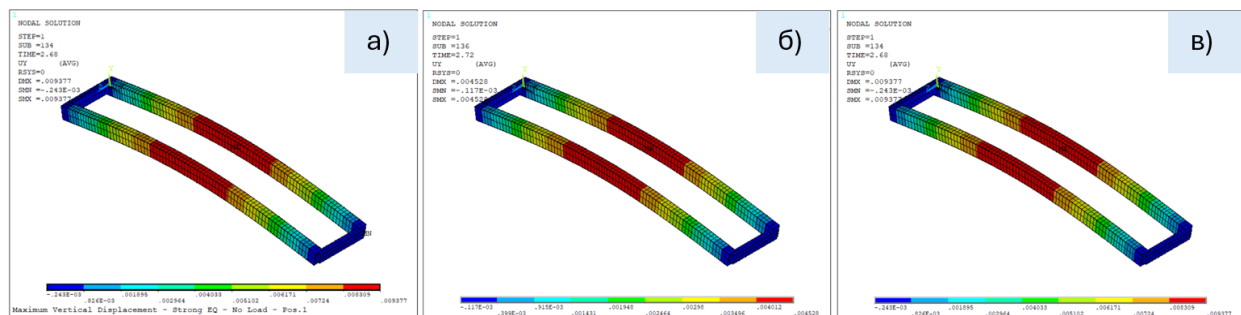
Во овој случај е анализирано однесувањето на мостовската дигалка при дејство на земјотресниот запис *El Centro* во вертикална (Y) насока, при што количката е поставена во близина на бочните носачи (позиција 1 и позиција 5), без присуство на висечки товар. Вертикалната насока е избрана бидејќи во неа се јавуваат најизразени динамички ефекти како резултат на дејството на гравитационите и инерцијалните сили.

Според резултатите, максималното еквивалентно напрегање е 50.6 MPa ; додека вертикалното поместувањето во зоната под количката изнесува изнесува и во двете положби 2.51 mm .

Б) Позиција 3

На слика бр.6.7 е прикажана распределбата на вертикалните поместувања при поставување на количката во средината на распонот и дејство на земјотресниот запис *El Centro* во Y насока. Добиените резултати покажуваат осцилаторен одговор со постепено пригушување, карактеристичен за динамички возбудена конструкција. Максималното вертикално поместување изнесува приближно 7.35 mm и се јавува во зоната на количката, односно во средината на распонот.

Анализата на напонската состојба покажува дека најголемите вредности на еквивалентниот напон се концентрирани во зоната на контакт помеѓу количката и главните носачи. Максималната вредност на еквивалентното напрегање изнесува приближно $\sigma_{max} 41.77 \text{ MPa}$. Распределбата на напрегањата вдоль носачите е релативно рамномерна, без изразени локални концентрации надвор од зоната на количката. Добиените вредности остануваат под границата на течење на конструктивниот челик *S235*, што укажува дека конструкцијата работи во еластичен домен и не се очекуваат трајни оштетувања. За разлика од претходните сценарија, при дејство на земјотресниот запис *El Centro* најголемото еквивалентно напрегање е добиено кога количката е поставена во близина на бочните носачи, што укажува на прераспределба на внатрешните сили под влијание на динамичкото оптоварување.



Слика бр. 6.7 Приказ на вертикалните поместувања (UY) на мостовската дигалка при дејство на земјотресниот запис *El Centro* во Y насока, без висечки товар: а) позиција 1, б) позиција 3 и в) позиција 5

6.3.3.2. Состојба со товар $2t$

А) Позиција 1 и позиција 5

На слика бр. 6.8 е прикажана распределбата на вертикалните поместувања на конструкцијата при дејство на земјотресниот запис *El Centro* во Y насока, за случај со висечки товар од $2t$ кога количката е поставена во близина на потпората (позиција 1 и позиција 5). Од приказот се забележува дека најголемите вертикални поместувања се јавуваат во зоната на количката и товарот, додека кон бочните носачи нивната вредност постепено се намалува. Распределбата на поместувањата е речиси симетрична за двете позиции, поради што се добиваат многу слични резултати.

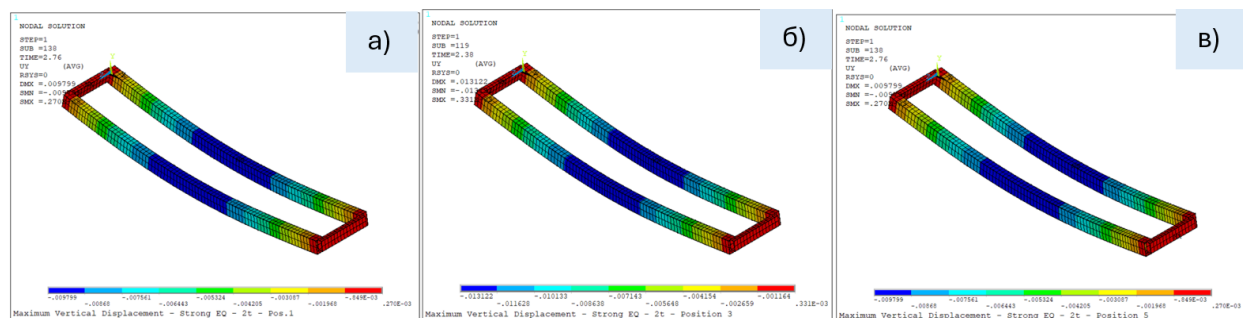
Резултатите од временската анализа покажуваат дека 2.76 mm . Анализата на напонската состојба покажува дека максималните еквивалентни напрегања достигнуваат вредност од приближно $\sigma_{max} \approx 51.86 \text{ MPa}$. Највисоките напрегања се концентрирани во зоната на количката и во преодните делови помеѓу главните и попречните носачи, каде што се јавуваат локални концентрации на напон како резултат на динамичкото дејство и геометриските промени на обликот.

Б) Позиција 3

На слика бр. 6.8 е прикажана распределбата на вертикалните поместувања на конструкцијата за случај кога количката со висечки товар од $2t$ е поставена во средината на распонот (позиција 3). Во овој случај најголемите поместувања се концентрирани во централниот дел од конструкцијата, каде што се јавува и најизразеното виткање на главните носачи.

Резултатите од временската анализа покажуваат изразен динамички одговор, кој во позиција 3 максималното вертикално поместување, достигнува приближно 13.12 mm . Ова однесување е последица на дополнителниот степен на слобода воведен со висечкиот товар, кој се однесува како осцилирачки систем и генерира поголеми динамички амплитуди.

Анализата на напонската состојба, извршена за моментот на максимално вертикално поместување, покажува дека максималните еквивалентни напрегања достигнуваат вредност од приближно $\sigma_{max} \approx 76.95 \text{ MPa}$. Највисоките напрегања се концентрирани во регионот на количката и во деловите од главните носачи непосредно под нејзиното дејство.



Слика бр. 6.8 Распределба на вертикалните поместувања (UY) при дејство на земјотресниот запис *El Centro* во Y насока за товар од 2t: а) позиција 1; б) позиција 3; в) позиција 5

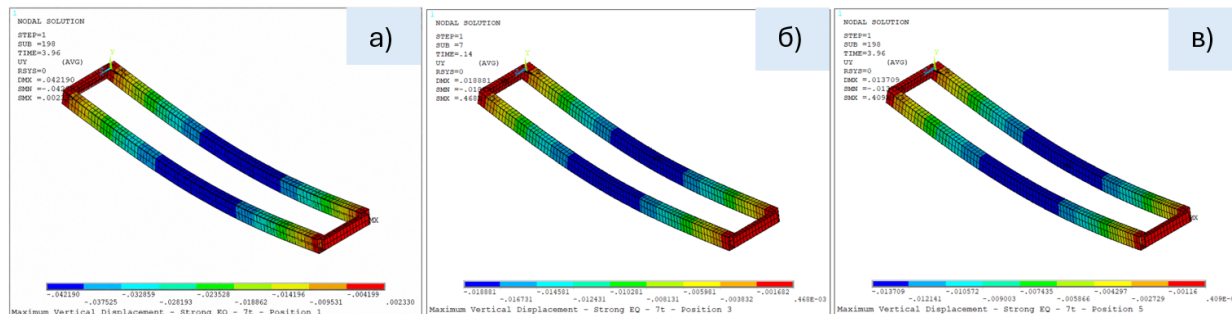
6.3.3.3. Состојба со товар 7t

А) Позиција 1 и позиција 5

Во овој случај е анализирано динамичкото однесување на мостовската дигалка при дејство на реалниот земјотресен запис *El Centro* во вертикална насока (Y), при висечки товар од 7t. Количката е поставена во близина на бочните носачи, односно во позиција 1 и позиција 5. На слика бр. 6.9 е прикажана распределбата на вертикалните поместувања (UY) во конструкцијата. Од резултатите се забележува дека најголемите поместувања се јавуваат во зоната на количката и висечкиот товар, додека кон спротивната потпора нивната вредност постепено се намалува. Распределбата на поместувањата има континуирана распределба на поместувањата вдоль главните носачи, што укажува на изразен севкупен динамички одговор на системот. Максималното вертикално поместување во позиција 1 и 5 изнесува 4.219 mm. Од друга страна пак, еквивалентниот напон изнесува 71.38 MPa.

Б) Позиција 3

При поставување на количката во средината на распонот (позиција 3), конструкцијата покажува најизразен динамички одговор. На слика бр. 6.9 е прикажано максималното вертикално поместување кое изнесува 18.88 mm. Во споредба со позициите 1 и 5, поместувањата се нешто поголеми, што е очекувано бидејќи најголемите вертикални деформации се концентрирани во средината на распонот. Добиените резултати покажуваат дека најнеповолна положба од аспект на динамички поместувања е поставувањето на товарот во средината на распонот, каде што се јавува најголем севкупен одговор на конструкцијата. Додека кога станува збор за еквивалентниот напон, тој изнесува 115.20 MPa.



Слика бр. 6.9 Распределба на вертикалните поместувања (UY) при товар од 7t и сеизмичко дејство El Centro во Y насока: а) позиција 1; б) позиција 3; в) позиција 5

6.4. Анализа на резултатите

Во оваа потточка се врши систематска анализа на добиените резултати од динамичките нумерички симулации на мостовската дигалка, при различни експлоатациони и сеизмички сценарија. Посебен акцент е ставен на влијанието на масата на товарот, позицијата на количката и насоката на сеизмичкото побудување (*анг. Seismic excitation*) врз динамичкиот одговор и напонската состојба на конструкцијата. Анализата опфаќа:

- временски одговор на системот
- максимални поместувања
- распределба на напрегања
- идентификација на критични зони

6.4.1. Основен модел

Основниот нумерички модел, развиен врз основа на конечни елементи на профили (*анг. beam*), покажува задоволителни резултати при статичка анализа и основна динамичка процена. Резултатите покажуваат дека:

- максималните поместувања се јавуваат во средината на распонот
- напрегањата се концентрирани во зоните на бочните носачи и во близина на количката

Меѓутоа, при примена на сеизмичко побудување, особено во хоризонтална насока, се забележува дека моделот не ја прикажува соодветно просторната (3D) динамика на системот. Поместувањата во X и Z насока се занемарливи, што укажува на ограничувањата на моделот во однос на реалната интеракција помеѓу тркалата и шините.

Дополнително, се јавуваат локални концентрации на напрегања како резултат на поедноставеното моделирање (концентрирани сили, недостаток на контактна површина), што во одредени случаи доведува до нереално високи вредности.

6.4.2. Надграден модел

Како што претходно е образложено, за пореално претставување на динамичкото однесување на мостовската дигалка е развиен надграден нумерички модел, во кој се воведени следните карактеристики:

- еластични врски (пружини) во повеќе насоки
- подобра распределба на масата
- подобрена просторна поврзаност на системот

Примената на надградениот модел овозможува поцелосно опфаќање на просторниот (3D) динамички одговор на мостовската дигалка при сеизмичко дејство. Добиените резултати укажуваат на:

- поизразени и пореални поместувања во сите насоки,
- подобра корелација со физичкото однесување на системот,
- порамномерна распределба на напрегањата,
- намалување на нереалните локални концентрации.

Особено е значајно што надградениот модел појасно ја репродуцира улогата на висечкиот товар како доминантен фактор во динамичкиот одговор, при што се добиваат значително поголеми амплитуди кај товарот во однос на количката.

6.5. Споредба на моделите и резултатите

Во Табела бр. 6.1 е прикажана споредбата на максималните вертикални поместувања (UY) и максималните еквивалентни напрегања (анг. *Von Mises*) добиени за трите анализирани сценарија, при различни маси на товарот и различни позиции на количката. Од прикажаните резултати можат да се забележат неколку јасно изразени закономерности.

Пред сè, позицијата на количката има значително влијание врз динамичкиот одговор на конструкцијата. Во сите три сценарија најголемите вертикални поместувања се добиваат кога количката е поставена во средината на распонот (позиција 3). Овој резултат, како што е спомнато и претходно, е очекуван. Ова е последица на тоа што во средината на распонот се јавува најголемиот момент на свиткување, поради што оваа зона е најподложна на вертикални деформации.

Од друга страна, резултатите добиени за позициите 1 и 5 се практично идентични. Кај сите анализирани случаи максималните вертикални поместувања и еквивалентните напрегања имаат исти или занемарливо различни вредности. Ваквата симетрија претставува очекуван резултат и ја потврдува правилната геометрија на моделот, коректно дефинираните гранични услови и правилното моделирање на конструкцијата.

Со зголемување на масата на товарот од 0t, преку 2t, до 7t, се забележува постепено зголемување на вертикалните поместувања и на еквивалентните напрегања. Ова е најприметливо кога количката е поставена во средината на распонот, каде што вертикалното поместување се зголемува од 1.01 mm (сценарио 1), преку 6.01 mm (сценарио 1 – товар 2 t), до 18.51 mm (сценарио 1 – товар 7 t). Слично е забележано и кај сценаријата 2 и 3, што укажува дека масата на товарот претставува еден од доминантните фактори кои влијаат врз динамичкиот одговор на мостовската дигалка.

Со преминот од сценарио 1 кон сценарио 2 не се забележуваат значајни разлики во максималните еквивалентни напрегања. Меѓутоа, при сценариото со силно сеизмичко дејство (сценарио 3) се добиваат најголемите вредности на поместувањата и напрегањата. На пример, кај товар од 7t во позиција 3 максималниот напон се зголемува од 109.00 MPa (сценарио 1), на 108.00 MPa (сценарио 2), односно достигнува 115.20 MPa при силно сеизмичко дејство (сценарио 3). И покрај тоа што сценаријата 1 и 2 даваат многу блиски вредности, сценариото со силно сеизмичко дејство резултира со најголеми напрегања и поместувања.

Интересно е што кај сценариото 3 максималните еквивалентни напрегања во позиција 3 се јавуваат во раната фаза од анализата (околу 0.14 s), додека кај позициите 1 и 5 максималните вредности се јавуваат подоцна (околу 3.96 s). Ова укажува дека при поставување на товарот во средината на распонот конструкцијата најсилно реагира уште во почетната фаза на сеизмичкото побудување, кога инерцијалните сили и динамичките ефекти се најизразени. Кај крајните позиции, пак, максималниот одговор се јавува во подоцнежна фаза од сеизмичкиот запис, што може да се објасни со различната распределба на масата и различното учество на облиците на вибрирање во зависност од положбата на количката.

