

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Милица С. Мићић

**УПРАВЉАЊЕ НЕРАВНИНАМА МАЛИХ
ТАЛАСНИХ ДУЖИНА НА ГЛАВИ ШИНЕ**

докторска дисертација

Београд, 2021

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Milica S. Mičić

**MANAGEMENT OF SHORT WAVE
UNEVENNESS OF THE RAIL HEAD SURFACE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021

УПРАВЉАЊЕ НЕРАВНИНАМА МАЛИХ ТАЛАСНИХ ДУЖИНА НА ГЛАВИ
ШИНЕ

Докторска дисертација

Милица С. Мићић
Универзитет у Београду
Грађевински факултет

Ментор: др Зденка Поповић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Чланови Комисије: др Зденка Поповић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

др Драган Петровић, редовни професор,
Универзитет у Крагујевцу, Факултет за машинство и
грађевинарство у Краљеву

др Љиљана Брајовић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

др Лука Лазаревић, доцент,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

др Дејан Вучковић, доцент,
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

ДАТУМ ОДБРАНЕ: _____

Захвалница

Посебну захвалност дугујем менторки, проф. др Зденки Поповић, која ми је пружила подршку током израде Дисертације и несебично преносила научна и стручна знања, као и драгоцену искуства у области научно-истраживачког рада.

Захваљујем члановима Комисије на подршци, као и корисним сугестијама, примедбама и коментарима током израде и прегледа Дисертације.

Захваљујем компанији CNTG d.o.o. из Београда на организовању и спровођењу теренских испитивања у станици Панчево Варош.

Захваљујем запосленима у предузећима Инфраструктура железнице Србије а.д. и Србија Воз а.д. који су омогућили приступ железничкој инфраструктури за потребе теренских испитивања и пружили неопходне податке за израду Дисертације. Посебно захваљујем шефу и особљу станице Панчево Варош на пружању подршке током спровођења експеримента на станичним колосецима под делимичним затвором саобраћаја.

Захваљујем својим родитељима и брату на безрезервној љубави, као и подршци током целокупног процеса образовања и израде Дисертације. Нарочито се захваљујем свом супругу Небојши и ћерки Нини на љубави, стрпљењу и разумевању. Захваљујем се породици свог супруга на пружању несебичне помоћи и разумевању.

Милица Мићић

УПРАВЉАЊЕ НЕРАВНИНАМА МАЛИХ ТАЛАСНИХ ДУЖИНА НА ГЛАВИ ШИНЕ

Сажетак:

Предмет истраживања у Дисертацији су неравнине малих таласних дужина на горњој површи главе шине у додиру са точком железничког возила. Циљ истраживања је развој методологије за управљање неравнинама малих таласних дужина ($\lambda < 1$ m) које настају услед контактнoг замора шинског челика (*RCF*). Управљање неравнинама на возној површи главе шине разматрано је у оквирима одрживог развоја железничке инфраструктуре, уз разматрање захтева корисника, железнице, привреде, животне средине, друштвене заједнице и безбедности транспорта.

Разматрани су узроци појаве и механизам развоја неравнина, са посебним освртом на шинске дефекте који директно угрожавају безбедност железничког транспорта и негативно утичу на животну средину: *head checking*, *squat*, *belgrospi* и различити типови набораности површи главе шине. Разматране су смернице за развој стратегије управљања *RCF* дефектима. Дат је преглед метода инспекције за рану детекцију поменутих дефеката.

У Дисертацији је испитивана хипотеза да крутост шинске подлоге утиче на појаву и развој неравнина малих таласних дужина на возној површи главе шине. Представљени су резултати истраживања утицаја крутости елемената конструкције горњег и доњег строја на укупну крутост шинске подлоге, као и методе за утврђивање вертикалне крутости. Анализирана је неравномерна крутост шинске подлоге дуж колосека са аспекта конструкције и одржавања.

Сprovedено је експериментално истраживање утицаја крутости шинске подлоге на појаву и развој дефеката типа *squat* у станици Панчево Варош применом метода опште и детаљне визуелне инспекције колосека, као и методама електрометрије и сеизмометрије на изабраној мерној деоници. Резултати анализе мерних података указују на утицај променљиве крутости подлоге на појаву и развој *squat* дефеката. Предложене су смернице за даља истраживања.

Кључне речи: железничка инфраструктура, шински дефекти, неравнине малих таласних дужина, контактни замор шинског челика, *head checking*, *squat*, крутост колосека, електрометријска метода, сеизмометријска метода, методе инспекције

Научна област: Грађевинарство

Уже научне области: Планирање и пројектовање железница
Конструкција, грађење и одржавање железница

MANAGEMENT OF SHORT WAVE UNEVENNESS OF THE RAIL HEAD SURFACE

Abstract:

The subject of the research presented in the Dissertation is a short wave unevenness of the rail head surface in contact with the wheel of the railway vehicle. The research aim is developing a methodology for management of short wave unevenness ($\lambda < 1$ m) that occurs due to the contact fatigue of rail steel (*RCF*). The management of unevenness on the running surface of the rail head is considered within the framework of sustainable development of railway infrastructure, considering the requirements of users, railways, economy, environment, social community and transport safety.

The causes of appearance and development mechanism of the unevenness were considered, with particular reference to rail defects that directly threaten the safety of railway transport and adversely affect the environment, such as *head checking*, *squat*, *belgrospi* and different types of surface corrugations of the rail head. Guidelines for the development of the management strategy of *RCF* defects were considered. An overview of inspection methods for early detection of the mentioned defects was presented.

Dissertation investigated the hypothesis that the track stiffness influences the appearance and development of the short wave unevenness of the rail head surface. The research results of the influence of the railway superstructure and substructure on the track stiffness, as well as the methods for vertical stiffness measurement were presented. The uneven track stiffness along the track was analysed from the aspect of the structure and maintenance.

An experimental investigation of the influence of track stiffness on the occurrence and development of *squat* defects in Pančevo Varoš railway station was performed using the methods of general and detailed visual inspection of tracks, as well as electrometric and seismic methods on the test section. The analysis of the obtained measurement data proved the influence of the uneven track stiffness on the occurrence and development of *squat* defects. Guidelines for further research in this area were proposed.

Keywords: railway infrastructure, rail defects, short wave unevenness, rolling contact fatigue of steel steel, head checking, squat, track stiffness, electrometric method, seismic method, inspection methods.

Scientific field: Civil engineering

Scientific subfield: Construction, building and maintenance of railways
Railways planning and projecting

САДРЖАЈ

1	УВОД	1
2	УПРАВЉАЊЕ РАЗВОЈЕМ НЕРАВНИНА МАЛИХ ТАЛАСНИХ ДУЖИНА СА АСПЕКТА ОДРЖИВОГ РАЗВОЈА	5
2.1	Утицај електрификације на одрживост железничког транспорта	7
2.2	Утицај емисије буке и вибрација на управљање неравнинама на глави шина	11
2.3	Аспект интегралног одржавања за одрживу железничку инфраструктуру.....	14
2.4	Утицај управљања неравнинама на глави шина на безбедност саобраћаја.....	20
2.5	Комплексност захтева одрживог развоја железничког транспорта	21
3	СМЕРНИЦЕ ЗА ДЕФИНИСАЊЕ СТРАТЕГИЈЕ ЗА УПРАВЉАЊЕ RCF ШИНСКИМ ДЕФЕКТИМА	23
3.1	Механизам појаве и класификација RCF шинских дефеката	24
3.1.1	Класификација шинског дефекта типа HC	26
3.1.2	Класификација шинског дефекта типа <i>squat</i>	27
3.1.3	Класификација шинског дефекта под називом набораност возне површи унутрашње шине у кривини малог радијуса	31
3.1.4	Класификација шинског дефекта под називом набораност кратких таласа.....	33
3.1.5	Класификација шинског дефекта типа <i>belgrospi</i>	34
3.2	<i>Squat</i> шински дефекат – феномен и смернице за управљање	36
3.2.1	Утицај коефицијента трења на појаву <i>squat</i> дефекта	36
3.2.2	Утицај таласне дужине <i>squat</i> дефекта на инспекцију.....	39
3.2.3	Утицај квалитета шинског челика на појаву и развој <i>squat</i> дефекта	40
3.2.4	Утицај променљиве крутости дуж возне шине на појаву <i>squat</i> дефекта	43
3.2.5	Металуршки аспект појаве <i>squat</i> дефекта	45
3.2.6	Утицај подмазивања на развој RCF дефеката	45
3.3	Стратегије одржавања шина	46
3.3.1	Основе репрофилисања главе возних шина	47
3.3.2	Значај инспекције за управљање неравнинама малих таласних дужина	49
3.3.3	Толеранције за планирање и спровођење репрофилисања шине	49
3.3.4	Општа стратегија репрофилисања	50
3.3.5	Превентивно и корективно репрофилисање шина.....	53
4	ИНСПЕКЦИЈА RCF ШИНСКИХ ДЕФЕКТА	57
4.1	Ултразвучно испитивање	59
4.1.1	Испитивање конвенционалним ултразвучним сондама	59
4.1.2	Испитивање вођеним таласима	62
4.1.3	Испитивање <i>phased array</i> сондама	62
4.1.4	Испитивање засновано на ласерском побуђивању ултразвучних таласа	63
4.1.5	Испитивање електромагнетским акустичким претварачима	64
4.1.6	Испитивање ултразвучним сондама (ACT) са ваздухом као контактним медијумом	66
4.1.7	Испитивање комбинацијом различитих типова извора и детектора ултразвучних таласа	66
4.2	Испитивања заснована на мерењима буке и вибрација.....	68
4.2.1	Испитивање акустичком емисијом.....	68
4.2.2	Испитивање мерењем убрзања кућишта осовине.....	70
4.3	Визуелно и аутоматско визуелно испитивање	72

4.4	Испитивање магнетским честицама и пенетрантима	75
4.5	Испитивање вртложним струјама.....	76
4.5.1	Испитивање вртложним струјама помоћу конвенционалних сонди	77
4.5.2	Термографија помоћу импулсно побуђених вртложних струја	79
4.6	Испитивање наизменичним струјама.....	81
4.7	Испитивање мерењем расипног магнетског флукса.....	84
4.8	Испитивање помоћу сензора базираних на оптичким влакнима.....	89
5	КРУТОСТ ШИНСКЕ ПОДЛОГЕ.....	92
5.1	Мерење крутости колосека	97
5.1.1	Методе за дискретно мерење крутости	99
5.1.2	Методе за континуално мерење крутости	102
5.2	Геофизичке методе за посредно утврђивање крутости	108
6	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО ИСТРАЖИВАЊА – УТИЦАЈ СТАЊА КОЛОСЕЧНЕ ПОДЛОГЕ НА ПОЈАВУ <i>SQUAT</i> ДЕФЕКТА	110
6.1	Опис мерне деонице	110
6.2	Визуелна инспекција <i>squat</i> дефеката	114
6.2.1	Статистичка анализа резултата опште визуелне инспекције.....	117
6.2.2	Дискусија резултата статистичке анализе	120
6.3	Геофизичка испитивања колосечне подлоге	120
6.3.1	Електрометријска метода техником профилисања.....	121
6.3.1.1	<i>Опис електрометријске методе</i>	<i>121</i>
6.3.1.2	<i>Мерни систем</i>	<i>124</i>
6.3.1.3	<i>Електрометријско профилисање дуж колосека број 2</i>	<i>125</i>
6.3.1.4	<i>Резултати мерења</i>	<i>128</i>
6.3.1.5	<i>Дискусија резултата мерења.....</i>	<i>134</i>
6.3.2	Сеизмометријска метода техником профилисања	142
6.3.2.1	<i>Опис сеизмометријске методе</i>	<i>142</i>
6.3.2.2	<i>Мерни систем</i>	<i>144</i>
6.3.2.3	<i>Сеизмометријско профилисање дуж колосека број 2</i>	<i>145</i>
6.3.2.4	<i>Резултати мерења</i>	<i>148</i>
6.3.2.5	<i>Дискусија резултата мерења.....</i>	<i>151</i>
7	ЗАКЉУЧАК И СМЕРНИЦЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА	152
	ЛИТЕРАТУРА.....	156
	ПРИЛОЗИ	171
	ПРИЛОГ 1.....	172
	ПРИЛОГ 2.....	176
	ПРИЛОГ 3.....	179
	ПРИЛОГ 4.....	212

ЛИСТА СЛИКА

Слика 2.1	Комплексни захтеви за управљање неравнинама на површини главе шине.....	6
Слика 2.2	Карбонски отисак железничке инфраструктуре и возила [26]	6
Слика 2.3	Карбонски отисак различитих видова транспорта [27].....	7
Слика 2.4	Локација електрана (хидроелектране, термоелектране и ветропаркови) на територији Републике Србије [1].....	8
Слика 2.5	Положај термоелектрана у околини железничких пруга у Србији [34]	9
Слика 2.6	Феномен излуживања и типови конструкције земљаног трупа применом летећег пепела [1] ...	10
Слика 2.7	Ниво и извори буке од железничког саобраћаја зависно од брзине возила [38]	11
Слика 2.8	„Прагови играчи“ услед делимичног ослањања на подлогу од туцаника	12
Слика 2.9	Пренос структурне буке кроз окружење [40].....	12
Слика 2.10	Услови за појаву буке и вибрација услед неравнина у додиру точак/шина.....	13
Слика 2.11	Укључивање технике брушења у циклус одржавања колосека и застора.....	13
Слика 2.12	Принцип интегралног одржавања конструкције горњег и доњег строја са заменом шине на половини животног века конструкције.....	14
Слика 2.13	Принцип интегралног одржавања конструкције горњег и доњег строја са једнаким животним веком шине и прага	15
Слика 2.14	Фотомикрографски приказ дубине декарбонизованог слоја шинског челика [45]	17
Слика 2.15	Принцип утицаја цикличног брушења на животни век шине	18
Слика 2.16	Модел развоја прелине и расположиви интервали за одржавање шине.....	19
Слика 2.17	Један од сукцесивних шинских ломова у <i>Hatfield</i> –у услед замора шинског челика [10]	21
Слика 2.18	Сукцесивни лом дуж шине [10].....	21
Слика 2.19	Карактеристични изглед попречног пресека главе шине након лома услед замора шинског челика [48].....	21
Слика 2.20	Припрема за брушење квашењем радног окружења (лево) и варничење током брушења (десно).....	22
Слика 3.1	Карактеристичне зоне појаве <i>RCF</i> дефеката на возној ивици и на возној површи главе шине ..	24
Слика 3.2	<i>HC</i> шински дефекат [3]	26
Слика 3.3	Зона појаве <i>HC</i> дефекта на возној ивици [16].....	27
Слика 3.4	Попречни лом услед <i>HC</i> дефекта [13]	27
Слика 3.5	Прве цифре кодне ознаке према [13] и према [14]	28
Слика 3.6	Додир точак/шина на возној површи главе шине у колосеку у правцу.....	29
Слика 3.7	Општи типови додира точак/шина и додир у једној тачки преко површине котрљања [78]	29
Слика 3.8	Изглед површинског дефекта типа <i>squat</i> према [3].....	29
Слика 3.9	Водећи и пратећи крак „V“ прелине након лабораторијског третмана савијања у вертикалној равни [58]	30
Слика 3.10	Пример попречног лома шине услед <i>squat</i> дефекта [16]	30

Слика 3.11	Комбиновани дефекат класификован као 2223 према [13].....	31
Слика 3.12	Изглед дефекта и апроксимација једноставним аналитичким моделом [41].....	32
Слика 3.13	Набораност кратких таласа на глави унутрашње шине у кривини према [3].....	32
Слика 3.14	Дефекат 2201 и изазвано оштећење застора у зони нарушеног ослањања прага [13].....	33
Слика 3.15	Ситна набораност према [3].....	34
Слика 3.16	<i>Belgrossi</i> дефекат комбинован са набораношћу возне површи главе шине [3].....	34
Слика 3.17	Пример комбинације набораности, <i>squat</i> -а и семена <i>squat</i> -а (колосек број 2 у станици Панчево Варош, октобар 2020. године).....	35
Слика 3.18	Положај максималне вредности напона смицања у зависности од вредности коефицијента трења у додиру точак/шина [81].....	37
Слика 3.19	Положај максималне вредности напона смицања у зависности од осовинског оптерећења према [72].....	37
Слика 3.20	Појава клизања у додиру точак/шина [57, 72].....	38
Слика 3.21	Смернице за избор квалитета шинског челика према препорукама [86].....	41
Слика 3.22	Смернице за избор квалитета челика према [87].....	42
Слика 3.23	Избор квалитета нове шине на основу брзине хабања и развоја <i>RCF</i> дефеката у случају обнове шина квалитета R260 према [87].....	43
Слика 3.24	Зависност густине и дужине <i>HC</i> прслина од квалитета челика [54].....	43
Слика 3.25	Појава <i>squat</i> дефеката у зони заваара: (а) алуминотермијски и (б) електроотпорни завар [59]....	44
Слика 3.26	Обострано појављивање <i>squat</i> дефекта у односу на алуминотермијски завар (колосек број 2 у станици Панчево Варош, октобар 2020. године).....	44
Слика 3.27	Иницијација прслине услед попречног кртог лома <i>WEL</i> -а [58].....	45
Слика 3.28	Продирање мазива и ширење <i>HC</i> прслине под точком возила [48].....	46
Слика 3.29	Принцип суперпонирања природног и вештачког хабања [41].....	48
Слика 3.30	Профил главе шине према [18].....	51
Слика 3.31	Профил за редукцију хабања [3].....	52
Слика 3.32	Профил за повећање ширине колосека [3].....	52
Слика 3.33	Принцип корекције возне ивице десне возне шине са <i>AHC</i> профилем.....	53
Слика 3.34	Различити принципи репрофилисања према [3].....	56
Слика 4.1	Потребан капацитет уређаја за инспекцију <i>RCF</i> шинских дефеката.....	57
Слика 4.2	Класификација метода инспекције шинских дефеката.....	58
Слика 4.3	Геометријске ортогоналне равни шине [14].....	60
Слика 4.4	Побуђивање различитих типова таласа угаоним сондама са клином према [91].....	60
Слика 4.5	Релевантне димензије прслине дефекта типа <i>squat</i> према [14].....	61
Слика 4.6	Релевантне димензије прслине дефекта типа <i>HC</i> према [14].....	62
Слика 4.7	Начин побуђивања таласа <i>phased array</i> сондама [92].....	63
Слика 4.8	Побуђивање таласа у више праваца помоћу једног побудног импулса (лево) [95] и систем <i>phased array</i> сонди са заштитним каишем (десно) [96].....	63
Слика 4.9	Принцип рада <i>EMAT</i> сонде [107].....	65

Слика 4.10	Детектовани површински таласи у случају неоштећене и оштећене шине [106].....	65
Слика 4.11	Шематски приказ пасивне детекције акустичких таласа према [120, 121]	68
Слика 4.12	Пасивни <i>UCSD</i> прототип: положај прототипа на возилу <i>FRA DOTX-216</i> (горе), начин повезивања сензорског система на возило (доле лево) и изглед сензорског система (доле десно) [121]	68
Слика 4.13	Поставка микрофона за индиректно мерење нивоа буке (лево) [126] и система микрофона постављених на последње обртно постоље возила (десно) [128]	69
Слика 4.14	Карактеристике звучног сигнала при акустичкој емисији [125]	69
Слика 4.15	Густина снаге <i>wavelet</i> -а за случај <i>squat</i> дефекта између прагова (горе) и изнад прага (доле), при чему се центар дефекта налази на позицији од 0 mm [133]	71
Слика 4.16	Измерене вибрације у додиру точка и шине услед постојања дефекта шине [134]	72
Слика 4.17	Принцип аутоматског визуелног испитивања према [14]	73
Слика 4.18	Платформа са два ласерска скенера [138]	74
Слика 4.19	Преносиви систем за визуелну инспекцију (лево) и делови уређаја за аквизицију слике (десно) [139]	74
Слика 4.20	Принцип испитивања методом вртложних струја [144]	76
Слика 4.21	Уређај за испитивање вртложним струјама интегрисан у инспекцијско возило (лево) и положај <i>EC</i> сонди (десно) [145]	77
Слика 4.22	Излазни сигнали добијени испитивањем <i>HC</i> дефекта (лево) и <i>squat</i> дефекта (десно) методом вртложних струја [55, 145]	78
Слика 4.23	Положај <i>LEOTEST Type EC</i> сонди за инспекцију главе шине [146]	79
Слика 4.24	Основна конфигурација мерног система заснованог на <i>PEC</i> термографији [149]	80
Слика 4.25	Временска зависност температуре током процеса загревања и хлађења (а), коса прслина (б) и утицај дубоке и плитке прслине на промену температуре (в) [149]	81
Слика 4.26	Примена <i>ACFM</i> методе за детекцију дефеката главе шине (лево) и компоненте магнетске индукције (десно)	82
Слика 4.27	Карактеристичан начин представљања <i>ACFM</i> сигнала у случају постојања дефекта [154]	82
Слика 4.28	Примена <i>MFL</i> мерног система за испитивање материјала без дефекта (а) и са дефектом (б) и принцип рада Холове сонде (в) [161]	84
Слика 4.29	Зависност B_z сигнала од положаја сонде у правцу x осе при наиласку на прлину [163]	85
Слика 4.30	Систем са седам сензорских глава [164]	86
Слика 4.31	Расподела успостављеног магнетског поља у шини за различите брзине инспекцијског возила [167]	87
Слика 4.32	Предложени систем који обједињује предности <i>MFL</i> методе и <i>PEC</i> термографије [162]	88
Слика 4.33	Принцип рада сензора са уписаном Браговом решетком [174]	90
Слика 4.34	Конфигурација мерног система базираног на Браговим решеткама [173]	91
Слика 5.1	Елементи конструкције горњег и доњег строја за колосек у застору од туцаника, шинска и колосечна подлога [182]	93

Слика 5.2	Елементи конструкције горњег и доњег строја за колосек на чврстој подлози са попречним бетонским праговима на бетонској или асфалтној плочи, шинска и колосечна подлога [182]...	93
Слика 5.3	Еластични шински уметак у оквиру система шинског причвршћења.....	93
Слика 5.4	Еластична шинска подлошка у оквиру система шинског причвршћења	94
Слика 5.5	Могући положаји еластичних елемената у оквиру конструкције колосека у застору од туцаника [181]	94
Слика 5.6	Могући положаји еластичних елемената у оквиру конструкције колосека на чврстој подлози [182]	95
Слика 5.7	Пример дискретног (лево) и континуалног (десно) ослањања шине на подлогу [183].....	95
Слика 5.8	Зависност крутости од квалитета ослањања прага [186]	96
Слика 5.9	Билинеарна апроксимација дијаграма оптерећење – угиб [185]	96
Слика 5.10	Хидраулички клип за наношење оптерећења и мерач угиба [184]	99
Слика 5.11	Метода наношења оптерећења ударцем маља (лево) и шведско <i>TLV</i> возило (десно) [184].....	100
Слика 5.12	<i>PANDA</i> уређај [195] и идентификација слојева помоћу ендоскопије [196]	100
Слика 5.13	Уређај за истовремено мерење угиба на више дубина [198]	101
Слика 5.14	Диференцијални индуктивни трансформаторски претварач (<i>LVDT</i>) [198].....	101
Слика 5.15	<i>MPQY</i> сензор (лево) [199] и геофон и пријемник ласерског зрака причвршћени за ножицу шине (десно) [187]	102
Слика 5.16	Убрзање (а), брзина (б) и вертикално померање (в) услед пролаза осовинског склопа обртног постоља возила [197].....	102
Слика 5.17	<i>CARS</i> возило за континуално мерење крутости [187]	103
Слика 5.18	<i>TTCI</i> возило за мерење крутости шинске подлоге [201]	103
Слика 5.19	<i>SBB</i> возило за мерење крутости колосека (лево) [184, 189] и поставка <i>UNL</i> мерног система на возило (десно) [184].....	104
Слика 5.20	Шематски приказ <i>UNL</i> мерног система [194, 200]	104
Слика 5.21	Мерни принцип <i>ZOYON</i> методе [184].....	105
Слика 5.22	Принцип мерења помоћу колица за континуално мерење крутости [184].....	105
Слика 5.23	Принцип мерења и опрема возила под називом <i>RSMV</i> [184].....	106
Слика 5.24	Кумулативна расподела динамичке крутости колосека за три различита колосека [189, 203].	107
Слика 5.25	Шематски приказ <i>Portancemetre</i> возила и поставка возила за извођење мерења на терену (лево), поставка сензора мерног система возила (десно) [190].....	107
Слика 5.26	Пример одређивања угиба колосека услед оптерећења осовинским склопом (а) и мерним точком (б) [189].....	108
Слика 6.1	Мрежа железничких пруга у Републици Србији према [205]	111
Слика 6.2	Позиција станице Панчево Варош на железничкој мрежи Републике Србије.....	112
Слика 6.3	Линије Беовоза у периоду од 2002. године до децембра 2017. године [206]	113
Слика 6.4	Колосеци 1, 2, 3 и 4 у станици Панчево Варош (путничка гарнитура на колосеку број 2 и теретни воз на колосеку број 4).....	113
Слика 6.5	Нумерација колосека у станици Панчево Варош	115

Слика 6.6	Релефна ознака на возној шини у колосеку број 2	115
Слика 6.7	Пример сукцесивне појаве <i>squat</i> дефекта у околини и изнад прага.....	115
Слика 6.8	Зонирање главних пролазних колосека за потребе визуелне инспекције	116
Слика 6.9	Одређивање дужине мерне деонице дуж колосека број 2	116
Слика 6.10	Зоне појаве <i>squat</i> дефеката у односу на праг [64, 136].....	117
Слика 6.11	Расподела уочених <i>squat</i> дефеката по зонама главних пролазних колосека.....	118
Слика 6.12	Укупан број <i>squat</i> дефеката на левој и десној шини главних пролазних колосека	118
Слика 6.13	Укупан број <i>squat</i> дефеката у зони изнад и у зони између прагова (независно од растојања између прагова).....	118
Слика 6.14	Укупан број <i>squat</i> дефеката у зони изнад и у зони између прагова за растојање прагова $L < 60$ cm и $L \geq 60$ cm.....	119
Слика 6.15	Укупан број <i>squat</i> дефеката у зонама са бетонским и дрвеним праговима.....	119
Слика 6.16	Укупан број <i>squat</i> дефеката у зонама изнад и између бетонских/дрвених прагова	119
Слика 6.17	Позиција покретања воза на колосеку број 2 у смеру ка Београду (прагови број 93 – 94).....	120
Слика 6.18	Референтне дубине разматрања резултата применом мултиелектродног електрометријског скенирања [208]	122
Слика 6.19	Шематски приказ распореда електрода и мерених нивоа по дубини	123
Слика 6.20	Положај оса релативног просторног правоуглог десног координатног система XYZ у колосеку.....	124
Слика 6.21	Мерни систем примењен за мултиелектродно електрометријско скенирање на колосеку 2	124
Слика 6.22	Шематски приказ диспозитива електрометријских профила (<i>ES-1</i> , <i>ES-2</i> , <i>ES-3</i>) на колосеку број 2 са почетном ПМЗ (горе) и завршном ПМЗ (доле)	126
Слика 6.23	Изглед ПМЗ испред прага број 1 за електрометријско скенирање профила <i>ES-1</i>	127
Слика 6.24	Положај електрода за електрометријско скенирање профила <i>ES-1</i> (леви профил)	127
Слика 6.25	Положај електрода за електрометријско скенирање профила <i>ES-2</i> (средњи профил у оси колосека)	127
Слика 6.26	Положај електрода за електрометријско скенирање профила <i>ES-3</i> (десни профил)	128
Слика 6.27	Профили <i>ES-1</i> , <i>ES-2</i> и <i>ES-3</i> истините <i>SEO</i> са ПМЗ испред првог и иза последњег прага испитиване деонице.....	129
Слика 6.28	Карте интегрисане на основу података <i>ES-1</i> , <i>ES-2</i> и <i>ES-3</i> на три дубинска нивоа	130
Слика 6.29	Профили <i>ES-1</i> , <i>ES-2</i> , <i>ES-3</i> од прага број 1 до прага број 34.....	131
Слика 6.30	Профили <i>ES-1</i> , <i>ES-2</i> , <i>ES-3</i> од прага број 35 до прага број 67.....	132
Слика 6.31	Профили <i>ES-1</i> , <i>ES-2</i> , <i>ES-3</i> од прага број 68 до прага број 95.....	133
Слика 6.32	Изглед зрна новог туцаника.....	134
Слика 6.33	„Беле површине“ услед ломљења зрна туцаника под саобраћајем (сува засторна призма, слика лево) и мокра засторна призма (слика десно)	135
Слика 6.34	Изглед екстремно запрљане и расквашене засторне призме (праг број 51 на слици десно)	135
Слика 6.35	Део електрометријског профила <i>ES-2</i> (лево) и појава заобљених зрна туцаника на средњем делу прага број 79.....	136

Слика 6.36	Ниво подземне воде у „изданском оку“ непосредно поред колосека у станици Панчево Варош	137
Слика 6.37	Нормално стање (горе) и деформисано стање (доле) планума.....	137
Слика 6.38	Основни принцип сеизмометријског поступка рефракције.....	144
Слика 6.39	Мерни систем RAS-24 [212]	144
Слика 6.40	Мерни систем инсталиран на колосеку број 2 у станици Панчево Варош	145
Слика 6.41	Шематски приказ диспозитива сеизмометријског профила SPI.....	146
Слика 6.42	Позиција прве иницијације	146
Слика 6.43	Детаљи примене сеизмометрије на колосеку број 2.....	147
Слика 6.44	Сеизмометријски рефрактивни снимак са маркираним првим наиластима	148
Слика 6.45	Профил SPI – 2D дистрибуција брзине V_p	149
Слика 6.46	Профил SPI – 2D дистрибуција хоризонталног градијента V_p	150
Слика 6.47	Подела профила SPI на сегменте са уцртаним границама максималних промена хоризонталног градијента V_p	151

ЛИСТА ТАБЕЛА

Табела 2.1	Пројектовани животни век земљаног трупа у различитим земљама света	16
Табела 3.1	Преглед референтне литературе у области <i>RCF</i> шинских дефеката	24
Табела 3.2	Кодне ознаке за <i>HC</i> шински дефекат према [13] и [14]	26
Табела 3.3	Кодне ознаке за <i>squat</i> шински дефекат према [13] и [14]	28
Табела 3.4	Кодне ознаке за набораност возне површи унутрашње шине у кривини малог радијуса према [13]	32
Табела 3.5	Кодне ознаке за набораност кратких таласа према [13].....	33
Табела 3.6	Промена вредности коефицијента трења током године [82].....	38
Табела 3.7	Квалитет шинског челика према затезној чврстоћи и тврдоћи [45].....	40
Табела 3.8	Преглед смерница за избор квалитета челика на пругама за мешовити саобраћај, за осовинско оптерећење 225 kN и најмање 20 милиона бруто тона годишње	42
Табела 3.9	Прагови интервенције за подужни профил (вредности „peak to peak“) [3].....	50
Табела 3.10	Прагови интервенције за попречне профиле ($R > 5000$ m и правац) [3].....	50
Табела 6.1	Поређење стања дефеката типа <i>squat</i> , стања застора, као и приказ на профилима и карти у околини прагова 35 и 36.....	138
Табела 6.2	Поређење стања дефеката типа <i>squat</i> , стања застора, као и приказ на профилима и карти у околини прагова 41 – 44.....	139
Табела 6.3	Поређење стања дефеката типа <i>squat</i> , стања застора, као и приказ на профилима и карти у околини прагова 49 – 54.....	140

ЛИСТА СИМБОЛА

Поглавље 1

- λ – таласна дужина
 $D0, D1, D2, D3$ – интервали таласних дужина према серији стандарда *EN 13848*
 R – радијус кривине

Поглавље 2

- V_{max} – максимална брзина
 d_I – референтна дубина прслине за стратегију брушења I (рана фаза развоја прслине)
 d_{II} – референтна дубина прслине за стратегију брушења II (каснија фаза развоја прслине)
 L_I – дужина циклуса брушења за стратегију I
 L_{II} – дужина циклуса брушења за стратегију II
 S_{min} – минимална вредност раста прслине за детекцију
 $S_{kr,b}$ – критична вредност раста прслине за ниво буке
 $S_{kr,r}$ – критична вредност раста прслине
 L_n – интервал развоја „невидљиве“ прслине
 L_i – расположив интервал за интервенцију
 L_{us} – расположив интервал за урбану средину