Иако максималните поместувања и напрегања значително се зголемуваат со зголемување на масата на товарот и интензитетот на сеизмичкото дејство, максималниот еквивалентен напон добиен во анализите останува значително под границата на течење на конструктивниот челик S235 (235 MPa). Ова покажува дека за сите анализирани случаи конструкцијата останува во еластичната област и не се очекува појава на пластични деформации.

Врз основа на добиените резултати може да се заклучи дека најнеповолното анализирано работно сценарио е случајот со товар од 7 t поставен во средината на распонот (позиција 3), при силно сеизмичко дејство. Во ова сценарио се добиени истовремено најголемите вертикални поместувања (18.88 mm) и најголемите еквивалентни напрегања (115.20 MPa). И покрај тоа, добиените напрегања остануваат значително под границата на течење на конструктивниот челик S235, што потврдува дека конструкцијата работи во еластичната област и при најнеповолниот анализиран случај.

Табела бр. 6.1 Сјоредбени резултати од динамичког анализа при различним експлоатационим и сеизмичким сценаријима

	Товар	Позиција 1		Позиција 3		Позиција 5	
		UY [mm]	σ_{max} [MPa]	UY [mm]	σ_{max} [MPa]	UY [mm]	σ_{max} [MPa]
Сценарио 1	Без товар	0.88	1.39 MPa	1.01	5.92 MPa	0.88	1.39 MPa
	2 t	0.52	8.45 MPa	6.01	35.40 MPa	0.52	8.45 MPa
	7 t	1.61	26.30 MPa	18.51	109.00 MPa	1.61	26.30 MPa
Сценарио 2	Без товар	0.10	1.07 MPa	0.75	4.42 MPa	0.1	1.07 MPa
	2 t	1.50	8.19 MPa	5.75	33.90 MPa	1.5	8.19 MPa
	7 t	1.59	26.00 MPa	18.30	108 MPa	1.59	26.00 MPa
Сценарио 3	Без товар	2.51	50.60 MPa	7.35	41.77 MPa	2.51	50.60 MPa
	2 t	2.76	51.86 MPa	13.12	76.95 MPa	2.76	51.86 MPa
	7 t	4.219	71.38 MPa	18.88	115.20 MPa	4.219	71.38 MPa

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 6

- Abdel-Rahman, E. M., Nayfeh, A. H., & Masoud, Z. N. (2003). Dynamics and control of cranes: A review. *Journal of Vibration and Control*, 9(7), 863–908. <https://doi.org/10.1177/1077546303009007007>
- Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (Eds.). (2004). *Earthquake Engineering*. CRC Press.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*
- Drogreshka, A., & Chernih-Anastasovska, A. (2019). Seismic Zones and Seismicity of the Territory of the Republic of North Macedonia. *Knowledge International Journal*, 31(3), 669–674. <https://doi.org/10.35120/kij3103669d>
- European Committee for Standardization (CEN). (2006). EN 1991-3: Eurocode 1: Actions on structures – Part 3: Actions induced by cranes and machinery. Brussels: CEN.
- European Committee for Standardization (CEN). (2007). EN 1993-6: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 6: Crane supporting structures. Brussels: CEN.
- European Committee for Standardization (CEN). (2020). EN 15011: Cranes – Bridge and gantry cranes. Brussels: CEN.
- Fayaz, J., Torres-Rodas, P., Medalla, M., & Naeim, F. (2023). *Assessment of ground motion amplitude scaling using interpretable Gaussian process regression: Application to steel moment frames. Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 52(8), 2339–2359. <https://doi.org/10.1002/eqe.3810>
- Housner, G. W. (1959). Behavior of structures during earthquakes. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 85(EM4), 109–129.
- Hudson, D. E. (1979). *Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms*. Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Berkeley, California.
- Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS). (2021). *Seismic Hazard Assessment and Seismotectonic Characteristics of the Republic of North Macedonia*. Skopje.
- Mulchandani, H. K., Muthukumar, G., & Bansal, S. (2019). Ground motion selection and scaling using ASCE 7-16: Case study on Town Alipur in Delhi Region. *Knowledge International Journal*, 31(3), 669–674. <https://doi.org/10.35120/kij3103669d>
- Oguamanam, D. C. D., Hansen, J. S., & Heppler, G. R. (2001). Dynamics of a three-dimensional overhead crane system. *Journal of Sound and Vibration*, 242(3), 411–426. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3366>
- Seismic Zones and Seismicity of the Territory of the Republic of North Macedonia*. *Knowledge International Journal*, 31(3), 669–674. DOI: 10.35120/kij3103669d.

7. ИНДИКАТОРИ ЗА ПРОЦЕНА НА СОСТОЈБАТА НА МОСТОВСКИТЕ ДИГАЛКИ

Во рамките на предложената методологија, процената на состојбата на мостовската дигалка по нејзино изложување на сеизмичко дејство се врши со користење на соодветно избрани индикатори. Нивната примена овозможува резултатите добиени од нумеричките симулации да се изразат преку параметри кои можат мерливо да се определат. Со споредување на вредностите добиени преку нумеричките симулации со граничните вредности дефинирани врз основа на избраните индикатори, се утврдува постсеизмичката состојба на мостовската дигалка. Оттука, од особено значење е соодветно да се изберат и издвојат индикаторите кои можат да обезбедат мерливи параметри, земајќи ги предвид податоците што се достапни во рамките на ова истражување.

7.1. Дефинирање и класификација на индикатори

Во литературата досега за слични системи се предложени голем број индикатори за утврдување на оштетување и проценка на состојбата на конструкциите, кои опфаќаат параметри засновани на динамички карактеристики, статистички показатели на сигналите, деформации и напони.

Врз основа на прегледот на литературата, во Табела бр. 7.1 е прикажана листа на индикатори кои се користат во истражувачки трудови од слични области, заедно со нивното значење и примена. Со цел нивно полесно претставување, индикаторите се класифицирани во неколку групи: динамички (природни фреквенции, модални облици, динамички фактори и сл.), индикатори врз основа на динамичкиот одговор (максимално поместување, максимално забрзување, максимална брзина и сл.), статистички (средна вредност, стандардна девијација, варијанса итн.), статички индикатори (степен на сигурност, нагиб на конструкцијата), напонски (еквивалентни напрегања), збирни индикатори (индекси на оштетување, индекс на сигурност и сл.) и оперативни индикатори (природни фреквенции, амортизација, број на циклуси, работни часови) (*Doebeling et al, 1996; Sohn et al. 2004; Fan & Qiao 2011; Farrar&Worden, 2012, Salawu, 1997*).

Табела бр. 7.1 Листа на индикатори за процена на состојба

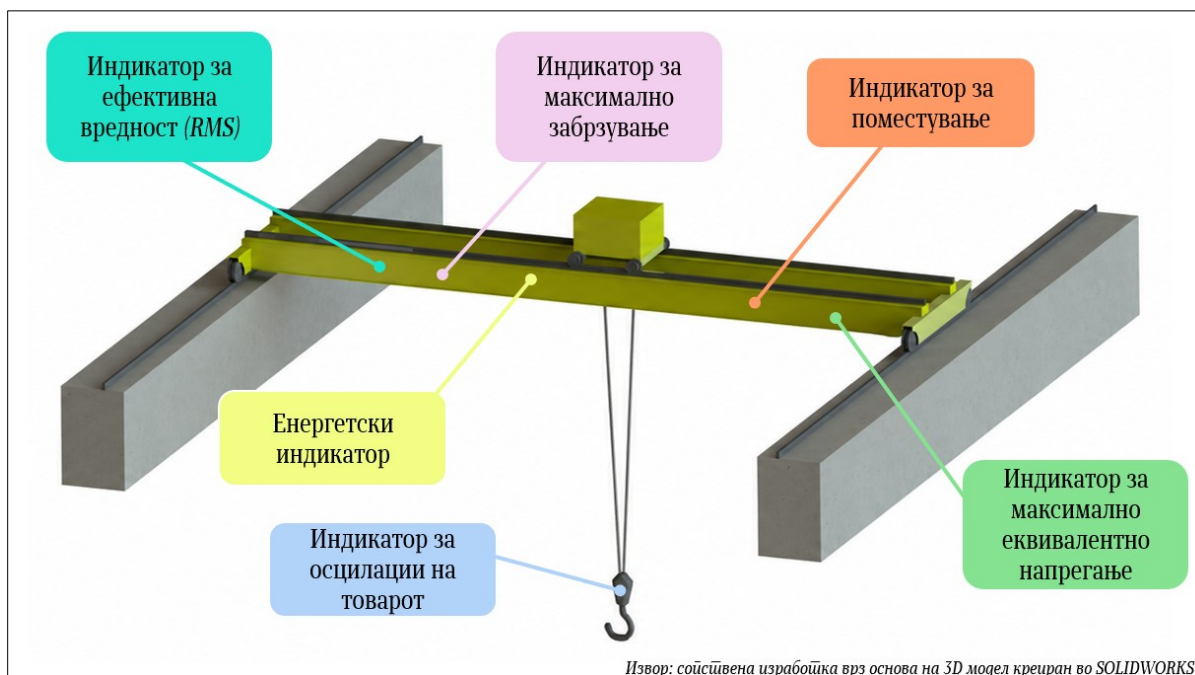
	Индикатор	Релевантна литература
Динамички индикатори	Сопствени фреквенции (анг. <i>Natural frequencies</i>)	Salawu (1997); Fan & Qiao (2011); Farrar & Worden (2012)
	Модални облици (анг. <i>Mode shapes</i>)	Doebeling et al. (1996); Farrar & Worden (2012)
	Индикатор за модална усогласеност (анг. <i>Modal Assurance Criterion – MAC/MSA</i>)	Allemang (2003); Pastor et al. (2012)
	Закривеност на модалните облици (анг. <i>Mode shape curvature</i>)	Pandey et al. (1991)
	Индикатори засновани на флексибилност (анг. <i>Flexibility-based</i>)	Doebeling et al. (1996)
Индикатори врз основа на динамичкиот одговор	Ефективна вредност (анг. <i>Root Mean Square – RMS</i>)	Sohn et al. (2004); Worden & Farrar (2007)
	Однос на ефективни вредности (анг. <i>RMS ratio</i>)	Nair et al. (2006)
	Максимално забрзување (анг. <i>Peak acceleration</i>)	Chopra (2012); FEMA; Eurocode 8
	Максимална брзина (анг. <i>Peak velocity</i>)	Chopra (2012)
	Карактеристики на временската историја (анг. <i>Time history features</i>)	Worden & Farrar (2007); Yan (2007).
Статистички индик.	Острина на распределбата (анг. <i>Kurtosis</i>)	Sohn et al. (2004)
	Асиметрија (анг. <i>Skewness</i>)	Sohn et al. (2004)
	Дисперзија (анг. <i>Variance</i>)	Nair et al. (2006)
Статички индик.	Поместување (анг. <i>Displacement</i>)	Chopra (2012); FEMA,
	Релативно поместување (анг. <i>Relative displacement</i>)	Sun, N., Fang, Y., et al. (2012); Yan (2007).
Напонски индик.	Еквивалентен напон (анг. <i>Stress (von Mises)</i>)	Wang & Cha 2020 review on vibration based damage detection
	Концентрација на напони (анг. <i>Stress concentration</i>)	(Wang & Cha 2020)
Енергетски индик.	Енергетски индикатор (анг. <i>Energy indicator</i>)	(Yan et al. (2007))
	Енергија на деформација (анг. <i>Strain energy</i>)	Sohn et al. (2004))
Оперативни индик.	Осцилации на товарот (анг. <i>Load oscillation</i>)	(Sun et al. (2012))
	Динамички одговор на количката (анг. <i>Trolley response</i>)	(Sun et al. (2012)

Сепак, земајќи ја предвид специфичноста на мостовската дигалка и достапните резултати од нумеричките симулации, не сите индикатори наведени во литературата можат директно да се применат во ова истражување. Поради тоа, изборот е направен според нивната релевантност за сеизмичкиот одговор на системот, можноста за нивно определување од достапните нумерички податоци и нивната практична вредност при процената на постсеизмичката состојба. На овој начин се обезбедува избраните индикатори да овозможат објективна и мерлива проценка на однесувањето на мостовската дигалка.

Во согласност со наведените критериуми, издвоени се индикатори кои овозможуваат:

1. Индикаторот за ефективна вредност (*RMS*)
2. Индикаторот за максимално забрзување
3. Индикаторот за поместување
4. Индикатор за максимално еквивалентно напрегање
5. Енергетски индикатор
6. Индикатор за осцилации на товарот.

Избраните индикатори опфаќаат различни аспекти на однесувањето на мостовската дигалка (слика бр.7.1). Првите пет индикатори се однесуваат на динамичкиот одговор и напрегањата на мостовската дигалка, додека индикаторот за осцилации на товарот го опишува однесувањето на висечкиот товар. На тој начин се овозможува проценка на состојбата на мостовската дигалка преку анализа на конструкцијата и на висечкиот товар.



Слика бр.7.1 Избрани индикатори за определување на постсеизмичката состојба на мостовска дигалка

7.2. Опис и гранични вредности на избраните индикатори

7.2.1. Индикатор за ефективна вредност

Ефективната вредност (анг. *Root Mean Square – RMS*) покажува колкав е просечниот интензитет на вибрациите во одреден временски интервал (слика бр.7.2) (*Farrar & Worden, 2012*). Ефективната вредност се добива така што секоја измерена вредност на вибрациите најпрво се подига на квадрат, со што се отстранува влијанието на позитивниот или негативниот знак. Потоа се пресметува средната вредност од квадратите на сите измерени вредности, а на крај се зема квадратен корен од добиената вредност (*Bendat & Piersol, 2010; Oppenheim & Schaffer, 2010*). На овој начин се добива вредноста која го претставува „просечниот интензитет“ на вибрациите. Математички, ефективната вредност се определува според равенката (7.1):

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (7.1)$$

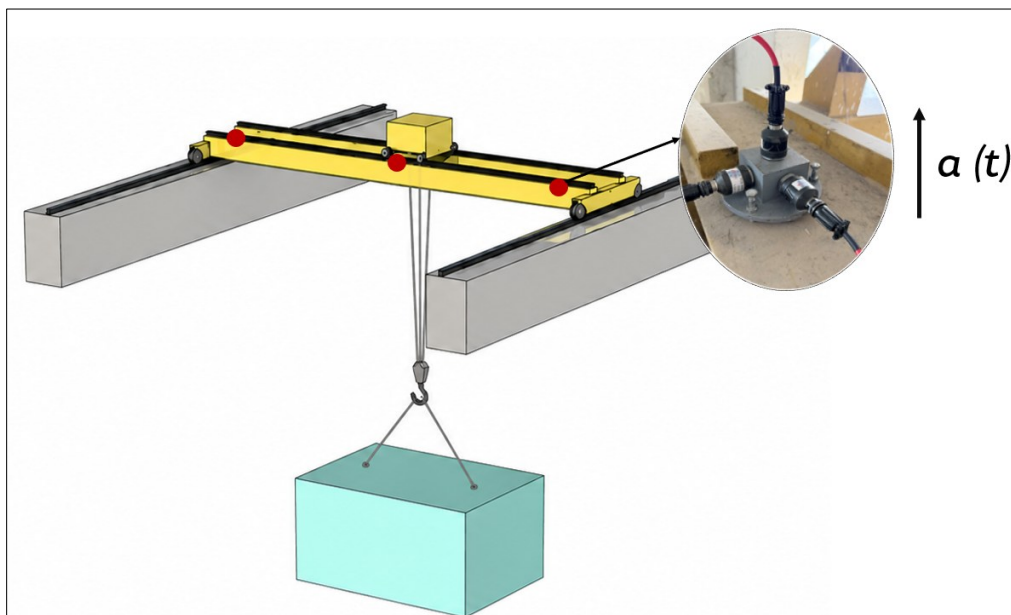
каде што x_i се поединечните измерени вредности на сигналот, а N е бројот на примероци.

За да може да се определи промената на динамичкиот одговор на мостовската дигалка, потребно е да се направи споредба помеѓу референтната *RMS* вредност и добиената вредност, за ист товар и иста положба на количката. Во ова истражување како референтни вредности се земаат *RMS* вредностите на вертикалното забрзување добиени од нумеричките динамички анализи без сеизмичко дејство (сценарио 1). При анализа со сеизмичко дејство (сценарио 2 или сценарио 3), добиената *RMS* вредност се споредува со соодветната референтна вредност од сценарио 1, а разликата помеѓу нив се користи за оценка на промената на динамичкиот одговор на мостовската дигалка. Во ова истражување референтните *RMS* вредности се земени од вертикалното забрзување во средината на распонот (позиција 3) за сите анализирани случаи од сценарио 1, без товар, со товар од $2t$ и со товар од $7t$, независно од положбата на количката (Табела бр.7.2). Ваквиот избор е направен бидејќи во средината на распонот се најизразените вертикални динамички одговори на мостовската дигалка.

Во следниот чекор потребно е референтната вредност и добиената вредност од сценарио 2 или 3 да се види во какви отстапувања се наоѓа. Бидејќи во литературата не се пронајдени општоприфатени гранични вредности за релативните промени на сите индикатори што се избрани да се користат во овој истражувачки труд, затоа се усвоени критериуми за интерпретација на сите предложени индикатори, при што промени до 10% се сметаат за мали отстапувања, промени од 10% до 25% за средни отстапувања, а промени поголеми од 25% за големи отстапувања. Овие вредности претставуваат критериуми предложени во рамките на оваа истражување и служат за полесна споредба на резултатите.

Табела бр. 7.2 Референтни RMS вредности на вертикално забрзување

Товар	Поз.	RMS реф
Без товар	1	0.129
Без товар	3	0.479
Без товар	5	0.129
2t	1	0.650
2t	3	2.419
2t	5	0.650
7t	1	1.954
7t	3	7.271
7t	5	1.954



Слика бр.7.2 Приказ на мерните места за определување на динамичкиот одговор на мостовската дигалка

7.2.2. Индикатор за максимално забрзување

Максималното забрзување (анг. *Peak acceleration*) ја претставува најголемата апсолутна вредност на забрзувањето регистрирана за време на динамичкиот одговор на мостовската дигалка. Математички се определува според изразот (7.2):

$$a_{max} = \max |a(t)| \quad (7.2)$$

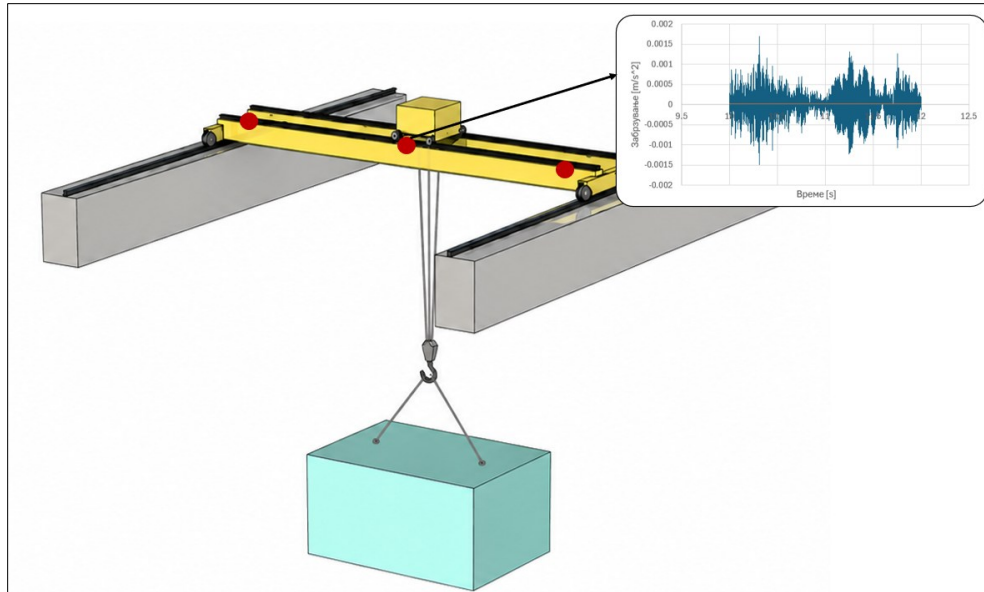
каде што $a(t)$ е моменталното забрзување како функција од времето.

Како што е спомнато претходно, во прегледот на литературата, овој параметар има посебно значење и најчесто се користи во форма на максимално забрзување на тлото (*анг. Peak Ground Acceleration – PGA*), кое претставува основен параметар за дефинирање на интензитетот на сеизмичкото дејство (*EN 1998-1, (2024)*).

Во ова истражување, максималното забрзување се определува од временските записи на забрзување, добиени од нумеричките симулации. Со споредба на максималните вредности за различни анализи (различни товари, позиции на количка и сеизмички сценарија), се оценува интензитетот на динамичкиот одговор на мостовската дигалка. Во литературата не постојат општоприфатени гранични вредности за максималното забрзување, бидејќи неговата вредност зависи од товарот, положбата на количката и карактеристиките на конструкцијата. Според тоа, во ова истражување е избрано да се користи споредба со референтна состојба. Како референтни вредности се земаат максималните забрзувања добиени од нумеричката динамичка анализа без сеизмичко дејство (сценарио 1), за ист товар и иста положба на количката. Во табела бр. 7.3 се прикажани референтните вредности на максималното вертикално забрзување во средината на распонот (позиција 3), добиени од нумеричките динамички анализи без сеизмичко дејство (сценарио 1). Врз основа на оваа споредба се предложени критериумите за оценка на промените во динамичкиот одговор на мостовската дигалка. Како што е кажано кај претходниот индикатор, повторно се користат критериумите од 10%, 10 до 25% и над 25%.

Табела бр. 7.3 Референтни вредности на максималното вертикално забрзување

Товар	Поз.	$a_{max,ref} (m/s^2)$
Без товар	1	0.198
Без товар	3	1.119
Без товар	5	0.198
2t	1	1.535
2t	3	5.995
2t	5	1.535
7t	1	4.696
7t	3	18.470
7t	5	4.696



Слика бр.7.3 Приказ на определувањето на максималното забрзување во избрана мерна точка на мостовската дигалка

7.2.3. Индикатор за поместување

Поместувањето (анг. *Displacement*) претставува промена што настанала во положбата на одредена точка од конструкцијата, под дејство на надворешно оптоварување (*Chopra, 2012*). Приказ на определувањето на максималното вертикално поместување на мостовската дигалка е прикажано на слика бр. 7.4.

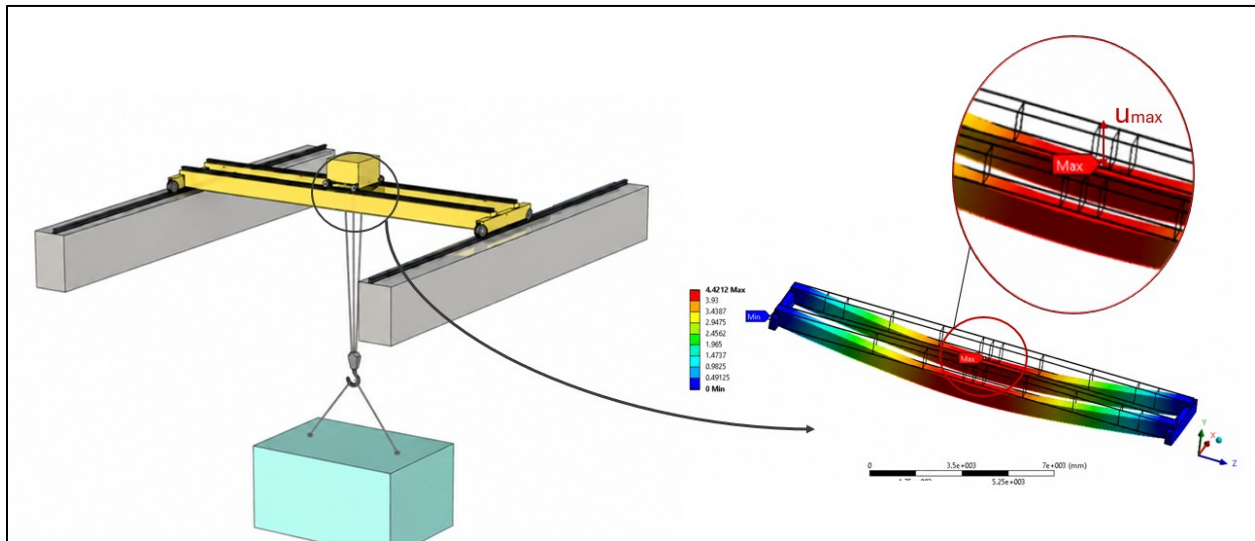
Во динамичка анализа, поместувањето се разгледува како функција од времето $u(t)$, при што како индикатор се користи неговата максимална апсолутна вредност, која се определува според изразот (7.3):

$$u_{max} = \max |u(t)| \quad (7.3)$$

Во овој докторски труд, поместувањето се определува од нумеричките динамички анализи спроведени во ANSYS. Како референтни вредности се земаат максималните вертикални поместувања по Y-оската, добиени од динамичките анализи без сеизмичко дејство (сценарио 1), за секој товар и положба на количката. Потоа, референтните вредности од сценарио 1, се споредуваат со добиените максимални поместувања од динамичките анализи за сценарио 2 или сценарио 3. Врз основа на споредбата со референтната состојба се оценува влијанието на сеизмичкото дејство врз динамичкиот одговор на мостовската дигалка. Во табела бр. 7.4 се прикажани референтните вредности на максималното вертикално поместување, добиени од нумеричките динамички анализи без сеизмичко дејство (сценарио 1), за различни товари и положби на количката. На крај, се користат граничните вредности од 10%, 25% над 25%.

Табела бр. 7.4 Референтни вредности на максимално вертикално поместување

Товар	Поз.	$u_{max,ref}$ [mm]
Без товар	1	0.88
Без товар	3	1.01
Без товар	5	0.88
2 t	1	0.52
2 t	3	6.01
2 t	5	0.52
7 t	1	1.61
7 t	3	18.51
7 t	5	1.61



Слика бр.7.3. Приказ на определувањето на максималното вертикално поместување на мостовската дигалка

7.2.4. Индикатор за максимално еквивалентно напрегање

Максималното еквивалентно напрегање (анг. *Maximum equivalent stress* или *von Mises stress*) претставува величина што го опишува вкупното напрегање во конструкцијата (слика бр.7.4). Еквивалентното напрегање се определува според изразот (7.4):

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (7.4)$$

Каде што:

σ_1, σ_2 и σ_3 се трите најголеми нормални напрегања, што дејствуваат во една точка на конструкцијата во три меѓусебно нормални насоки (Ansys, 2023).

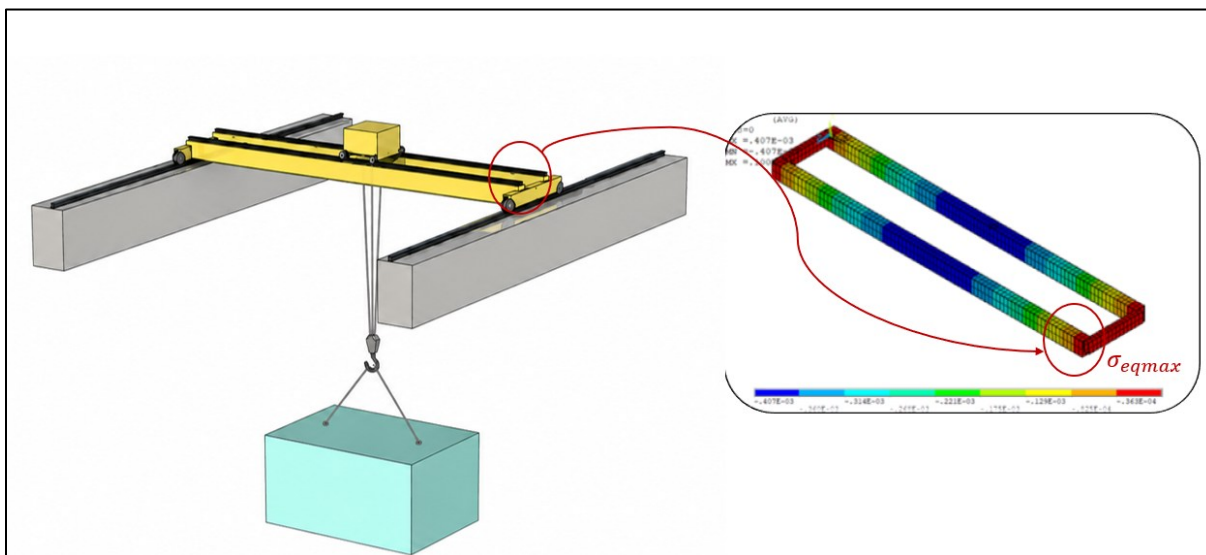
Во Поглавје 6, се дадени вредностите добиени за максималните еквивалентни напрегања. Бидејќи веќе се добиени од динамичките симулации во ANSYS, за овој индикатор како референтни вредности се искористени вредностите добиени од сценарио 1. На сличен начин како и кај претходните индикатори, тие вредности се споредуваат со измерените вредности од сценарио 2 или 3 и се добива релативната промена на максималното еквивалентно напрегање, според изразот (7.5):

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{max,ref}}{\sigma_{max,ref}} \cdot 100\% \quad (7.5)$$

Во табела бр. 7.5 се прикажани вредностите добиени за еквивалентните напрегања. Во последниот чекор е направена споредбата со веќе дефинираните гранични вредности од 10%, 20 и 25%.