Поглавље 3

- $1/R$ – закривљеност
 a – амплитуда дефекта
 L – таласна дужина дефекта
 Q – оптерећење од точка
 d – дубина појаве максималног напона смицања
 τ_{max} – максимална вредност напона смицања
 μ – коефицијент трења
 $\tau_{max,p}$ – максимална вредност напона смицања за путничке возове
 $\tau_{max,f}$ – максимална вредност напона смицања за теретне возове
 d_p – дубина у односу на возну површ, односно положај максималне вредности напона смицања за путничке возове
 d_f – дубина у односу на возну површ, односно положај максималне вредности напона смицања за теретне возове
 ωR – брзина на ободу точка
 ω – угаона брзина
 V – брзина возила
 ΔV – разлика брзине на обиму точка и брзине напредовања возила (клизање)

M	–	обртни моменат
T	–	сила трења
Q	–	оптерећење од точка

Поглавље 4

c	–	брзина простирања ултразвучних таласа
f	–	фреквенција ултразвучних таласа
λ	–	таласна дужина ултразвучног таласа
θ'	–	упадни угао
l	–	хоризонтална дужина површинске депресије
h'	–	вертикална дубина унутрашње прслине
l'	–	хоризонтална дужина прслине
h	–	дубина депресије
z	–	ширина површинске прслине
d'	–	дубина унутрашње прслине
θ	–	угао простирања прслине
I	–	импулсна или наизменична побудна струја
J	–	густина индуковане струје
B	–	магнетска индукција
F	–	Лоренцова сила
$R(\omega)$	–	фреквентна карактеристика
$V_A(\omega)$	–	фреквентни одзив сензора А
$V_B(\omega)$	–	фреквентни одзив сензора В
$W(\omega)$	–	спектар побудних таласа од точка
$W_A(\omega)$	–	преносна функција деонице колосека између точка и сензора А
$G_{AB}(\omega)$	–	преносна функција деонице колосека између сензора А и В
SK	–	статистички параметар који представља меру пригушења сигнала (<i>Spectral Kurtosis</i>)
$SAWP$	–	скалирана усредњена снага <i>wavelet</i> -а (<i>Scale-Averaged Wavelet Power</i>)
PSD	–	спектрална густина снаге (<i>Power Spectrum Density</i>)
$J(z_{ec})$	–	зависност густине вртложних струја од растојања z_{ec} и од времена у комплексном домену
$J(0)$	–	густина струје на површини материјала
z_{ec}	–	растојање од површине материјала
α_0	–	почетна фаза на површини материјала
δ	–	дубина продирања вртложних струја
f_{ec}	–	фреквенција вртложних струја
μ_0	–	магнетска пермеабилност вакума
μ_r	–	релативна магнетска пермеабилност материјала
σ	–	специфична проводност материјала
V_{dif}	–	напон у дијагонали моста
V_{sum}	–	збир напона на пријемним калемовима

B_x	–	компонента магнетске индукције у правцу x осе
B_y	–	компонента магнетске индукције у правцу y осе
B_z	–	компонента магнетске индукције у правцу z осе
B_{x0}	–	компонента магнетске индукције у правцу x осе за материјал без оштећења
$P-P$ вредност	–	разлика између вредности максимума и минимума B_z сигнала (<i>Peak to Peak value</i>)
$P-P$ ширина	–	разлика положаја минимума и максимума дуж x осе (<i>Peak to Peak width</i>)
λ_B	–	таласна дужина рефлектоване светлости
n	–	средња вредност индекса преламања језгра оптичког влакна
A	–	просторна периодичност
$\Delta\lambda_B$	–	промена таласне дужине рефлектоване светлости услед промене просторне периодичности
ε	–	истезање
ΔT	–	промена температуре
k_e	–	осетљивост Брагове решетке на релативно истезање при константној температури (константа)
k_T	–	коэффициент температурске зависности при константном релативном издужењу (константа)

Поглавље 5

k	–	статичка крутост еластичног шинског ослонца (константа опруге)
Q	–	концентрисана сила у ослонцу
z	–	угиб шинског ослонца
k_i	–	крутости појединачних елемената шинске подлоге
U	–	модул еластичности шинске подлоге
L	–	осовинско растојање прагова
z_p	–	угиб због празнине испод прага
$k_{s,t}$	–	секантна крутост
Q_s	–	гранично оптерећење у случају билинеарне апроксимације дијаграма оптерећење–угиб
Q_t	–	максимално оптерећење у случају билинеарне апроксимације дијаграма оптерећење–угиб
z_s	–	гранични угиб у случају билинеарне апроксимације дијаграма оптерећење–угиб
z_t	–	укупни угиб у случају билинеарне апроксимације дијаграма оптерећење–угиб
$k_{tg,t}$	–	тангентна крутост
$k(f)$	–	динамичка крутост
$Q(f)$	–	динамичко оптерећење
$z(f)$	–	динамички угиб
$\alpha(f)$	–	динамичка еластичност (флексибилност)
d	–	растојање између две линије ласера код <i>UNL</i> мерног система
$V_{deflection}$	–	брзина вертикалног угиба колосека у једној тачки
V_{ds}	–	брзина померања оптерећења дуж колосека

Поглавље 6

L	–	осовинско растојање прагова
-----	---	-----------------------------

ρ	–	параметар специфичне електричне отпорности
SEO	–	специфична електрична отпорност
a	–	растојање активних електрода у <i>Wenner</i> -овом линијском диспозитиву
n	–	ниво дубинског захвата
A, B	–	струјне активне електроде
M, N	–	потенцијалне активне електроде
D	–	дубина захвата испитивања
V_p	–	брзина простирања примарних сеизмичких таласа
θ_1	–	упадни угао под којим талас долази на граничну површину из средине 1
θ_2	–	преломни угао под којим се талас простира у средини 2 након преламања
V_1	–	брзина простирања таласа у средини 1
V_2	–	брзина простирања таласа у средини 2
θ_{max}	–	максимални упадни угао
i	–	критични угао

ЛИСТА СКРАЋЕНИЦА

<i>Б</i>	–	број прслина у оквиру вишеструког дефекта
ГИП	–	горња ивица прага
ГИШ	–	горња ивица шине
<i>Д</i>	–	дубина прслине
ЕУ	–	Европска унија
ЖС	–	Железнице Србије
ИД	–	испитивана деоница
<i>Л</i>	–	локација прслине
<i>ЛИ</i>	–	лабораторијска испитивања
НИС	–	Нафтна индустрија Србије
<i>О</i>	–	оријентација прслине
<i>ПД</i>	–	димензија прслине на површини главе шине
ПМЗ	–	продужена мерна зона за потпуно покривање опсега мерења
СО	–	Саобраћајни Оператер
<i>СРПС ЕН</i>	–	хармонизовани европски стандарди
<i>ТИ</i>	–	теренска испитивања
УИ	–	управљач железничке инфраструктуре
У–Л	–	интервал од тренутка уочавања прслине до лома шине
<i>АВА</i>	–	убрзање кућишта осовине (<i>Axle Box Acceleration</i>)
<i>АСFM</i>	–	испитивање наизменичним струјама (<i>Alternating Current Field Measurement</i>)
<i>АСТ</i>	–	ултразвучна сонда са ваздухом као контактним медијумом (<i>Air–Coupled Acoustic Transducer</i>)
<i>АЕ</i>	–	акустичка емисија (<i>Acoustic Emission</i>)
<i>АНС</i>	–	специјално репрофилисан попречни профил шине за контролу појаве и развоја <i>RCF</i> прслина (<i>Anti–HeadCheck</i>)
АТ	–	Аустрија (<i>Austria</i>)
<i>АVТ</i>	–	аутоматска визуелна инспекција (<i>Automatic Visual Testing</i>)
ВЕ	–	Белгија (<i>Belgium</i>)
<i>САРS</i>	–	Кинеска академија наука за област железница (<i>China Academy of Railway Sciences</i>)
<i>СВR</i>	–	опит пенетрације (<i>California Bearing Ratio</i>)
<i>СЕN</i>	–	Европски комитет за стандардизацију (<i>Comité Européen de Normalisation</i>)
<i>СЕTE</i>	–	Француски истраживачки центар (<i>Centre d’Experimentation et de Recherche</i>)
СН	–	Швајцарска (<i>Switzerland</i>)
<i>СNТG</i>	–	Центар за недеструктивна тестирања и геофизику из Београда
ДВ	–	Немачка државна железничка управа (<i>Deutsche Bahn</i>)
ДК	–	Данска (<i>Denmark</i>)
<i>Е</i>	–	електроде постављене у оси колосека
<i>ЕС</i>	–	вртложне струје (<i>Eddy Current</i>)
<i>ЕL</i>	–	електроде постављене са леве стране колосека

- EMAT* – електромагнетска акустичка сонда (*Electromagnetic Acoustic Transducer*)
- EN* – европски стандард (*European Norm*)
- ER* – електроде постављене са десне стране колосека
- ES-1* – електрометријски профил са леве стране колосека
- ES-2* – електрометријски профил у оси колосека
- ES-3* – електрометријски профил са десне стране колосека
- Eurobalt II* – истраживачки пројекат под називом „Европско истаживање о оптималној конструкцији колосека у застору од туцаника“ (*European Research for an Optimised BALLasted Track*)
- EVS* – метода за одређивање вертикалне крутости колосека (*EBER Vertical Stiffness*)
- FBG* – фибер оптички сензори на бази уписаних Брагових решетки (*Fiber Bragg Grating*)
- FOS* – фибер оптички сензори (*Fiber Optic Sensors*)
- FP* – погрешно детектовано (*False Positives*)
- FPGA* – интегрисано коло које чине гејтовска поља која се програмирају од стране корисника (*Field Programmable Gate Array*)
- FRA* – Федерална железничка управа у Америци (*Federal Railroad Administration*)
- FWD* – уређај са падајућим тегом за мерење крутости (*Falling Weight Deflectometer*)
- G_i – позиције геофона
- GEV* – општа расподела екстремних вредности (*Generalized Extreme Value*)
- GPS* – систем за глобално позиционирање (*Global Positioning System*)
- GWT* – испитивање вођеним таласима (*Guided Wave Testing*)
- H* – параметар који описује нијансу боје у степенима на колорном кругу (0° – 360°) (*Hue*)
- HC* – шински дефекат (*Head Checking*)
- HSG* – техника брушења великом брзином (*High Speed Grinding*)
- HSL* – модел боја – нијанса, засићење, осветљеност (*Hue, Saturation and Lightness*)
- HU* – Мађарска (*Hungary*)
- IC* – ознака за тип возила за даљински саобраћај (*InterCity train*)
- IT* – Италија (*Italy*)
- KTH* – Краљевски институт за технологију у Шведској (*Kungliga Tekniska högskolan*)
- L* – лонгитудинални таласи (*Longitudinal waves*)
- LCC* – трошкова животног циклуса (*Life Cycle Cost*)
- LED* – светлећа диода (*Light-Emitting Diode*)
- LUX* – Луксембург (*Luxembourg*)
- LVDT* – диференцијални индуктивни трансформаторски претварач (*Linear Variable Differential Transformers*)
- MDD* – уређај за истовремено мерење угиба на више дубина (*Multi-Depth Deflectometer*)
- MEMS* – микро електромеханички системи (*Micro Electro-Mechanical Systems*)
- MFL* – расипни магнетски флукс (*Magnetic Flux Leakage*)
- MO* – магнетско–оптички (*Magneto-Optical*)
- MPQY* – сензор који се састоје од мерних трака директно залепљених на посредни уређај за истовремено мерење вертикалних, бочних и подужних сила (*Multi-Purpose Q and Y load detector*)
- MT* – испитивање магнетским честицама (*Magnetic Particle Testing*)

NL	–	Холандија (<i>Netherlands</i>)
NOR	–	Норвешка (<i>Norway</i>)
OFDR	–	оптичка рефлектометрија у фреквентном домену (<i>Optical Frequency Domain Reflectometry</i>)
OTDR	–	оптичка рефлектометрија у временском домену (<i>Optical Time Domain Reflectometry</i>)
PEC	–	импулсно побуђене вртложне струје (<i>Pulsed Eddy Current</i>)
PL	–	Пољска (<i>Poland</i>)
PT	–	испитивање пенетрантима (<i>Penetrant Testing</i>)
R	–	Рејлијеви таласи (<i>Rayleigh waves</i>)
RCF	–	замор шинског челика (<i>Rolling Contact Fatigue</i>)
RGB	–	модел боја – црвена, зелена, плава (<i>Red, Green, Blue</i>)
RIFLEX	–	систем за инспекцију шине заснован на флексибилним електромагнетским акустичким сондама (<i>Rail Inspection by Flexible Electromagnetic Acoustic Transducers</i>)
RO	–	Румунија (<i>Romania</i>)
RSMV	–	возило за континуално мерење крутости колосека (<i>Rolling Stiffness Measurement Vehicle</i>)
S	–	смичући таласи (<i>Shear waves</i>)
S _i	–	позиције иницијација
SBB	–	Швајцарске железнице (<i>Schweizerische Bundesbahnen</i>)
SLD	–	ласерска техника скенирања где се положај ласерског извора не мења, док се детектор помера дуж испитиване површине (<i>Scanning Laser Detector</i>)
SLLS	–	ласерска техника скенирања где се ласерски извор помера дуж испитиване површине, док је детектор непокретан (<i>Scanning Laser Line Source</i>)
SNCF	–	Национално друштво француских железница (<i>Société Nationale des Chemins de fer Français</i>)
SP1	–	сеизмометријски профил интегрисан на основу три појединачна преклопљена профила
SP1–1, SP1–2, SP1–3	–	три појединачна профила изведена сеизмометријским поступком рефракције
SWE	–	Шведска (<i>Sweden</i>)
TLV	–	метода за мерење крутости наношењем оптерећења помоћу возила (<i>Track Loading Vehicle</i>)
TP	–	тачно детектовано (<i>True Positives</i>)
TSI	–	техничке спецификације интероперабилности (<i>Technical Specifications for Interoperability</i>)
TTCI	–	Центар за транспортну технологију у Колораду (<i>Transportation Technology Center, Inc.</i>)
UCSD	–	прототип заснован на комбинацији различитих типова извора и детектора ултразвучних таласа
UIC	–	Међународна железничка унија (<i>Union Internationale des Chemins de fer</i>)
UIC ORE	–	Институт за истраживања при Међународној железничкој унији (<i>Office for Research and Experiments</i>)
UK	–	Уједињено Краљевство (<i>United Kingdom</i>)
UNL	–	Универзитета Небраска у Линколну (<i>University of Nebraska at Lincoln</i>)
U–RAIL	–	прототип заснован на ласерском побуђивању ултразвучних таласа и детекцији помоћу АСТ сонди
UT	–	ултразвучно испитивање (<i>Ultrasonic Testing</i>)
VT	–	визуелно испитивање (<i>Visual Testing</i>)
WEL	–	крти слој у виду беле гравуре (<i>White Etching Layer</i>)

1 УВОД

Шине су неизоставни елементи конструкције колосека, које имају велики удео у инвестиционим трошковима (преко 30% за колосек у застору од туцаника и 20% за колосек на чврстој подлози). У том смислу, управљање животним веком шина у колосеку игра кључну улогу у оптимизацији укупних трошкова, укључујући трошкове одржавања током животног века конструкције горњег и доњег строја железничке пруге. Управљање животним веком шина у колосеку укључује оптимални избор шина (квалитет челика и профил), инспекцију возних шина у колосеку, негу шина (подмазивање и превентивно брушење нових шина) и одржавање шина (циклично превентивно и циклочно корективно одржавање, мониторинг и замену шине).

Предмет истраживања у Дисертацији је управљање развојем неравнина малих таласних дужина на горњој површи главе шине у колосеку. Тема Дисертације је саставни део управљања животним веком шина у колосеку у условима одрживог развоја железничке инфраструктуре [1].

Неравнине малих таласних дужина $0 < \lambda \leq 1$ m на површи главе возне шине у зони додира са точком значајно утичу на животни век шина у колосеку. Управљање њиховим развојем је још увек неистражена област и зато не постоји јединствена стратегија коју спроводе Управљачи железничке инфраструктуре (УИ) широм света. Хармонизовани европски стандарди из серије *СРПС ЕН 13231* [2, 3] пружају смернице на нивоу препорука за подршку у доношењу одлука током управљања неравнинама малих таласних дужина.

Серија хармонизованих српских стандарда *СРПС ЕН 13848* (у свему идентична са серијом *EN 13848 – Railway applications – Track – Track geometry quality* [4 – 9]) која се односи на квалитет геометрије колосека обухвата вертикална одступања нивелете под оптерећењем од возила у области таласних дужина од 3 m (само изузетно од 1 m) до чак 150 m (тзв. интервали таласних дужина *D0*, *D1*, *D2* и *D3* према серији стандарда *EN 13848*) и не може се применити на управљање неравнинама које настају у додиру главе шине и точкова возила.

Неравнине малих таласних дужина представљају побуду за осциловање неогибљене масе возила и утичу на повећање динамичких сила које се са возила преносе на колосек, те изазивају брже пропадање геометрије колосека и утичу на смањење удобности вожње. Поред

тога што повећавају укупне трошкове одржавања и смањују животни век железничке инфраструктуре и возила, оне у условима лошег управљања могу да угрозе безбедност саобраћаја због појаве лома шине у колосеку под саобраћајем.

Најпознатији такав пример је исклизнуће *IC* воза (*intercity 225 Mark 4 express train*) из колосека на удаљености око 800 m од станице Хетфилд у Великој Британији (*Hatfield, UK*, 17. октобар 2000. године), које је узроковано спонтаним вишеструким ломовима шина услед дефеката насталих замором шинског челика на дужини колосека око 200 m [10]. Ова железничка несрећа је снажно одјекнула међу Управљачима инфраструктуром широм света и била је непосредни повод за повећање обима ригорозних инспекција стања шина у колосеку у Великој Британији и ЕУ. Поред тога, овај немили догађај је утицао на интензивирање истраживања феномена дефеката који настају услед замора шинског челика у зонама додира главе шине и точкова возила. Велики број извештаја о исклизнућима путничких и теретних возова [11, 12] узрокованим дефектима услед замора шинског челика указује да је ова тема још увек неистражена и да резултати истраживања још увек нису одговорили захтевима безбедности железничког саобраћаја. Нажалост, још увек не постоји одговарајућа стратегија, односно не постоје јединствене смернице за управљање неравнинама малих таласних дужина насталих услед замора шинског челика.

Управљање неравнинама малих таласних дужина на горњој површи главе шине у зони додира са точком обухвата: (а) анализу могућих узрока појаве и напредовања дефеката услед замора шинског челика, (б) избор одговарајућих метода мерења без разарања за њихову рану детекцију у возним шинама у колосеку и праћење њиховог контролисаног раста у условима несметаног функционисања железничког саобраћаја, (в) дефинисање стратегије одржавања шине као дела интегралног одржавања колосека и колосечне подлоге током целокупног животног циклуса конструкције горњег и доњег строја.

С обзиром на велики број типова дефеката који стварају неравнине на возној површи главе шине, истраживања у Дисертацији су примарно усмерена на дефекте услед замора шинског челика (*RCF – Rolling Contact Fatigue*), који директно утичу на безбедност железничког саобраћаја: *head checking* (кодна ознака 2123 и 2223 према *UIC Code 712* [13]), *squat* (кодна ознака 227 према *UIC Code 712* [13] и кодне ознаке 127, 227, 2 271, 417, 427 и 437 према *EN 16729–3* [14]), *belgrospi* (није обухваћен кодном ознаком према *UIC Code 712* [13]), набораност шинске главе (кодна ознака 2201 према *UIC Code 712* [13]) и набораност унутрашње шине услед проклизавања точкова у кривинама малог радијуса (кодна ознака 2202 према *UIC Code 712* [13]). У Дисертацији је поштована класификација и кодне ознаке шинских дефеката према препорукама *UIC Code 712* [13] и *EN 16729–3* [14]. Такође, поштоване су препоруке Међународне железничке уније (*UIC*) да се називи дефеката *head checking* (*HC*), *squat* и *belgrospi* користе званично у научним истраживањима без превођења, због ризика да би погрешан назив дефекта, могао да доведе до неспоразума и примене погрешне мере за управљање развојем дефекта, што би у крајњем исходу могло да угрози безбедност саобраћаја.

RCF дефекти, нажалост, нису обухваћени важећом техничком регулативом за железничку инфраструктуру у Републици Србији, односно Правилником [15]. Супротно очекивањима, техничка регулатива у Србији још увек није хармонизирана са *UIC* препорукама [13, 16] и *EN* стандардима [3, 14], тако да Железнице Србије не примењују *UIC* процедуре за инспекцију, класификацију и пријављивање шинских дефеката и израду статистичких показатеља о шинским дефектима (*UIC* база података). На нивоу *UIC* чланица формирана је јединствена база за прикупљање података у циљу размене искустава и развоја јединствене методологије за управљање шинским дефектима на нивоу Европе и шире. Нажалост, јединствена *UIC* база података о шинским дефектима не садржи податке о железничкој инфраструктури у Србији.

Напред наведено указује на актуелност теме Дисертације и њен значај за безбедност железничког саобраћаја, као и економичност одржавања железничке инфраструктуре. Додатну актуелност теми даје законска обавеза хармонизације техничке регулативе у Србији [17] са техничким захтевима интероперабилности за железничку инфраструктуру [18], укључујући област одржавања шина. Захтеви интероперабилности, за сада, важе за железничке пруге на коридору X, а дугорочно ће важити за целу железничку мрежу у Србији [17].

Након уводних разматрања, у поглављу Дисертације под називом „Управљање развојем неравнина малих таласних дужина са аспекта одрживог развоја“ (Поглавље 2) представљен је савремени приступ у управљању неравнинама малих таласних дужина на горњој површи главе возних шина у колосеку у оквирима одрживог развоја железничке инфраструктуре, уз разматрање комплексних и често супротних захтева корисника, железнице, привреде, животне средине, друштвене заједнице и безбедности транспорта [1]. У Поглављу 2 су приказане расположиве технологије за уклањање неравнина на новим шинама у колосеку (иницираних технологијом производње и насталих приликом полагања шина у колосек). Препоручено је укључивање управљања развојем неравнина малих таласних дужина у интегрално одржавање конструкције горњег и доњег строја железничке пруге, како би се смањили укупни трошкови одржавања инфраструктуре и возила током целокупног животног века колосека и смањили екстерни трошкови (утицаји на животну средину).

У поглављу Дисертације под називом „Смернице за дефинисање стратегије за управљање RCF шинским дефектима“ (Поглавље 3) објашњени су узроци појаве и механизам развоја неравнина малих таласних дужина на горњој површи главе возне шине. Посебно су разматрани следећи типови RCF шинских дефеката: (а) HC шински дефекти на колосеку у правцу и деоницама колосека са већим радијусима ($R \geq 800 - 3000 \text{ m}$), (б) *squat* дефекти који се јављају на деоницама са покретањем и кочењем железничких возила, (в) набораност унутрашње шине услед проклизавања унутрашњих точкова возила у кривинама малих радијуса ($R \leq 450 \text{ m}$), (г) набораност главе шине у колосецима конвенционалних железничких пруга и (д) *belgrospi* дефекти. Сви разматрани RCF дефекти припадају класи неравнина малих таласних дужина. У поглављу су дате опште смернице за дефинисање стратегије за управљање RCF шинским дефектима. У Поглављу 3 највише пажње је посвећено дефекту типа *squat* зато што се експериментални део Дисертације односи на утврђивање зависности појаве *squat* дефекта и крутости шинске подлоге.

У поглављу Дисертације под називом „Инспекција RCF шинских дефеката“ (Поглавље 4) представљено је тренутно стање и преглед непосредних и посредних метода без разарања шинског челика за рану детекцију неравнина малих таласних дужина на возној површи главе шине у колосеку. Представљене су методе инспекције које су обухваћене EN стандардима [14, 19, 20], као и унапређене и нове методе које се могу користити за инспекцију површинских и потповршинских RCF дефеката. У поглављу су наведене смернице за избор метода за инспекцију RCF шинских дефеката.

С обзиром на то да је у пријави Дисертације постављена хипотеза да крутост шинске подлоге утиче на појаву и развој неравнина малих таласних дужина на возној површи главе шине у колосеку, посебно поглавље Дисертације под називом „Крутост шинске подлоге“ (Поглавље 5) посвећено је феномену и методама мерења крутости подлоге. У Поглављу 5 представљени су резултати истраживања утицаја крутости елемената конструкције горњег и доњег строја на укупну крутост шинске подлоге. Указано је на утицај одржавања железничке инфраструктуре на промену крутости шинске подлоге. Анализиран је феномен променљиве крутости шинске подлоге дуж колосека.

У шестом поглављу Дисертације под називом „Експериментални део истраживања – утицај стања колосечне подлоге на појаву *squat* дефеката“ представљен је програм

експерименталног истраживања утицаја крутости шинске подлоге на појаву и развој шинских дефеката типа *squat* на главном пролазном колосеку у станици Панчево Варош. Представљени су резултати претходних истраживања методом опште и методом детаљне визуелне инспекције опходњом колосека у циљу одабира репрезентативне мерне деонице за испитивање крутости шинске подлоге. Детаљно су описани циљеви мерења методама електрометрије и сеизмометрије на изабраној мерној деоници на главном пролазном колосеку. Приказан је број и положај мерних места за обе примењене геофизичке методе. Презентовани су мерни резултати спроведеног електрометријског профилисања у виду три подужна профила дуж мерне деонице, и то: са обе стране и у средини колосека. У циљу одређивања стања застора, планума и тампон слоја, приказане су карте интегрисане на основу претходно добијених профила на три дубинска нивоа (-0,25 m, -0,50 m и -0,75 m). Поред тога, резултати добијени сеизмометријском методом представљени су у виду 2D дистрибуције брзине, као и хоризонталног градијента примарних таласа за профил дуж осовине испитиваног колосека. Добијени резултати су анализирани са аспекта крутости подлоге испитиваног колосека.

У последњем поглављу Дисертације презентована су закључна разматрања и дате су препоруке за даља истраживања.

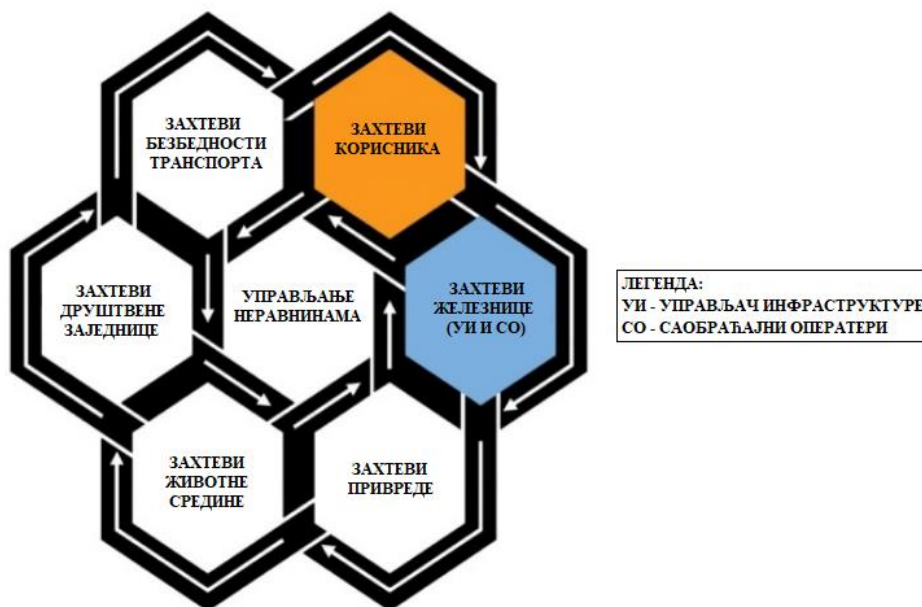
2 УПРАВЉАЊЕ РАЗВОЈЕМ НЕРАВНИНА МАЛИХ ТАЛАСНИХ ДУЖИНА СА АСПЕКТА ОДРЖИВОГ РАЗВОЈА

У овом Поглављу се разматра управљање неравнинама малих таласних дужина на горњој површи главе возних шина у колосеку са аспекта одрживог развоја железничког транспорта. Поглавље садржи резултате истраживања, разматрања и закључне ставове који су објављени у раду [1].

У поменутом раду [1] анализиран је одрживи развој железничке инфраструктуре са аспекта животне средине, уз разматрање комплексних и често супротних захтева корисника, привреде и друштвене заједнице. Разматрања у [1] су усмерена на железничку инфраструктуру у Републици Србији. Упркос томе, закључни ставови дефинисани у овом раду имају општи значај и могућност примене.

Одрживи развој железничке инфраструктуре треба да задовољи потребе савременог транспорта, а да притом не угрози одрживост природних ресурса за будућа поколења, нити да својим утицајима на природно окружење ограничи могућности нових генерација да задовоље своје потребе. Овакви захтеви су у складу са резолуцијом Уједињених нација „A/RES/70/1 – *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*“ из 2015. године, у чијој изради је активно учествовала и Република Србија, која у стратегију развоја друштва и економије укључује захтеве одрживог развоја.

Савремени приступ у управљању неравнинама малих таласних дужина на горњој површи главе возних шина у колосеку мора бити заснован на одрживом развоју железничке инфраструктуре и као такав мора да укључи комплексне захтеве: корисника, железнице, привреде, животне средине, друштвене заједнице и безбедности транспорта (слика 2.1).



Слика 2.1 Комплексни захтеви за управљање неравнинама на површини главе шине

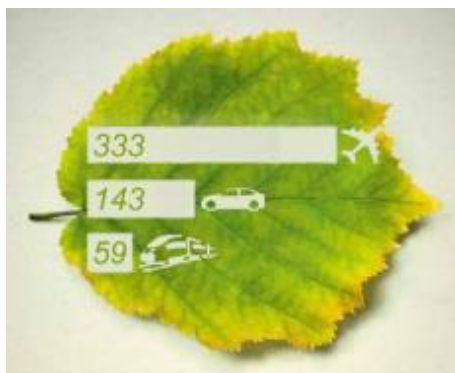
Транспорт је изузетно важан сектор привреде широм света. Његов развој директно доприноси расту и развоју економије у целини. У исто време, инфраструктура представља неопходан, али не и довољан услов за развој транспорта и економије [1]. Са друге стране, емисија штетних гасова, бука, вибрације, утицаји електромагнетног поља, климатске промене, саобраћајна загушења и несреће угрожавају људско здравље и животну средину [21]. Додатно, за грађење саобраћајне инфраструктуре троше се природни ресурси и загађује се животна средина (слика 2.2). Због тога, транспорт у исто време представља и потребу и претњу за развој људског друштва [1]. У том смислу, европска транспортна политика тежи одрживом развоју транспорта на глобалном нивоу, који је заснован на одрживом коришћењу природних ресурса, заштити и унапређењу животне средине, уз задовољење реалних и различитих потреба свих категорија потенцијалних корисника транспорта [22 – 25]. Железнички транспорт је још увек вид транспорта са неискоришћеним капацитетима и изразитим еколошким потенцијалом на глобалном нивоу.



Слика 2.2 Карбонски отисак железничке инфраструктуре и возила [26]

Успостављање законских права, одговорности и последица у вези са животном средином, као и медијске кампање и укључивање еколошких тема у образовање, допринели су развоју еколошке свести грађана широм света. Ипак, практично искуство јасно показује да еколошка свест људи није довољан услов за прелазак са осталих видова транспорта (нарочито са друмског и ваздушног који имају изразито негативни еколошки утицај) на

железнички транспорт [1]. Слика 2.3 приказује карбонски отисак различитих видова транспорта изражен као CO_2 емисија у грамима по путничком километру [27].



Слика 2.3 Карбонски отисак различитих видова транспорта [27]

У циљу испуњења захтева корисника и постизања конкурентског капацитета на транспортном тржишту, железничка инфраструктура, возила и пратеће услуге морају бити усклађени са специфичним захтевима модерног превоза [18, 28]. Без обзира на званичну транспортну политику која је декларативно усмерена ка одрживом развоју, концепт „преласка на железницу“ („*modal shift to rail*“ concept) се преспоро примењује на транспортном тржишту у Србији, али и широм света [27].

Циљ „*modal shift to rail*“ концепта је развој савремене железничке инфраструктуре која мора да задовољи потребе корисника (превоз путника и робе), циљеве друштвеног развоја, као и захтеве одрживог развоја транспорта и друштва у целини [26, 29 – 33].

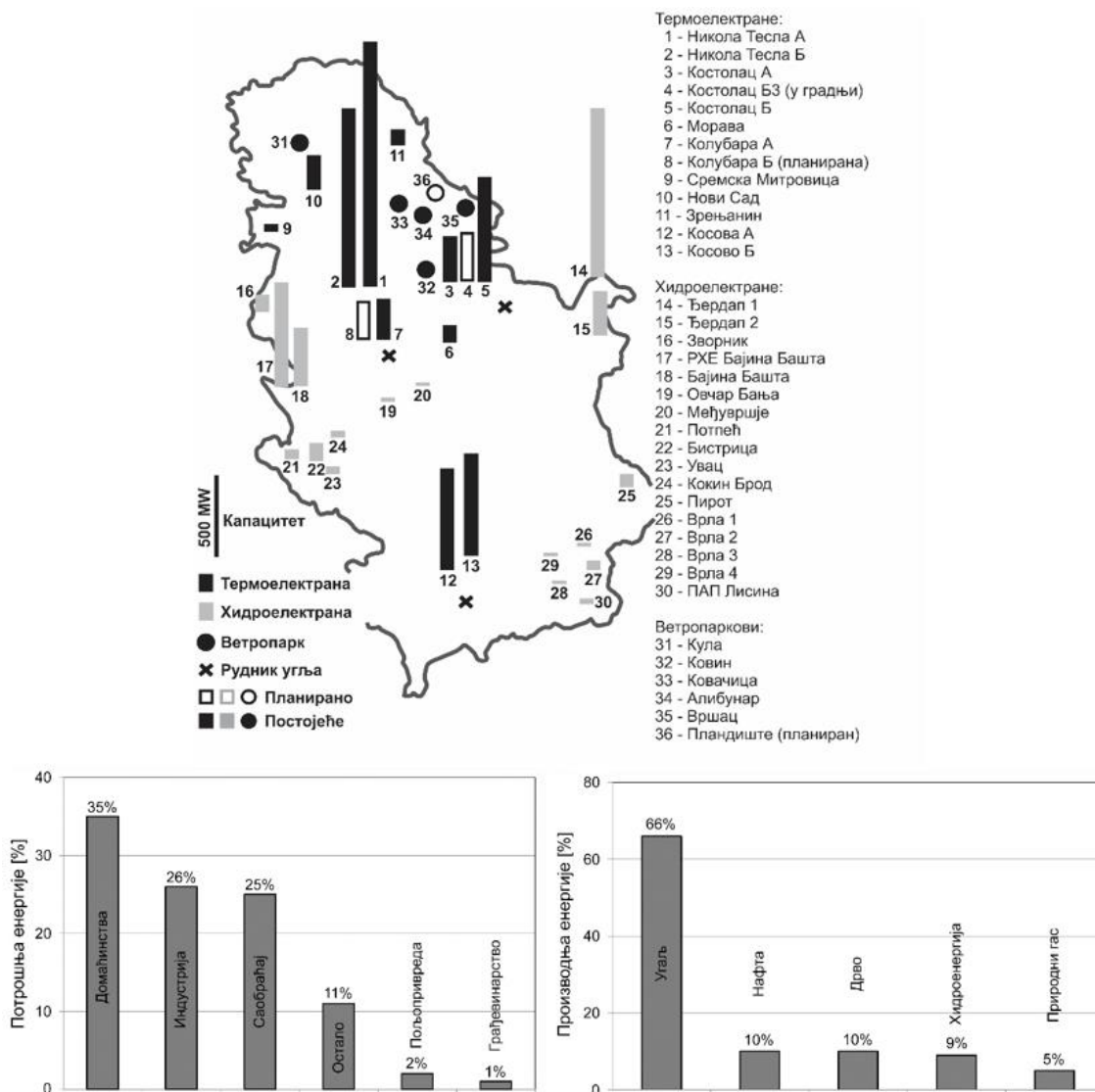
2.1 Утицај електрификације на одрживост железничког транспорта

Један од основних захтева одрживог развоја железничког транспорта је електрификација железничке мреже, и то уз обавезну примену одрживих извора електричне енергије [1].

Велики проценат фосилних горива у производњи електричне енергије негативно утиче на карбонски отисак железничког транспорта у Републици Србији (слика 2.4). Такође, примена великог броја дизел локомотива на железничкој мрежи емитује продукте који значајно загађују ваздух, земљиште и воду у окружењу [1].

Нажалост, електрификација железничког система у Србији, с обзиром на велики број термоелектрана, не даје потребан допринос унапређењу животне средине. Електроенергетски систем у Србији примарно је заснован на коришћењу угља у термоелектранама у Обреновцу, Костолцу и Свилајнцу. Процењени потенцијал обновљивих енергетских ресурса у Србији износи 5,6 милиона тона изражено у еквиваленту нафте за годину дана [1].

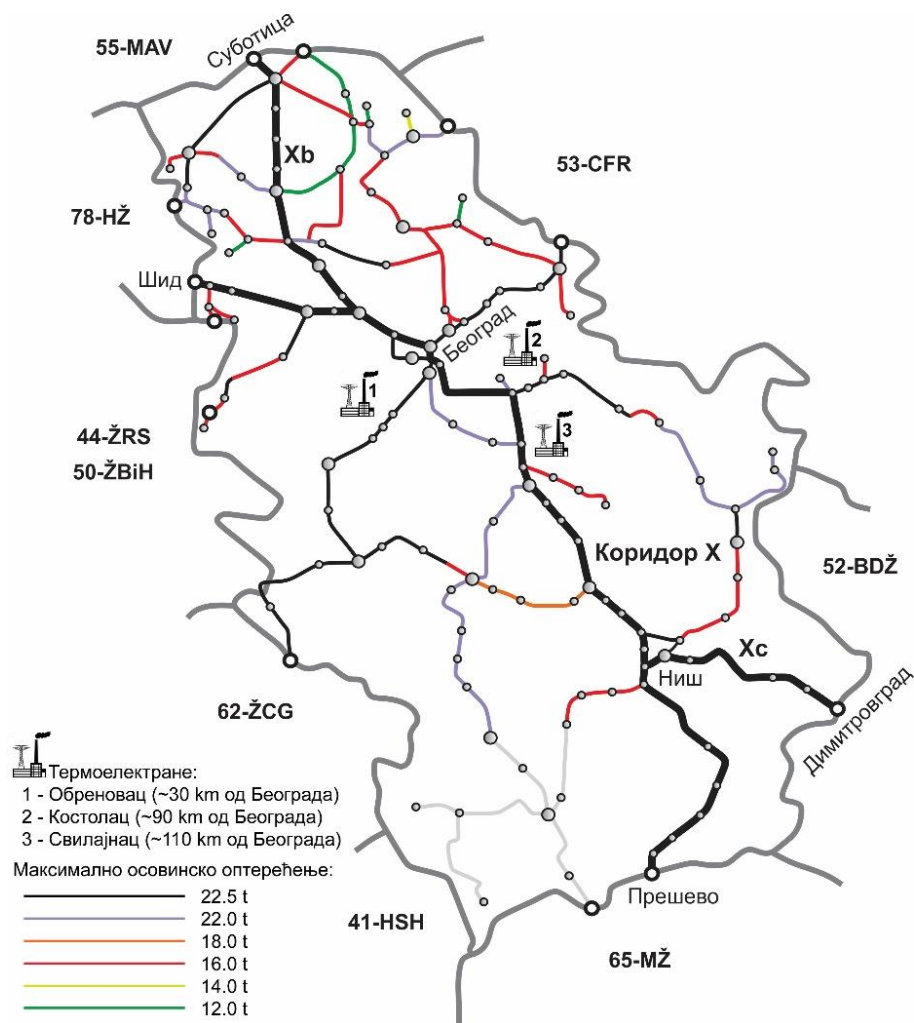
У Србији је електрификовано око 1/3 железничких колосека, с тим да се у блиској будућности планира електрификација додатних 254 km колосека (у оквиру реконструкције и новоградње). Главне карактеристике планиране железничке инфраструктуре у Републици Србији представљене су у раду [34] заједно са локацијом термоелектрана у односу на трасе железничких пруга (слика 2.5).



Слика 2.4 Локација електрана (хидроелектране, термоелектране и ветропаркови) на територији Републике Србије [1]

Капацитет електрана у Србији износи 8,359 MW, при чему је највећи део производње (око 62%) заснован на сагоревању лигнита уз неминовно загађење ваздуха, земљишта, воде, хране и здравља људи у околини термоелектрана и шире. Сваке године у Србији се произведе око 7 милиона тона летећег пепела из термоелектрана. Тренутно се на депонијама око термоелектрана налази више од 300 милиона тона летећег пепела и шљаке, што заузима огроман простор (око 1.600 хектара обрадиве земље). Дугорочно и трајно решење овог проблема везано је за постепену редуцију удела термоелектрана у производњи електричне енергије и повећање удела енергије која се добија из обновљивих извора.

Као и код осталих линијских инфраструктурних објеката у области транспорта, грађење железничке инфраструктуре захтева велике количине земљаног материјала за извођење насипа. Веома често (нарочито у урбаним срединама, на деоницама где траса пролази кроз пољопривредно земљиште и слично) постоји недостатак погодног земљаног материјала, или су позајмишта земљаног материјала на великој удаљености у односу на градилиште на коме се изводе земљани радови. Један од начина за решавање ученог проблема недостатка материјала за извођење насипа је коришћење материјала који настају као нуспродукт у термоелектранама (летећи пепео и шљака).



Слика 2.5 Положај термоелектрана у околини железничких пруга у Србији [34]

На основу Закона о управљању отпадом [35] пепео и шљака из термоенергетских постројења су сврстани у отпад који се може користити као секундарна сировина. У Србији се као грађевински материјал за израду железничког насипа могу користити летећи пепео и шљака који настају као нуспродукт рада термоелектрана. Смањење депонија летећег пепела и шљаке кроз њихову употребу у области грађевинарства доноси вишеструке користи, од којих су најзначајније заштита животне средине, заштита природних необновљивих ресурса (камен, песак, шљунак) и велике финансијске уштеде. Примена летећег пепела за грађење железничке инфраструктуре омогућена је на основу Уредбе Владе Републике Србије [36]. Цена овог материјала износи 0 РСД.

Доношењу Уредбе [36] претходила су геотехничка лабораторијска тестирања [37] која су доказала да испитивани летећи пепео произведен у термоелектранама у Србији може да се користи за грађење железничке инфраструктуре [34], и то за:

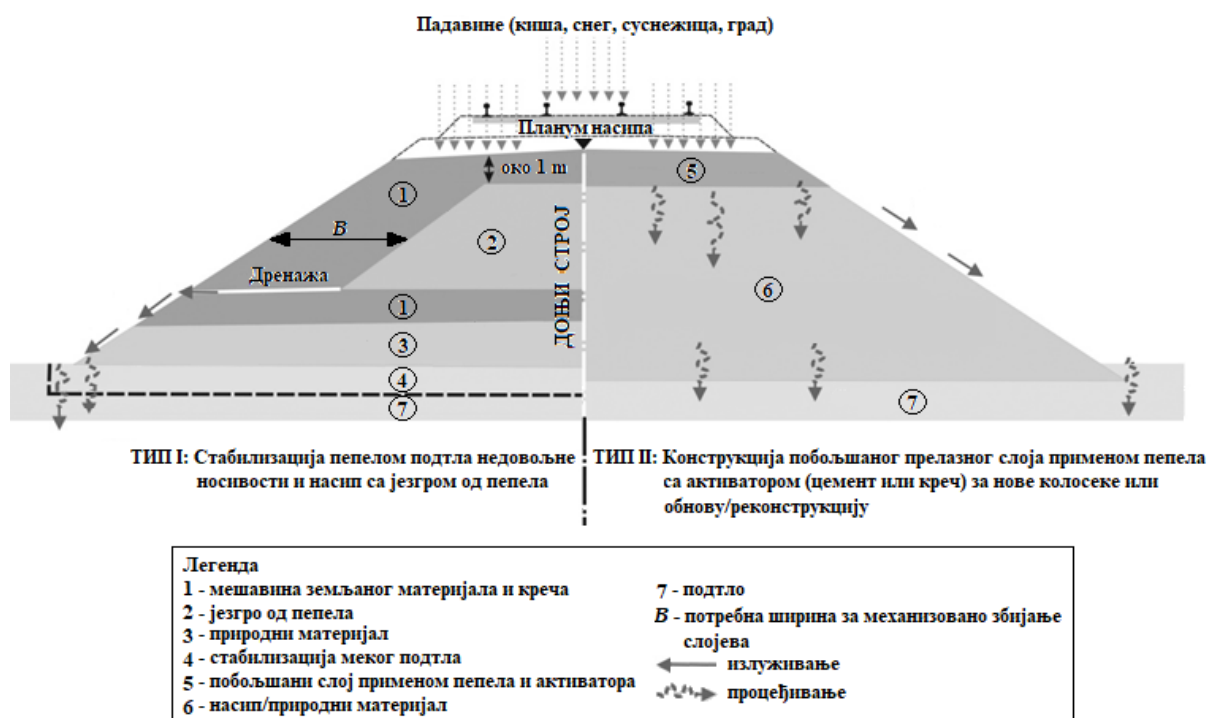
- стабилизацију темељног тла недовољне носивости,
- израду земљаног насипа (коришћењем језгра од пепела или стабилизација земљаног материјала коришћењем пепела, слика 2.6),
- израда слоја за повећање носивости насипа коришћењем пепела и активатора од цемента или креча (слика 2.6),
- израду носећег слоја испод бетонске/асфалтне носеће колосечне подлоге, који је стабилизован пепелом уз коришћење активатора (цемент или креч).

Ипак, пре примене летећег пепела за израду носећих слојева конструкције доњег строја железничке инфраструктуре, захтева се испитивање ризика од излуживања опасних материја у природно/урбано окружење [1]. У том смислу, неопходно је испитивање излуживања из насипа на пробним деоницама под саобраћајем.

Слика 2.6 приказује два типа конструкције земљаног трупа железничке пруге:

- тип конструкције I – језгро од летећег пепела и заштитни слој од земљаног материјала стабилизованог кречом (заштита језгра од пепела и баријера против излуживања),
- тип конструкције II – носећи слој (испод тампона) који је стабилизован пепелом уз употребу активатора од цемента или креча.

Тип I подразумева контролисано излуживање кроз дренажни систем, док тип II подразумева спонтано вертикално излуживање, уз процеђивање кроз носеће слојеве доњег строја железничке пруге.



Слика 2.6 Феномен излуживања и типови конструкције земљаног трупа применом летећег пепела [1]

Студија [37] показује да се током времена повећава носивост слојева стабилованих употребом летећег пепела. За уједначену носивост стабилованог слоја неопходна је хомогена мешавина земљаног материјала и пепела, уједначено и правовремено збијање, као и правилна нега (влажење прскањем након уградње).

Од изузетног значаја за појаву и развој шинских дефеката типа *squat* је постизање и одржавање захтеване (пројектоване) и равномерне крутости колосечне подлоге током грађења и одржавања железничке инфраструктуре. У случају примене летећег пепела за грађење доњег строја железничке пруге, од изузетне важности је контрола хемијског састава и геомеханичких карактеристика пепела који се узима са депоније, правилно транспортовање и чување пепела, поштовање прописане технологије уграђивања и неге, као и обавезна контрола остварене носивости (*CBR* опитом треба да се докаже захтевана и равномерна носивост). Уколико се из било којих разлога (нпр. извођач није овладао технологијом рада са летећим пепелом) докаже да је носивост на плану железничке пруге довољна и истовремено неравномерна, то би могло да доведе до брже појаве и развоја шинских

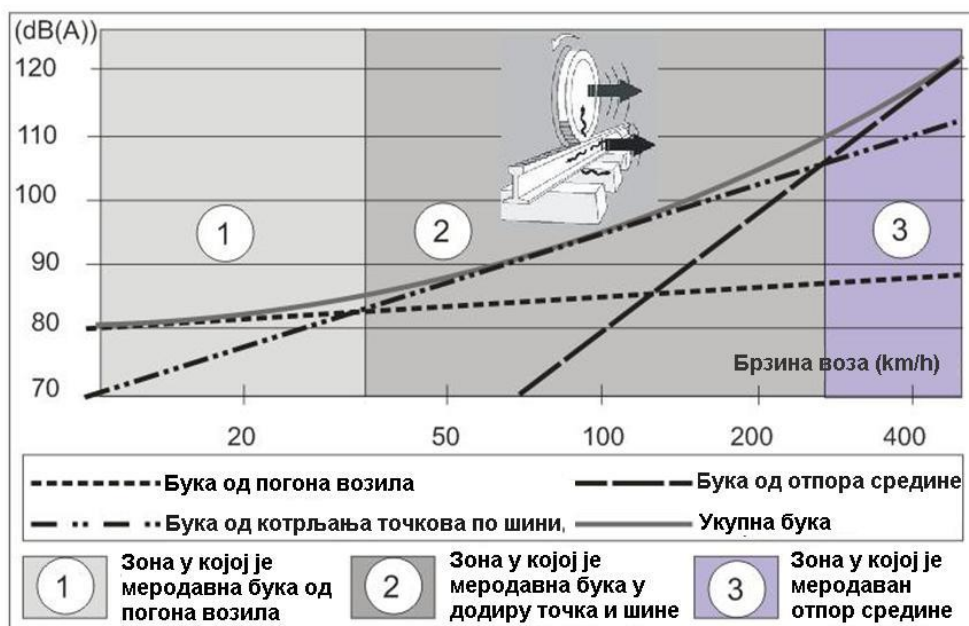
дефеката типа *squat* услед појаве зона са већом крутошћу колосечне подлоге. У том случају проблеми и трошкови одржавања могли би да буду већи од остварених уштеда уградњом летећег пепела. С обзиром на то да је појава шинских дефеката типа *squat* везана за зоне кочења и покретања возила, овај проблем се најједноставније може решити тако да се за грађење доњег строја испод колосека у службеним местима (колосеци на којима се возови заустављају), као и колосека испред предсигнала и сигнала, не користи летећи пепео.

Поред тога, захтев да се реализује пројектована и равномерна крутост колосечне подлоге како би се смањили трошкови одржавања је општи захтев који важи без обзира на врсту материјала који се уграђују у конструкцију горњег и доњег строја железничке инфраструктуре.

2.2 Утицај емисије буке и вибрација на управљање неравнинама на глави шина

Неравнине на возној површини главе возних шина могу проузроковати буку, вибрације и додатна динамичка напрезања, што има за последицу брже пропадање геометрије колосека и елемената конструкције горњег и доњег строја.

Емисија буке примарно зависи од брзине кретања железничких возила, као што показује слика 2.7.

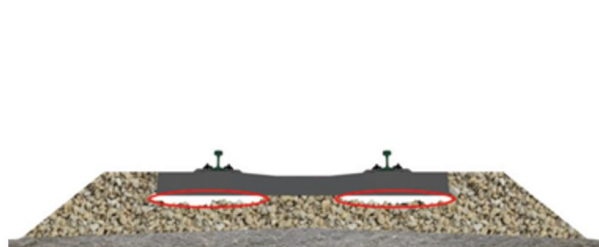


Слика 2.7 Ниво и извори буке од железничког саобраћаја зависно од брзине возила [38]

Као што је претходно поменуто, појава шинских дефеката типа *squat* просторно је ограничена зонама кочења и покретања возила, као и зонама са малим коефицијентом трења у додиру точка и шине (услови влажног додира точка и возне површи главе шине у тунелима). У складу са сликом 2.7, даља разматрања утицаја шинских дефеката типа *squat* на емисију буке одређена су одговарајућим нивоима брзина возила у зонама појаве ових дефеката:

- Зона 1 одговара зони колосека у службеним местима на којима се сва возила заустављају;
- Зона 2 одговара зони колосека у службеним местима на којима се нека возила заустављају, а нека транзитирају без заустављања, као и зонама испред предсигнала и сигнала. Такође, зона 2 одговара и деоницама колосека у железничким тунелима;
- С обзиром на ниво пројектованих брзина на железничкој мрежи ($V_{max} = 200 \text{ km/h}$), зона 3 није од значаја за разматрање у области железничког саобраћаја у Републици Србији, она се односи на деонице колосека на којима возила саобраћају брзинама већим од 280 km/h.

Појава шинских дефеката типа *squat* на колосецима у службеним местима на којима се сва возила заустављају незнатно повећава ниво буке зато што је бука од погона возила и уређаја у возилу доминантна (слика 2.7). Ипак, у условима када развој шинских дефеката типа *squat* утиче на појаву лошег ослањања (слика 2.8) и вибрирања прагова под точковима возила које улази/излази са колосека, могућ је пренос структурне буке (вибрација) у окружење (слика 2.9).

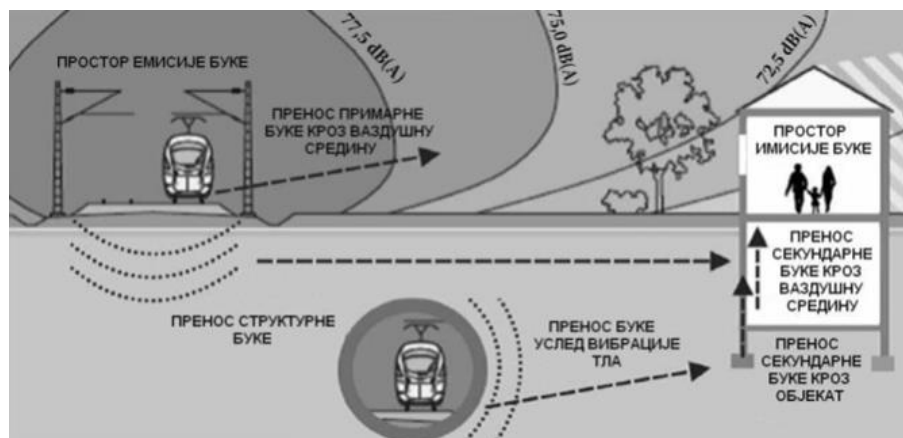


Празнине испод површи ослањања прага [39]



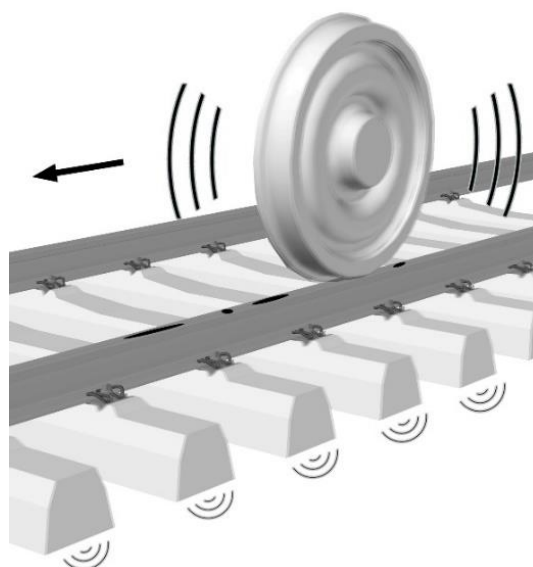
Праг број 51 испод десне шине колосека број 2 у станици Панчево Варош

Слика 2.8 „Прагови играчи“ услед делимичног ослањања на подлогу од туцаника



Слика 2.9 Пренос структурне буке кроз окружење [40]

Појава шинских дефеката типа *squat* на колосецима у службеним местима на којима се не заустављају сва возила, као и на деоницама колосека у тунелима, или деоницама испред сигнала и предсигнала (када је на њима зелено светло) утиче на повећање емисије буке у окружење услед неравнина на глави шине у додиру са точковима возила (слика 2.10). Истовремено, овакво стање возне површине на глави шине у додиру са точковима возила доводи до емисије структурне буке (слика 2.10).



Слика 2.10 Услови за појаву буке и вибрација услед неравнина у додиру точак/шина

У сваком случају, појава неравнина малих таласних дужина на возној површи главе возних шина може да доведе до оштећења површи точкова возила које су у додиру са оштећеном шином. Даље, оштећени точак може да доведе до оштећења возних шина на свим колосецима по којима се возило креће. Ово упућује на важност санирања неравнина на глави шине у што ранијој фази њихове појаве применом цикличног и корективног брушења (уз укључивање технике глодања и стругања шинског челика према потреби), као што показује слика 2.11.



Слика 2.11 Укључивање технике брушења у циклус одржавања колосека и застора

Основни циљ је да се омогући железнички транспорт са минималним утицајем на окружење (бука, вибрације), а да при томе трошкови грађења и одржавања инфраструктуре буду прихватљиви за Управљача инфраструктуре у условима безбедног железничког саобраћаја, као и да железнички транспорт одговори захтевима корисника и унапреди своју конкурентност у односу на остале видове саобраћаја.

2.3 Аспект интегралног одржавања за одрживу железничку инфраструктуру

Савремени приступ управљању неравнинама малих таласних дужина на возној површи главе шина у колосеку разматра одржавање шина у саставу циклуса одржавања осталих елемената конструкције горњег строја током целокупног животног века [41]. Слика 2.12 приказује пример међусобног усклађивања циклуса одржавања за животни век конструкције горњег строја 40 година са заменом шине након 20 година, циклусима чишћења застора након 16 година, циклусима подбијања прагова након 4 године, као и циклусима брушења шина након 4 године експлоатације. Овај концепт одговара стратегији одржавања у развијеним железничким управама у Европи, с тим што у кривинама са малим радијусима (радијуси до 450 m [42]) циклус замене шине може да буде чешћи због појаве набораности дугачких таласа (назив и кодна ознака дефекта 2202 према [13]) на глави унутрашње шине и њеног бочног хабања.



Слика 2.12 Принцип интегралног одржавања конструкције горњег и доњег строја са заменом шине на половини животног века конструкције

Са друге стране, немачке железнице промовишу принцип продужења животног века шине применом савремене технологије одржавања како би се изједначио животни век шине и бетонског прага (40 – 45 година). Слика 2.13 приказује принцип интегралног одржавања са

циклом брушења шине након 2 године. Претпоставка је да део шинског челика који се односи хабањем заједно са делом који се скида брушењем не прелази прописану вредност укупног дозвољеног хабања (нпр. 14 mm за шину 60E1). Треба напоменути да се овакав приступ односи на магистралне пруге и пруге за велике брзине, што искључује из разматрања изражено бочно хабање на шинама у кривинама малих радијуса. У случају примене оваквог приступа, потребно је доказати и економску оправданост кроз анализу трошкова током целокупног животног века шине.



Слика 2.13 Принцип интегралног одржавања конструкције горњег и доњег строја са једнаким животним веком шине и прага

Саставни део стратегије савременог одржавања је анализа трошкова током животног века шина, који обухватају трошкове набавке, транспорта, полагања, неге, инспекције и одржавања возних шина у колосеку. Анализом укупних трошкова током животног века конструкције горњег строја могуће је доношење исправне и транспарентне одлуке о избору материјала, стратегији превентивног и корективног одржавања и плановима замене елемената конструкције горњег и доњег строја. Дакле, управљање одржавањем шина сматра се интегралним делом одржавања конструкције горњег и доњег строја.

У недостатку званичних података о дужинама регуларних циклуса одржавања који се примењују на железничкој мрежи у Србији, наводе се типичне дужине циклуса одржавања за компоненте горњег строја и завршни слој доњег строја, на типичним главним магистралним пругама у Аустрији према подацима из литературе [43]:

- 4 – 5 година (40 – 70 милиона бруто тона) за циклично подбијање прагова,
- 1 – 3 године (20 – 30 милиона бруто тона) за циклично брушење шине,

- 12 – 15 година (150 – 300 милиона бруто тона) за чишћење засторне призме,
- 10 – 15 година (300 – 1000 милиона бруто тона) за замену шина,
- 20 – 30 година (250 – 600 милиона бруто тона) за замену дрвених прагова,
- 30 – 40 година (350 – 700 милиона бруто тона) за замену бетонских прагова,
- 10 – 30 година (100 – 500 милиона бруто тона) за замену система шинског причвршћења,
- 20 – 30 година (200 – 500 милиона бруто тона) за замену туцаника у застору,
- > 40 година (преко 500 милиона бруто тона) за санацију доњег строја.

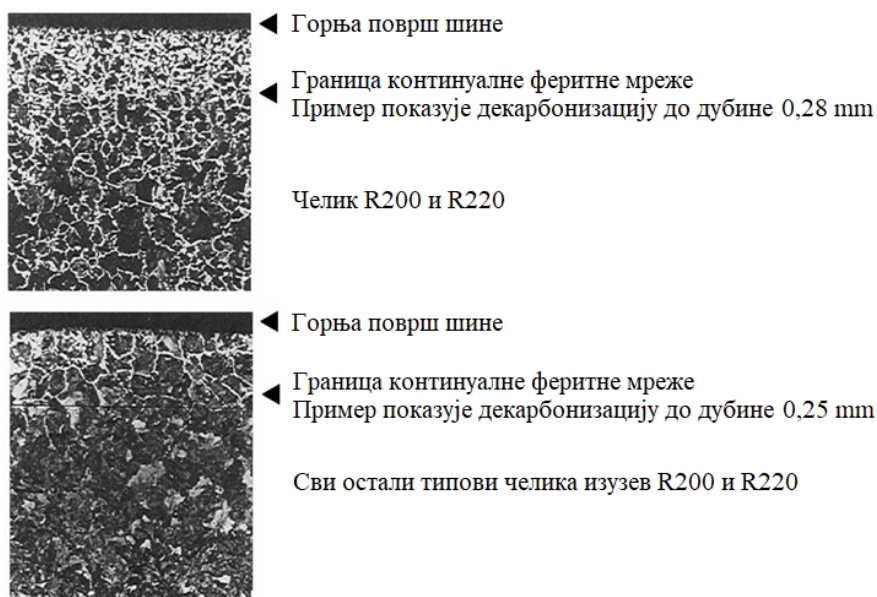
За разматрање животног века земљаног трупa коришћени су, такође, подаци из литературе. Према [44], дужина пројектованог животног века земљаног трупa креће се од 70 до 120 година. Ипак треба имати у виду да је појам земљаног трупa дефинисан на различите начине у различитим земљама, тако да подаци приказани у табели 2.1 нису директно упоредиви. Тако на пример, земљани труп у Кини обухвата и потпорне конструкције.

Табела 2.1 Пројектовани животно век земљаног трупa у различитим земљама света

Држава	Пројектовани животно век
Кина	- за земљани труп 100 година - за дренажни систем и заштиту косина 60 година
Јапан	- за земљани труп 100 година - за дренажни систем, заштиту косина, баријере за заштиту од буке и друге заменљиве конструкције обично мање од 100 година у складу са комплексношћу њихове замене
Немачка	- 120 година
Француска	- за земљани труп, у зависности од категорије пруге, 100 година за магистралне пруге и 70 година за остале
Шпанија	- 100 година
Шведска	- 80 година

Увођење принципа интегралног одржавања [41] подразумева временско синхронизовање дужина и почетака/завршетака циклуса одржавања уз поштовање принципа спровођења активности одржавања „одоздо – на горе“ (од планума, преко застора, до уређења нивелете и смера колосека и на крају брушење шина). Интегрално одржавање разматра могућност једновремене замене колосека (возне шине, систем причвршћења и колосечни прагови), као и одређивање термина за почетак брушења главе возних шина непосредно након термина завршетка циклуса одржавања елемената горњег и доњег строја, на што дужој деоници пруге (како би се повећала ефикасност и смањили трошкови одржавања). На тај начин се минимизирају укупни трошкови одржавања горњег строја, уз продужење животног века шине:

- уклањањем декарбонизованог површинског слоја до дубине око 0,3 mm (насталог у процесу производње шине) помоћу брушења возне површи главе шине непосредно након полагања шина у колосек (слика 2.14),
- цикличним брушењем у циљу уклањања површинских шинских дефеката (слика 2.15),
- корективним брушењем површинских дефеката (између регуларних циклуса брушења).



Слика 2.14 Фотомикрографски приказ дубине декарбонизованог слоја шинског челика [45]

На слици 2.15 су представљене две стратегије брушења. Стратегија брушења I се предузима у раној фази развоја прслине при дубини d_I . Стратегија брушења II се предузима у каснијој фази развоја прслине при дубини d_{II} . Уочава се да су циклуси брушења при стратегији I мање дужине и да је дебљина слоја који се уклања брушењем мања него у случају стратегије II. У сваком конкретном случају разматра се више стратегија како би се одредила оптимална стратегија која обезбеђује захтевано продужење животног века уз што мање трошкове одржавања.

Смањење трошкова и повећање ефикасности одржавања, уз продужење животног века конструкције горњег строја, повећава конкурентност железничког транспорта, што је битан предуслов за одрживи развој овог вида транспорта [1].

Ефикасно управљање одржавањем шина у оквиру интегралног одржавања конструкције горњег строја обавезно укључује:

- оптимални избор шина (квалитет челика и профил шине у складу са стандардом [45]),
- оптимални избор технологије полагања шина,
- контролу квалитета извршених радова на колосеку (пријем радова укључујући превентивно брушење нових шина у колосеку непосредно након његовог полагања, у складу са стандардом [46]),
- избор оптималних метода за утврђивање стања возних шина у колосеку без разарања шинског челика (Поглавље 4 у Дисертацији) за различите врсте шинских дефеката,
- цикличну инспекцију возних шина у колосеку применом одговарајуће методе инспекције,
- утврђивање критеријума и процедуре за праћење стања шина након извршене цикличне инспекције,
- праћење стања шина са дефектима у колосеку под саобраћајем (инспекције између редовних цикличних инспекција),
- негу возних шина у колосеку (подмазивање спољне шине у кривинама, превентивно брушење након замене шине у складу са захтевима стандарда [46]),
- циклично брушење возних шина у колосеку уз могућу примену савремене технологије машинског глодања са завршним брушењем шинског челика,

- према потреби, корективно брушење возних шина у колосеку уз могућу примену савремене технологије машинског стругања, глодања и завршног брушења шинског челика,
- утврђивање критеријума за спровођење репрофилисања шина [2, 3, 47],
- утврђивање критеријума за замену возних шина у колосеку.