Табела бр. 7.5 Референтни вредности на максималното еквивалентно напрегање

Товар	Поз.	$\sigma_{max, ref} [MPa]$
без товар	1	1.39
без товар	3	5.92
без товар	5	1.39
2t	1	8.45
2t	3	35.40
2t	5	8.45
7t	1	26.30
7t	3	109.00
7t	5	26.30



Слика бр.7.4 Приказ на определувањето на максималниот еквивалентен напон во конструкцијата на мостовската дигалка

7.2.5. Енергетски индикатор

Енергетските индикатори претставуваат параметри кои ја опишуваат вкупната динамичка активност на системот при дејство на надворешни оптоварувања (Nick et al., 2021). Доколку настане промена во конструкцијата, се менува и нејзината енергетска состојба. Со други зборови, доколку се појави оштетување на конструкцијата тоа ќе доведе до промена на нејзината енергетската состојба. Поради тоа, во овој докторски труд се користи овој индикатор за определување на промени кои настанале кај мостовската дигалка по сеизмичко дејство (слика бр.7.5).

Во овој докторски труд, според достапните податоци од нумеричките симулации енергетскиот индикатор се дефинира преку сигналот на забрзување во временски домен. Енергијата се пресметува како интеграл од квадратот на забрзувањето, односно (7.4):

$$E = \int_0^T a^2(t) dt \quad (7.4)$$

каде што:

$a(t)$ е забрзувањето како функција од времето

T е времетраењето на сигналот

Како и до сега и кај енергетскиот индикатор се користи споредба со референтна состојба, при што се анализира неговата релативна промена (7.5):

$$\Delta E = \frac{E - E_{ref}}{E_{ref}} \cdot 100\% \quad (7.5)$$

каде што:

E е енергетската вредност за разгледуваната состојба

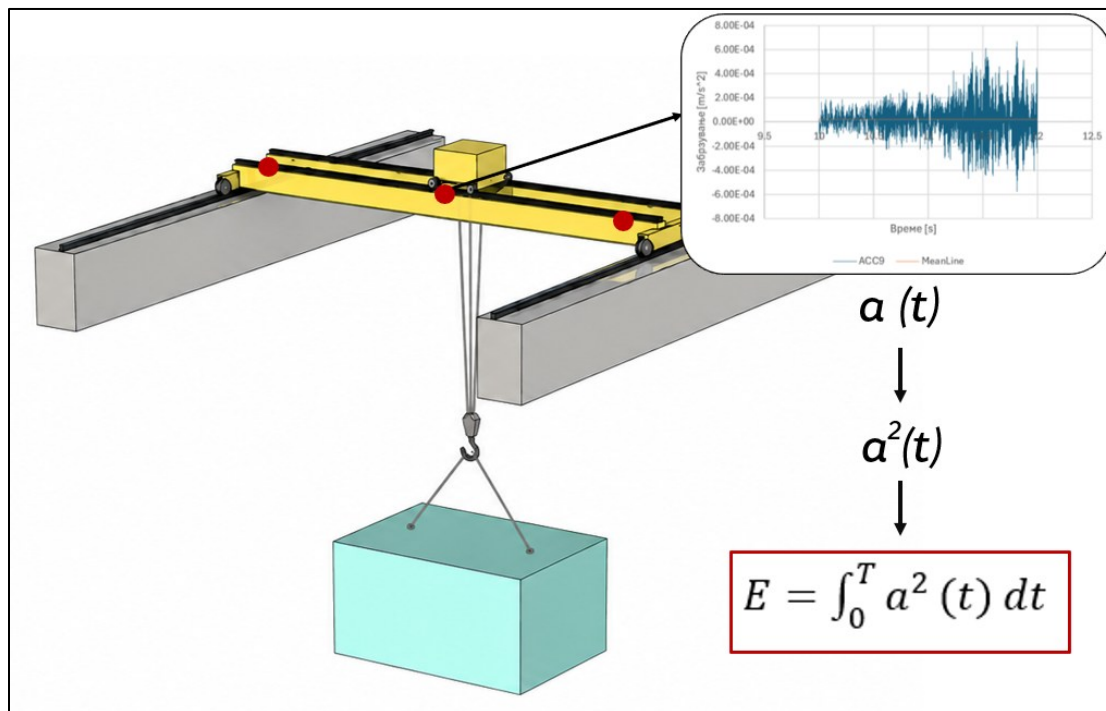
E_{ref} е енергетската вредност за референтната состојба

Како референтни вредности се земени енергетските вредности добиени од динамичките анализи без сеизмичко дејство (сценарио 1), за ист товар и иста положба на количката. Потоа, енергетските вредности добиени за сценарио 2 или сценарио 3 се споредуваат со соодветната референтна вредност од сценарио 1. Врз основа на релативната промена се оценува влијанието на сеизмичкото дејство врз динамичкиот одговор на мостовската дигалка. Во табела бр. 7.6 се прикажани референтните вредности на енергетскиот индикатор добиени од динамичките анализи без сеизмичко дејство (сценарио 1), кои понатаму служат како основа за споредба со резултатите од сценарио 2 и сценарио 3. Во следниот чекор се користат граничните вредности од 10%, 25% над 25%, како што веќе е кажано.

Табела бр. 7.6 Референтни вредности на енергетскиот индикатор

Товар	Поз.	$E_{ref} [m^2/s^3]$
Без товар	1	0.050
Без товар	3	0.688
Без товар	5	0.050
2t	1	1.27
2t	3	17.55

2t	5	1.27
7t	1	11.46
7t	3	158.62
7t	5	11.46



Слика бр.7.5 Приказ за определувањето на енергетскиот индикатор од временскиот сигнал на забрзувањето

7.2.6. Индикатор за осцилации на товарот

Осцилациите на товарот (анг. *Load oscillation*) го претставуваат нишањето на висечкиот товар при неговото движење или при дејство на надворешни влијанија (Sun et al. (2023)).

Во литературата, обично осцилациите на товарот се изразуваат преку аголот на нишање. Меѓутоа, во ова истражување, согласно достапните резултати од нумеричките динамички симулации во ANSYS, осцилациите на товарот се определуваат преку максималното, релативно, хоризонтално поместување на товарот во однос на количката. Сличен пристап е применет и во трудот на (Hmoumen и Szabo (2022)), каде релативното хоризонтално поместување на товарот во однос на количката се користи за опишување и анализа на нишањето на товарот. Во Поглавје 6 се прикажани резултатите од динамичките анализи главно за вертикалното поместување по Y-оската, бидејќи тие имаат најголемо значење при анализата на динамичкиот одговор на мостовската дигалка со сеизмичко дејство. Хоризонталните поместувања по X-оската не се детално анализирани во Поглавје 6, бидејќи нивните вредности се значително помали од вертикалните поместувања по Y-оската. Меѓутоа, за определување на осцилациите на висечкиот товар потребно е да се анализира неговото релативно хоризонтално поместување во однос на количката. Поради тоа,

референтните вредности на овој индикатор се определуваат врз основа на хоризонталните поместувања по X -оската на товарот и количката, добиени од нумеричките динамички анализи за сценарио 1, за товари од $2t$ и $7t$ и за положби на количката 1, 3 и 5. Во нумеричките динамички анализи спроведени во ANSYS се извлечени временските записи од хоризонталното поместување по X -оската на јазлите или точките што ги претставуваат количката и товарот. Врз основа на овие податоци, во секој временски момент се определува релативното хоризонтално поместување на товарот во однос на количката според изразот (7.6):

$$\Delta x(t) = UX_{\text{товар}}(t) - UX_{\text{количка}}(t) \quad (7.6)$$

каде што,

$UX_{\text{товар}}(t)$ е хоризонталното поместување на товарот, додека

$UX_{\text{количка}}(t)$ е хоризонталното поместување на количката.

По определувањето на релативното хоризонтално поместување на товарот, се определува максималната апсолутна вредност на овој параметар, која претставува референтна вредност на индикаторот и се одредува според изразот (7.7):

$$\Delta x_{\max, \text{ref}} = \max |\Delta x(t)| \quad (7.7)$$

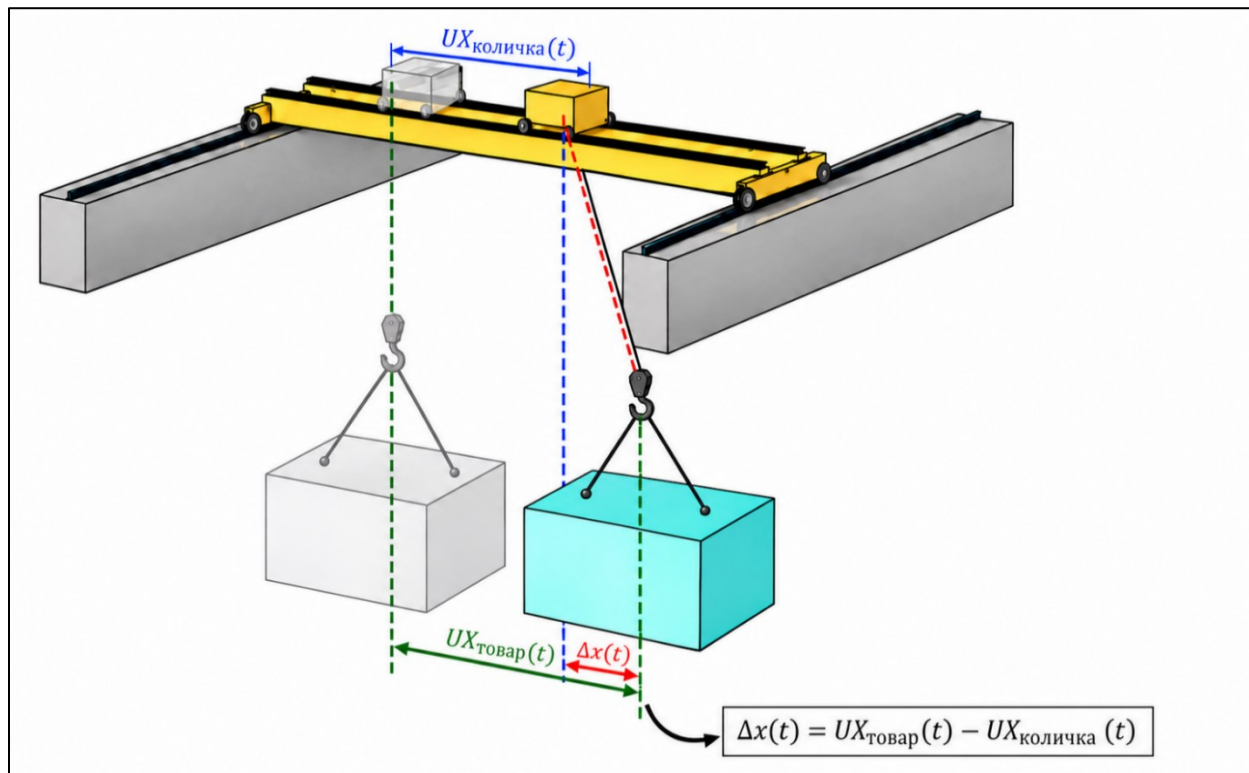
Во Табела бр. 7.7 се прикажани референтните вредности на максималното релативно хоризонтално поместување, добиени од динамичките анализи без сеизмичко дејство (сценарио 1), за товари од $2t$ и $7t$ и за различни положби на количката со товарот. Овие вредности претставуваат референтна состојба и служат за споредба со резултатите добиени за сценарио 2 и сценарио 3, при истиот товар и иста положба на количката. По истата логика како за претходните индикатори, зголемување до околу 10% во однос на референтната вредност се смета за мало отстапување, зголемување од 10% до 25% укажува на значајна промена или средно отстапување, додека зголемувањето поголемо од 25% се смета за значително или големо отстапување во неговиот динамички одговор.

Табела бр. 7.7 Референтни вредности на индикаторот за осцилирање на товарот

Товар	Поз.	$\Delta x_{\max, \text{ref}} [mm]$
$2t$	1	0.3456
$2t$	3	0.3479
$2t$	5	0.3456
$7t$	1	1.0917
$7t$	3	1.1405
$7t$	5	1.0917

Од добиените референтни вредности може да се забележи дека во нумеричкиот модел применет во ова истражување товарот од $7t$ покажува поголемо максимално релативно хоризонтално поместување во споредба со товарот од $2t$. Слични резултати се добиени и во истражувачкиот труд (Yazid et al. (2011)), каде што при анализа на портална дигалка е утврдено

дека зголемувањето на масата на товарот доведува до зголемување на амплитудите на нишање на товарот. На крај повторно се искористени граничните вредности како кај претходно наведените индикатори.



Слика бр.7.6 Приказ за определувањето на максималното, релативно, хоризонтално поместување на товарот во однос на количката

7.3. Интерпретација на индикаторите

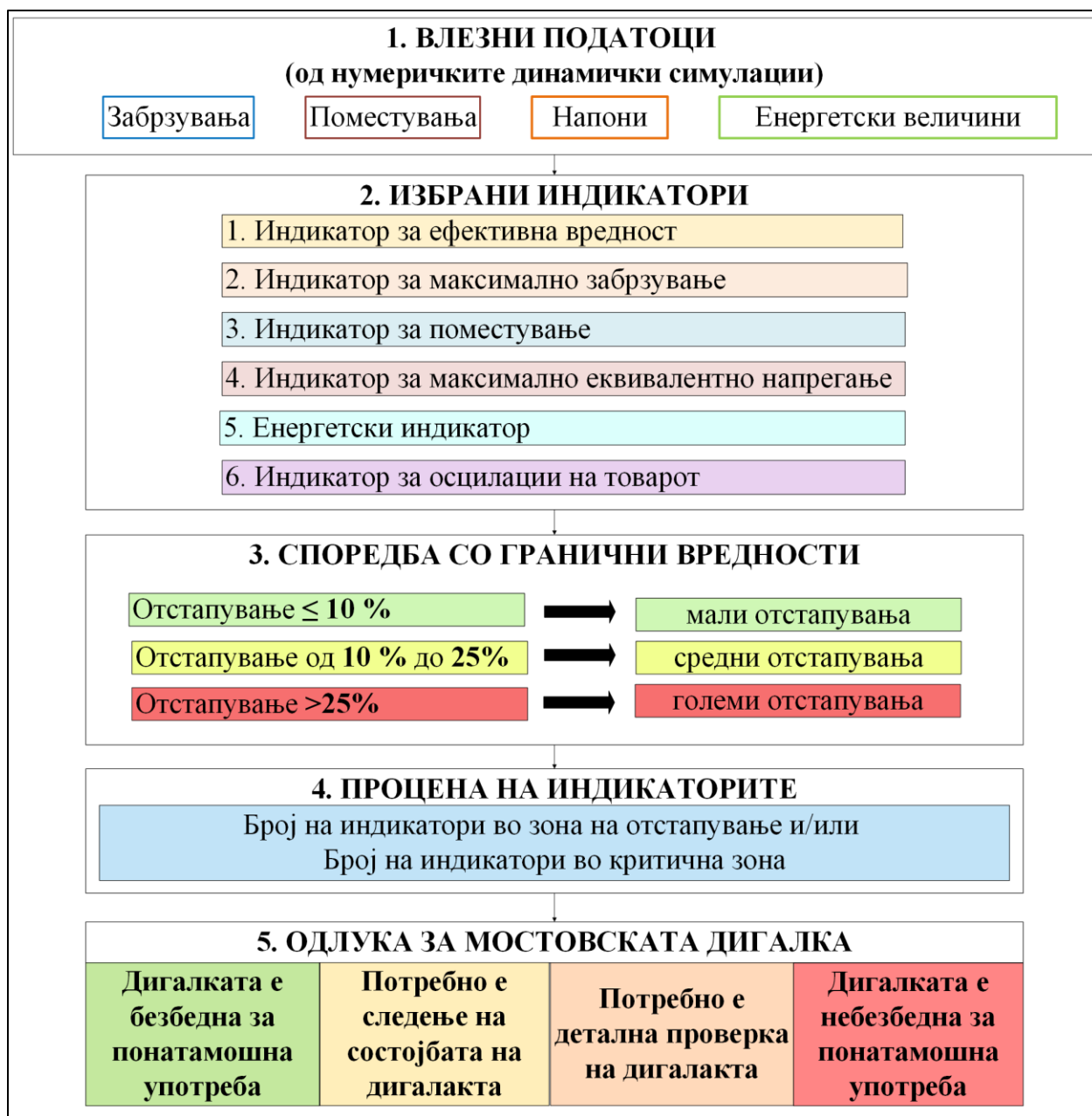
Врз основа на избраните индикатори и начинот на нивното определување, опишан во претходните потточки, процената на постсеизмичката состојба на мостовската дигалка се врши преку нивно заедничко разгледување, наместо преку одделна анализа на секој индикатор. Ваквиот пристап е усвоен бидејќи прегледот на литературата покажува дека промените во состојбата на конструкцијата не можат со доволна сигурност да се определат само врз основа на еден индикатор.