Слика 2.15 Принцип утицаја цикличног брушења на животног век шине

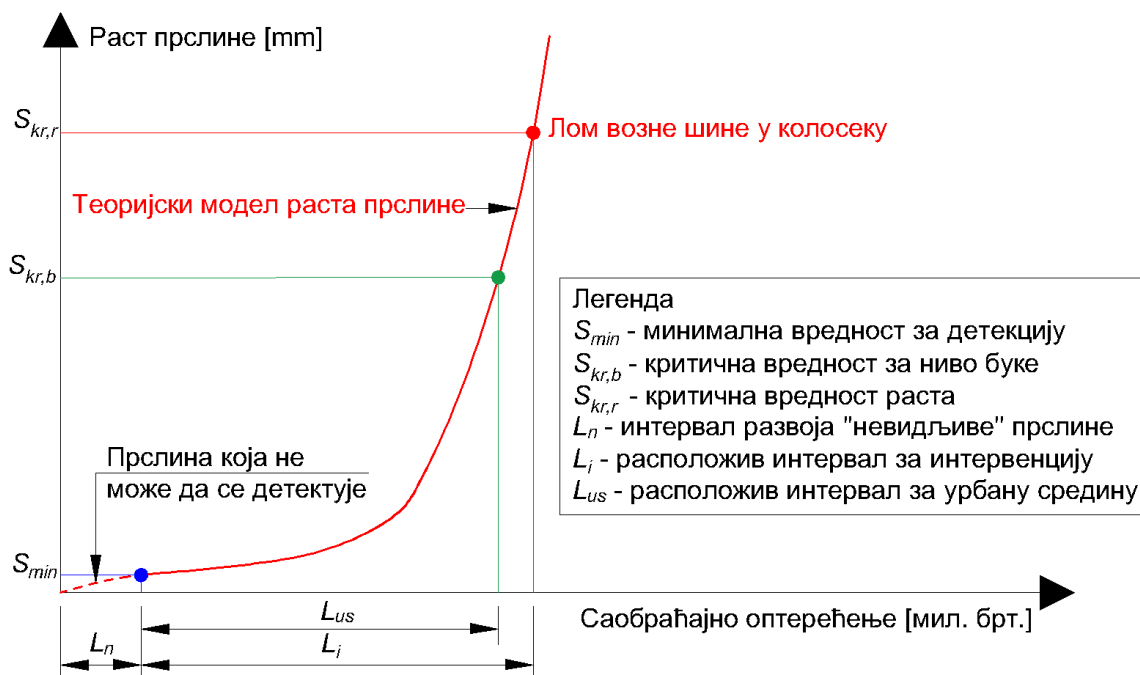
Превентивним брушењем нових шина непосредно након њиховог полагања у колосек примарно се врши уклањање површинског слоја са ниским садржајем угљеника на глави нове шине (слика 2.14). Превентивним брушењем се одлаже појава будућих дефеката на возној површини шине, али немогуће је постићи да се у потпуности искључи појава дефеката током експлоатације. Овим превентивним поступком се, такође, уклањају нерегуларности геометрије горње површи главе шине настале током полагања, уређења геометрије и стабилизације колосека. Превентивно брушење спада у негу шина. Превентивно брушење заједно са типом и квалитетом уграђених шина, као и квалитетом полагања возних шина дефинише тзв. инхерентни (почетни) квалитет положених возних шина (слика 2.11) од кога зависи брзина пропадања шина (развој шинских дефеката и пропадање геометрије колосека) у колосеку.

Циклично брушење шина се врши након уређења нивелете и смера, као и стабилизације колосека. Поменути радови (брушење шина, уређење геометрије и стабилизација колосека) се по могућности изводе у истом затвору колосека како би се редуковали (а) трошкови планирања радова, (б) трошкови припреме за извођење радова на колосеку и (в) трошкови због ометања саобраћаја. Цикличним брушењем се уклања површински слој шинског челика који садржи највише шинских дефеката у раној фази развоја (слика 2.15). На тај начин се редукују укупни трошкови одржавања целокупне конструкције горњег строја током животног века шине. Све чешће се, поред примене технологије брушења шина ради отклањања површинских и потповршинских дефеката услед замора шинског челика, користи и комбинована технологија глодања са завршним брушења главе шине. У односу на технологију брушења шине, комбинованом технологијом се постиже знатно већи учинак јер

се једним пролазом машине техником глодања уклања од 0,3 mm до 3 mm шинског челика. За исти учинак довољан је значајно краћи затвор колосека. Челична струготина, која настаје глодањем главе шине, скупља се у посебном складишном простору радне машине и може да се рециклира. Применом технологије глодања, изостаје абразивна челична прашина која карактерише поступак брушења челика. Поменута прашина је опасна за дисајне органе радника, а поред тога неповољно утиче на учинак кочница које раде на принципу вртложних струја. Значајна предност технологије глодања шинског челика је изостајање варничења које је карактеристично за брушење шина, што искључује опасност од пожара (нарочито у летњим месецима). То значи да у случају глодања није потребно квашење радног простора пре проласка машине за глодање, што значајно убрзава и појефтињује радни поступак. Ово указује да је комбиновани поступак прилагођен захтевима животне средине.

Заостале неравнине на возној површи главе шине након спровођења цикличног брушења, као и неравнине које се прогресивно развијају у периоду између суседних циклуса брушења, морају се уклонити корективним брушењем на дужини локалне неравнине. За корекцију оваквих дефеката може се користити стругање, глодање и завршно брушење горње површи возне шине у колосеку. С обзиром на то да је шински дефекат типа *squat* просторно ограничен на карактеристичним зонама појављивања, једноставан је за праћење у случају прогресивног напредовања и предузимање корективног брушења.

Ефикасно управљање неравнинама на глави возне шине у колосеку укључује праћење и прогнозу раста прслине. Развој прслине се најчешће прати у односу на акумулирано саобраћајно оптерећење за посматрану шину, које се изражава у превезеним бруто тонама. Слика 2.16 приказује принцип праћења раста прслине и критичне вредности развоја прслине за интервенцију Управљача инфраструктуре. Тренутак најранијег уочавања шинског дефекта зависи од примењене методе инспекције. На слици 2.16 испрекиданом линијом представљен је прогнозирани раст прслине до тренутка најраније детекције („невидљива прслина“ пре детекције). Дужина интервала развоја „невидљиве прслине“ у шини изразито зависи од примењене методе за инспекцију шинских дефеката. За ефикасно управљање шинским дефектима значајно је да се прслина уочи што раније (Поглавље 4).



Слика 2.16 Модел развоја прслине и расположиви интервали за одржавање шине

Од тренутка детекције прслине почиње интервал у коме Управљач инфраструктуре може да примени технологију брушења (алтернативно глодања/стругања) у циљу уклањања дефеката. Циљ је да се дефекти отклоне у раној фази развоја. Расположиви интервал за одржавање шине зависи од окружења у коме се колосек налази. У урбаном окружењу и другим окружењима која су осетљива на буку, развој прслине не сме да узрокује прекорачење дозвољеног нивоа буке (меродаван је дозвољени ниво ноћне буке). У ненасељеним подручјима (где не постоји прописан максимални допуштени ниво буке) максимална дужина интервала за интервенцију је ограничена термином за замену шине пре појаве лома (слика 2.16).

Због великог броја утицајних фактора не може се егзактно прогнозировать раст прслина на возној површи главе шине. У циљу ефикасног управљања шинским дефектима, УИ мора да развија моделе раста шинских дефеката који одговарају реалним условима на конкретним деоницама пруге (према типу шине, квалитету шинског челика, осовинском оптерећењу, саобраћајном оптерећењу, перформансама возила, структури брзина, параметрима ситуационог плана и уздужног профила, конструкцији колосечне подлоге, конструкцији доњег строја, улози на железничкој мрежи).

2.4 Утицај управљања неравнинама на глави шина на безбедност саобраћаја

Лоше управљање шинским дефектима повећава трошкове одржавања шина и железничке инфраструктуре у целини. Неконтролисани развој шинских дефеката до лома шине може да угрози безбедност саобраћаја и да додатно повећава трошкове одржавања услед преране замене шина и осталих оштећених елемената конструкције горњег строја. Последице могу да буду људске жртве, повреде, трауме, материјална штета и наношење штете природном/урбаном окружењу. Поред тога, овакве несреће могу да доведу до дугорочног губитка поверења путника у железнички превоз и пад захтева за превозом робе железницом, што смањује конкурентност железнице у односу на остале видове транспорта.

Лом шине је последња фаза развоја прслине, која може да доведе до исклизнућа возила из колосека. Могућност угрожавања безбедности саобраћаја услед развоја шинских дефеката указује на озбиљност спровођења инспекције шина применом одговарајућих савремених поступака.

Слика 2.17 приказује фотографију шинског лома услед замора шинског челика из званичног извештаја [10] о познатој железничкој несрећи у Енглеској (17. октобар 2000. године) услед исклизнућа путничког воза из колосека. Несрећа се догодила на изласку из станице Хетфилд (*Hatfield*) услед вишеструких шинских ломова узрокованих *НС* дефектима у комбинацији са *squat* шинским дефектима. Четири путника су погинула, повређено је преко седамдесет људи и проузрокована је велика материјална штета.

Слика 2.18 приказује део поломљене шине након исклизнућа воза у *Hatfield*-у. У Извештају [10] се наводи да је на дужини од 35 m уочено око 200 делова шине.

Доступни подаци о исклизнућима теретних возова широм света сврставају *RCF* дефекат у један од осам најчешћих узрока исклизнућа [11, 12]. Неки од примера исклизнућа теретних возова услед лома шине наведени су у [12]. Испитивањем узрока несрећа, на шинама је уочен *RCF* дефекат типа *head checking* који је представљао иницијацију за развијање и напредовање попречне прслине која је довела до лома шине. Овакве железничке

несреће на пругама са тешким теретним саобраћајем представљају опасност и по животну средину услед ослобађања опасних материја и могућих пожара.

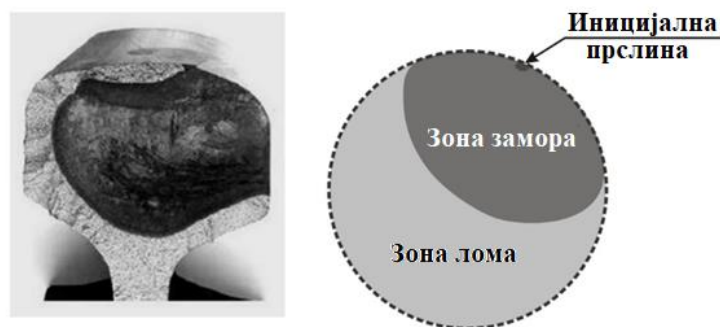


Слика 2.17 Један од суцесивних шинских ломова у Hatfield–у услед замора шинског челика [10]



Слика 2.18 Суцесивни лом дуж шине [10]

Слика 2.19 показује развој попречне пррлине у случају дефекта типа *squat*, као и карактеристичан положај иницијалне пррлине на горњој површи главе шине, изглед зоне замора и зоне лома у попречном пресеку шине.



Слика 2.19 Карактеристични изглед попречног пресека главе шине након лома услед замора шинског челика [48]

У Србији, нажалост, *RCF* шински дефекти нису обухваћени техничком регулативом тако да нема званичних података о исклизнућима насталим услед поменутих шинских дефеката.

2.5 Комплексност захтева одрживог развоја железничког транспорта

Железнички транспорт треба да заштити и, по могућности, унапреди животну средину. У раду [1] разматран је деликатан однос железничке инфраструктуре и животне средине и сугерисано је да политика одрживог транспорта и одговарајућа законска регулатива треба да

буду засновани на принципу „корисник плаћа – загађивач плаћа“, који је промовисан у [23] у циљу испуњења захтева очувања животне средине.

Захтеви одрживости инфраструктуре су свакако комплексни, а понекад и међусобно супротстављени. У том смислу, у потпоглављу 2.1 посебно су разматрани захтеви електрификације који услед примене фосилних горива у термоелектранама доводе до деградације животне средине. Такође, указано је да примена летећег пепела из термоелектрана за грађење тупа железничких пруга није увек повољно решење са аспекта заштите животне средине.

Такође, у потпоглављу 2.3 указује се на могући негативни утицај технологије брушења шина на околину због варничења (слика 2.20), као и негативан утицај на здравље ангажованих радника због абразивности челичне прашине. Због тога савремено одржавање шине треба да укључи технике које немају негативан утицај на околину и здравље људи (нпр. стругање и глодање шинског челика).



Слика 2.20 Припрема за брушење квашењем радног окружења (лево) и варничење током брушења (десно)

У поменутом потпоглављу 2.3 указује се на потребу одређивања оптималне дужине циклуса брушења на што већој дужини колосека како би се постигао што већи економски ефекат и смањено карбонски отисак услед одржавања шина.

У том смислу, у раду [1] се истиче да комплексност утицаја на животну средину захтева свеобухватно сагледавање утицаја железничког транспорта на окружење, укључујући грађење и одржавање железничке инфраструктуре.

Основа за реализацију политике одрживог развоја железничког транспорта у Србији је успостављање хармонизованог законског оквира у складу са захтевима ЕУ [1].

3 СМЕРНИЦЕ ЗА ДЕФИНИСАЊЕ СТРАТЕГИЈЕ ЗА УПРАВЉАЊЕ *RCF* ШИНСКИМ ДЕФЕКТИМА

Поглавље приказује *state of the art* у области разумевања механизма појаве и развоја шинских дефеката услед цикличног понављања котрљања точкова шинских возила по малој додирној површи на глави возних шина. Разматрања у Поглављу су примарно усмерена на неравнине малих таласних дужина које у највећој мери утичу на повећање трошкова одржавања железничке инфраструктуре у циљу испуњења захтева безбедности саобраћаја, окружења, као и интереса УИ и превозника. С обзиром на то да *RCF* шински дефекти у највећој мери утичу на безбедност железничког саобраћаја и трошкове одржавања инфраструктуре и возила, Поглавље се примарно бави овом врстом неравнина малих таласних дужина на возној површи главе шине.

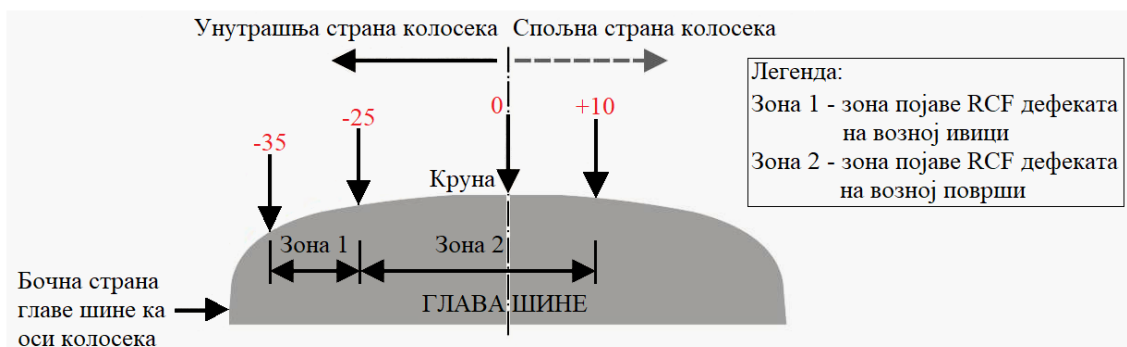
Нажалост, расположива ЕУ техничка регулатива (*UIC* препоруке и европски стандарди) не пружа јединствену терминологију у области *RCF* шинских дефеката, што може да доведе до неспоразума са нежељеним последицама за безбедност саобраћаја. Ранија истраживања *UIC*-а [49] и објављени радови аутора [48, 50] указивали су на неопходност јединствених назива *RCF* типова дефеката на енглеском језику без превођења, укључујући нумеричко кодирање према [13]. У овој Дисертацији се примарно користе називи и кодне ознаке дефеката према [13]. Сва одступања од овог принципа су додатно образложена.

Посебна пажња у Поглављу је посвећена *RCF* дефектима типа *squat*, с обзиром на то да се експериментални део Дисертације бави инспекцијом и анализом узрока појаве и развоја овог дефекта.

На крају Поглавља дају се опште смернице за управљање *RCF* шинским дефектима, на основу којих УИ треба да развије сопствену стратегију за управљање, у складу са стањем инфраструктуре и возила, као и расположивим финансијским средствима којима располаже.

3.1 Механизам појаве и класификација *RCF* шинских дефеката

RCF шински дефекти се јављају у зонама великих и сложених контактних напрезања на глави возних шина у додиру са точковима возила (слика 3.1) и изражена су појава и отворено питање на железницама широм света. Велики број научних и стручних радова аутора, као и истраживачких пројеката, из различитих земаља доказује ову тврдњу.



Слика 3.1 Карактеристичне зоне појаве *RCF* дефеката на возној ивици и на возној површи главе шине

У табели 3.1 класификовани су објављени научни и стручни радови, као и истраживачки пројекти, према различитим аспектима разматрања *RCF* шинских дефеката (инфраструктура, саобраћај, конструкција возила и металургија), као и према смерницама за управљање овим феноменом. Радови аутора су разврстани према географским подручјима из којих долазе први аутори. Исти принцип класификације примењен је и за истраживачке пројекте. Примећује се да су често коаутори радова из различитих земаља, што указује на међународну сарадњу на истраживачким темама из ове области.

Поред тога, табела 3.1 укључује и техничку регулативу издату од стране референтних европских институција: објаве Међународне железничке уније (*UIC*), као и стандарде издате од стране Европског комитета за стандардизацију (*CEN*). Табела 3.1 не укључује преглед литературе која се односи на инспекцију шинских дефеката, која је обрађена у Поглављу 4.

Табела 3.1 Преглед референтне литературе у области *RCF* шинских дефеката

Земља	Аспект разматрања				Смернице за управљање феноменом
	Инфраструктура	Саобраћај	Утицај конструкције возила	Металургија	
Немачка	[51, 52, 53, 54]	[53]		[51, 52, 54]	[51, 52, 54, 55]
Холандија	[56, 57, 58, 59]	[56, 57]	[56, 57, 58, 59]	[56, 57, 58, 59]	[56, 57]
Шведска	[60, 61]	[60]	[60, 61]	[60]	[60]
Србија	[27, 41, 48, 62–66]	[41, 48, 62–66]	[41, 64, 65]	[65]	[27, 41, 48, 62–66]
Јапан	[67–69]	[68, 69]	[68, 69]	[67–69]	[67–69]
Кина	[70, 71]	[70]		[71]	[70]
Аустралија	[72]	[72]	[72]	[72–74]	[72, 75]
Северна Америка	[12, 49, 76, 77]	[12, 49, 77]	[49]		[12, 49, 76, 77]

Институција	Инфраструктура	Саобраћај	Утицај конструкције возила	Металургија	Смернице за управљање феноменом
UIC	[13]	[13]			[13, 16]
CEN					[2, 3, 14, 19, 20]

RCF шински дефекти су појава која се манифестује на конвенционалним пругама, као и на пругама за велике брзине. Такође, овај феномен се уочава, како на пругама за тежак теретни саобраћај, тако и на пругама за мешовити и путнички саобраћај. Поред тога, *RCF* шински дефекти се јављају на шинама у колосецима у застору од туцаника, као и на шинама у колосецима на чврстој подлози.

Замор шинског челика у додиру точак/шина обухвата сложени процес разарања његове структуре, који је инициран почетном микро–прслином која се развија у потповршини главе шине и која може да доведе до лома шине у колосеку под дејством цикличног оптерећења од точкава возила, које се преноси на шину преко мале додирне површине. Као што је поменуто у Поглављу 2, површина лома у попречном пресеку шине има карактеристичан изглед са две визуелно изразито различите површине: зона замора и зона лома (слика 2.19 из Поглавља 2). Зона замора има глатку и тамну површину у којој се уочава иницијална прслина повезана са возном површином на глави шине. У зони замора уочавају се линије напредовања прслине услед замора челика, која се налази на месту повећане концентрације напона услед [16]:

- геометријског облика попречног профила главе шине,
- иницијалних површинских оштећења насталих приликом обраде главе шине,
- технологије производње шине,
- оштећења у додиру точак/шина током експлоатације и
- других дефеката.

Развој прслине се најчешће изражава као пораст њене величине у односу на акумулирано бруто саобраћајно оптерећење, које се изражава у милионима превезених бруто тона. Брзина раста прслине је условљена различитим факторима, од којих су најважнији следећи [16]:

- статичко оптерећење од точка (брзине до 10 km/h),
- динамичко оптерећење од точка,
- режим кретања возила (покретање, убрзање, кочење),
- тип односно профил шине,
- квалитет шинског челика,
- врста дефекта,
- температурна разлика у односу на неутралну температуру континуално заварених шина,
- резидуални напони у шини,
- хабање главе шине (вертикално и бочно),
- стање геометрије колосека,
- крутост шинске подлоге.

У оквиру пројекта [49] спроведена је анализа осетљивости како би се представио утицај различитих услова саобраћаја и конструкције горњег строја на раст прслине од тренутка њеног уочавања (одговарајућом методом инспекције) до лома шине (интервал У–Л). Истраживања [49] су показала да температурна разлика, профил шине, просечно осовинско оптерећење, позиција додира точак/шина, крутост шинске подлоге, као и динамички утицај од возила утичу на раст прслине током целокупног интервала У–Л. Супротно од тога, други фактори (резидуални напон, закривљеност $1/R$, вертикално и бочно хабање) имају

ограничени утицај до одређене величине прслине. У пројекту [49] раст прслине је разматран у функцији акумулираног бруто саобраћајног оптерећења.

У овом потпоглављу разматра се класификација *RCF* шинских дефеката према препорукама *UIC* [13] из 2002. године, као и према европским стандардима [3, 14] из 2018. године.

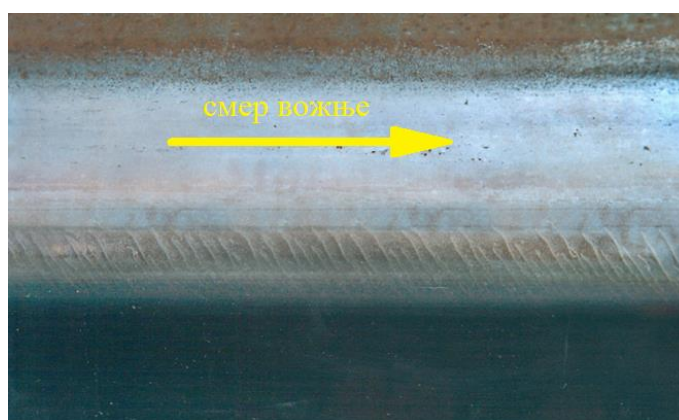
3.1.1 Класификација шинског дефекта типа *HC*

У складу са *UIC* класификацијом [13], *head checking (HC)* шински дефекат се описује као дефекат изван крајева шине, који се по правилу појављује на прелазу возне површи у зону унутрашње возне ивице спољне шине у кривини. Уочава се у виду кратких паралелно положених прслина на прилично уједначеном међусобном растојању. Растојање између прслина одступа у зависности од локалних услова и квалитета шинског челика, тако да износи од једног милиметра до више центиметара. Начин дефинисања кодне ознаке према [13] и [14] приказан је у табели 3.2.

Табела 3.2 Кодне ознаке за *HC* шински дефекат према [13] и [14]

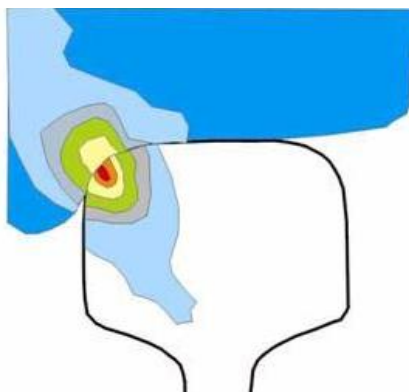
Кодна ознака према [13]	Прва цифра	Друга цифра	Трећа цифра	Четврта цифра
2123	2 – дефекат изван шинских спојева	1 – глава шине	2 – fine прслине које могу да доведу до одвајања делова возне ивице	3 – косе кратке прслине
2223		2 – горња површ главе шине		
Кодна ознака према [14]	Прва цифра	Друга цифра	Трећа цифра	Четврта цифра
2223	2 – дефекат изван шинских спојева	2 – горња површ главе шине	2 – fine прслине које могу да доведу до одвајања делова возне ивице	3 – косе кратке прслине

Слика 3.2 приказује изглед *HC* дефекта и оријентацију косих прслина у случају дефинисаног смера вожње у колосеку. Према [3], тачна локализација *HC* шинског дефекта зависи од услова додире точак/шина.



Слика 3.2 *HC* шински дефекат [3]

Слика 3.3 показује зону додире точка и спољне шине у кривини у којој се појављује *HC* шински дефекат.



Слика 3.3 Зона појаве *НС* дефекта на возној ивици [16]

НС шински дефекат се појављује углавном на спољашњој шини у кривинама великог радијуса (R до 3000 m, а најчешће до 1500 m, према [48]), али може се јавити и у кривинама малог радијуса или на колосеку у правцу [14].

Визуелно уочавање површинских *НС* прслина указује да испод површине главе шине већ постоје потповршинске прслине, које се простиру до одређене дубине и у одређеном смеру унутар главе шине. Уколико се дефекат не отклони на време, он напредује доводећи до одвајања мањих или већих делова шинског челика са возне ивице, што у неповољним ситуацијама може да доведе до исклизнућа возила из шина. Такође, напредовање унутрашњих *НС* прслина у смеру на доле, у крајњем исходу често води до попречног лома шине (слика 3.4) и директно угрожава безбедност саобраћаја [48].



Слика 3.4 Попречни лом услед *НС* дефекта [13]

3.1.2 Класификација шинског дефекта типа *squat*

У складу са *UIC* класификацијом [13] овај шински дефекат се разматра као „*cracking and local depression of the running surface*“, односно као прслина и локална депресија (улегнуће) на возној површи.

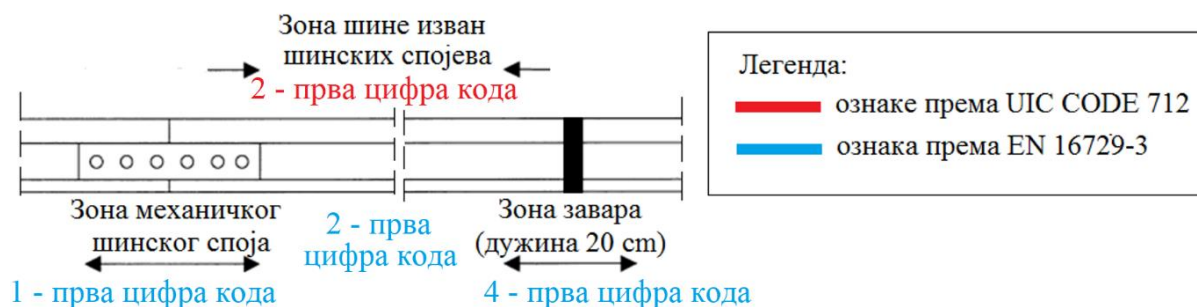
Начин утврђивања кодне ознаке према [13] и [14] приказан је у табели 3.3.

На слици 3.5 објашњено је значење прве цифре у кодним ознакама дефекта типа *squat* и указано је на допунске кодне ознаке према [14] које указују на појаву дефекта на крајевима шине и у зонама заваара.

Дефекат типа *squat* настаје на глави возних шина у колосеку у правцу, или у кривинама изразито великих радијуса $R \geq 3000$ m услед деловања динамичког оптерећења од точкова возила и појаве напона смицања у потповршинским слојевима главе шине, у карактеристичним зонама изразитог кочења, покретања и убрзавања возила. Због тога се овај дефекат најчешће уочава у ограниченим дужинама колосека у зонама улаза и излаза из службених места, као и зонама испред сигнала.

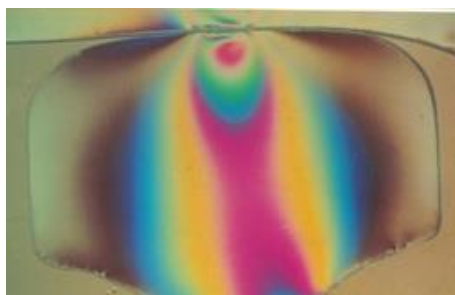
Табела 3.3 Кодне ознаке за *squat* шински дефекат према [13] и [14]

Кодна ознака према [13]	Прва цифра	Друга цифра	Трећа цифра	Четврта цифра
227	2 – дефекат изван шинских спојева	2 – горња површ главе шине	7 – прлина и локална депесија на возној површи	–
Кодна ознака према [14]	Прва цифра	Друга цифра	Трећа цифра	Четврта цифра
127	1 – дефекат на крају шине	2 – горња површ главе шине	7 – прлина и локална депресија на возној површи	–
227	2 – дефекат изван шинских спојева			Указује на дефекат <i>belgrospi</i> који има потенцијал да пређе у <i>squat</i> дефекат
2271		–		
417	4 – дефекат у зони заваара или зони наваривања	1 – електроотпотно заваривање		–
427		2 – алуминотермијско заваривање		
437		3 – електролучно заваривање		
Напомена: Стандард [14] уводи кодну ознаку 228 за „ <i>local depression of the running surface caused by dripping water in tunnels</i> “ (локална депресија возне површи у тунелима са великом влажношћу). Овај дефекат према [14] није класификован као <i>squat</i> дефекат.				



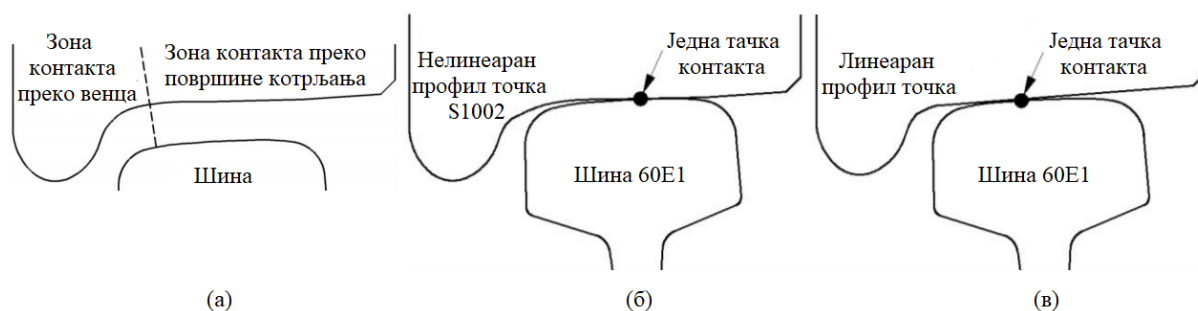
Слика 3.5 Прве цифре кодне ознаке према [13] и према [14]

Слика 3.6 приказује зону додира точак/шина на возној површи главе шине у којој се формирају дефекти типа *squat*.



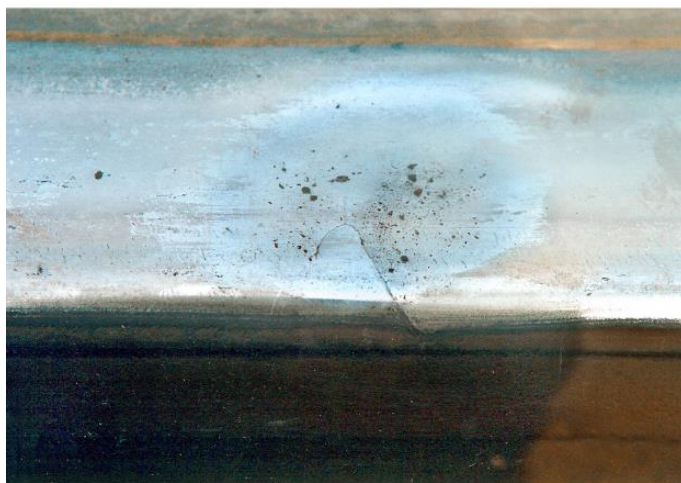
Слика 3.6 Додир точак/шина на возној површи главе шине у колосеку у правцу

У практичним условима додир точка и шине мења се током кретања возила и зависи од стварног облика профила точка, профила главе шине, као и њиховог међусобног положаја. На слици 3.7а приказани су могући типови додира точак/шина преко површине котрљања и преко венца точка. На слици 3.7б и 3.7в приказана је зависност положаја тачке додира на глави шине од облика точка [78]. С обзиром на померање тачке додира на возној површи главе шине формира се карактеристична зона додира точак/шина која се простире до зоне возне ивице на глави шине (слика 3.1).



Слика 3.7 Општи типови додира точак/шина и додир у једној тачки преко површине котрљања [78]

Дефекат типа *squat* се уочава на возној површи као проширење и локална депресија у виду тамне мрље (слика 3.8).



Слика 3.8 Изглед површинског дефекта типа *squat* према [3]

Дефекат је први пут уочен на јапанским железницама 1950. године и третиран је као „*rail dark spot defect*“ [79]. Слично томе, у немачкој литератури користи се и назив „*Schwarzer Fleck*“ (у преводу: „црна мрља“), јер се дефекат визуелно уочава као црна мрља

на сјајној углачаној возној површи на глави шине. Назив *squat* се користи од 1970. године након што је дефекат уочен на британским железницама [64].

UIC Каталог шинских дефеката из 2002. године [13] уврстио је овај дефекат под именом *squat* без превођења назива дефекта на друге језике због опасности по безбедност саобраћаја.

На колосецима са дефинисаним смером кретања возила, у оквиру зоне захваћене *squat* дефектом формира се карактеристична прслина у облику латиничног слова „V“. Краци прслине су неједнаке дужине, израженији крак је у смеру вожње (тзв. водећи крак прслине), док је пратећи крак прслине краћи. Водећи и пратећи крак прслине формирају „зев“ који је оријентисан ка возној ивици шине (слика 3.9).



Слика 3.9 Водећи и пратећи крак „V“ прслине након лабораторијског третмана савијања у вертикалној равни [58]

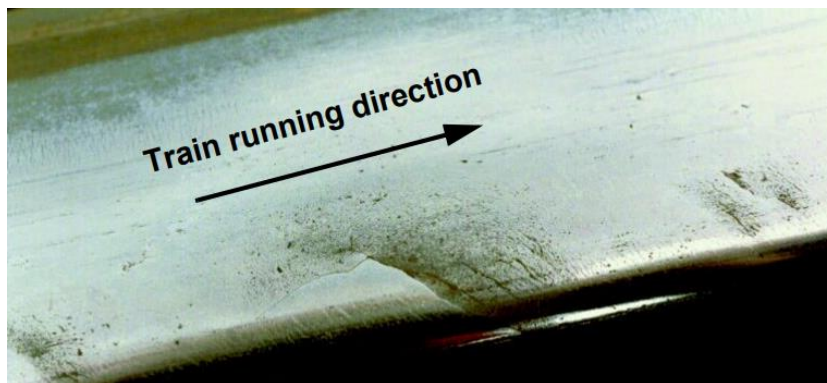
Стандард [3] врло оскудно дефинише *squat* дефекат као тамну мрљу на глави шине, уз бочно течење челика, као и улегнуту и проширену возну траку на глави шине (слика 3.8). Стандард указује да се услед *squat* дефекта јавља мрежа прслина која израста из две главне хоризонталне прслине (краци „V“ прслине) и може довести до озбиљног и неочекиваног лома шине (слика 3.10). Поменута мрежа прслина отежава анализу дефекта [3].



Слика 3.10 Пример попречног лома шине услед *squat* дефекта [16]

UIC Code [13] указује на могућност комбиновања *HC* и *squat* дефекта (слика 3.11). Ипак, UIC Code [13] класификује овај дефекат као *HC* дефекат и додељује му кодну ознаку

2223. На слици 3.11 јасно се уочава дугачка „V“ прслина. Такође, уочава се да је дефекат повезан са лаком депресијом око које је формирана тамнија површина. Често се уочава и проширење возне површи. Овакав опис одговара дефекту типа *squat* који је комбинован са *HC* дефектом. Уколико се оваква комбинација дефеката појављује периодично, може да доведе до вишеструких спонтаних попречних шинских ломова на дужини од више метара, уз одвајање делова возне шине већих дужина из колосека. Због тога се овај дефекат сматра изузетно опасним, што је, нажалост, показала позната железничка несрећа у Енглеској 2000. године (*Hatfield*, 17. октобар 2000. године). Због кодне ознаке 2223 која је у [13] коришћена за опасну комбинацију дефекта типа *squat* са *HC* дефектом често се у литератури погрешно закључује да не постоје подаци да је *squat* дефекат био узрок исклизнућа железничког возила.



Слика 3.11 Комбиновани дефекат класификован као 2223 према [13]

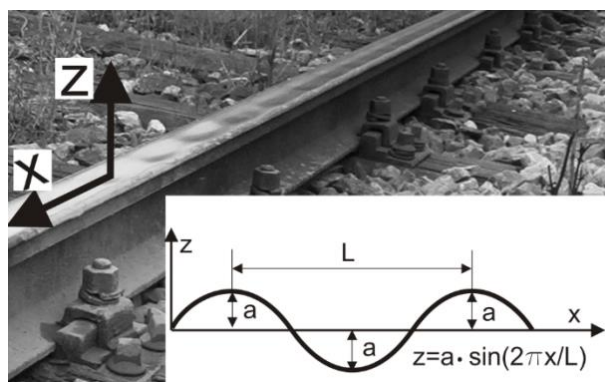
3.1.3 Класификација шинског дефекта под називом набораност возне површи унутрашње шине у кривини малог радијуса

Овај шински дефекат настаје на возној површи унутрашње шине у кривинама малог радијуса током експлоатације колосека. Шта се подразумева под појмом „мали радијус“ зависи од карактеристика конструкције осовинског склопа и обртног постоља возила, као и разлике брзина путничких и теретних возила, односно вишка надвишења за спора теретна возила. Самим тим, ова појава је нарочито изражена на пругама за мешовити теретни саобраћај. Крута конструкција обртног постоља, бочна крутост колосека и изражене разлике у брзинама путничких и теретних возила доприносе појави овог дефекта.

Услед вишка надвишења, осовински склоп се помера ка унутрашњој шини у кривини и остварује се котрљање унутрашњег точка по већем кругу котрљања у односу на спољашњи точак. Због различитих дужина спољашње и унутрашње шине у кривини, унутрашњи точак проклизава у односу на спољашњи како би се обртно постоље „уписало“ у кривину малог радијуса. Последица проклизавања унутрашњег точка је карактеристично таласасто хабање возне површи на глави унутрашње шине (слика 3.12).

Набораност возне површи главе унутрашње шине негативно утиче на одржавање геометрије колосека, мирноћу и удобност вожње, као и утицаје на околину (емисија буке и вибрација).

Према *UIC Code* [13] овом дефекту је додељена кодна ознака 2202 (табела 3.4), као и дужина таласа од 8 cm до 30 cm.



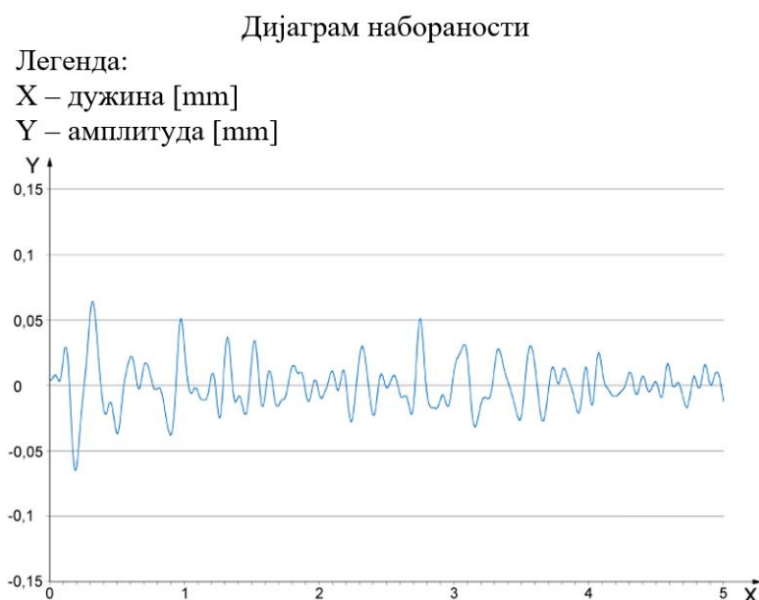
Слика 3.12 Изглед дефекта и апроксимација једноставним аналитичким моделом [41]

Табела 3.4 Кодне ознаке за набораност возне површи унутрашње шине у кривини малог радијуса према [13]

Кодна ознака према [13]	Прва цифра	Друга цифра	Трећа цифра	Четврта цифра
2202	2 – дефекат изван шинских спојева	2 – горња површ главе шине	0 – хабање	2 – набораност дугачких таласа

Постоји изразито неслагање *UIC Code* [13] и европског стандарда [3] у погледу назива овог дефекта и опсега дужине таласа. Стандард [3] дефинише дефекат под називом „*short wave corrugation*“ (набораност кратких таласа) као изражене депресије на возној површи главе шине са дужином таласа од 3 cm до 30 cm на унутрашњој шини у кривини (слика 3.13).

Европски стандарди [3, 14] не дају кодне ознаке ни за један тип набораности возне површи на глави шине.



Слика 3.13 Набораност кратких таласа на глави унутрашње шине у кривини према [3]

3.1.4 Класификација шинског дефекта под називом набораност кратких таласа

Према *UIC Code* [13] овом дефекту је додељен назив „*short-pitch corrugation*“, кодне ознаке према табели 3.5, као и дужина таласа од 3 cm до 8 cm.

Табела 3.5 Кодне ознаке за набораност кратких таласа према [13]

Кодна ознака према [13]	Прва цифра	Друга цифра	Трећа цифра	Четврта цифра
2101	2 – дефекат изван шинских спојева	1 – глава шине	0 – хабање	1 – набораност кратких таласа
2201		2 – горња површ главе шине		

Дефекат набораност кратких таласа настаје током експлоатације колосека и одликује се готово правилно наизменично распоређеним сјајним испупчењима и тамним улегнућима на возној површи главе шине (слика 3.14).

Набораност возне површи на глави возних шина утиче на повећање динамичког оптерећења од точкова возила, што утиче на повећање емисије вибрација и буке (до 15 dB), као и брже пропадање геометрије колосека и оштећење точкова возила. Слика 3.14 показује пропадање застора у зони ослањања прага услед присуства набораности возне површи шине, што за последицу има лоше ослањање прага на застор и прогресивно пропадање геометрије колосека.



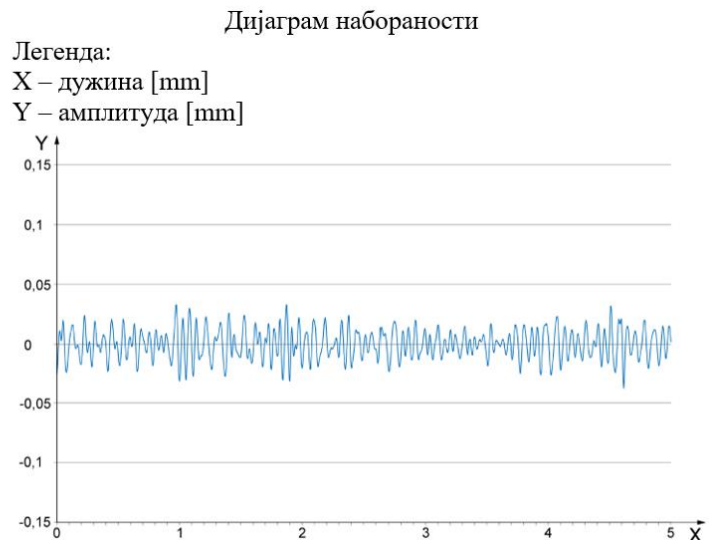
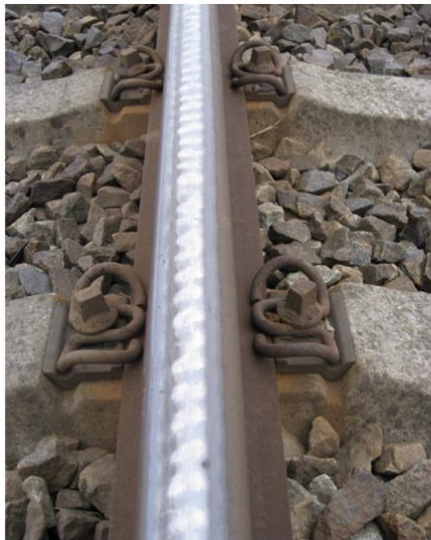
Слика 3.14 Дефекат 2201 и изазвано оштећење застора у зони нарушеног ослањања прага [13]

Појава набораности је израженија на колосецима са униформним карактеристикама конструкције возила и уједначеним брзинама возила (градска железница, метро системи, колосеци резервисани за путнички саобраћај великих брзина и слично).

Такође, појава је израженија на колосецима са већом крутошћу шинских ослонаца. Због тога у њеном регулисању велику улогу има крутост шинске подлошке.

Избором шина са термички обрађеном главом (повећана тврдоћа горње површи главе шине) не може се елиминисати појава набораности возне површи на глави шине, али се може успорити њено напредовање.

Стандард [3] дефинише, такође, дефекат под називом „*short pitch corrugation*“, и то као квази–периодичне неправилности на возној површи главе шине (слика 3.15, лево), где се неправилности појављују као низ светлих гребена и тамних удубљења. Дужина таласа обично варира између 10 mm и 100 mm (слика 3.15, десно). Овако дефинисана „ситна набораност“ обично се среће у колосеку у правцу на обе шине и у кривинама великог радијуса на спољној шини.



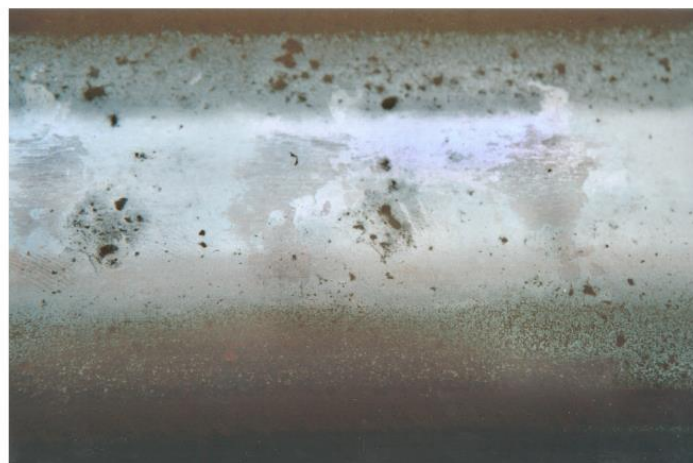
Слика 3.15 Ситна набораност према [3]

3.1.5 Класификација шинског дефекта типа *belgrospi*

UIC Code [13] не обухвата класификацију дефекта типа *belgrospi*.

Европски стандард [14] додељује код 2271 дефекту *belgrospi* који има потенцијал да пређе у *squat* дефекат (табела 3.3).

Европски стандард [3] описује овај дефекат као мрежу прслина која се може развити на шинама у колосеку за брзине веће од 160 km/h под утицајем набораности кратких таласа (слика 3.16). Прслине се појављују при набораности кратких таласа са дубином од 0,03 mm. Ако се набораност не уклони на време брушењем, *belgrospi* дефекти се развијају и могу прерасти у *squat* дефекте.



Слика 3.16 *Belgrospi* дефекат комбинован са набораношћу возне површи главе шине [3]

У литератури се још увек наводи став да се овај дефекат јавља искључиво на пругама за велике брзине услед замора шинског челика [53]. У сваком случају, овај тип шинског дефекта први пут је уочен на пругама за велике брзине у Немачкој. Дефекат је добио име према презименима тројице немачких стручњака, који су први уочили овај феномен: *Belz* (Белц), *Grossmann* (Гросман) и *Spiegel* (Шпигел). Дефекат се јавља у виду прелина акумулираних на вршним деловима наборане површи главе шине. Дефекат се може описати и као комбинација хаотично распоређених *НС* дефеката и минијатурних дефеката типа *squat* [48].

У раду [48] аутори указују да дубина набораности 0,03 mm возне површи главе шине значајно повећава динамичке силе које делују на шину на пругама за велике брзине, те се због тога управо ова вредност прописује као гранична за спровођење активности брушења главе шине на таквим пругама.

Током детаљних визуелних инспекција шина на пругама у Србији и Црној Гори [64, 80] уочена је појава дефекта типа *belgrospi* на колосецима где је брзина знатно мања од границе (160 km/h) коју прописује стандард [3].

У оквиру приказа резултата визуелне инспекције дефеката у станици Панчево Варош, која је обављена у оквиру експерименталног истраживања за потребе ове Дисертације, документовано је присуство дефеката типа *belgrospi* у виду тзв. семена за развој будућих *squat* дефеката (слика 3.17). Овај тип дефекта је оцењен као лако оштећење шине.



Слика 3.17 Пример комбинације набораности, *squat*-а и семена *squat*-а (колосек број 2 у станици Панчево Варош, октобар 2020. године)

3.2 *Squat* шински дефекат – феномен и смернице за управљање

У потпоглављу 3.1.2 указано је да се шински дефекат типа *squat* јавља на деоницама ограничене дужине на којима се возила заустављају и покрећу. То су најчешће деонице на улазу/излазу из службених места и деонице испред позиција сигналних уређаја. Ову особеност треба узети у обзир приликом утврђивања стратегије управљања *RCF* дефектима на нивоу железничке мреже која је у надлежности УИ.

Такође, чињеница је да се дефекат типа *squat* не јавља у тунелима, изузев у тунелима са изразитим присуством влаге. Набројане карактеристичне деонице уочавања дефеката типа *squat* упућују да се појава овог дефекта може анализирати са аспекта расположивог трења у додиру точак/шина.

Дефекат типа *squat* се јавља као изолован, или у неправилном низу. У случају сукцесивне појаве овог типа дефекта, расте опасност од спонтаног вишеструког лома возне шине и испадања/одвајања делова шине.

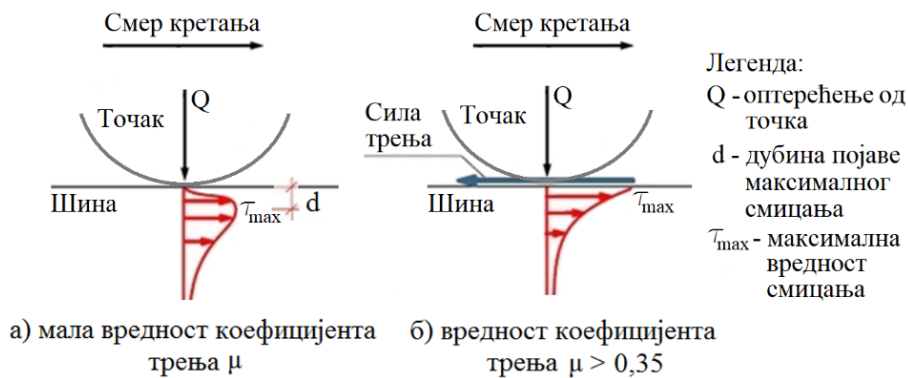
Као што је претходно речено, честа је комбинација набораности и *squat* дефекта. У случају урбаног окружења, управљање развојем ове комбинације дефеката примарно је везано за корекцију набораности у циљу редуковања емисије буке и вибрација.

До сада је недовољна пажња посвећивана управљању развојем овог дефекта. Један од разлога за такву ситуацију је комбиновање *squat*-а са *НС* дефектом, што је довело до примарног бављења истраживача развојем *НС* дефекта са аспекта безбедности саобраћаја и до занемаривања опасности од неконтролисаног развоја *squat* дефекта.

С обзиром на то да су возне шине основна компонента конструкције колосека, трошкови набавке, полагања и одржавања шина значајно утичу на укупне трошкове током целокупног животног века конструкције горњег строја железничке пруге. Широм света, железничке управе су (без обзира да ли је инфраструктура у државном или приватном власништву) приморане да се оријентишу ка ниским трошковима одржавања, тако да је разматрање трошкова животног циклуса (*LCC – Life Cycle Cost*) шина постало битан део тржишног пословања. Тржишни приступ је довео до унапређења постојећих и појаве нових типова шинских челика, као и до унапређења одржавања железничке инфраструктуре.

3.2.1 Утицај коефицијента трења на појаву *squat* дефекта

За анализу додира точак/шина значајно је разматрање напона смицања на возној површи и у потповршинској зони главе шине у зависности од вредности расположивог коефицијента трења [57, 72, 81]. На слици 3.18 приказана је зависност смичућих напона у глави шине од вредности коефицијента трења у додиру точка и шине у складу са [81]. Уколико је вредност коефицијента трења веома мала, максимална вредност напона смицања спушта се у потповршински слој главе шине, уз ризик да изазове иницијалну потповршинску прслину. Са порастом коефицијента трења, максималан напон смицања се приближава горњој површи главе шине која је у непосредном додиру са точком. Такође, са порастом вредности коефицијента трења расте вредност силе трења у додиру, односно повећава се хабање којим се уклањају fine прслине на возној површи главе шине. Слика 3.18 показује да вредности коефицијента трења преко 0,35 доводе до значајног хабања возне површи главе шине, а свакако и до значајног хабања точкова железничких возила. Такође, овакве вредности коефицијента трења, при свим осталим једнаким возно–динамичким условима, утичу на повећавање вероватноће исклизнућа возила из колосека [82].

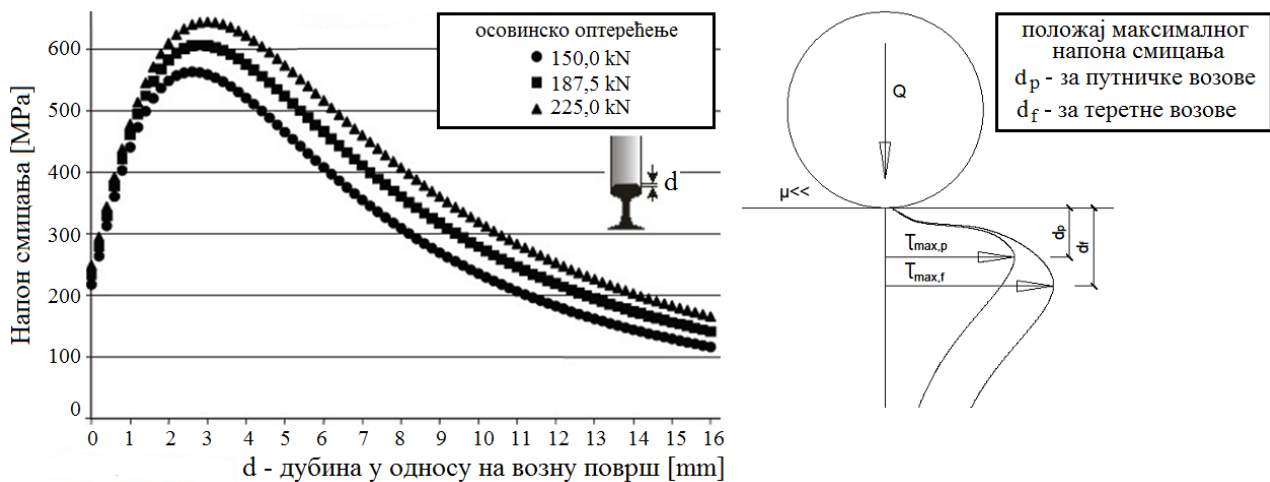


Слика 3.18 Положај максималне вредности напона смицања у зависности од вредности коефицијента трења у додиру точак/шина [81]

Поред тога, у [72] се наводи да положај максималне вредности напона смицања у односу на површ додира точак/шина зависи од интензитета вертикалног оптерећења које се са возила преноси на шину (слика 3.19).

То значи да уколико су возила лакша (путничка возила и празна кола) максимална вредност напона смицања је ближа возној површи, што представља већу опасност за појаву потповршинских и површинских дефеката.

Са друге стране, код тешких возила (натоварена теретна возила) максимални напон смицања налази се дубље у односу на површину додира точак/шина. Истовремено, интензитет силе трења и напона смицања расту са повећањем осовинског оптерећења од возила. Са повећањем силе трења у додиру повећава се хабање и тзв. „природно“ уклањање површинског слоја који је захваћен RCF шинским дефектима.



Слика 3.19 Положај максималне вредности напона смицања у зависности од осовинског оптерећења према [72]

Коефицијент трења такође зависи од реалног стања точкова возила, горњег строја пруге, услова погона, климе, материјала точка и шине, као и задржаности њихових додирних површина [83]. Присуство воде, снега, мазива и модификатора трења, може имати велики утицај на смањење коефицијента трења и поспешивање развоја RCF дефеката, посебно у условима кретања воза великим брзинама [12, 48, 84]. Тако на пример, појава *squat* дефекта је могућа у тунелима у случају постојања влаге, иако се дефекат не уочава у тунелима у сувим условима [62].

Подаци *UIC ORE* из 1990. године [82] показују да се у климатским условима који одговарају земљама чланицама *UIC*-а (дакле и у Србији) коефицијент трења точкава и шина мења током године (табела 3.6).

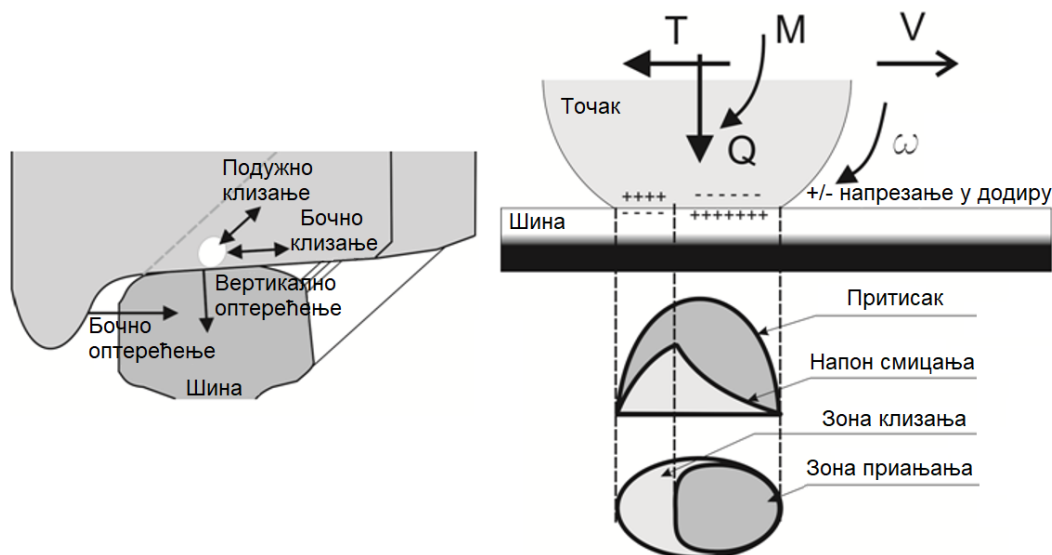
Табела 3.6 Промена вредности коефицијента трења током године [82]

Коефицијент трења μ	0,10	0,25	0,40
Вероватноћа појављивања [%]	10	65	25
Приближно дана у години	36	185	144

Дакле, возови се у току године крећу око 36 дана по веома влажним шинама са $\mu=0,10$, око 185 дана са коефицијентом трења $\mu=0,25$ између влажног и сувог, а преостали број дана по веома сувом времену $\mu=0,40$, када се шине и точкови (венци точкава и точкови по кругу котрљања) највише троше [82].

У оквиру истраживања [84] спроведена су лабораторијска испитивања и нумеричке анализе утицаја запрљаности додирне површине точка и шине на смањење коефицијента трења при већим симулираним брзинама кретања, од 100 km/h до 300 km/h. Испитивања су изведена за случајеве запрљаности водом, уљем и мешавином ове две компоненте. У сва три случаја, коефицијент трења се смањује са повећањем брзине кретања и његове приближне вредности при брзини од 100 km/h износе 0,19, 0,12 и 0,06, за сва три лубриканта редом. Такође, услед појаве клизања узроковане малим коефицијентом трења, литература [84] наводи да се на додирној површини точка и шине јавља нагли пораст температуре, па се пластична деформација и појава замора шинског челика може догодити и под малим осовинским оптерећењем. На основу добијених резултата, највећи пораст температуре се јавља у случају влажног стања додирне површине.

Слика 3.20 приказује зону приањања и клизања у додиру точак/шина у складу са Картеровом теоријом из 1926. године, која је развијена на основу чињенице утврђене мерењем да је брзина на ободу точка (ωR) већа од брзине напредовања возила V . Утврђена разлика $\Delta V = \omega R - V$ представља губитак брзине услед клизања у додиру точак/шина.



Слика 3.20 Појава клизања у додиру точак/шина [57, 72]

3.2.2 Утицај таласне дужине *squat* дефекта на инспекцију

Типична таласна дужина шинског дефекта *squat* износи 20 mm – 40 mm према истраживањима обављеним на железничкој мрежи у Холандији, чији су резултати објављени у [85]. Овако мала таласна дужина не уклапа се у опсеге таласних дужина који су обухваћени серијом стандарда *EN 13848* која се бави неравнинама возне површи шина у колосеку у експлоатацији. Ова серија стандарда је прихваћена од стране Института за стандардизацију Србије као серија српских стандарда, а састоји се из следећих делова:

- *СРПС ЕН 13848–1* [4]: Дефинисање параметара геометрије колосека (*Part 1: Characterisation of track geometry*),
- *СРПС ЕН 13848–2* [5]: Мерни системи – Возила за мерење параметара геометрије колосека (*Part 2: Measuring systems – Track recording vehicles*),
- *СРПС ЕН 13848–3* [6]: Мерни системи – Машине за грађење и одржавање (*Part 3: Measuring systems – Track construction and maintenance machines*),
- *СРПС ЕН 13848–4* [7]: Мерни системи – Ручни и лаки уређаји (*Part 4: Measuring systems – Manual and lightweight devices*),
- *СРПС ЕН 13848–5* [8]: Нивои квалитета геометрије колосека – Колосек на отвореној прузи, у скретницама и укрштајима (*Part 5: Geometric quality levels – Plain line, switches and crossings*),
- *СРПС ЕН 13848–6* [9]: Одређивање квалитета геометрије колосека (*Part 6: Characterisation of track geometry quality*).

Серија стандарда *EN 13848* обухвата три главна опсега таласних дужина за неравнине возне површи које су настале услед грешака у геометрији колосека:

- интервал таласних дужина *D1*: $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$,
- интервал таласних дужина *D2*: $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$,
- интервал таласних дужина *D3*: $70 \text{ m} < \lambda \leq 150 \text{ m}$ (само за грешке у геометрији колосека великих таласних дужина на пругама за брзине $V > 230 \text{ km/h}$).

Како би се детектовали дефекти малих таласних дужина, који могу да побуде велике динамичке силе, у европском стандарду *EN 13848–1* [4] препоручује се опционо разматрање опсега таласних дужина *D0*: $1 \text{ m} < \lambda \leq 5 \text{ m}$. Опсег *D0* се односи на мирноћу возње. На пругама где се посебно захтева удобност за путнички саобраћај, мерење мирноће возње може да се веома једноставно реализује постављањем уређаја за мерење убрзања на кућиште осовине или сандук возила, што је у складу са препорукама *EN 13848–1* [4].

Уколико се инспекција геометрије колосека обавља у опсегу таласних дужина *D0*, онда треба смањити корак узорковања на 0,1 m. При томе треба уочити да овом инспекцијом нису обухваћене динамичке побуде са таласним дужинама краћим од 1 m. Дакле, и даље нису обухваћене динамичке побуде од набораности возне површи главе шине, *squat* дефеката, као и других типова *RCF* дефеката. Корак узорковања 0,1 m је већи од таласне дужине (20 mm – 40 mm) која одговара дефекту типа *squat*. У сваком случају, за квалитетну инспекцију равности горње површи главе возних шина био би неопходан изузетно мали корак узорковања.

Ипак, у информативном делу стандарда *СРПС ЕН 13848–1 (Annex A)* дате су смернице за мерење вертикалног и бочног убрзања као показатеља квалитета геометрије колосека. Ове смернице се могу искористити и за утврђивање присуства неравнина малих таласних дужина на возној површи главе возних шина у додиру са точком. Детаљан опис мерења помоћу овог поступка описан је у Поглављу 4 које је посвећено инспекцији шинских дефеката.

Неравнине површи главе шине које настају у додиру са точком услед оштећења возне површи на глави шине припадају опсегу малих таласних дужина $0 < \lambda \leq 1 \text{ m}$. Ове неравнине

се не могу у потпуности кориговати подбијањем прагова (у складу са серијом стандарда *EN 13848*). Управљање неравнинама малих таласних дужина спада у посебну област одржавања шина. Ове неравнине утичу на динамичке силе које се са возила преносе на колосек и на тај начин генеришу развој неравнина већих таласних дужина, које су везане за пропадање геометрије колосека. Примарна област истраживања у Дисертацији су управо неравнине малих таласних дужина које настају у додиру точка и шине.