Поради тоа, во рамките на оваа докторска дисертација е воспоставена логика на одлучување преку која се утврдува дали состојбата на мостовската дигалка може да се смета за прифатлива или се наметнува потреба од спроведување на дополнителни проверки. Како критериуми во оваа постапка се користат бројот на индикатори чии вредности се наоѓаат во зоната на отстапување или во критичната зона, како и соодветните препорачани активности дадени во Табела бр. 7.8. Овие критериуми се дефинирани и предложени во рамките на ова истражување.

Табела бр.7.8 Критериуми за интерпретација на состојбата на мостовската дигалка

Случај	Услов	Препорачана активност
1	Нема индикатор во зона на отстапување	Состојбата на мостовската дигалка е прифатлива и не се потребни дополнителни проверки
2	Еден индикатор во зона на отстапување	Следење на состојбата на мостовската дигалка
3	Еден индикатор во критична зона	Детална инспекција на мостовската дигалка
4	Два до три индикатори во зона на отстапување и/или критична зона	Детална инспекција и проценка на состојбата на мостовската дигалка
5	Повеќе од 3 индикатори во критична зона	Прекин на работата на мостовската дигалка

На слика бр. 7.7 е прикажан блок-дијаграм на предложената методологија за проценка на состојбата на мостовската дигалка, со сите чекори по редослед, од влезните податоци до донесувањето на конечната одлука.



Слика бр. 7.7 Шематски приказ на методологијата за процена на состојбата на мостовска дигалка врз основа на индикатори

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА ЗА ПОГЛАВЈЕ 7

- Abdel-Rahman, E. M., Nayfeh, A. H., & Masoud, Z. N. (2003). Dynamics and control of cranes: A review. *Journal of Vibration and control*, 9(7), 863-908.
- Allemang, R. J. (2003). The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse. *Sound and vibration*, 37(8), 14-23.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed.). Prentice Hall.
- Doebeling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review*. Los Alamos National Laboratory.
- European Committee for Standardization. (2024). *Eurocode 3: Design of steel structures*
- Fan, W., & Qiao, P. (2011). Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, 10(1), 83-111.
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). *Structural health monitoring: A machine learning perspective*. Wiley.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). *FEMA 306: Evaluation of earthquake-damaged concrete and masonry wall buildings*.
- Hmoumen, M., & Szabó, T. (2022). Controlling of Payload Swinging of an Overhead Crane. *Pollack Periodica*, 17(2), 54-59
- Liu, H., Cheng, W., & Li, Y. (2019). Dynamic responses of an overhead crane's beam subjected to a moving trolley with a pendulum payload. *Shock and Vibration*, 2019(1), 1291652.
- Nair, K. K., Kiremidjian, A. S., & Law, K. H. (2006). Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure. *Journal of Sound and Vibration*, 291(1-2), 349-368.
- Nick, H., Aziminejad, A., Hosseini, M. H., & Laknejadi, K. (2021). Damage identification in steel girder bridges using modal strain energy-based damage index method and artificial neural network. *Engineering Failure Analysis*, 119, 105010.
- Oguamanam, D. C. D., Hansen, J. S., & Heppler, G. R. (1998). Dynamic response of an overhead crane system. *Journal of sound and vibration*, 213(5), 889-906.
- Pandey, A. K., Biswas, M., & Samman, M. M. (1991). Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 145(2), 321-332.
- Pastor, M., Binda, M., & Harčarik, T. (2012). Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48, 543-548.
- Salawu, O. S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: A review. *Engineering Structures*, 19(9), 718-723.
- Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R., & Czarnecki, J. J. (2004). *A review of structural health monitoring literature: 1996-2001*. Los Alamos National Laboratory.

- Sun, X., Ilanko, S., Mochida, Y., & Tighe, R. C. (2023). A review on vibration-based damage detection methods for civil structures. *Vibration*, 6(4), 843-875.
- Thompson, E. (2023, April 6). *What is Equivalent Stress?* Ansys. <https://ansys.synopsys.com/blog/what-is-equivalent-stress>
- Worden, K., & Farrar, C. R. (2007). Structural health monitoring: A machine learning perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365(1851), 515–537.
- Yan, A. M., Kerschen, G., De Boe, P., & Golinval, J. C. (2007). Structural damage diagnosis under varying environmental conditions—Part I: A linear analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(5), 2233–2248.
- Yazid, E., Parman, S., & Fuad, K. (2011). Vibration Analysis of Flexible Gantry Crane System Subjected Swinging Motion of Payload. *Journal of Applied Sciences*, 11(10), 1707–1715. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.1707.1715>

8. АЛАТКА ЗА ПОСТСЕЙЗМИЧКА ПРОЦЕНА НА СОСТОЈБАТА НА МОСТОВСКАТА ДИГАЛКА

Во ова поглавје е направен спој на претходните резултати од нумеричките симулации и индикаторите, и граничните вредности од претходното поглавје, во една практична алатка за проценка на состојбата на мостовска дигалка по сеизмичко дејство. Алатката претставува имплементација на предложената методологија, при што дефинираните индикатори и нивните гранични вредности се вметнати во алгоритмот за автоматизирано донесување на одлуки за состојбата на дигалката по сеизмичкото дејство.

Главната цел на алатката е брзо и објективно да ја процени состојбата на дигалката, користејќи резултати од нумеричките анализи.

8.1. Претворање на индикаторите во одлука

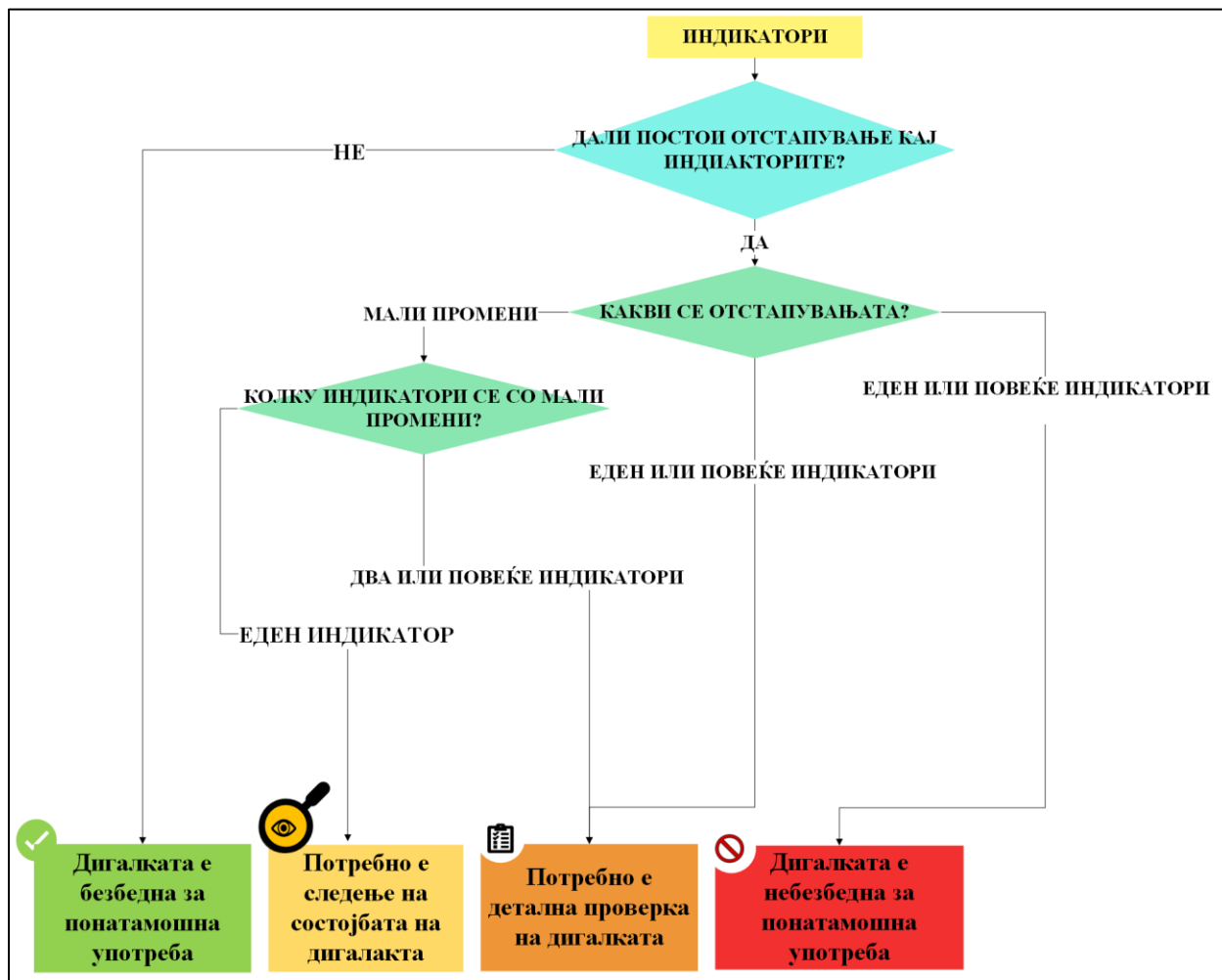
Процесот на претворање на индикаторите во конечна одлука се базира на нивна класификација во однос на дефинираните гранични вредности. Како што е прикажано во Поголавје 7, секој индикатор поединечно се споредува со соодветни гранични вредности, при што се утврдува дали припаѓа на нормална зона на отстапување или критична зона.

Во оваа фаза, индикаторите се третираат како независни параметри кои даваат поединечна оценка за состојбата на системот. Со цел да се добие јасна и еднозначна класификација, се воведува логика на одлучување базирана на бројот и интензитетот на индикаторите што се наоѓаат во зона на отстапување или критична зона. Доколку еден индикатор покажува мало отстапување, се препорачува следење на состојбата. Меѓутоа, доколку истиот индикатор ги надминува критичните гранични вредности, потребна е детална проверка на системот. Во случај кога два до три индикатори покажуваат отстапување, исто така се препорачува детална проверка. Доколку повеќе индикатори се во критична зона, системот се класифицира како небезбеден за понатамошна употреба. Условите и препорачаните мерки за постапување се прикажани во Табела бр. 7.1. Визуелната интерпретација на истата логика на одлучување е прикажана преку блок-дијаграмот даден на слика бр. 8.1. Алгоритмот за донесување одлука е формулиран преку АКО-ТОГАШ (*анг. IF-THEN*) логика, со цел да се овозможи јасно дефинирана интерпретација на индикаторите.

Логиката на одлучување може да се сумира на следниов начин (слика бр. 8.1):

- Доколку (*анг. IF*) еден индикатор е во зона на отстапување, тогаш (*анг. THEN*) се препорачува следење на состојбата;
- Доколку (*анг. IF*) еден индикатор е во критична зона, тогаш (*анг. THEN*) се препорачува детална проверка;

- Доколку (анг. *IF*) два до три индикатори се во зона на отстапување или критична зона, тогаш (анг. *THEN*) се препорачува детална проверка;
- Доколку (анг. *IF*) повеќе од три индикатори се во критична зона, тогаш (анг. *THEN*) системот се класифицира како небезбеден за понатамошна употреба;



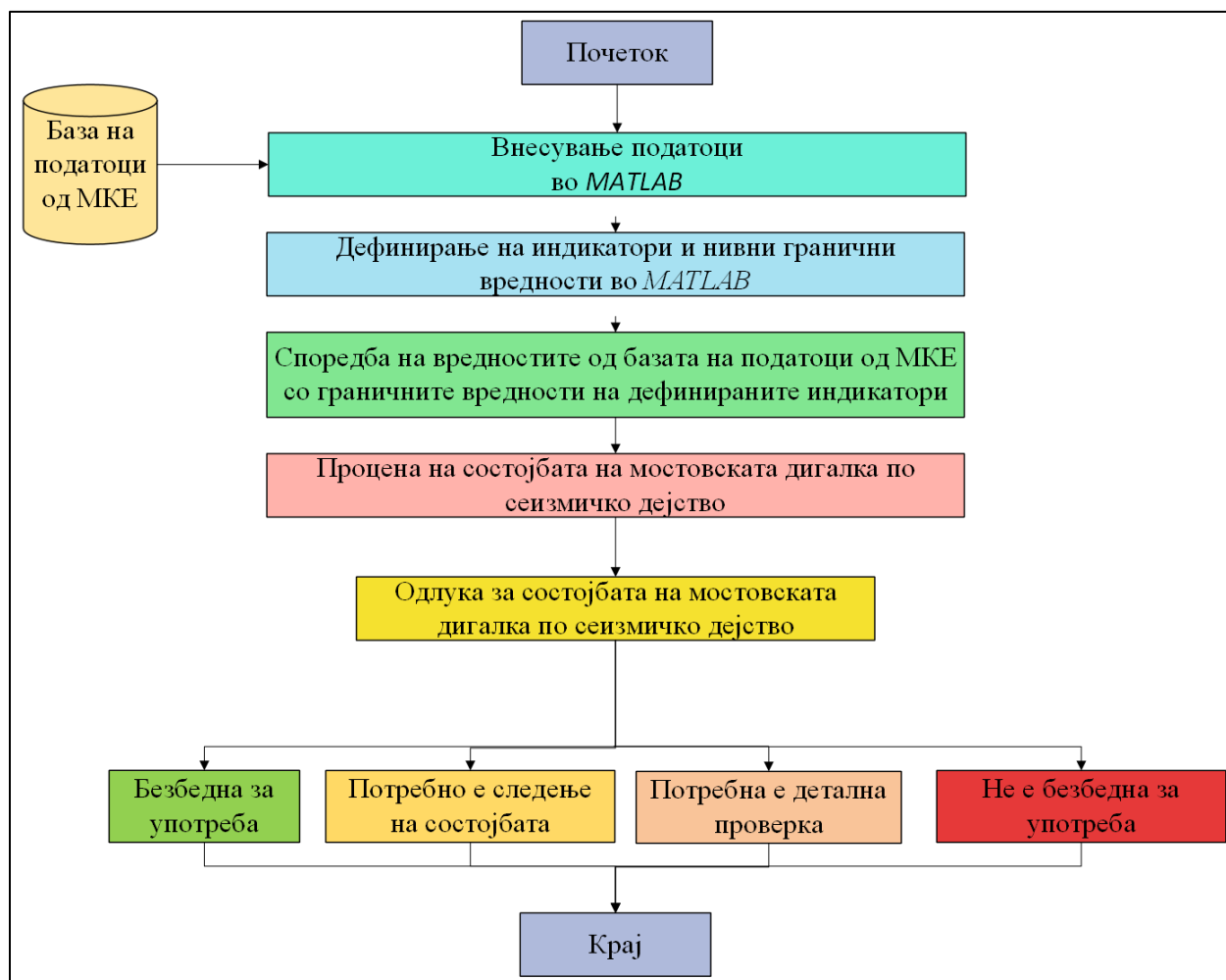
Слика бр. 8.1 Блок-дијаграм на алгоритмот за донесување одлука врз основа на индикаторите

8.2. MATLAB-алатка за процена

Со цел практична примена на предложената логика на одлучување, развиена е алатка во *MATLAB*. Алатката овозможува обработка на влезните податоци, пресметка и класификација на индикаторите, како и брзо донесување на конечната одлука за состојбата на мостовската дигалка по сеизмичко дејство.