3.2.3 Утицај квалитета шинског челика на појаву и развој *squat* дефекта

Управљање одржавањем шина укључује избор оптималног квалитета шинског челика. Тврђе перлитне врсте челика са термички обрађеном главом имају већу отпорност на појаву дефеката услед замора шинског челика. Поред перлитне структуре шинског челика постоји и беинитна структура челика, која има најбољу отпорност на замор у додиру шине са точком возила. Међутим, због сложене и скупе технологије производње и варирања особина челика у зависности од његовог хемијског састава, шине са беинитном микроструктуром се за сада производе само у сврху испитивања и још увек немају комерцијалну употребу.

На магистралним пругама европске железничке мреже, у склопу примене захтева интероперабилности железничког система, постоји обавеза примене квалитета шинског челика у складу са европским стандардом [45]. Према овом стандарду [45] квалитет челика се одређује на основу тврдоће челика по *Brinell*-у. Стандард [45] (за Вињолове шине масе веће или једнаке 46 kg/m, за примену на конвенционалним пругама и пругама за велике брзине) обухвата 23 типа профила шина у границама тврдоће челика од 200 до 440 НВ (табела 3.7).

Табела 3.7 Квалитет шинског челика према затезној чврстоћи и тврдоћи [45]

Квалитет према затезној чврстоћи (стари стандард)	Мин. затезна чврстоћа [N/mm ²]	Квалитет челика према тврдоћи по Бринелу (ЕН 13674–1)	Распон тврдоће челика по Бринелу [НВ]	Примедба
700	680	R200	200 – 240	(C–Mn)
800	780	R220	220 – 260	(C–Mn)
900 А	880	R 260	260 – 399	(C–Mn)
900 В	880	R260Mn	260 – 300	(C–Mn)
1100	1080	R320Cr	320 – 360	Легирани челик (1% Cr)
900 А (НН)	1175 глава 880 врат и ножица	R350НТ	350 – 390	(C–Mn) Термички обрађен
XXX	1175	R350LНТ	350 – 390	Ниско легирани челик термички обрађен
XXX	1280	R370CrНТ	370 – 410	Легирани челик, термички обрађен
XXX	1280	R400НТ	400 – 440	Нелегирани челик, термички обрађен

Такође, према законским одредбама [17] захтева се примена техничких спецификација интероперабилности за све нове и реконструисане железничке пруге у Србији. Ово је законски оквир у коме постоји слобода избора оптималног типа шинског челика који се може користити у комерцијалне сврхе.

Као што је познато, према ранијим европским прописима квалитет шинског челика је дефинисан најмањом затезном чврстоћом. На пругама Железнице Србије (ЖС) уграђене су шине чија је најмања затезна чврстоћа 700 МПа. Уграђивање шина веће затезне чврстоће вршило се само у оштрим кривинама, у тунелима, на великим нагибима, на местима где се врши кочење и заустављање возова, код скретничких елемената и код других специјалних конструкција колосека. Избор квалитета челика вршен је тако да се смањи вертикално хабање главе шине, док се одлагање бочног хабања постизало подмазивањем унутрашњег бока главе спољне шине у кривини, који је у додиру са венцем точка. Оваква стратегија је примењивана у складу са *UIC* препорукама из 2005. године [86] (слика 3.21), без вођења рачуна о управљању *RCF* шинским дефектима.



Слика 3.21 Смернице за избор квалитета шинског челика према препорукама [86]

Резултати истраживања који су добијени у оквиру међународног истраживачког пројекта [87] (више од 200 различитих колосека обухваћених *Innotrack* базом података, тест деонице *Innotrack* у Аустрији и Енглеској) указују на очигледну везу закривљености I/R и деградације шине: хабање је доминантна појава у кривинама са радијусима до 1000 m, док се *RCF* дефекти јављају при радијусима од 500 m до 5000 m. При тумачењу резултата овог пројекта треба имати у виду да је и овај пројекат под *RCF* дефектима разматрао дефекте типа *HC* као доминантни тип дефеката услед замора шинског челика. Дефекти типа *squat* нису на адекватан начин обухваћени истраживањем, јер се они јављају на специфичним деоницама које се по правилу пројектују у правцу или у кривинама великих радијуса.

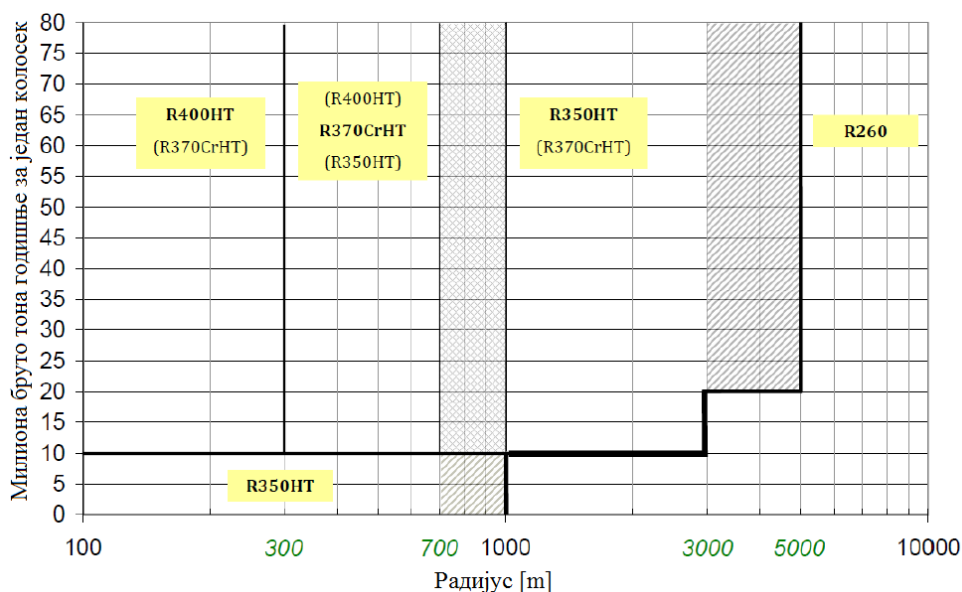
Такође, у [87] се наводи да перлитне структуре тврдих шинских челика показују већи отпор хабању и *RCF* дефектима. У поређењу са стандардним квалитетом челика R260, челик R350HT са термички третираном тврдом главом шине је око 3 пута отпорнији на хабање и најмање 2 пута отпорнији на *RCF* дефекте [87].

С обзиром на то да је доминантни проблем у одржавању шина у колосеку постала појава и развој *RCF* дефеката у односу на решавање проблема хабања, велики број железничких управа је одступио од препорука из 2005. године [86] и развио сопствену стратегију за избор квалитета челика (табела 3.8). У анализи овог прегледа смерница треба усмерити пажњу да су смернице обликоване само са аспекта закривљености I/R , те да су из разматрања испуштене специфичне деонице на којима се јавља дефекат типа *squat*.

Табела 3.8 Преглед смерница за избор квалитета челика на пругама за мешовити саобраћај, за осовинско оптерећење 225 kN и најмање 20 милиона бруто тона годишње

Радијус [m]	≤ 300	≤ 400	≤ 500	≤ 600	≤ 700	≤ 800	≤ 1500	≤ 3000	> 3000	
UIC	R350HT		R350HT/R260			R260				
DB	R350HT (≥ 30.000 t/d)					R260				
DB new	R350HT (≥ 50.000 t/d)							R260		
CH	R350LHT		R350LHT / R320Cr			R320Cr R350LHT	R260			
AT	R350HT	R260								
SWE	R350HT	R260								
SWE (HH)	R350HT								R260	
NOR	R350HT					R260				
UK	R260									
IT	R260									
BE LUX	R350HT					R260				
NL	R350HT R370CrHT	R370CrHT							R260	
DK	R350HT					R260				
PL	R350HT					R260				
HU	R350HT					R260				
RO	R350HT					R260				

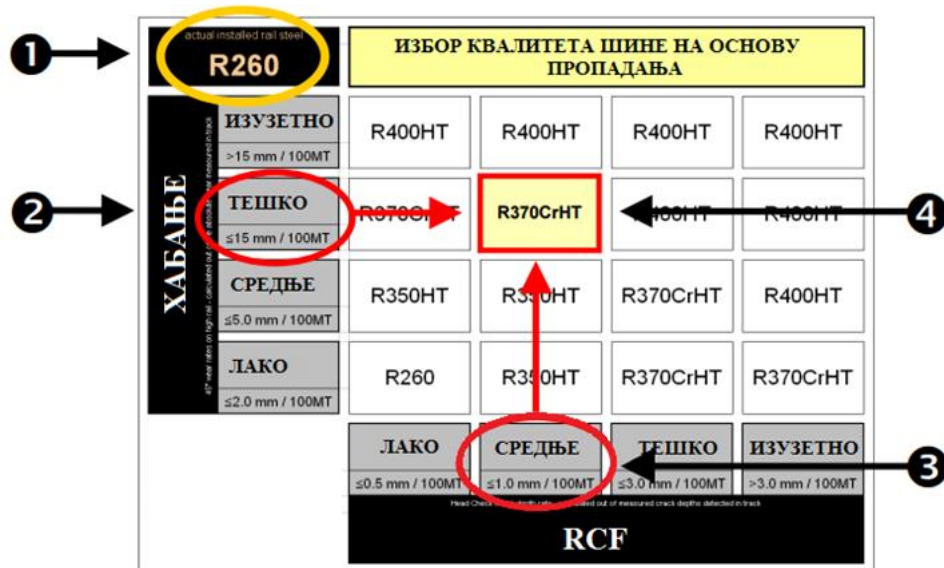
Поменути пројекат [87] даје детаљне смернице за избор квалитета шинског челика који укључује већи број шинских челика садржаних у *EN 13674-1* [45] (шрафирана подручја поново указују на зоне преклапања) које су представљене на слици 3.22.



Слика 3.22 Смернице за избор квалитета челика према [87]

У пројекту [87] су представљене смернице за избор квалитета шине приликом обнове железничке пруге за познати тип квалитета челика постојећих шина у колосеку, као и познату брзину напредовања хабања и *RCF* дефеката. На слици 3.23 представљен је пример замене постојеће шине са квалитетом челика R260, у условима измерене стопе хабања („тешко“ хабање до 15 mm/100 mil. brt) и средњег напредовања *RCF* дефекта (до 1,0 mm/100 mil. brt), новом шином чији је квалитет R370CrHT.

У раду [54] испитиван је утицај квалитета челика на број прлина по 1 cm дужине возне ивице шине. Резултати испитивања су показали да челик нормалног квалитета (слика 3.24, лево) има мањи број прлина по дужном центиметру возне ивице, као и већу дужину површинске прлине. Са друге стране, специјални квалитет челика *HSH*[®] (слика 3.24, десно) има за 1/3 гушћи распоред прлина и за 20% мању дужину површинске прлине. Сходно томе, специјални челици са повећаном отпорношћу на појаву *HC* дефекта захтевају правремено брушење возне ивице како због густине прлина не би дошло до испадања делова возне ивице и угрожавања безбедности саобраћаја.



Слика 3.23 Избор квалитета нове шине на основу брзине хабања и развоја *RCF* дефеката у случају обнове шина квалитета *R260* према [87]



Слика 3.24 Зависност густине и дужине *HC* прлина од квалитета челика [54]

3.2.4 Утицај променљиве крутости дуж возне шине на појаву *squat* дефекта

Промена крутости дуж возне шине се најчешће јавља услед промене вертикалне крутости у зони изнад прагова, као и услед заварених шинских спојева.

Један од најважнијих фактора који утиче на појаву *RCF* дефекта, али и на његов даљи развој, је крутост шинске подлоге [16, 64].

У већини објављених радова, аутори су довели у везу зону појаве дефекта типа *squat* са крутошћу шинских ослонаца. Резултати бројних визуелних инспекција *squat* дефеката,

указали су на то да се приближно 75% од укупног броја дефеката налази у зони изнад прага [64, 80]. Ова корелација је потврђена и након спроведене визуелне инспекције *squat* дефеката у станици Панчево Варош, што је детаљно описано у експерименталном делу Дисертације (Поглавље 6), где је дефинисана зона шине изнад прага у дужини једне четвртине растојања прагова лево и десно у односу на осу сваког прага.

Појава *squat* дефеката је карактеристична и за зоне завареног шинског споја, где долази до нагле промене крутости возне површи у зони завара. У раду [59] приказана је појавност дефекта у зонама завара шина, изведених: (а) алуминотермијским и (б) електроотпорним поступком (слика 3.25).



Слика 3.25 Појава *squat* дефеката у зони завара: (а) алуминотермијски и (б) електроотпорни завар [59]

Појаве дефеката код оба типа завара, карактеристичне су за изражене локалне промене тврдоће дуж возне површи.

Код алуминотермијског завара, уочавају се два изолована дефекта непосредно испред и непосредно иза завара, односно на месту где се спајају шински челик и алуминотермијски завар (слика 3.25, лево). На поменутих местима споја долази до пада тврдоће шинског челика у односу на завар.

Са друге стране, код електроотпорног завара крајеви шина се директно спајају под великим притиском и температуром, тако да не постоји додатни материјал у завару. Због тога се визуелно уочава само један изолован дефекат на месту споја шина истог или различитог профила и квалитета, тј. на месту пада тврдоће шинског челика (слика 3.25, десно).

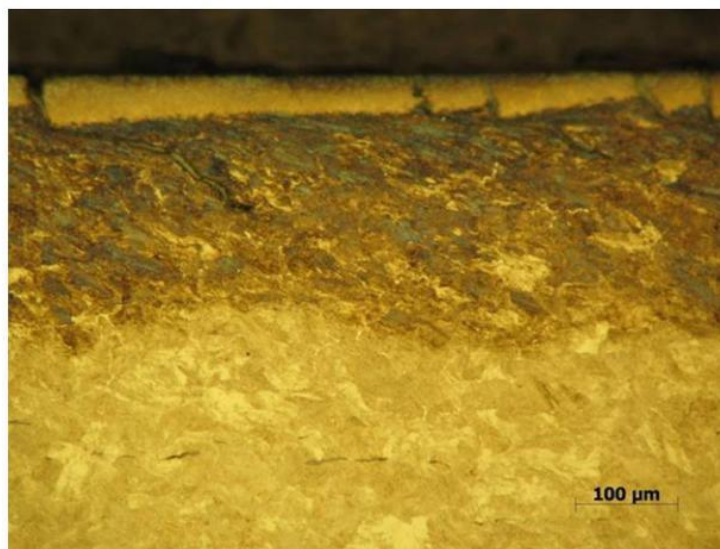
Слика 3.26 показује пример развоја *squat* депресије испред и иза алуминотермијског завара са израженим течењем шинског челика на возној ивици услед замора.



Слика 3.26 Обострано појављивање *squat* дефекта у односу на алуминотермијски завар (колосек број 2 у станици Панчево Варош, октобар 2020. године)

3.2.5 Металуршки аспект појаве *squat* дефекта

Pal u sar. [73, 74] су спровели испитивања са аспекта металургије и истакли да је формирање прслине на горњој површи шине повезано са микроструктурним променама које за последицу имају појаву и развој кртог слоја у виду беле гравуре (*white etching layer – WEL*), као што приказује слика 3.27. Међутим, аутори рада [88] изнели су тврдњу да *WEL* није неопходан услов за формирање *squat* дефекта, а да се дефекти (слични *squat* дефектима) који се доводе у везу за *WEL*-ом могу класификовати као дефекти под називом *studs*. За сада, не постоји јединствени став у вези настанка и развоја *WEL*-а. Постоје мишљења да је ова појава везана са великим температурама у додиру точак/шина, али и супротна мишљења која негирају овакав став. У Дисертацији није разматран металуршки аспект иницирања *squat* дефекта.

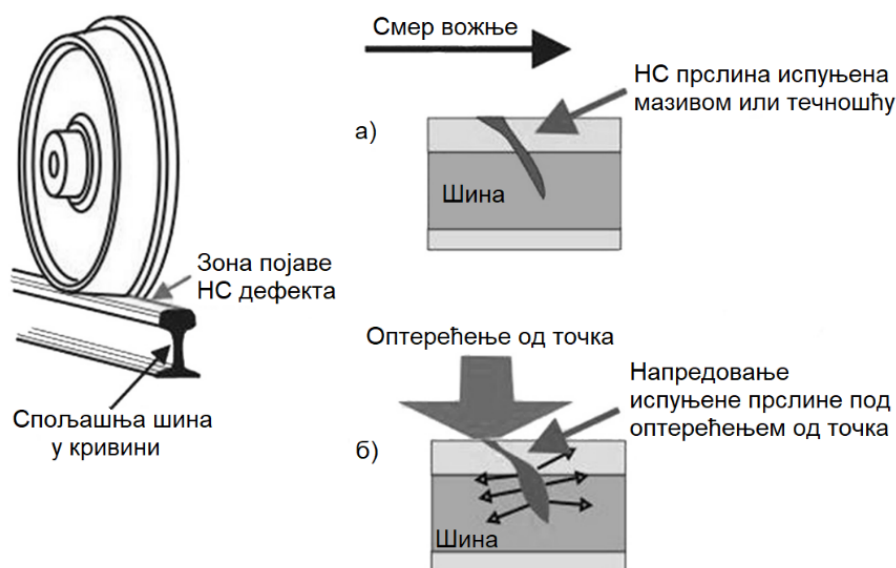


Слика 3.27 Иницијација прслине услед попречног кртог лома *WEL*-а [58]

3.2.6 Утицај подмазивања на развој *RCF* дефеката

Уобичајена мера превентивног одржавања шина која се спроводи на железницама широм света је подмазивање бока главе спољашње шине (у кривинама малог радијуса) како би се смањило бочно хабање шине и венца точка. Приликом спровођења ове мере одржавања, изузетно је важно прецизно дозирање средства за подмазивање шине. Највећи број УИ користи поступак са инсталирањем тзв. мазалица у колосеку на почетку кривине. Поред тога, постоје и техничка решења са дозирањем мазива из возила на основу раста закривљености колосека.

Нажалост, у пракси се уочавају примери разношења мазива километрима далеко у односу на позицију мазалице. Запрљаност површине додира венца точка и бока главе шине може да доведе до утискивања мазива у претходно развијене *RCF* прслине. Оваква нежељена појава може да се уочи у случају *HC* дефеката чија је карактеристична зона појављивања управо возна ивица спољашње шине у кривинама великих радијуса (слика 3.28).



Слика 3.28 Продирање мазива и ширење НС прслине под точком возила [48]

3.3 Стратегије одржавања шина

Интеракција возило/колосек/окружење, као и режими кретања возила (кочење, убрзање, покретање, минимална и максимална брзина вожње), генеришу сложена напрезања у додиру точак/шина, која изразито зависе од локалних карактеристика колосека, типа возила и других услова рада (климатски фактори, присуство уређаја за подмазивање шина, расипање и цурење корисног терета и слично). На колосецима савремених пруга, циклично понављање напрезања шине све чешће резултира развојем површинских и потповршинских *RCF* прслина, које се најчешће манифестују на великим дужинама возних шина као набораност возне површи на глави шине, *НС* дефекти и прслине на возној ивици, или се на просторно ограниченим деоницама јављају у форми *squat* дефеката.

Управљање развојем *RCF* дефеката се заснива на спровођењу инспекције и репрофилисања возних шина у колосеку. Различити УИ спроводе различите стратегије репрофилисања возних шина у складу са сопственим искуствима, стеченим знањима и препорукама важеће техничке регулативе. С обзиром на значај инспекције, овој области је посвећено посебно поглавље у Дисертацији (Поглавље 4).

Ово Поглавље се примарно бави стратегијом репрофилисања главе возних шина у колосеку. Репрофилисање је планирана активност одржавања возних шина, коју дефинише УИ у складу са законском обавезом израде плана одржавања пре пуштања железничке пруге у саобраћај [17].

Иако је у потпоглављу 3.2.3 објашњено да квалитет шинског челика има најважнију улогу у управљању развојем *RCF* прслина, металургија за сада нуди квалитете шинских челика који могу да ублаже, али не и да спрече деградацију шине услед замора челика. За сада не постоји шински челик који би могао у потпуности да издржи циклично понављање контактних напрезања без појаве прслина. Због тога је од изузетне важности да се осмисли таква стратегија одржавања шина која ће омогућити продужење њиховог животног века, уместо да се оштећене шине замењују више пута током животног века прагова. Полазна основа такве стратегије је правилан избор квалитета шинског челика, као и укључивање одржавања шине у концепт интегралног одржавања целокупне конструкције горњег строја,

укључујући прелазни и тампон слој конструкције доњег строја железничке пруге (Поглавље 2 ове Дисертације).

Очекивани животни век шине (временски период од полагања у колосек до замене шине) изразито зависи од њене интеракције са осталим деловима система возило–железничка инфраструктура. Са друге стране, захтеви за све бржим и чешћим превозом путника и робе, допуштена већа осовинска оптерећења и нове генерације возила са већом крутошћу (тешкоће уписивања у кривину) утицале су на бржу деградацију возних шина (и точкова возила), што доводи до чешћих и скупљих интервенција одржавања, па чак и замене шина изван редовних циклуса одржавања.

Успешност у условима тржишног пословања железнице изразито зависи од примене савремених знања у области одржавања возних шина. Поред правилног избора квалитета шина (у складу са локалним карактеристикама саобраћаја, возила и инфраструктуре), Управљачима инфраструктуре стоји на располагању и репрофилисање главе шине како би се постигла контрола појаве и развоја *RCF* дефеката, односно како би се одржала поузданост и безбедност железничког транспорта.

3.3.1 Основе репрофилисања главе возних шина

Репрофилисање се односи на кориговање геометрије главе шине помоћу тренутно доступних технологија као што су брушење, глодање и стругање у циљу уклањања слојева челика који су захваћени *RCF* дефектима. Специјално, репрофилисање се користи у циљу релаксирања возне ивице изложене великим контактним напрезањима, која доводе до понављања *HC* дефекта.

У практичним условима, стратегија репрофилисања изразито зависи од технологија и опреме које стоје на располагању УИ.

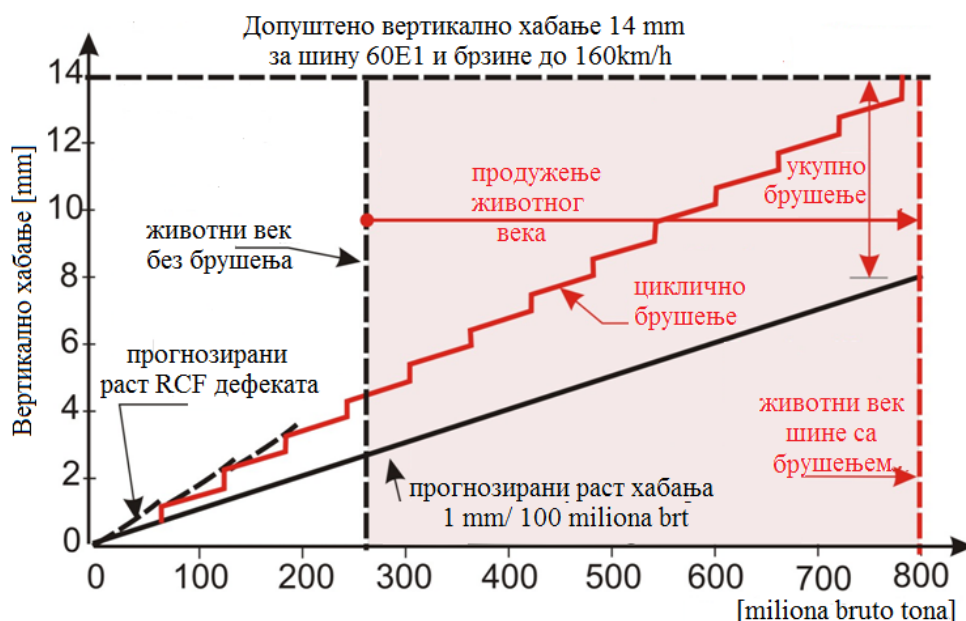
Поред тога, велики значај за успешност управљања *RCF* дефектима има дефинисање граница толеранција као прагова интервенције (репрофилисања) у случају кориговања подужног (дубина набораности) и попречног профила (дубина прслине, вертикално и бочно хабање) возних шина. Одређивање прагова интервенције је сложени процес који се заснива на знањима и искуствима Управљача инфраструктуре, као и на сталном праћењу брзине напредовања *RCF* дефеката након репрофилисања како би се извршиле евентуалне корекције прагова интервенције који су претходно дефинисани у плану одржавања, а нарочито на специфичним деоницама колосека (појава дефекта типа *wheel–burn*, *squat* дефекта, набораности возне површи унутрашње шине у кривинама малог радијуса и слично). У сваком случају, није могуће генерално прописивање обавезних прагова интервенције због изразите сложености утицаја који дефинишу појаву и развој *RCF* дефеката.

Ипак, јасно је да у условима савременог железничког транспорта, који мора да одржи конкурентност са другим видовима саобраћаја, УИ стоје на располагању ограничени интервали затвора колосека за спровођење активности одржавања. Због тога се активности одржавања изводе у планираним циклусима одржавања, при чему дужину временског периода између два суседна циклуса одржавања одређује УИ. Одређивање циклуса одржавања захтева уважавање свих специфичности које су везане за расположивост и техничке перформансе механизације за одржавање, минимално и реално расположиво време заузимања колосека у циљу извођења активности одржавања, као и за захтеве технолошког усклађивања репрофилисања са осталим активностима одржавања (нпр. технолошка условљеност репрофилисања завршетком радова на уређењу смера и нивелете уз стабилизацију колосека) и слично. Због тога УИ најчешће везују дужине циклуса одржавања за акумулирано оптерећење изражено у милионима превезених бруто тона по посматраном

колосеку, или за одређену сезону (нпр. на пругама где је транспорт везан за туризам, превоз пољопривредне робе и слично).

Приликом одређивања циклуса одржавања важно је размотрити: (а) капацитет планиране механизације која ће се користити за репрофилсање главе возних шина (максимална / минимална дубина слоја уклоњеног челика у једном пролазу механизације, брзина кретања механизације током рада и ван радног режима), (б) расположиво време затвора колосека, (в) распоред колосека на железничкој мрежи на којима се привремено оставља механизација када није у радном режиму, (г) спецификацију очекиваних резултата репрофилсања (репарација појединачних дефеката, репрофилсање подужног и попречног профила), као и (д) захтеване толеранције за прихватање радова након извршеног репрофилсања [2].

Важно је уочити да краћи циклуси репрофилсања захтевају уклањање слојева шинског челика мање дебљине, због чињенице да је у краћим временским периодима развој *RCF*-а знатно ограничен у односу на дуже временске периоде. Идеално би било када би дубина развијених дефеката могла да се уклони у једном пролазу механизације за репрофилсање. Ипак, краћи циклуси одржавања дају веће укупне трошкове одржавања шине током њеног животног века. Уз то, приликом сваког циклуса репрофилсања уклања се одређена дебљина челика (тзв. вештачко хабање), коју је потребно суперпонирати са дебљином челика која се уклања у процесу хабања између два узастопна циклуса репрофилсања (тзв. природно хабање). Збир дебљина уклоњеног челика природним и вештачким хабањем током целокупног животног века шине не сме да буде већи од допуштене толеранције за вертикално хабање профила шине (слика 3.29). Такође, продужени животног век шине не треба да буде дужи од животног века прага [41]. Оптимална стратегија репрофилсања омогућује захтевани животног век шине уз минималне трошкове одржавања. Захтевани животног век шине дефинише УИ. На пример, УИ на немачким железницама спроводи стратегију усаглашавања животног века шине и прагова, док УИ кинеских железница спроводи стратегију минималног одржавања шина у колосеку током њиховог планираног животног века у просечном трајању 7 – 9 година.



Слика 3.29 Принцип суперпонирања природног и вештачког хабања [41]

У складу са наводима у [3], неколико европских УИ користи следеће циклусе за репрофилсање шина квалитета R260 у циљу контроле *HC* дефеката: а) након 15 милиона

бруто тона за кривине, б) након 45 милиона бруто тона за правце. У складу са наводима из потпоглавља 3.2.3, за тврђе термички обрађене шине (нпр. R350HT) интервали се могу удвостручити у зависности од карактеристика колосека и саобраћаја. У сваком случају, дебљина уклоњеног слоја челика треба да одговара измереним дубинама слојева који су захваћени *НС* прслинама. Ипак, током и након репрофилисања треба проверити да ли су *RCF* прслине заиста уклоњене [89]. У ту сврху често се користи метод вртложних струја за контролу присуства прслина у повратном ходу механизације за репрофилисање. Примена методе инспекције помоћу вртложних струја ближе је описана у Поглављу 4 ове Дисертације. Применом инспекције присуства дефеката помоћу вртложних струја спречава се уклањање веће дебљине слоја челика од стварно потребне. Такав приступ оптимизује величину вештачког хабања репрофилисањем, што додатно продужава животни век шина у колосеку.

Међутим, за управљање дефектима типа *squat*, без обзира да ли се ради о деоницама у правцу или кривинама великих радијуса, због карактеристичног режима вожње (покретање и кочење), могу се очекивати краћи циклуси за репрофилисање. На деоницама где су дефекти типа *squat* иницирани појавом набораности возне површи главе шине, циклуси репрофилисања се уређују према напредовању набораности.

3.3.2 Значај инспекције за управљање неравнинама малих таласних

дужина

Један од услова за квалитетно одржавање колосека је познавање његовог стварног стања, што се постиже редовним инспекцијама. Инспекција шине треба да пружи информације о њеном попречном профилу, уздужном профилу и дефектима на површини и унутар шине. Инспекција се може извршити машински интегрисаним мерним уређајима, уређајима којима се управља ручно, као и визуелним прегледом. С обзиром на изузетан значај инспекције у процесу управљања неравнинама малих таласних дужина на глави возних шина, овој теми је посвећено посебно поглавље Дисертације (Поглавље 4).

3.3.3 Толеранције за планирање и спровођење репрофилисања шине

С обзиром на то да брзина напредовања *RCF* дефеката зависи од изразито сложених услова, који могу да буду и изразито локалног карактера (нпр. неравномерна крутост шинске подлоге и остале нерегуларности у одржавању), не могу се прописати јединствени прагови за интервенцију. Сваки УИ самостално прописује прагове интервенције у складу са специфичностима окружења у коме послује (начин финансирања, доступност механизације за репрофилисање, карактеристике мреже којом управља и слично), што за последицу има одговарајуће трошкове одржавања и животни век конструкције горњег и доњег строја. Од УИ се очекује да прати развој дефеката и да према потреби коригује прагове за интервенцију које је претходно прописао. На тај начин се кроз време итеративним поступком долази до објективно одређених прагова за интервенцију. У сваком случају, серија европских стандарда *EN 13848* дефинише захтевани квалитет геометрије колосека на европској железничкој мрежи, али УИ сам развија стратегију којом тај квалитет мора да осигура на магистралним правцима.

У овом потпоглављу ће се изложити препоруке које даје европски стандард [3]. Прагови за интервенцију у складу са табелом 3.9 и табелом 3.10 дефинишу препоручене вредности изнад којих се значајно повећавају нивои буке са повећањем дубине набораности, а динамичке силе и вибрације колосека почињу да оштећују структуру застора. Неке

специфичне врсте дефеката, које се јављају на колосецима за брзине преко 160 km/h (нпр. *belgrospi*), захтевају нижи праг интервенције од 0,03 mm како би се смањиле динамичке силе које се преносе у конструкцију горњег и доњег строја (нарочито на пругама за велике брзине).

Вредности интервенције за набораност унутрашње шине у кривинама малог радијуса неки УИ узимају у интервалу између 0,1 mm и 0,3 mm, зависно од брзине пропадања колосека.

Наведени прагови интервенције у [3] одражавају праксу која се уз уважавање економских разлога користи на европским железничким мрежама и представљају препоручене вредности. Називи дефеката у табели 3.9 написани су на енглеском језику у складу са [3] како би се избегла могућа забуна због њиховог неслагања са називима дефеката који су коришћени у Каталогу шинских дефеката [13]. Вредности наведене у табели 3.9 и табели 3.10 не односе се на пријем радова на репрофилисању, већ само на планирање и спровођење репрофилисања у оквиру активности одржавања.

Табела 3.9 Прагови интервенције за подужни профил (вредности „peak to peak“) [3]

Брзина на колосеку [km/h]	Тип дефекта према [3]	Дужина таласа	Праг за планирање	Праг за интервенцију
		Интервал [mm]	Дубина [mm]	Дубина [mm]
$V \leq 80$	<i>Short pitch corrugation</i>	10 – 100	0,10	0,20
$80 < V \leq 120$			0,07	0,15
$120 < V \leq 160$			0,05	0,10
$V > 160$			0,02	0,04
$V \leq 80$	<i>Short wave corrugation</i>	30 – 300	0,20	0,30
$V > 80$			0,10	0,20
Градска железница $V \leq 120$			0,35	0,70
$V > 160$	<i>Long wave corrugation</i>	300 – 1000	0,40	0,50

Табела 3.10 Прагови интервенције за попречне профиле ($R > 5000$ m и правац) [3]

Брзина на колосеку [km/h]	Максимално радијално одступање од циљног профила (средња вредност на 100 m)	
	Праг за планирање [mm]	Праг за интервенцију [mm]
$V \leq 120$	Нема захтева	
$120 < V \leq 160$	+0,7	+1,3
$V > 160$	+0,5	+0,7

3.3.4 Општа стратегија репрофилисања

Опште прихваћен став на нивоу европских УИ је да прво репрофилисање шина треба извршити непосредно након полагања нових шина у колосек, како би се оптимизовало стање површине нове шине (уклањање декарбонизованог слоја, уклањање оштећења из процеса уградње, поправка равности на завареним спојевима итд.). Шине у новим колосецима треба обрадити пре пуштања у саобраћај. Шине треба обрадити што је пре могуће након полагања у колосек (по могућности у року од шест месеци).

Поред тога, неки УИ у циљу управљања *RCF* дефектима, прво репрофилисање нових шина изводе са циљем да се постигне профил шине који је унапред прилагођен

преовладавајућим профилима точкова на мрежи, или се профилише тзв. *AHC* (*anti-headcheck*) профил шине.

Током експлоатације колосека редовно се у одговарајућим интервалима уклања слој шинског челика на површини главе шине који је изложен *RCF* дефектима, укључујући набораност возне површи. Према [3], у циљу постизања континуалности уздужног профила горње површи главе шине, изводе се прелази са ограниченим максималним подужним нагибом између профила:

- 1/1000 за $V \leq 160$ km/h,
- 1/3000 ($V > 160$ km/h).

Циклично репрофилисање главе шине, такође, може бити превентивно, као и корективно. Циклично превентивно одржавање је пожељно, јер се на тај начин уклањају слојеви челика изложени замору пре него што се развију *RCF* дефекти.

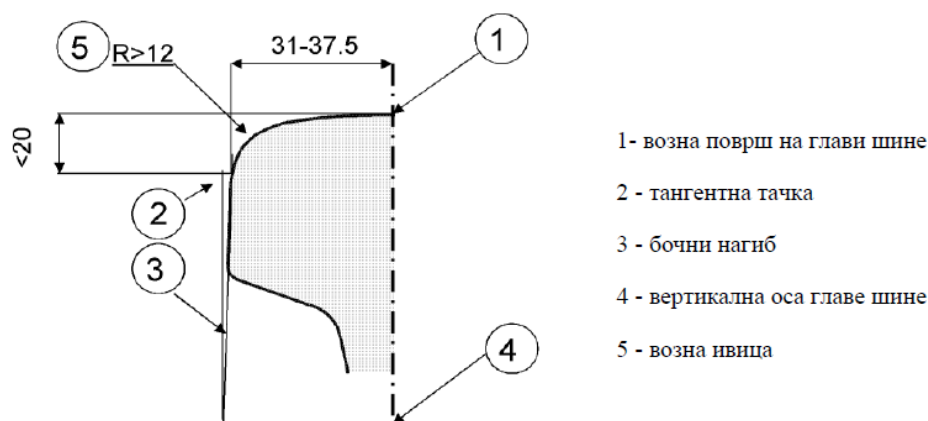
У сваком случају, за циклично превентивно или циклично корективно одржавање шина, УИ треба да одреде фиксне вредности дубина уклањања челика на основу препорука из важећих стандарда, сопствених искустава или снимљеног стања возних шина у колосецима. На пример, стандард [3] даје следеће препоруке за дубине уклањања челика:

- највише 0,6 mm на критичном подручју возне ивице,
- највише 0,2 mm у средини главе шине, али не мање од 0,1 mm.

Треба напоменути да *RCF* прслине нису уједначене ни по облику ни по дубини дуж возних шина, што отежава одређивање фиксне вредности дубине уклањања челика.

Пре репрофилисања главе шине у циљу постизања коригованог облика попречног профила главе шине, све типове набораности возне површи треба у потпуности уклонити (*peak-to-peak value* – од врха гребена до дна депресије) и још подбрусити до слоја челика који није захваћен *RCF* дефектима (за 0,1 mm према препоруци [3]).

Приликом репрофилисања главе возних шина обично се примењују стандардни циљни профили, који су најчешће идентични као ваљани профили према захтевима [18] (слика 3.30).

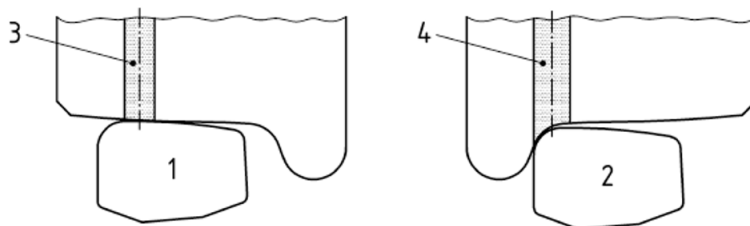


Слика 3.30 Профил главе шине према [18]

Поред оваквог приступа, користе се различити циљни профили шине за специјалне намене, као што су профили за смањење бочног хабања спољних шина у оштрим кривинама и профили за повећање ширине колосека у циљу промене еквивалентне коничности. Као што је већ поменуто, да би се контролисао развој *RCF* дефеката на деоницама које су осетљиве на *HC* дефекат, препоручује се употреба *AHC* профила. Такође, у скретницама и укрштајима са вертикално постављеним шинама (без инклинације), могу се репрофилисати шине тако да се

профил главе прилагоди шинама које се прикључују на скретницу или укрштај, а које имају инклинацију (нпр. 1:20).

Профили за смањење хабања (тзв. „асиметрични профили“, слика 3.31) могу се користити за контролу прекомерног бочног хабања спољних шина у кривинама. Асиметрични профили главе шине померају круг котрљања точка на спољној шини ближе возној ивици коригованог профила главе шине (померање ка већем кругу котрљања на спољашњем точку), а на унутрашњој шини ближе спољној страни главе шине (померање ка мањем кругу котрљања на унутрашњем точку). Оваквом корекцијом облика главе шине тежи се да се повећа пређени пут спољашњег точка и смањи пређени пут унутрашњег точка при једнакој брзини обртања осовине осовинског склопа коме поменути точкови припадају.



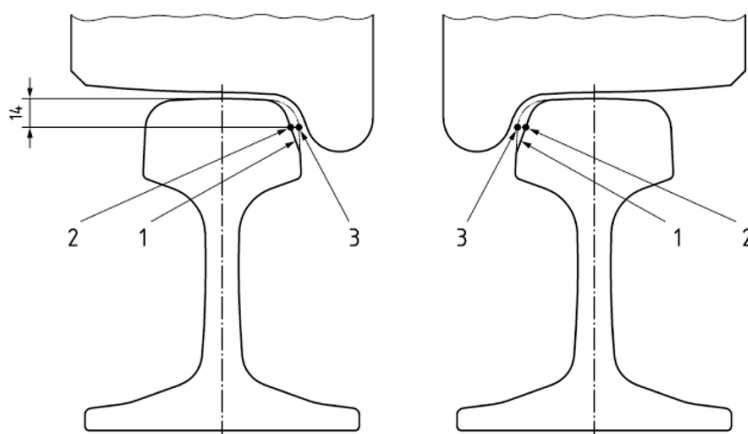
Легенда

1. унутрашња шина
2. спољашња шина у кривини са надвишењем
3. круг котрљања унутрашњег точка
4. круг котрљања спољашњег точка

Напомена: примена репрофилисаних шина захтева специјалну пажњу у зонама прелазних кривина

Слика 3.31 Профил за редукцију хабања [3]

Профили за проширење колосека могу се применити тамо где је стварна ширина колосека мања од њене потребне вредности. У овом случају, номинални профили обе возне шине се обострано обресе у зони возне ивице и унутрашњих бокова главе шине (нпр. 2,5 mm на свакој шини да би се постигло проширење колосека 5 mm), као што приказује слика 3.32.



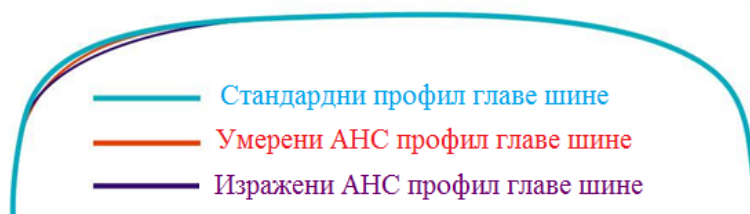
Легенда

1. 70° нагнута фасета (обрешена површина)
2. референтна тачка 14 милиметара испод ГИШ
3. тачка у којој се мери максимално повећање ширине колосека

Слика 3.32 Профил за повећање ширине колосека [3]

АНС профил се користи за контролу појаве и развоја RCF прелина смештених у близини возне ивице шине у кривинама великог радијуса. Стандард [3] препоручује АНС

профил који пружа релаксацију возне ивице профила главе шине уклањањем слоја челика најмање дебљине 0,3 mm у циљу одлагања појаве *НС* дефекта. Наведена дебљина уклањања слоја челика може да варира у зависности од циклуса репрофилисања (нпр. под утицајем брзине напредовања *НС* дефекта и/или расположивог капацитета машине која се користи за репрофилисање). За сада не постоји јединствени *АНС* профил. Различити УИ развили су сопствене *АНС* профиле које користе на мрежама којим управљају [90]. Заједничко за све *АНС* профиле је уклањање возне ивице у којој се очекује појава и развој *НС* дефеката (слика 3.33). *АНС* профили се примењују на деоницама ограничене дужине на којима се искуствено очекује појава *НС* дефеката.



Слика 3.33 Принцип корекције возне ивице десне возне шине са *АНС* профилем

3.3.5 Превентивно и корективно репрофилисање шина

Сложени корективни радови ангажују капацитет машина за репрофилисање током дужих периода времена током којих се на другим возним шинама могу развити *RCF* дефекти. Са друге стране, стратешки планирани циклични радови у нормалним условима могу покривати знатно дуже деонице колосека, што повећава учинак механизације и смањује трошкове њеног ангажовања.

Нова искуства великих европских УИ у области одржавања шина показују да би превентивне мере требало да имају приоритет у односу на корективно одржавање. Наиме, савремена искуства су показала да је превентивно одржавање шина обично исплативије од корективног.

Овакав приступ треба од почетка примењивати на новим, реконструисаним и обновљеним колосецима железничке мреже. На постојећим колосецима, након интензивног исправљања озбиљнијих недостатака (грешке у геометрији колосека и *RCF* дефекти) применом корективног одржавања, шине треба одржавати превентивним режимом. Овакав приступ треба да максимизира техничке и економске ефекте одржавања шина.

Историјски гледано, корективно репрофилисање шина је дуги низ година имало највећи приоритет на европској железничкој мрежи. Оно је усмерено на проблематичне деонице колосека чије су локације често расуте на железничкој мрежи која је у надлежности УИ. Како су места за стајање механизације за репрофилисање (механизација ван радног режима) лоцирана на знатној удаљености (понекад и више десетина километара) од радилишта на колосеку, механизација свакодневно треба да пређе велике удаљености до места интервенције (обично као шинска возила ниског приоритета), чиме се губи драгоцено радно време. Тако нпр. када се механизација за репрофилисање користи на кратким деоницама (кривине малог радијуса, зоне кочења и покретања возила) које су често међусобно удаљене више километара, а предвиђени корективни рад захтева већи број радних пролаза, очекује се велика цена рада по метру репрофилисане шине.

Планирани термин за репрофилисање шина треба да се заснива на разматрању могућности минимизирања укупних трошкова, који обухватају збир свих трошкова узрокованих неисправним стањем шине и трошкова исправљања недостатака. Трошкови

исправљања недостатака могу се знатно смањити ако се на нивоу железничке мреже планирају интервенције како би се обезбедило максимално ефикасно време рада ангажоване механизације. Одлагање репрофилисања главе возних шина укључује повећање укупних трошкова услед развоја шинских дефеката, док преурањено репрофилисање резултира прекомерним и непотребним трошковима.

Приликом планирања интервенција за репрофилисање главе возних шина треба узети у обзир значајно време заузећа колосека (долазак механизације, рад на колосеку, одлазак механизације). Такође, треба узети у обзир и повољну ситуацију да ће циклична корекција једног од присутних типова *RCF* дефеката (набораност возне површи, трагови утиснутих објеката, *HC*, *squat*, итд.) такође смањити или елиминисати друге типове присутних дефеката.

Ефикасно планирање интервенције цикличног репрофилисања у циљу управљања појавом и развојем *RCF* шинских дефеката на железничкој мрежи треба да обухвати:

- програм превентивног цикличног репрофилисања за све пруге које припадају железничкој мрежи,
- избор одговарајуће механизације за репрофилисање са аспекта њеног учинка и утицаја на окружење (Поглавље 2),
- време потребно за рад механизације са дефинисаном радном брзином и бројем пролаза механизације у зависности од претходно утврђеног циљног профила и потребне дебљине слоја челика који је потребно уклонити,
- распоред стајалишта за механизацију ван режима рада са неопходном опремом за њено одржавање и снабдевање горивом на стратешким локацијама,
- утврђивање и планирање заузећа колосека за долазак, припремне радове, рад и одлазак механизације у складу са утврђеним редом вожње за сваку пругу,
- обезбеђење неопходне опреме за снимање и документовање извршеног обима и квалитета рада на репрофилисању.

Са становишта сваке деонице колосека на којој се планира репрофилисање шина неопходно је направити детаљан план организације свакодневног рада на репрофилисању главе возних шина како би се осигурало да однос радног периода и ефективног времена репрофилисања буде оптималан. Детаљан план репрофилисања мора да се заснива на претходно прикупљеним информацијама о стању возних шина у колосеку коришћењем одговарајућих метода инспекције.

Искуства показују да флексибилност и сарадња између управљања саобраћајем и управљања радовима на колосеку има изузетан значај за постизање максималног учинка механизације током времена заузимања колосека. Планирана промена реда вожње и режима рада у службеним местима може допринети знатно нижим трошковима одржавања железничке инфраструктуре.

Приликом израде планова одржавања треба обратити посебну пажњу на предности механизације са великим радним учинком која омогућује постизање циљног профила главе возних шина са најмањим бројем радних пролаза. Ипак, механизација са великим радним учинком може правилно да се искористи само на дугачким непрекидним секцијама колосека. Због тога се организација ангажовања овакве механизације увек сагледава на нивоу целе железничке мреже којом управља УИ. Посебан проблем у овом случају јесте потреба закључивања дугорочних уговора за ангажовање механизације, што додатно указује на озбиљност и дугорочне карактеристике стратешких планова одржавања железничке мреже.

УИ треба да прати развој технологије за репрофилисање шина, нарочито у вези са специфичностима коришћења (нпр. ефекти варничења и прашине) и потенцијалних ограничења (нпр. обавезност уклањања опреме као што су бројачи осовина и сличне опреме

из колосека током рада механизације). Слика 3.34 приказује различите принципе рада механизације за репрофилисање главе шине, која се користи на европској железничкој мрежи, и који су разматрани у европском стандарду [3].

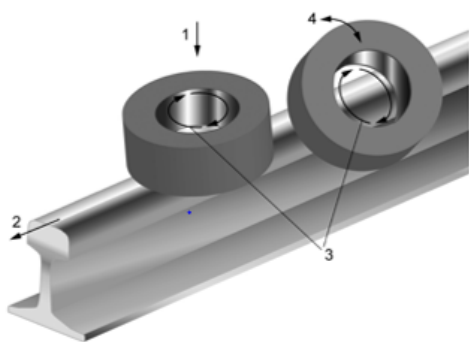
Учинак ротационог брушења (слика 3.34а) зависи од конфигурације и капацитета машине, као и радне брзине брушења, која износи између 3 km/h и 15 km/h. Количина уклоњеног шинског челика зависи од броја и снаге брусних модула, као и брзине рада. Учинак такође зависи од захтеваног циљног попречног профила и оперативних фактора рада механизације (расположиво радно време на колосеку, ометање осталог саобраћаја на колосеку). У зависности од капацитета машине, потребан је један или више пролаза брушења. Развој овог типа механизације одвија се у смеру ограничавања ефекта варничења и стварања абразивне челичне прашине у процесу брушења. Модули за брушење могу се прилагодити тако да се не оштећују уређаји, опрема и конструкција колосека (скретнице, укрштаји, шине вођице, сигурносне шине, бројачи осовина и слично). Обрађени попречни профил главе шине карактерише се полигоналним обликом са малим брусним фасетама. Тачност која се постиже за попречни и уздужни профил главе шине треба да одговара захтевима европских стандарда [2, 47].

Глодање шина карактерише велика количина уклоњеног шинског челика (слика 3.34б). Обим уклоњеног материјала одређује се бројем глодалица, њиховим капацитетом, брзином рада и обликом оштећеног попречног профила. Маchine су опремљене са две до шест глодалица и допуњене су завршном брусном јединицом. Радна брзина је између 500 m/h и 1500 m/h. Завршна обрада циљног попречног профила постиже се финим брушењем. Није потребно уклањање опреме из колосека током рада механизације. Оглодани челик и прашина од брушења сакупљају се усисним системима и могу да се рециклирају. Тачност која се постиже за репрофилисани попречни и уздужни профил главе шине и други критеријуми одговарају захтевима европског стандарда [2].

Механизација са модулом за осцилаторно брушење (слика 3.34в) врши уклањање шинског челика на два начина: осцилаторним кретањем брусних плоча уз истовремено транслаторно померање машине у смеру напредовања радова. Примењен је принцип мокрог брушења без стварања варница или прашине. Овим поступком не може се постићи циљна промена попречног профила главе шине. Поступак је могуће извести без уклањања опреме из колосека. Радна брзина са осциловањем је до 1200 m/h. У тзв. „режиму крутог клизног блока“, тј. без осциловања, радна брзина је до 15 km/h. Најчешће се рад механизације одвија у више пролаза до постизања коначног резултата репрофилисања. Након брушења уздужног профила, храпавост површине и визуелни изглед одговарају захтевима [2, 47].

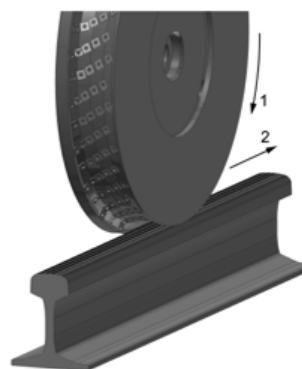
Техника брушење великом брзином (*High speed grinding – HSG*) заснива се на принципу тангенцијалног брушења. Брусни камен не покреће мотор, већ је вучен уз ваљање дуж возне шине (слика 3.34г). Постоји могућност рада *HSG* механизације без уклањања опреме из колосека тако што се модули за брушење могу подизати и спуштати како не би дошли у колизију са конструкцијом и опремом колосека (скретнице, укрштаји, вођице, бројачи осовина и слично). Механизација је пројектована тако да ограничи утицај на околину (ограничени ефекти варница и прашине који настају у процесу рада). Уклањање метала зависи од притиска који брусни камен врши на возну површ и од броја брусних јединица. Брушење возне површи главе шине се изводи брзинама између 50 km/h и 80 km/h у оквиру редовног саобраћаја. *HSG* технологија се примењује искључиво за превентивно брушење возних шина. Главни услов за примену ове технологије је конзистентност профила шине. У зависности од капацитета механизације, може бити потребан један или више пролаза механизације да би се постигла жељена дебљина уклоњеног шинског челика. Да би се применила *HSG* технологија брушења без затвора колосека, брушење се врши под углом од 8° до 45° у равни возне површи шине (ознака 3 на слици 3.34г). Резултати *HSG* брушења у

погледу уздужног профила и храпавости површине треба да одговарају захтевима европског стандарда [2].



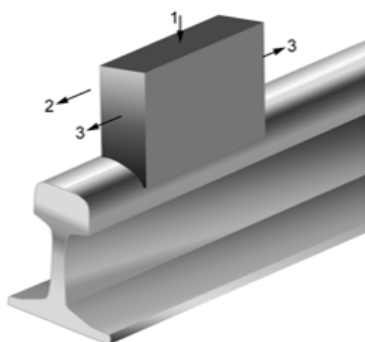
Легенда:
 1 - притисак брусног камена
 2 - униформно кретање унапред или уназад
 3 - ротација брусног камена
 4 - попречни нагиб (инклинација) брусног камена

а) Принцип ротационог брушења [3]



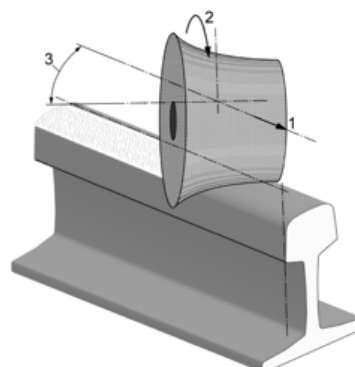
Легенда:
 1 - смер ротације при глодању
 2 - смер глодања

б) Принцип глодања [3]



Легенда:
 1 - притисак брусног камена
 2 - транслаторно кретање
 3 - осцилаторно кретање

в) Принцип осцилаторног брушења [3]



Легенда:
 1 - смер кретања
 2 - смер ротације
 3 - угао у равни возне површи главе шине

г) Принцип брушења великом брзином [3]

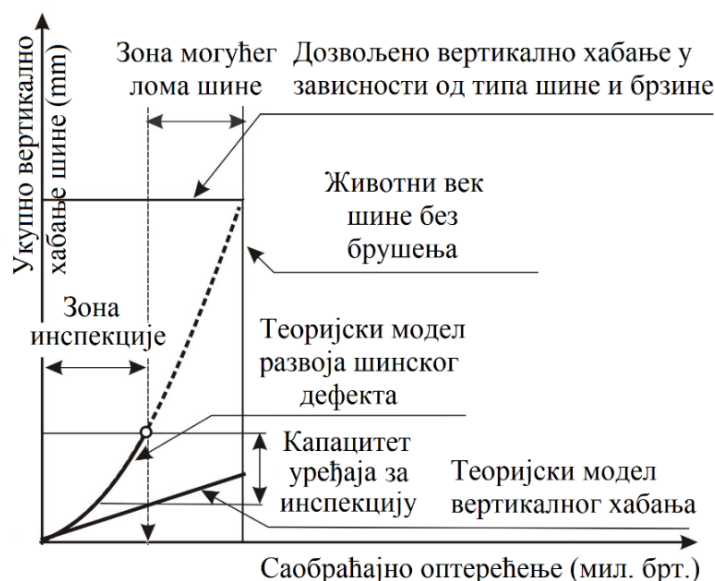
Слика 3.34 Различити принципи репрофилсања према [3]

Кратке секције колосека на којима треба извршити репрофилсање у више пролаза (који се не могу завршити у основном циклусу) треба третирати флексибилнијом механизацијом. Исти приступ треба применити за неизбежан корективни рад на специфичним критичним крајним деоницама колосека (скретнице, укрштаји, пружни прелази и слично), које често захтевају знатно чешће интервенције.

У Поглављу 2 посебно је указано на потребу да планови одржавања возних шина у колосеку буду саставни део интегралног одржавања, као и на технолошку зависност редоследа спровођења активности одржавања (спровођење активности одржавања одоздо – нагоре, односно од планума до репрофилсања возних шина у динамички стабилizованом колосеку са уређеном нивелетом и смером).

4 ИНСПЕКЦИЈА *RCF* ШИНСКИХ ДЕФЕКТА

Инспекција *RCF* шинских дефеката је изузетно важан део управљања неравнинама на горњој површи главе шине. Као што је у ранијим поглављима истакнуто, од великог значаја је избор методе инспекције која омогућује детекцију дефекта у што ранијој фази његовог развоја. На слици 4.1 приказан је теоријски модел развоја *RCF* дефекта, као и једноставни линијски модел развоја вертикалног хабања, са циљем да се укаже на неопходан капацитет уређаја за инспекцију у распону од тренутка најранијег детектовања прслине до тренутка лома шине.



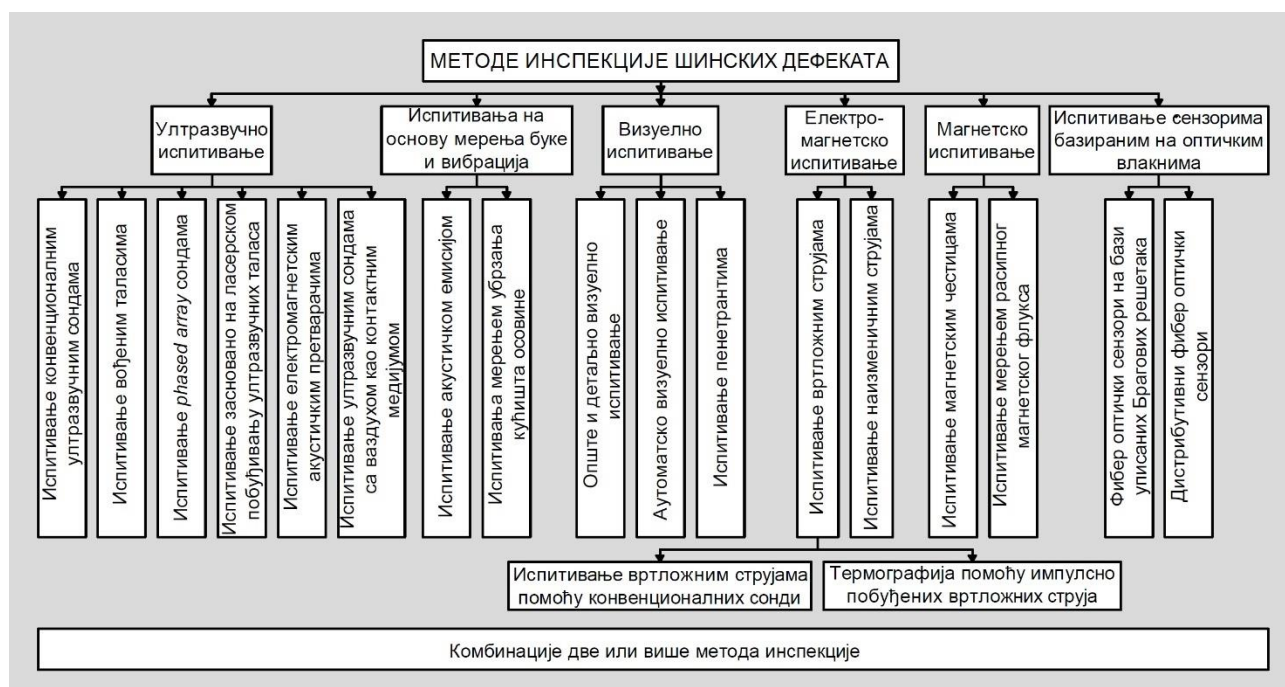
Слика 4.1 Потребан капацитет уређаја за инспекцију *RCF* шинских дефеката

Инспекција шинских дефеката представља мултидисциплинарну и сложену област истраживања, која се бави проучавањем механизма настајања и развоја различитих типова шинских дефеката, укључујући њихово моделовање и анализу. Поред тога, инспекција шинских дефеката обухвата и развој метода мерења и сензора, обраду и анализу сигнала, као и процес аутоматизације. Развој метода инспекције доводи до интензивирања мултидисциплинарних истраживања и утиче на даље унапређење различитих научних дисциплина. Ова истраживања су често део скувих и дуготрајних истраживачких пројеката.

Са повећањем брзина и осовинских оптерећења возила, убрзано стварање и напредовање шинских дефеката захтева развој поузданих метода детекције, као и утврђивање оптималних циклуса инспекције у условима несметаног функционисања железничког саобраћаја. Мерна опрема може бити постављена у колосеку или инсталирана у возилима. Мерна опрема, која је инсталирана на инспекцијским возилима или возилима за комерцијални саобраћај, мора да омогући довољну осетљивост и просторну резолуцију мерења, као и одређивање тачног положаја шинског дефекта у колосеку.

На европској железничкој мрежи, инспекција шинских дефеката захтева стандардизоване начине испитивања дефинисане од стране *CEN*-а. Поред стандардних метода дефинисаних у релевантним европским стандардима [14, 19, 20], у даљем тексту овог Поглавља дат је преглед савремених метода без разарања које би се могле применити за инспекцију *RCF* шинских дефеката типа *squat* и *head checking* (*HC*).

Класификација стандардизованих и савремених метода инспекције, које се разматрају у овом Поглављу, приказана је на слици 4.2. Како би се повећала сигурност инспекције, односно омогућила детекција више типова дефеката, потребно је комбиновати две или више метода инспекције (слика 4.2).



Слика 4.2 Класификација метода инспекције шинских дефеката

Историјски гледано, све методе пролазе кроз фазе интензивног развоја и стагнације, које се смењују у зависности од технолошких унапређења мерне опреме (нпр. сонде, сензори итд.), аквизиционих система и софтверских алата за обраду и анализу снимљених података. Даља унапређења метода инспекције треба да се развијају у циљу ране, поуздане и аутоматске детекције *RCF* дефеката у условима несметаног функционисања железничког саобраћаја, као и њихове класификације у реалном времену.

Резултати извршене квалитативне анализе метода инспекције, које се разматрају у овом Поглављу, приказани су у Прилогу 1. Посебно су назначене методе инспекције које су стандардизоване од стране *CEN*-а (сиво обојена поља у Прилозима 1.1 и 1.2).

У Прилогу 1.1, приказана је способност детекције *RCF* дефеката за сваку методу посебно, односно параметри дефеката које је могуће детектовати одређеном методом

инспекције. Анализирана је способност методе инспекције да детектује локацију прслине (L), димензију прслине на површини главе шине ($ПД$), дубину прслине (D), оријентацију прслине (O), као и број прслина у оквиру вишеструког дефекта (B). Поред тога, наведени су и начини примене ($ЛИ$ – лабораторијска или $ТИ$ – теренска испитивања) метода инспекције на основу података из расположиве литературе која је анализирана за потребе ове Дисертације.

У Прилогу 1.2, посебним симболом (\bullet) су означене могуће комбинације метода инспекције, као и параметри RCF дефекта који се тачније могу одредити применом одговарајуће комбинације метода у циљу повећања поузданости инспекције.

4.1 Ултразвучно испитивање

Ултразвучно испитивање (*Ultrasonic Testing – UT*), као најчешће коришћена метода детекције шинских дефеката, детаљно је разматрано у [13, 14, 16, 19]. Главни недостатак конвенционалног ултразвучног испитивања и испитивања вођеним таласима представља постојање контактнoг медијума и трења између сонде и шине. Зато се развијају савремене методе ултразвучног испитивања са бесконтактним побуђивањем и детекцијом ултразвучних таласа.

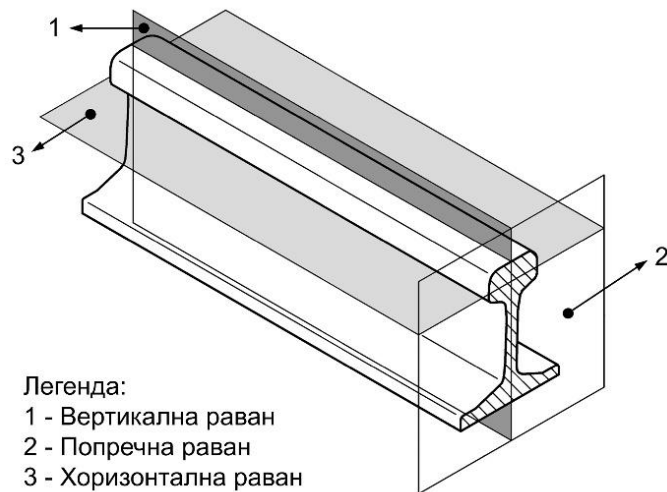
Конвенционална ултразвучна метода се сматра непоузданом за инспекцију RCF дефеката, због постојања „мртве зоне” и проблема везаног за маскирање већих дефеката другим мањим локалним дефектима, као што је наведено у [14, 64, 66]. Развојем бесконтактних сонди за генерисање површинских и потповршинских таласа, као и оптималном комбинацијом различитих типова ултразвучних извора и детектора, повећана је вероватноћа откривања RCF дефеката.

4.1.1 Испитивање конвенционалним ултразвучним сондама

Неопходно је дефинисати углове сонди у односу на вертикалну, попречну и хоризонталну раван шине (слика 4.3), како би се побудили одређени типови таласа потребни за инспекцију одговарајућих дефеката.

У ултразвучном испитивању, врло је важан избор оптималне фреквенције инспекције. Пре избора фреквенције, потребно је узети у обзир структуру и дебљину материјала, тип и величину дефекта, као и његову могућу локацију. Због повезаности брзине простирања ултразвучних таласа (c), њихове фреквенције (f) и таласне дужине (λ) преко израза $c=f\lambda$, примењеном фреквенцијом се врши контрола таласне дужине, а на тај начин и величина дефекта на коју су ти таласи најосетљивији. Детекција дефекта је могућа само ако је његова величина већа од половине изабране таласне дужине ($\lambda/2$) ултразвучног таласа [91].