Развиената алатка претставува практична имплементација на методологијата дефинирана во претходните поглавја. Во неа се вметнати избраните индикатори, нивните гранични вредности и правилата за одлучување дадени на слика бр. 7.7. На тој начин се овозможува резултатите добиени од нумеричките анализи да се претворат во оценка на постсеизмичката состојба на мостовската дигалка.

Алатката е организирана во неколку последователни чекори: внесување на податоците; пресметка на индикаторите, односно обработка на резултатите при што од нумеричките податоци се извлекуваат параметри што ја опишуваат состојбата на системот, споредба со гранични вредности, примена на логиката на одлучување и приказ на конечниот излез (слика 8.2.). Деталниот опис на овие чекори е даден во следните потточки.



Слика бр. 8.2 Шематски приказ на алгоритмот на алатката за постсеизмичка процена на состојбата на мостовска дигалка

8.2.1. Влезни податоци

Влезните податоци претставуваат основа за пресметка на избраните индикатори во *MATLAB*-алатката. Тие се добиваат како резултат од нумеричките динамички анализи спроведени во *ANSYS*.

Во овој истражувачки труд, како влезни податоци се користат временски записи и изведени параметри кои го опишуваат динамичкото однесување на системот, и тоа:

- временски записи на забрзување $a(t)$
- временски записи на поместување $u(t)$
- временски записи на еквивалентното напрегање $\sigma(t)$
- временски записи на хоризонталните поместувања по X -оската на товарот и количката

Од наведените податоци, во алатката се пресметуваат соодветните индикатори дефинирани во Поглавје 7. Покрај наведените податоци, како влезни параметри се земаат предвид и карактеристиките на работното сценарио, кои имаат значително влијание врз динамичкиот одговор на системот, и тоа:

- положбата на количката вдолж носечката конструкција,
- масата на висечкиот товар, доколку постои.

Овие параметри не се користат директно во пресметката на индикаторите, но имаат влијание врз споредбата на внесените податоци со референтите вредности за соодветните индикатори.

8.2.2. Алгоритам

Алгоритамот во *MATLAB*-алатката претставува дел од предложената методологија и врши пренесување на влезните податоци во конечна инженерска одлука. Алгоритамот се заснова на обработка на податоците, пресметка на индикаторите и нивна класификација во однос на дефинираните гранични вредности. Како што веќе е спомнато, алгоритамот е составен од неколку последователни чекори:

➤ **Чекор 1:** Вчитување на влезни податоци

Во првиот чекор се внесуваат бараните податоци добиени од нумеричките симулации во *ANSYS*. Во случај кога нема висечки товар, индикаторот за осцилации на товарот не се зема предвид при конечната класификација, бидејќи не постои.

➤ **Чекор 2:** Пресметка на индикаторите

Во овој чекор, врз основа на влезните податоци се определуваат вредностите на избраните индикатори. За секој индикатор се врши споредба со соодветната референтна вредност и се пресметува неговата релативна промена во однос на референтната состојба.

➤ **Чекор 3:** Класификација на индикаторите

Во чекор 3, врз основа на пресметаната релативна промена за секој индикатор се определува за какви промени станува збор, односно:

- без отстапувања (индикаторите се со вредности помали или еднакви со граничните вредности)
- мали отстапувања до 10%
- средни отстапувања над 10% до 25% и
- големи отстапувања (над 25%)

➤ **Чекор 4:** Комбинирана анализа на индикаторите

Во овој чекор, врз основа на класификацијата од претходниот чекор, индикаторите се разгледуваат заеднички. Се определува колку индикатори покажуваат мали, средни или големи отстапувања. Добиените резултати се користат во следниот чекор за донесување на конечната одлука за состојбата на мостовската дигалка.

➤ **Чекор 5:** Донесување на одлука (*IF – THEN* логика)

Врз основа на видот на промените и бројот на индикаторите кај кои тие се појавуваат, се донесува конечната одлука за состојбата на мостовската дигалка. За таа цел се применува следната логика на одлучување:

- доколку кај индикаторите не се утврдени отстапувања, состојбата на мостовската дигалка се оценува како прифатлива за понатамошна употреба;
- доколку еден индикатор покажува мало отстапување, потребно е следење на состојбата;
- доколку два или повеќе индикатори покажуваат мали отстапувања, потребна е детална проверка;
- доколку еден или повеќе индикатори покажуваат средни отстапувања, потребна е детална проверка;
- доколку еден или повеќе индикатори покажуваат големи отстапувања, мостовската дигалка се оценува како небезбедна за понатамошна употреба.

8.2.3. Интерфејс и имплементација

Развиената *MATLAB*-алатка е имплементирана како едноставен, но функционален графички интерфејс кој овозможува внесување на влезните податоци, нивна брза обработка и донесување на конечна одлука за состојбата на мостовската дигалка по сеизмичко дејство.

Во горниот дел од интерфејсот се внесуваат параметрите, положба на товарот, маса на товарот, како и потребните податоци добиени од *ANSYS* динамичките симулации со сеизмичко дејство. Во позадина *MATLAB* кодот врши проверка на тие внесени податоци со референтните вредности за секој од нив. По активирање на командата за пресметка, алатката ги обработува податоците, ги класифицира индикаторите и врз основа на дефинираната логика донесува конечна одлука.

Резултатот од процената се прикажува визуелно преку порака, придружена со соодветна боја која ја означува состојбата на мостовската дигалка по сеизмичко дејство. Зелената боја означува безбедна состојба, жолтата укажува на потреба од следење, портокаловата на потреба од детална проверка, додека црвената боја означува небезбедна состојба за понатамошна употреба на мостовската дигалка.

Визуелниот изглед на интерфејсот и начинот на внесување и приказ на резултатите се прикажани на слика бр. 8.3, слика бр. 8.4, слика бр. 8.5 и слика бр. 8.6, при што за појасно претставување се дадени три карактеристични случаи:

- слика бр. 8.3 – состојба во која сите индикатори се во нормална зона, па мостовската дигалка се класифицира како безбедна за употреба;
- слика бр. 8.4 – состојба со присутни отстапувања кај 1 или 2 индикатори и се препорачува следење на состојбата на мостовската дигалка;
- слика бр. 8.5 – состојба со присутни отстапувања кај дел од индикаторите и се препорачува детална проверка;
- слика бр. 8.6 – состојба во која повеќе индикатори се во критична зона со што мостовската дигалка се класифицира како небезбедна за употреба;

Алатка за постсеизмичка процена на мост...

АЛАТКА ЗА ПОСТСЕИЗМИЧКА ПРОЦЕНА

Положба на количката: 3

Маса на товарот: 2 t

RMS: 1 m/s²

Макс. забрзување: 2 m/s²

Макс. поместување: 0.5 mm

Макс. еквив. напрегање: 20 MPa

Енергетски индикатор: 1 m²/s³

Осцилации на товарот: 0.2 mm

Пресметај состојба

СОСТОЈБАТА Е ПРИФАТЛИВА ЗА ПОНАТАМОШНА УПОТРЕБА

Слика бр. 8.3 Излез од алатката *MATLAB* во случај кога мостовската дигалка е безбедна за употреба

Алатка за постсеизмичка процена на мост...

АЛАТКА ЗА ПОСТСЕИЗМИЧКА ПРОЦЕНА

Положба на количката: 3 ▼

Маса на товарот: 7 t ▼

RMS: 1 m/s²

Макс. забрзување: 1 m/s²

Макс. поместување: 1 mm

Макс. еквив. напрегање: 120 MPa

Енергетски индикатор: 1 m²/s³

Осцилации на товарот: 0.5 mm

Пресметај состојба

ПОТРЕБНО Е СЛЕДЕЊЕ НА СОСТОЈБАТА

Слика бр. 8.4 Излез од алатката *MATLAB* во случај кога е потребно следење на состојбата на мостовската дигалка

Алатка за постсеизмичка процена на мост...

АЛАТКА ЗА ПОСТСЕИЗМИЧКА ПРОЦЕНА

Положба на количката: 3 ▼

Маса на товарот: 2 t ▼

RMS: 3 m/s²

Макс. забрзување: 1 m/s²

Макс. поместување: 2 mm

Макс. еквив. напрегање: 180 MPa

Енергетски индикатор: 2 m²/s³

Осцилации на товарот: 2 mm

Пресметај состојба

ПОТРЕБНА Е ДЕТАЛНА ПРОВЕРКА

Слика бр. 8.5 Излез од алатката *MATLAB* во случај кога е потребна детална проверка на мостовската дигалка

Алатка за постсеизмичка процена на мост...

АЛАТКА ЗА ПОСТСЕИЗМИЧКА ПРОЦЕНА

Положба на колинката: 3 ▼

Маса на товарот: Без товар ▼

RMS: 1 m/s²

Макс. забрзување: 1 m/s²

Макс. поместување: 3 mm

Макс. еквив. напрегање: 280 MPa

Енергетски индикатор: 3 m²/s³

Осцилации на товарот: 0 N/A

Пресметај состојба

МОСТОВСКАТА ДИГАЛКА НЕ Е БЕЗБЕДНА ЗА ПОНАТАМОШНА УПОТРЕБА

Слика бр. 8.6 Излез од алатката *MATLAB* во случај кога дигалката не е безбедна за употреба

9. ДИСКУСИЈА

Во ова поглавје се дискутираат резултатите добиени од експерименталните мерења, нумеричките анализи и предложената методологија за проценка на состојбата на мостовската дигалка. За разлика од претходните поглавја, каде што резултатите се разгледуваат одделно, во ова поглавје тие се разгледуваат заедно, со цел да се направи споредба и да се оцени нивната примена.

9.1. Дискусија на резултатите од експерименталното модално испитување и верификацијата на моделот

Со експерименталното модално испитување се добиени податоци за динамичкото однесување на мостовската дигалка и нејзините облици на вибрирање при различни работни услови. Со обработката и анализата на измерените сигнали се определени доминантните фреквенции и карактеристиките на одговорот на конструкцијата. Добиените експериментални резултати се основа за формирање на нумеричкиот модел на мостовската дигалка.

Од збирната анализа на резултатите прикажани во Табелите бр. 4.3÷4.5 забележливо е дека динамичкиот одговор на конструкцијата зависи од положбата и масата на товарот, како и од мерната позиција. Ваквото однесување е во согласност со претходни експериментални истражувања, кои покажуваат дека распределбата на масата и положбата на товарот имаат значително влијание врз природните фреквенции и модалниот одговор на мостовските дигалки (*Oguamanam & Hansen, 1998*). Доминантните фреквентни компоненти идентификувани во анализата овозможуваат определување на природните фреквенции на конструкцијата, додека со споредба на измерените вредности во различните мерни позиции може да се согледаат нејзините облици на вибрирање. Сличен пристап за идентификација на модалните параметри преку анализа на вибрациони сигнали е применет и во претходни истражувања (*Yildirim & Esim, 2020*).

Од резултатите прикажани во Поголавје 4 може да се забележи дека во состојба без товар, првиот глобален облик на вибрирање е идентификуван на фреквенција од околу 6.84 Hz, додека при товар од 2t и 7t се јавува на пониски фреквенции, главно околу 3.42 Hz. Во анализираните случаи, првиот глобален облик најјасно се регистрира во мерната позиција 3 (L/2), каде што се забележуваат и повисоки амплитуди во споредба со крајните мерни позиции.

Една од карактеристиките што произлегува од анализата на резултатите е дека фреквенцијата поврзана со првиот глобален облик на вибрирање (3.42 Hz) не секогаш има највисока амплитуда во сите мерни позиции, особено во крајните делови на главниот носач. Ова не претставува отстапување во мерењето, туку се должи на просторна распределба вдоль конструкцијата.

Иако природните фреквенции се глобални карактеристики на мостовската дигалка и се однесуваат на целата конструкција, нивната манифестација во мерните сигнали зависи од локалната амплитуда на соодветниот модален облик.

Забележено е и дека малите амплитуди на измерените сигнали и присуството на шум придонесуваат првиот глобален облик на вибрирање да не биде секогаш јасно издвоен во мерните позиции 1 и 5.

Оттука, може да се заклучи дека отсуството на доминантен пик 3.42 Hz во одредени мерни позиции не значи дека овој облик на вибрирање не е присутен, туку дека неговото учество во локалниот одговор е помало во споредба со другите модални компоненти. Ова ја потврдува потребата од внимателен избор на мерни позиции при модална анализа, при што средината на распонот се покажува како најсоодветна точка за сигурна идентификација на глобалните динамички карактеристики на конструкцијата.

На слика бр. 9.1 е прикажана зависноста помеѓу масата на подигнатиот товар и доминантната природна фреквенција на конструкцијата, добиена од експерименталната анализа на сигналите на вертикалното забрзување.

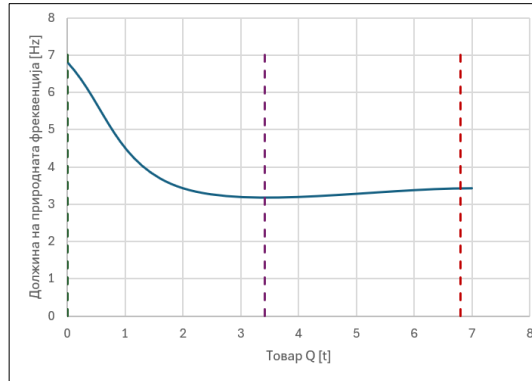
Од графикот може да се забележи дека при премин од сценариото без товар кон сценариото со товар од $2t$, природната фреквенција се намалува од приближно 6.8 Hz на околу 3.4 Hz . При понатамошно зголемување на товарот до $7t$, фреквенцијата на првиот глобален облик останува приближно иста ($\approx 3.4\text{ Hz}$), односно не се забележува значителна промена во однос на товарот од $2t$.

Овие резултати потврдуваат дека првиот глобален облик на вибрирање на главниот носач на мостовската дигалка е релативно стабилен, додека варијациите во природната фреквенција главно се должат на промената на ефективната маса на мостовската дигалка.

Во целина, добиените експериментални резултати не претставуваат невообичаено или неочекувано однесување, туку се во согласност со теоретските принципи на динамиката на конструкции и со резултатите од претходни истражувања во оваа област.

Конзистентната појава на првиот глобален облик на вибрирање во нискофреквентниот опсег, неговата најизразена манифестација во средината на распонот, како и доминацијата на повисоките облици на вибрирање во крајните делови, ја потврдуваат валидноста на експерименталниот пристап.

Може да се заклучи дека добиените резултати не само што се физички оправдани, туку обезбедуваат и сигурна основа за понатамошна анализа, нумеричка верификација и развој на методологија за процена на состојбата на мостовската дигалка.



Слика бр. 9.1 Влијание на масата на товарот врз првата природна фреквенција на главниот носач

9.2. Дискусија на резултатите од експерименталното статичко испитување

Во однос на статичката анализа, добрата усогласност помеѓу нумеричките и експерименталните резултати дополнително ја потврдува точноста на моделот. Ова е важно бидејќи статичкото однесување претставува основа за разбирање на динамичките карактеристики на мостовската дигалка. Резултатите од нумеричката анализа, заедно со нивната споредба со експерименталните мерења, покажуваат дека моделот во голема мера успешно го опишува целокупното динамичко однесување на мостовската дигалка. Особено добра согласност се забележува кај првите глобални облици на вибрирање, што укажува дека клучните параметри на моделот, како што се масата, крутоста и граничните услови, се правилно поставени.

Исто така, резултатите покажуваат дека начинот на моделирање на системот за дигање на товарот кај мостовската дигалка значително влијае на добиените резултати. Ова особено се однесува на претставувањето на системот количка и товар, при што различни пристапи можат да доведат до различен динамички одговор. Затоа, моделот кој покажува најдобра согласност со експерименталните резултати во сите сценарија може да се смета за најсоодветен за понатамошни анализи.

Во целина, може да се заклучи дека нумеричкиот модел дава сигурна слика за целокупното однесување на мостовската дигалка. Иако постојат одредени ограничувања, особено кај повисоките облици на вибрирање и локалните влијанија, тие не ја намалуваат неговата применливост за инженерска анализа и процена на состојбата на мостовската дигалка.

Треба да се напомене дека анализираната мостовска дигалка е поставена во експлоатација во 1980 година и повеќе од четири децении успешно се користи. И покрај нејзината старост, експерименталните мерења и нумеричките анализи покажуваат дека конструкцијата и понатаму поседува задоволителни динамички карактеристики.

Една од можните причини за ваквото проектирање може да се бара во тогашната инженерска практика, кога индустриските конструкции често се проектирале со поголем степен на сигурност и поконзервативен пристап при димензионирањето. Позитивна страна на ваквиот пристап е повисоката безбедност и надежност на конструкцијата, особено при непредвидени оптоварувања. Исто така, предимезионирањето резултира со поголема сопствена маса, што може да доведе до зголемување на инерцијалните сили при динамички и сеизмички дејства. И покрај нејзината старост, експерименталните мерења и нумеричките анализи покажуваат дека конструкцијата и понатаму поседува задоволителни динамички карактеристики. Ова укажува дека староста сама по себе не е доволен показател за намалена безбедност, туку состојбата на конструкцијата треба да се оценува врз основа на инженерски анализи и експериментални испитувања.

Од друга страна, треба да се има предвид дека анализираната мостовска дигалка не работи континуирано во производствен процес, туку се користи во лабораториски услови во ИЗИИС. Поради тоа, бројот на работни циклуси е значително помал во споредба со мостовските дигалки кои секојдневно работат во индустриски погони или магацини, што веројатно придонело за зачувување на конструкцијата. Треба да се истакне дека важен параметар при интерпретација на добиените резултати е бројот на работни циклуси што влијае врз надежноста на конструкцијата.

Методологијата што е предложена е особено корисна токму за вакви случаи, односно, конструкции со постар датум, кај кои одлуката дали можат безбедно да продолжат со експлоатација не треба да се темели само на нивната старост, туку на реална инженерска процена заснована на експериментални и нумерички анализи.

9.3. Дискусија на резултатите од динамичката анализа

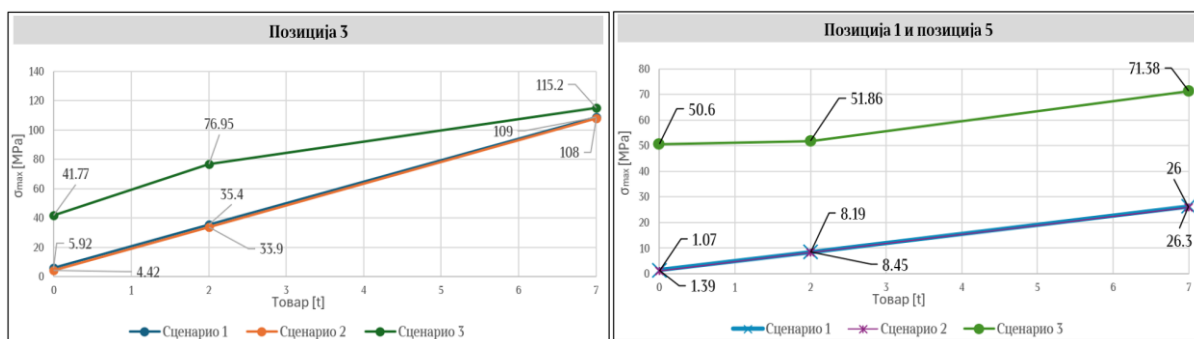
Резултатите од динамичката нумеричка анализа овозможуваат подетално согледување на однесувањето на мостовската дигалка при различни услови на оптоварување и различни нивоа на сеизмичко дејство. За разлика од експерименталната модална анализа, која овозможува определување на природните динамички карактеристики на конструкцијата, временската динамичка анализа во *ANSYS* обезбедува увид во реалниот одговор на системот при дејство на реален земјотресен запис.

Еден од најзначајните заклучоци произлегува од анализата на вертикалните поместувања. Независно од положбата на количката и големината на товарот, најголемите вертикални поместувања се јавуваат во средината на главниот носач, што укажува дека токму оваа зона претставува најкритичен дел од конструкцијата. Ова потврдува дека севкупното свиткување на главниот носач има најголемо влијание врз динамичкиот одговор на мостовската дигалка, додека положбата на товарот влијае пред сè врз распределбата на поместувањата и напрегањата.

Од резултатите прикажани во Табела бр. 6.1 може да се забележат одредени сличности и отстапувања помеѓу анализираните случаи. Пред сè, резултатите добиени за позициите 1 и 5 се речиси исти кај сите анализирани сценарија. Ова е очекувано а произлегува од геометриската симетрија на конструкцијата, симетрично дефинираните гранични услови и еднаквата распределба на масата.

Од друга страна, поставувањето на количката во средината на распонот (позиција 3) резултира со најголеми вертикални поместувања и највисоки еквивалентни напрегања во сите анализирани случаи. На пример, при силно сеизмичко дејство и товар од 7t е добиено максимално вертикално поместување од 18.88 mm и максималното еквивалентно (*Von Mises*) напрегање од 115.20 MPa, што претставува најнеповолен анализиран случај во ова истражување. Во однос на соодветното референтно сценарио без сеизмичко дејство, максималното еквивалентно напрегање е зголемено за околу 5.7%. Кај товар од 2t во средината на распонот, напрегањето при силно сеизмичко дејство е приближно 2.2 пати поголемо од референтната вредност, додека во случајот без товар е приближно 7 пати поголемо. Овие резултати покажуваат дека релативното влијание на сеизмичкото дејство врз максималното еквивалентно напрегање е поизразено кај помалите товари, додека со зголемување на товарот релативната промена на напрегањето се намалува.

Од друга страна, кај крајните позиции 1 и 5, влијанието на силното сеизмичко дејство е повторно најизразено во случајот без товар. Кај товар од 2t, максималното еквивалентно напрегање е приближно 6 пати поголемо во однос на референтната состојба, додека кај товар од 7t е околу 2.7 пати поголемо. Од споредбата на Сценарио 1 и Сценарио 2 може да се забележи дека добиените вредности се многу блиски за сите анализирани товари, што укажува на мало влијание на послабото сеизмичко дејство врз максималното еквивалентно напрегање. На слика бр. 9.2 е прикажана зависноста на максималното еквивалентно напрегање од товарот за трите анализирани сценарија во позициите 1, 3 и 5.



Слика бр. 9.2 Максимално еквивалентно напрегање за различни сценарија – позиции 1, 3 и 5

И покрај значителното зголемување на динамичкиот одговор при повисоки товари и посилно сеизмичко дејство, максималните еквивалентни напрегања добиени во сите анализирани случаи остануваат под границата на течење на конструктивниот челик S235 (235

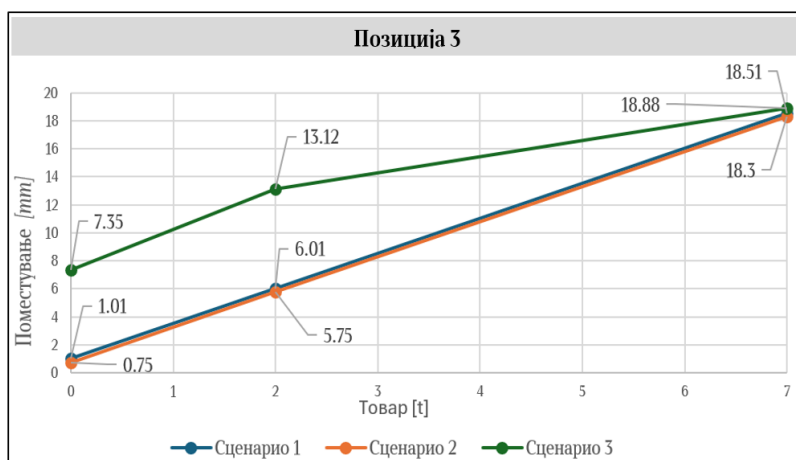
MPa). Ова укажува дека конструкцијата работи во еластичната област и дека во анализираните сценарија не се очекува појава на пластични деформации.

Особено е значајно што резултатите покажуваат дека критичната зона на конструкцијата останува иста, независно од положбата на количката. Овој заклучок има значење, бидејќи укажува дека средината на главниот носач треба да претставува примарна зона при инспекциите, мониторингот и процената на состојбата по евентуално сеизмичко дејство. Истовремено, резултатите покажуваат дека позицијата на количката влијае врз распределбата на локалните деформации и напрегања, но не ја менува критичната зона.

На слика бр. 9.3 е прикажано максималното вертикално поместување во трите сценарија за позиција 3, односно во средината на распонот, каде што се регистрирани најголемите вертикални поместувања. Од графикот може да се забележи дека резултатите за Сценарио 1 и Сценарио 2 се многу блиски. Ова покажува дека послабото сеизмичко дејство не предизвикува значителна промена на максималното вертикално поместување во однос на референтната состојба.

Кај Сценарио 3 се забележуваат поголеми вертикални поместувања, особено во состојба без товар и при товар од 2t. Без товар, поместувањето се зголемува од 1.01 mm на 7.35 mm, додека при товар од 2t се зголемува од 6.01 mm на 13.12 mm. Ова укажува на поизразено влијание на силното сеизмичко дејство во овие две работни состојби.

При товар од 7t, вредностите за трите сценарија изнесуваат 18.51 mm, 18.30 mm и 18.88 mm. Во овој случај, големиот товар има доминантно влијание врз максималното вертикално поместување, поради што дополнителното влијание на сеизмичкото дејство врз максималната вредност е релативно мало.



Слика бр. 9.3 Максималното вертикално поместување за различни сценарија – позиции 1, 3 и 5

Значењето на ваквите анализи е особено важно ако се земе предвид дека голем број мостовски дигалки се во употреба повеќе децении и низ годините се направени

модификации на нивните конструкции. Поради тоа, потребно е периодично да се проценува нивната состојба и способноста за безбедна понатамошна употреба.

9.4. Дискусија на избраните индикатори и нивната примена во MATLAB-алатката

Еден од клучните аспекти во предложената методологија не е само изборот на индикаторите, туку начинот на нивна интерпретација и нивната заедничка примена. Секој индикатор поединечно има свои вредности со кои ја опишува состојбата на мостовската дигалка, а подоцна со сублимирање на сите индикатори се добиваат зони на одлука кои ни даваат детален приказ за постсеизмичката состојба на мостовската дигалка.

Од резултатите може да се забележи дека индикаторите не реагираат подеднакво на сите промени во системот. Така, индикаторите за осцилации на товарот покажуваат релативно стабилно однесување и се чувствителни претежно на поголеми промени во масата или крутоста. Наспроти тоа, индикаторите *RMS*, максимално забрзување и поместување, индикаторот за максимално еквивалентно напрегање и енергетскиот индикатор имаат поголеми рангови на вредности и се директно поврзани со степенот на динамичкото возбудување. Ова укажува дека секој индикатор разгледува различни аспекти од анализата на постсеизмичката состојба на мостовската дигалка.

Во таа насока, значајно е да се истакне дека не секое отстапување кај индикаторите значи и реална промена во состојбата на конструкцијата. На пример, зголемување на *RMS* или максималното забрзување може да биде резултат на поголемо оптоварување, а не на оштетување. Поради тоа, процената се врши врз основа на повеќе индикатори, а не само на еден параметар. На тој начин се добива пообјективна слика за состојбата на мостовската дигалка. Овој концепт е директно имплементиран во MATLAB-алатката, каде индикаторите не претставуваат само излезни параметри, туку активни елементи во процесот на донесување одлука. Преку дефинираната логика, алатката не само што ги пресметува индикаторите, туку ги трансформира нивните вредности во категории. Со тоа се преминува од класична анализа на резултати кон практична алатка за проценка.

Алатката ги обработува избраните индикатори и дава јасна препорака дали дигалката може да продолжи со употреба, дали е потребно следење, детална проверка или прекин на работа на мостовската дигалка. Во целина, може да се заклучи дека избраните индикатори не треба да се разгледуваат како конечна цел, туку како средство за добивање на појасна слика за однесувањето на мостовската дигалка.

Од извршеното истражување може да се заклучи дека добиените резултати претставуваат солидна основа за проценка на однесувањето на мостовската дигалка под различни услови на оптоварување и сеизмичко дејство. Согласноста помеѓу експерименталните и нумеричките резултати ја потврдува валидноста на применетиот модел, додека динамичката анализа овозможува идентификација на критичните состојби и параметри кои најмногу влијаат врз одговорот на мостовската дигалка. Дополнително, интегрираната примена на индикаторите

и нивната имплементација во *MATLAB*-алатката овозможуваат премин од класична анализа кон практична и систематизирана процена на состојбата. На овој начин, предложената методологија не само што обезбедува подобро разбирање на однесувањето на мостовската дигалка, туку и претставува применлив инженерски пристап за донесување одлуки во реални услови.

10. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ ЗА ПОНАТАМОШНИ ИСТРАЖУВАЊА

10.1. Главни резултати и верификација на хипотезите

Во рамките на овој докторски труд е развиена и применета интегрирана методологија за анализа и процена на состојбата на мостовска дигалка по сеизмичко дејство, која ги поврзува експерименталните мерења, нумеричкото моделирање и обработката на резултатите во единствен систем за донесување одлуки.

Резултатите од експерименталните испитувања покажуваат дека динамичките карактеристики на конструкцијата зависат од работната состојба на мостовската дигалка. Во состојба без товар, првиот глобален облик на вибрирање е идентификуван на фреквенција од приближно 6.84 Hz, додека при товар од $2t$ и $7t$ се јавува на пониска фреквенција, главно околу 3.42 Hz. Истовремено, е утврдено дека масата и позицијата на товарот влијаат врз динамичкиот одговор, но без значително менување на целокупните карактеристики на конструкцијата.

Развиениот нумерички модел има добра совпаѓливост со експерименталните резултати, особено кај пониските облици на вибрирање, што ја потврдува неговата валидност. Динамичката анализа овозможува идентификација на критичните состојби, при што е утврдено дека одговорот на системот значително зависи од интензитетот и карактеристиките на сеизмичкото дејство, како и од присуството на товарот.

Дополнително, дефиниран е сет на индикатори преку кои сложениот одговор на системот се претвора во мерливи параметри, а нивното поврзување во *MATLAB*-алатка овозможува автоматизирана и објективна процена на состојбата.

Во рамките на истражувањето се поставени следните хипотези, кои се верифицирани врз основа на добиените резултати:

- **Хипотеза 1:** Интегрираната примена на нумерички модели и експериментална модална анализа овозможува попрецизна процена на однесувањето на системот. **Потврдена.** Комбинираната примена на експерименталните испитувања и нумеричкото моделирање овозможува подобро согледување на динамичкото однесување на мостовската дигалка. Со експерименталната модална анализа се определени природните фреквенции и облиците на вибрирање на конструкцијата кои се искористени за проверка и подобрување на нумеричкиот модел. Споредбата на експерименталните и нумеричките резултати покажуваат задоволителна усогласеност, со што е потврдена применливоста на развиениот модел за понатамошните анализи. На овој начин, експерименталните резултати обезбедуваат реална основа за верификација на моделот, додека нумеричкиот модел овозможува анализа на однесувањето на мостовската дигалка при различни работни и сеизмички услови.
- **Хипотеза 2:** Нумеричкиот модел со доволна точност го репродуцира реалното однесување на конструкцијата.

Делумно потврдена. Добра усогласност е постигната кај глобалните облици на вибрирање, при што отстапувањата се во опсег од приближно 5÷11%, додека кај повисоките облици на вибрирање се јавуваат поголеми отстапувања.

➤ **Хипотеза 3:**

Карактеристиките на сеизмичкото дејство имаат значително влијание врз динамичкиот одговор.

Потврдена. Сеизмичките записи имаат директно и значајно влијание врз динамичкиот одговор на системот, при што нивните карактеристики, како што се амплитудата, фреквентната содржина и времетраењето, влијаат врз големината на поместувањата и напрегањата во конструкцијата. Особено е забележано дека при сеизмички записи со поголем интензитет или со фреквентна содржина блиска до сопствените фреквенции на системот, доаѓа до значително зголемување на амплитудата на одговорот. Како резултат на тоа, во вакви услови се јавуваат критични состојби, кои можат да доведат до надминување на дозволените напрегања. Сепак, во рамките на анализираниот сценариј во овој докторски труд не се евидентирани критични состојби, односно добиените максимални, еквивалентни напрегања остануваат под границата на течење на конструктивниот челик S235.

➤ **Хипотеза 4:** Предложената методологија претставува практична алатка за процена на состојбата.

Потврдена. Развиената MATLAB-алатка овозможува систематска процена на состојбата на мостовската дигалка преку заедничка анализа на избраните индикатори. Врз основа на внесените податоци, вредностите на индикаторите се споредуваат со соодветните референтни вредности за избраниот товар и положба на количката, по што се определуваат нивните промени и се врши класификација според дефинираните гранични вредности. Потоа, преку дефинираната логика на одлучување, резултатите од сите индикатори се разгледуваат заеднички и се добива конечна оценка за постсеизмичката состојба на мостовската дигалка. На овој начин, резултатите од нумеричките анализи се претвораат во зони за одлучување за понатамошна употреба, следење на состојбата, детална проверка или прекин на употребата.

10.2. Придонес

10.2.1. Научен придонес

Научниот придонес на овој труд се состои во развојот на интегриран пристап кој ги поврзува експерименталните мерења, нумеричкото моделирање и процената на состојбата во единствена методологија.

Особено значајно е воспоставувањето на врска помеѓу динамичката анализа и практичната процена преку индикатори, што претставува нов пристап во анализата на постсеизмичката состојба на мостовските дигалки.

Дополнителен придонес претставува:

- верификација на нумерички модел врз реални мерења, со што е овозможено негово понатамошно користење за анализа на различни работни и сеизмички сценарија;
- анализата на динамичкото однесување на мостовската дигалка при различни товари, положби на количката и нивоа на сеизмичко дејство, со што е овозможено согледување на влијанието на овие параметри врз состојбата на мостовската дигалка по сеизмичко дејство;
- изборот и примената на индикатори за процена на постсеизмичката состојба на мостовската дигалка, преку кои различните аспекти на динамичкиот одговор на конструкцијата и товарот се разгледуваат заедно;
- дефинирањето на референтни вредности за избраните индикатори, кои претставуваат основа за споредба и овозможуваат да се утврдат промените во состојбата на мостовската дигалка по сеизмичко дејство;
- развојот на алгоритам за комбинирана анализа на индикаторите и донесување одлука, преку кој поединечните резултати се обединуваат во конечна процена на состојбата;
- примена на предложената методологија во MATLAB алатка, со што развиениот пристап е претворен во применлива постапка за процена на постсеизмичката состојба на мостовската дигалка;

Исто така, во рамките на истражувањето се укажува на недостатокот на конкретни нормативни насоки за процена на состојбата на мостовските дигалки по сеизмичко дејство. Поради тоа, се јавува потреба од развој на појасни критериуми врз основа на кои може да се оцени дали настанатите промени се прифатливи и дали мостовската дигалка може безбедно да продолжи со работа.

Потребата од вакви насоки дополнително се зголемува имајќи ги предвид различните природни влијанија на кои индустриските објекти и опремата можат да бидат изложени во текот на нивниот работен век. Климатските промени и појавата на екстремни временски услови, од една страна, и сеизмичките дејства предизвикани од тектонските процеси, од друга страна, укажуваат на потребата овие влијанија соодветно да се разгледуваат при процената на сигурноста на постојните индустриски системи.

Ова е особено значајно за мостовските дигалки, кои претставуваат составен дел од голем број индустриски објекти и често остануваат во употреба повеќе децении и врз кои се извршени модификации во текот на времето. Дополнително значење има примената на вакви постапки во сеизмички активни региони, каков што е и регионот на Р. Северна Македонија, каде геотектонската положба и активните тектонски процеси условуваат постоење на сеизмичка опасност. Оттука, покрај барањата за проектирање и редовна експлоатација, значајно е нормативните документи во иднина да опфатат и појасни постапки за процена на состојбата на ваквите системи по сеизмичко дејство.

10.2.2. Практичен придонес

Практичната вредност на трудот се огледа во можноста предложената методологија да се примени во реални услови.

Развиената *MATLAB*-алатка овозможува:

- обработка на резултатите
- пресметка на индикаторите
- автоматска процена на состојбата

На овој начин, резултатите од нумеричките анализи се претвораат во јасна препорака за понатамошно постапување со мостовската дигалка. Предложената методологија може да има практична примена при периодичните инспекции на мостовските дигалки, како дополнување на вообичаените постапки за проверка. Со споредба на тековните вредности на избраните индикатори со претходно утврдените референтни вредности може да се утврди дали настанале промени во однесувањето на конструкцијата. На овој начин, методологијата може да послужи како дополнителна поддршка при процената на состојбата и при одлучувањето дали е потребно понатамошно следење или подетална проверка.

10.3. Насоки за идни истражувања

И покрај добиените резултати и развиената методологија, постојат повеќе насоки за нејзино понатамошно унапредување и проширување.

Една од најзначајните насоки е воведување на нелинеарни модели, кои овозможуваат пореален опис на однесувањето на конструкцијата при поинтензивни оптоварувања. Во рамките на овој труд анализата е спроведена во еластичен домен, каде се претпоставува линеарна зависност помеѓу силите и деформациите. Меѓутоа, при силно сеизмичко дејство може да дојде до појава на пластични деформации, локални оштетувања и намалување на крутоста, што не може целосно да се опфати со ваков пристап. Затоа, примената на нелинеарни материјални и геометриски модели би овозможила попрецизна анализа на критичните состојби и реалното однесување на системот.

Дополнително, подетално моделирање на контактите помеѓу конструктивните елементи, особено помеѓу тркалата на количката и носачите, би придонело за подетално разбирање на конструкцијата.

Во идни истражувања може да се разгледа и примена на различни типови сеизмички записи, со различна фреквентна содржина, времетраење и интензитет, со цел да се добие поцелосна слика за однесувањето на системот во различни сценарија.

Експерименталните испитувања со контролирана динамичка возбуда претставуваат дополнителна насока за истражување, со што би се овозможило попрецизна идентификација на динамичките параметри и подобра валидација на нумеричките модели, во споредба со анализите базирани на амбиентни вибрации.

Понатаму, примената на методи за машинско учење отвора можност за автоматска обработка и интерпретација на податоците, како и за класификација на состојбата на

системот врз основа на повеќе индикатори. Со тоа би се овозможила дополнителна автоматизација и унапредување на предложената алатка.

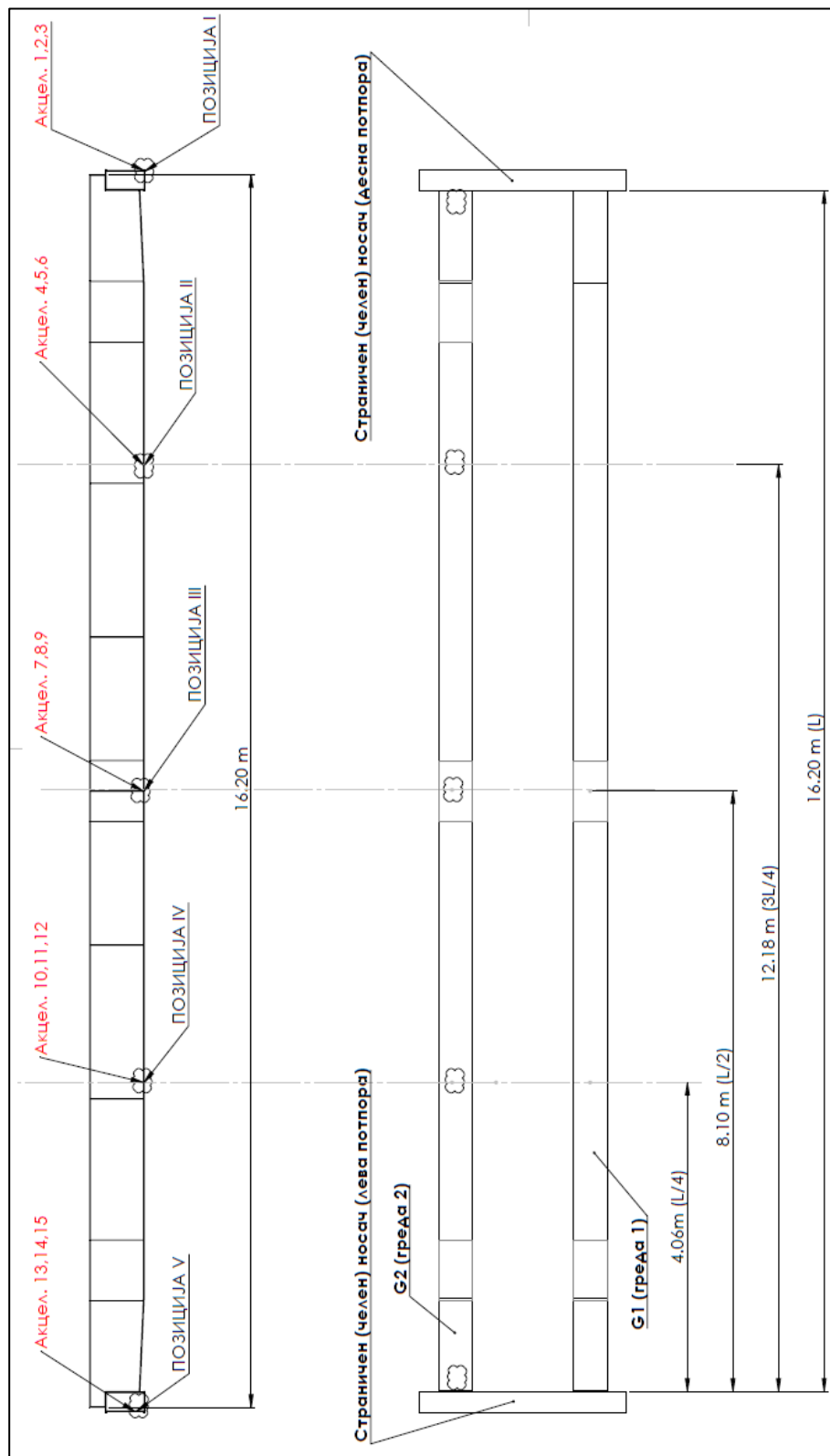
Дополнително, друга насока на истражувањето може да се добие и со развој на дигитален двојник (анг. *Digital Twin*) на мостовската дигалка, кој би овозможил континуирано следење и ажурирање на состојбата на системот во реално време. Ваквиот пристап подразбира спојување на нумеричкиот модел со реални мерни податоци, при што моделот постојано се калибрира врз основа на измерениот одговор. На тој начин, предложената методологија и MATLAB-алатката би можеле да се надградат во систем за следење и дијагностика, кој овозможува навремено откривање на промени и потенцијални оштетувања, како и подобрување на безбедноста и управувањето со системот во текот на неговата експлоатација.

На крај, потребно е да се работи на поврзување на ваквите пристапи во нормативни документи и стандарди, со цел нивна поширока примена во инженерската практика и унапредување на безбедноста на индустриските системи изложени на сеизмичко дејство.

ПРИЛОЗИ

Прилог 1

Шематски приказ на поставеноста на акцелерометрите при експерименталното мерење.



Прилог 2

Линкот овозможува пристап до оригиналните записи од експерименталните мерења, без дополнителна обработка, користени како основа за спроведените анализи во докторскиот труд.