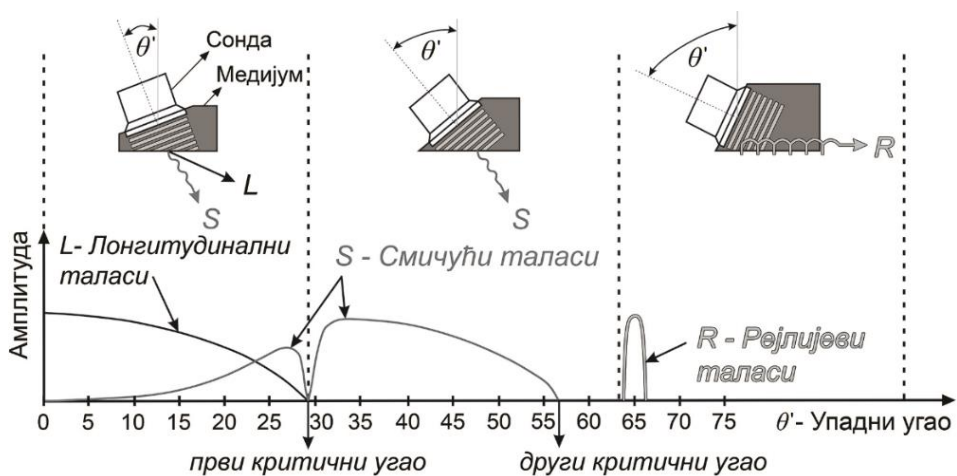
Приликом ултразвучног испитивања RCF дефеката потребно је побудити површинске и потповршинске таласе, у које спадају Рејлијеви таласи и лонгитудинални површински таласи. Рејлијеви таласи се простиру при шинској површини и при томе прате површинску закривљеност шинске главе. Дубина продирања ових таласа је приближно једнака једној таласној дужини (1λ) ултразвучног таласа [91].



Слика 4.3 Геометријске ортогоналне равни шине [14]

У инжењерској пракси се најчешће користе две конфигурације ултразвучног испитивања: рефлексiona импулс–ехо метода и трансмисиона *pitch–catch* метода. Импулс–ехо метода је заснована на мерењу времена повратка рефлектованог таласа и његовог интензитета. Побудна сонда шаље краткотрајни импулс, док иста сонда или друга сонда постављена у исто кућиште детектује повратни импулс. Рефлексija таласа се дешава од дефеката и/или граничних површина материјала. Трансмисиона *pitch–catch* метода се заснива на мерењу слабљења сигнала пропуштеног таласа између побудне и пријемне сонде. У неким случајевима се користи комбинација обе методе.

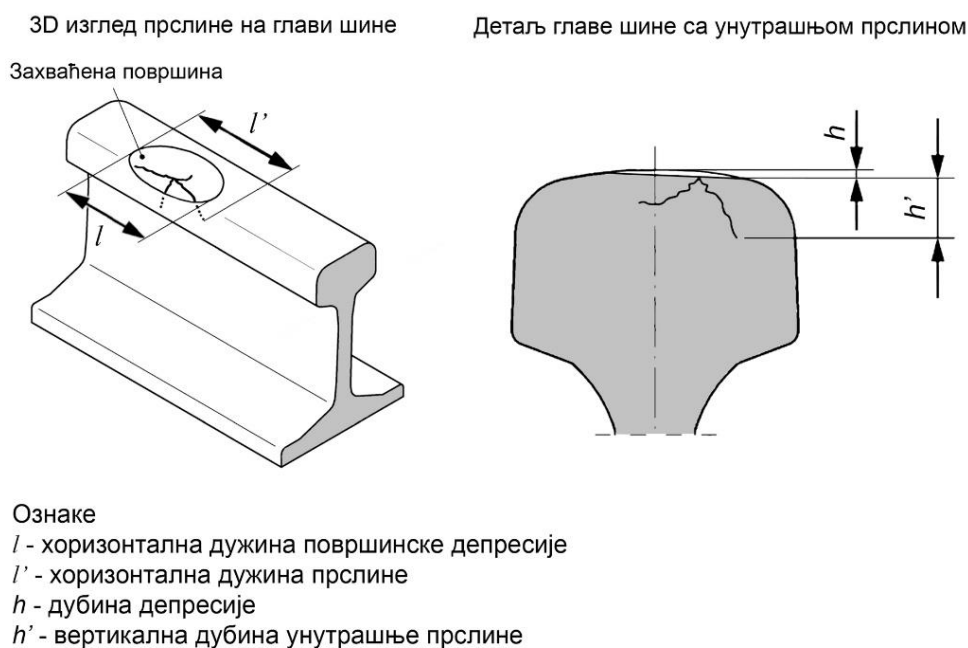
За побуђивање и детекцију ултразвучних таласа користе се различите врсте ултразвучних сонди (равне, угаоне и специјалне сонде) [91]. За побуђивање површинских и потповршинских таласа користе се угаоне и специјалне сонде. Угаоне сонде омогућавају да се избором упадног угла таласа побуди жељени тип таласа (слика 4.4). Како би се избегла рефлексija упадног таласа од површине шине, потребно је постојање контактнoг медијума између сонде и шине. Контактни медијум је најчешће у виду клина (слика 4.4). Да би се побудили Рејлијеви таласи, потребно је да упадни угао таласа буде већи од другог критичног угла, што се у пракси постиже применом угаоних сонди са преломним углом од 70° , као што је приказано на слици 4.4. Специјалне сонде су врло разноликих структура које омогућавају њихову осетљивост на *RCF* дефекте.



Слика 4.4 Побуђивање различитих типова таласа угаоним сондама са клином према [91]

Европски стандард [19] прописује фреквенцијски опсег, као и обавезне и опционе вредности угла сонде за детекцију одређених типова дефеката. Угао сонде је дефинисан у односу на вертикалну раван. Метода ултразвучног испитивања се може користити за детекцију *RCF* дефеката, као што су *squat* и *НС*, као и за одређивање њихових величина (слике 4.5 и 4.6) [14]. За сваки од наведених *RCF* дефеката, европски стандард [14] дефинише способност детекције одређене димензије прслине и угао под којим је потребно поставити сонду.

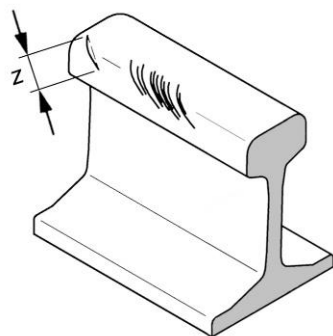
На слици 4.5 приказане су релевантне димензије прслине у случају *squat* дефекта. Код ултразвучног испитивања употребом ручне опреме и опреме уграђене у возило, за детекцију хоризонталне дужине (l) и вертикалне дубине (h) унутрашње прслине користе се сонде постављене под углом од 0° и 70° , редом [14]. Треба обратити пажњу да постоји опасност да попречни дефекти могу бити маскирани дугачком хоризонталном прслином [14].



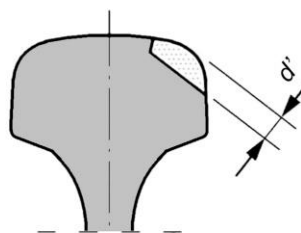
Слика 4.5 Релевантне димензије прслине дефекта типа *squat* према [14]

За детекцију релевантних димензија дефекта типа *НС* (дубина и ширина, слика 4.6) помоћу система за ручно ултразвучно испитивање, користи се сонда постављена под углом од 70° . Дубину дефекта је могуће одредити скенирањем дуж осе шине, док се ширина може одредити скенирањем по ширини шине. Међутим, како би детекција дефекта била омогућена, потребно је да његова дубина буде већа од 3 mm. У случају испитивања ултразвучним уређајем уграђеним у возило, дубина дефекта се може мерити за дубине веће од 5 mm. Међутим, потребно је нагласити да мерења могу да ометају остале локалне прслине које ограничавају максималну дубину дефекта која се може детектовати. За одређивање дужине унутрашње хоризонталне прслине, употребом система за ручно испитивање, као и опреме уграђене у возило, користи се сонда постављена под углом од 0° [14].

3D изглед НС прслине на глави шине



Детаљ главе шине са унуташњом НС прслином



Ознаке

 z - ширина површинске прслине d' - дубина унутрашње прслине

Слика 4.6 Релевантне димензије прслине дефекта типа НС према [14]

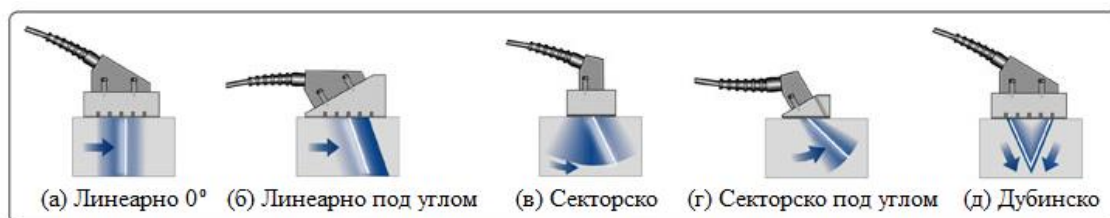
4.1.2 Испитивање вођеним таласима

У шинама могу да се побуде и простиру различите врсте вођених таласа (лонгитудинални, трансверзални и Рејлијеви) чије карактеристике су одређене геометријом шине и који имају велики значај за детекцију површинских и потповршинских дефеката. Испитивање вођеним таласима (*Guided Wave Testing – GWT*) је обухваћено европским стандардом [14] и представља нискофреквентну методу инспекције шине.

Код *GWT* методе врши се побуђивање одређеног типа вођених таласа употребом статичког низа пиезоелектричних претварача, који су привремено у директном контакту са површином шине. Генерисани вођени таласи се простиру до 30 m дуж шине у оба смера и преносе се и примају у облику поворке повратних импулса (рефлексиона импулс–ехо конфигурација ултразвучног испитивања). На тај начин је могуће дефекте детектовати, лоцирати и проценити њихову озбиљност на већим удаљеностима од сонди [14]. Метода је корисна за испитивање зона са мањим нерегуларностима главе шине (као што је набораност главе шине, кодни број 2201 [13]) или када је шина делимично неприступачна за испитивање (шински спојеви, скретнице, прелази у нивоу итд.).

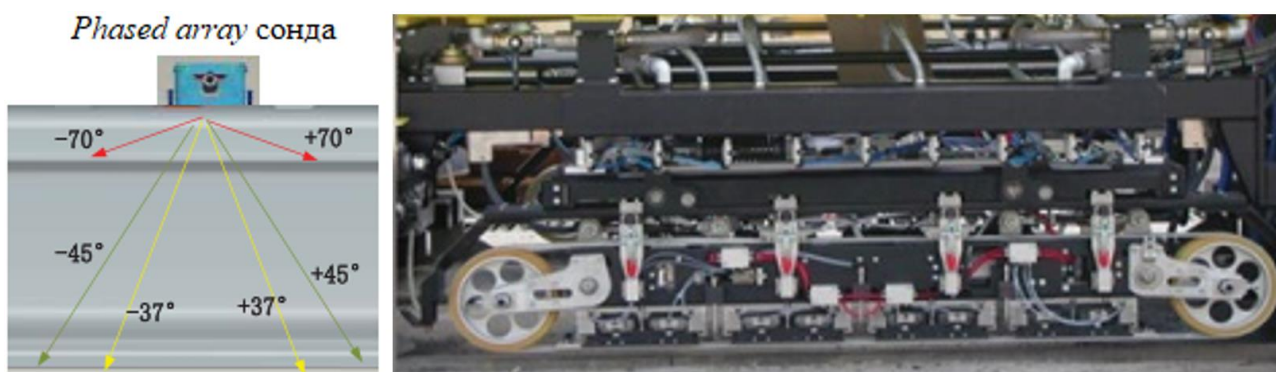
4.1.3 Испитивање *phased array* сондама

Phased array сонда се састоји од више појединачних сонди које су интегрисане у једну целину. Подешавање угла и дубине продирања ултразвучних таласа, као и захваћене површине испитивања врши се електронским путем преко унапред програмираног кашњења импулса којима се сонда побуђује и избором оптималне фреквенције таласа. Ове сонде могу да се примењују на различите начине, као што је приказано на слици 4.7 [92]. Линеарно побуђивање се врши таласима усмереним у једном правцу, односно таласима који се простиру нормално у односу на површину или под изабраним константним углом (слика 4.7 – случајеви а и б). Секторско побуђивање се врши таласима чији се правац мења у одређеном опсегу углова (слика 4.7 – случајеви в и г). Посебан начин побуђивања је када се врши фокусирање таласа на одређену дубину испод површине, односно дубинско побуђивање (слика 4.7д). На тај начин, *phased array* сонде могу да се прилагоде положају и типу испитиваних дефеката шине.



Слика 4.7 Начин побуђивања таласа *phased array* сондама [92]

Унапређење *phased array* технике врши се увођењем новог начина побуђивања сонди и развијањем алгоритама за брзу детекцију и обраду сигнала. Овакав начин побуђивања омогућава да се ултразвучни таласи истовремено простиру у више праваца (слика 4.8, лево). Углови испитивања, дубина продирања и фреквенција таласа могу се бирати на стандардан начин као код класичних ултразвучних сонди, или се могу прилагодити врсти и положају дефеката (*virtual probe arrangement* [93]). Поред истовременог побуђивања сонди, мерни сигнали се истовремено детектују и паралелном обрадом се добијају подаци за све правце у реалном времену. Описан начин испитивања се у литератури [93 – 95] назива брза технологија испитивања помоћу *phased array* сонди (*Fast-phased array ultrasonic technology*), јер она омогућава већу вероватноћу детекције дефеката при већим брзинама инспекцијских возила (већим од 80 km/h). Проблеми везани за постојање контактне медијума се превазилазе коришћењем клизећег каиша који има улогу клизећег контактне медијума (слика 4.8, десно). Клизећи каиш се покреће помоћу два ротирајућа точка и са доње стране додирује шину, док је са горње стране на њега наслоњена сонда.



Слика 4.8 Побуђивање таласа у више праваца помоћу једног побудног импулса (лево) [95] и систем *phased array* сонди са заштитним каишем (десно) [96]

4.1.4 Испитивање засновано на ласерском побуђивању ултразвучних таласа

Уместо ултразвучне контактне сонде, побуђивање различитих типова ултразвучних таласа, а посебно Рејлијевих површинских таласа и лонгитудиналних површинских таласа, може се вршити ласерским путем, кроз процес аблације [97 – 99] или термоеластични процес [100, 101]. За побуђивање ултразвучних таласа користи се линијски ласерски извор, чији сноп на површини шине има облик линије дугачке око 6 mm и дебљине 300 μ m.

У режиму аблације, деловањем ласерског снопа долази до топљења материјала и његовог испаравања. Зато ова метода не представља у потпуности методу без разарања, за разлику од термоеластичног режима који се више користи. У термоеластичном режиму,

површина која је озрачена ласерским зраком убрзано се загрева и шири, док се у околном хладнијем материјалу јавља напрезање што доводи до генерисања ултразвучних таласа [102].

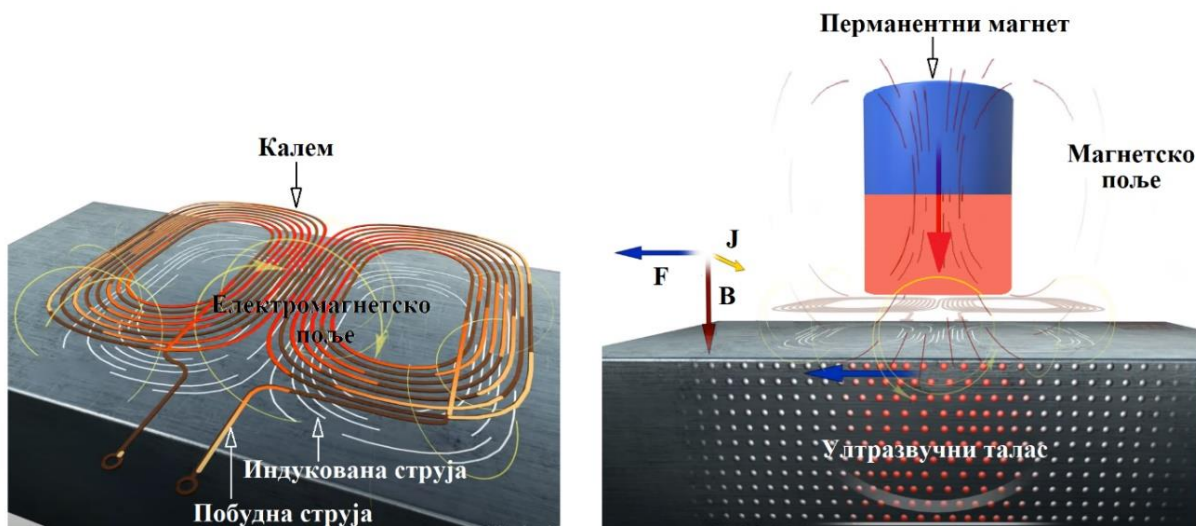
Детекција ласерски генерисаних таласа може да се врши бесконтактно, помоћу ласерске интерферометрије, електромагнетских акустичких сонди (*Electromagnetic Acoustic Transducers – EMAT*) или ултразвучних сонди са ваздухом као контактним медијумом (*Air–Coupled Acoustic Transducers – ACT*) [101 – 103]. Интерферометарско детектовање се више користи у лабораторијским условима и за анализу амплитуда модела генерисаних таласа [100, 101, 104]. Са друге стране, *EMAT* и *ACT* сензори су једноставнији за практичну употребу и могу се користити за испитивања на терену. Како би се омогућило генерисање ултразвучних таласа на неприступачнијим местима на шини [105], а како би и систем за ласерско побуђивање био флексибилнији и једноставнији за употребу на терену, ласерска светлост се може доводити на површину материјала помоћу снопа оптичких влакана.

За испитивање дефеката шине користе се две ласерске технике скенирања. Код прве технике (*Scanning Laser Line Source – SLLS*), ласерски извор се помера дуж испитиване површине, док је детектор непокретан. Приликом приближавања ласера дефекту, долази до карактеристичне промене спектра и амплитуде детектованог сигнала. Овај метод је врло осетљив за детекцију малих потповршинских дефеката реда таласне дужине ($l\lambda$), међутим није осетљив на оријентацију прслине [100, 104]. У случају друге технике (*Scanning Laser Detector – SLD*), положај ласерског извора се не мења, а детектор се помера дуж испитиване површине. Испитивањем дефеката исте дужине али различите оријентације помоћу *SLD* методе, уочено је да излазни сигнал може да буде приближно 20 пута већи у случају вертикалне прслине ($\theta = 90^\circ$ у односу на површину која се испитује) у поређењу са косом прслином под малим углом θ (плитка прслина). У истраживању [100] посматране су две конфигурације, када се: (а) ласерски извор и детектор налазе са исте стране дефекта и (б) ласерски извор и детектор налазе са супротних страна дефекта. Како би се постигла већа осетљивост детекције дефекта и добили подаци о дубини и углу дефекта, показано је да је потребно комбиновати сигнале из оба типа мерења уз примену техника машинског учења [100].

4.1.5 Испитивање електромагнетским акустичким претварачима

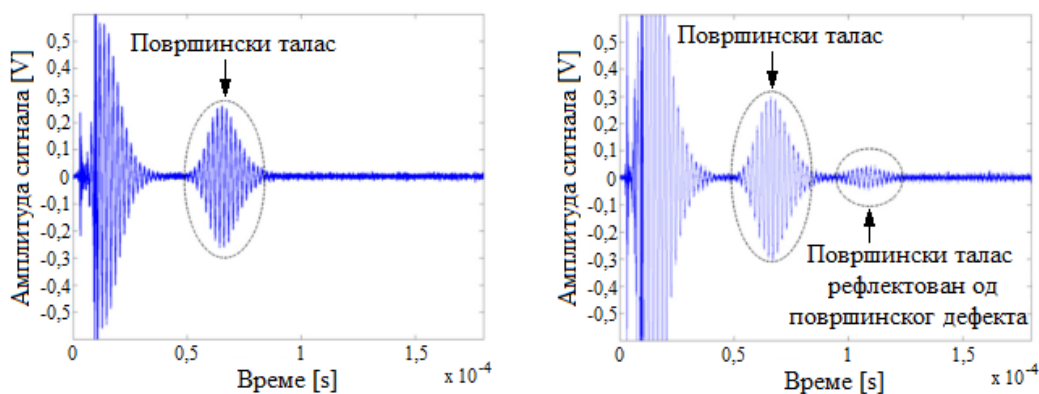
Електромагнетски акустички претварачи (*EMAT*) могу се користити и за побуђивање и за детекцију акустичких таласа у проводним и магнетским материјалима. Основну структуру *EMAT*-а чине перманентни магнет и калем који је обмотан око магнета или постављен испод магнета. Магнет и калем се постављају изнад површине испитиваног материјала на одговарајућој висини која се у литератури назива *lift-off* растојање. Променом конфигурације калема и перманентног магнета могуће је генерисати различите типове ултразвучних таласа (лонгитудинални, смичући, Рејлијеви и површински лонгитудинални таласи), што је детаљно објашњено у [106].

На слици 4.9 је шематски представљен положај перманентног магнета и калемова који се налазе испод њега и чине *EMAT* сонду. Када импулсна или наизменична побудна струја I тече кроз калем у одређеном смеру, индукује се струја у материјалу у супротном смеру од смера побудне струје и њен вектор густине је \vec{j} . Пошто се индукована струја налази и у пољу сталног магнета магнетске индукције \vec{B} , на индукована наелектрисања делује Лоренцова сила \vec{F} по јединици запремине материјала која се може изразити као $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$.



Слика 4.9 Принцип рада EMAT сонде [107]

У оквиру истраживања које су спровели *Han и сар.* [106] приказана је практична примена EMAT сонде (са калемом у облику меандра и неодијумским магнетом у феромагнетском потковичастом језгру) за детекцију вештачких површинских дефеката (слично *НС* дефектима). Када се користи побудна фреквенција од 0.5 MHz, генеришу се површински Рејлијеви таласи под упадним углом $\theta \approx 90^\circ$ и на тај начин могуће је детектовати површинске дефекте. Упоређивани су детектовани сигнали са пријемне сонде за неоштећену и оштећену шину. У случају постојања површинског дефекта, пријемна сонда региструје додатни сигнал чије време појављивања одговара растојању пријемне сонде од дефекта (слика 4.10).



Слика 4.10 Детектовани површински таласи у случају неоштећене и оштећене шине [106]

Највећи изазов за практичну примену ове методе је постизање оптималног *lift-off* растојања и одржавања његове константне вредности током мерења. *Lift-off* растојање треба да буде што мање да би се постигла довољна осетљивост мерења. Истовремено, *lift-off* растојање треба да буде довољно велико како не би постојала могућност оштећења сонде услед неравнина шинске површи.

У истраживању [108] предложена је нова конфигурација EMAT сонде на основу испитивања утицаја *lift-off* растојања сваке компоненте сонде (и калема и магнета) на осетљивост мерења. Утврђено је да варирање *lift-off* растојања магнета до 10 mm не утиче на осетљивост испитивања. Зато је у поменутом истраживању предложено да магнет EMAT сонде буде уграђен на возило, док се *lift-off* растојање калема одржава константним захваљујући титанијумском еластичном држачу, који се налази између калема и површине

шине. Ова нова конфигурација није потпуно бесконтактна и захтева даља унапређења услед постојања следећих недостатака: загревање услед трења између површине шине и носача при већим брзинама, немогућност мерења приликом вожње у оба смера, осетљивост на ударе и немогућност регистровања величине дефекта шине.

Други приступ решавању проблема *lift-off* растојања представља развој *RIFLEX (Rail Inspection by Flexible Electromagnetic Acoustics Transducers)* сонди [109]. Оне представљају унапређене бесконтактне *EMAT* сонде које би могле бити интегрисане на постојећа комерцијална или инспекцијска возила која се крећу брзинама већим од 112 km/h. Појединачне *EMAT* сонде које се састоје од двослојних калемова уграђених у полиимидне филмове, могу се распоредити у флексибилне низове како би се прилагодили облику главе шине. Следећи допринос унапређењу овог система је и развој аутоматског ласерског система, који прилагођава *lift-off* растојање брзини воза и одржава га константним током инспекције. Брзина обраде сигнала је побољшана коришћењем *FPGA (Field Programmable Gate Array) data logger*-а, који омогућава праћење сигнала са четири сонде и детекцију дефеката шине у реалном времену.

У истраживању [110] приказане су *EMAT* сонде које имају уграђене траке од меких магнетских материјала, као концентраторе магнетског флукса, између перманентног магнета и калема у облику меандра. Показано је да сонде са магнетском траком двоструко повећавају магнетски флукс и на тај начин је повећана осетљивост детекције дефеката.

4.1.6 Испитивање ултразвучним сондама (*ACT*) са ваздухом као контактним медијумом

Због бројних предности бесконтактних метода испитивања, све већа пажња се посвећује истраживању *ACT* сонди као бесконтактних детектора [103]. Највећа предност *ACT* сонди је могућност њиховог постављања на растојању од више десетина центиметара изнад шине.

У истраживању [103] је испитана осетљивост детекције вештачких шинских дефеката (вертикалних зареза у глави шине) *ACT* сондама при детектовању рефлектованог и пропуштеног сигнала. Показано је да обе конфигурације (импулс-ехо и *pitch-catch*) могу да детектују дубину дефекта. Испитивана је осетљивост мерења за различита растојања сонде од површине шине, као и за различите углове постављања сонде. Највећа осетљивост мерења је добијена за вредности угла од 0° и од 90°.

Поред детекције ултразвучних сигнала, *ACT* сонде се могу користити и за побуђивање ултразвучних таласа. С обзиром да се *ACT* сонде могу поставити на већем растојању од површи шине, нарочито су погодне за примену код аутоматских система уграђених на возило [111 – 113].

4.1.7 Испитивање комбинацијом различитих типова извора и детектора ултразвучних таласа

Резултати истраживања појединих начина побуђивања и детекције ултразвучних таласа, довели су до развоја практичних аутоматских система инспекције, који користе комбинације различитих врста ултразвучних извора и детектора како би се повећала осетљивост на детекцију дефеката главе шине. Међу овим системима инспекције су прототипови засновани на ласерском побуђивању ултразвучних таласа и детекцији ултразвучних таласа помоћу *ACT* сонди, као што су *U-RAIL* и *UCSD* [98, 111, 114 – 118].

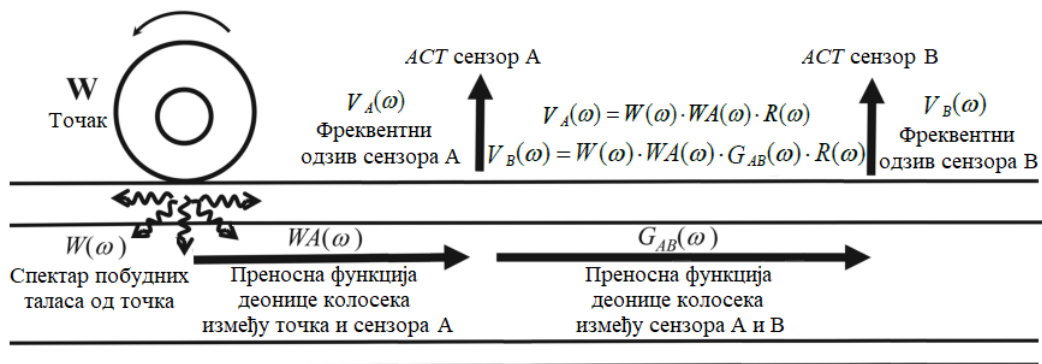
За испитивање главе шине помоћу *U-RAIL* система, користи се ласерско побуђивање лонгитудиналних и Рејлијевих таласа и шест *ACT* сонди за детекцију ултразвучних таласа.

Систем је уграђен на специјално друмско–железничко возило и тестиран на терену. Утврђено је да је оптимална брзина инспекције помоћу *U-RAIL* система између 8 km/h и 15 km/h [118]. Како би се спречио утицај промене растојања *ACT* сонди од површине шине, систем је допуњен ласерским мерачем овог растојања, као и дигиталном камером за одређивање тренутне позиције мерног система и препознавање потенцијалних препрека на шини које би могле ометати детекцију и оштетити систем [98]. Посебно развијен софтвер омогућава контролу рада система, као и карактеризацију дефеката на основу добијених сигнала [116, 117]. *U-RAIL* систем је погодан за детекцију *HC* дефеката.

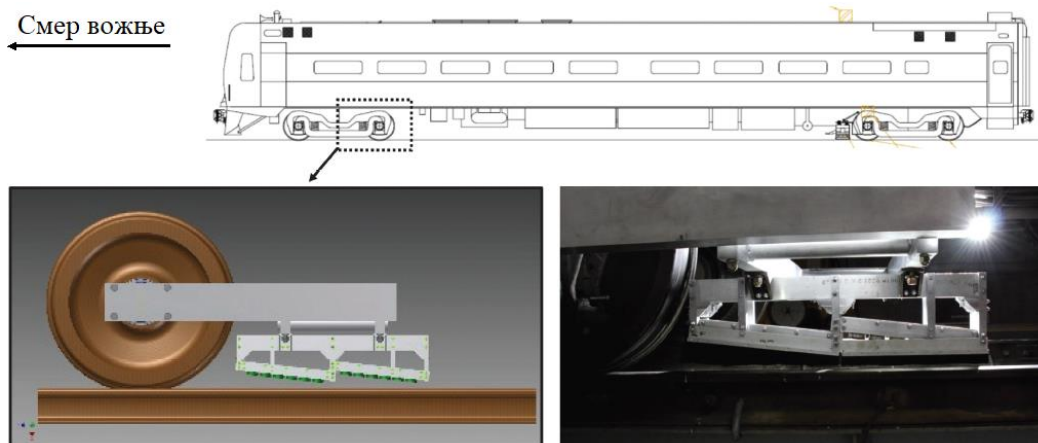
Прототип *UCSD* је тестиран у више фаза од 2006. године, уз стално унапређивање система. У периоду од 2006. године до 2010. године тестиран је на специјалном друмско–железничком возилу (*R-4 hy-railer vehicle*). При малим брзинама инспекције (до ~16 km/h), показало се да систем може да се користи за карактеризацију стања шинске површи, посебно степена љускања главе шине (кодни бројеви 2221 и 2222 према [13]) [111, 114]. Због ограничености и комплексности ласерског побуђивања, систем је унапређен коришћењем парова *ACT* сонди које и побуђују и детектују вођене таласе [111 – 113]. Испитивања на терену током 2014. године и 2015. године показала су да систем има могућност детекције дефеката главе шине у зони котрљања точка и на бочној страни главе шине ка оси колосека. У оквиру истраживања [119], представљена је теоријска анализа процене *UCSD* система са аспекта детекције различитих типова и величина дефеката шине. Развијен је модел за нумеричку симулацију детекције дефеката помоћу система који омогућава варирање различитих параметара система и различитих врста дефеката.

Последње унапређење *UCSD* прототипа базира се на пасивној детекцији акустичких сигнала, код које динамичка побуда потиче од интеракције точка и шине при кретању, без посебног извора за генерисање ултразвучних таласа. Акустички таласи се стварају као резултат комбинације вибрација од точка и шине, као и од буке од котрљања точка у случају постојања неравнина и нерегуларности додирних површина точка и шине. Систем се састоји само од пара пријемних *ACT* сонди постављених на одређеном растојању дуж шине, које стално детектују цуреће таласе који се кроз ваздух преносе од шине до сонди [120, 121]. Уместо скупљих технолошких унапређења система, код *UCSD* система је унапређена детекција и софтверска обрада добијених сигнала у циљу решавања проблема везаних за вибрације извора при кретању возила и промене *lift-off* растојања. Општи концепт овог прототипа се заснива на одређивању преносне функције (*Green's function*) одређене деонице колосека између две позиције сонди деконволуцијом излазних сигнала са тих сонди. Под претпоставком да су фреквентне карактеристике $R(\omega)$ сонди и побуђених таласа исте, фреквентни одзиви $V_A(\omega)$ и $V_B(\omega)$ са две сонде се разликују само на основу простирања таласа кроз шину између сонди (слика 4.11). Преносне функције се одређују за деоницу колосека без дефеката, као и за деоницу са дефектима. Упоредивањем добијених преносних функција, врши се нормирање преносне функције деонице са дефектима у односу на деоницу без дефеката помоћу *Outlier* анализе. Даљом статистичком анализом параметара нормиране преносне функције и унапред познатих типова дефеката, добија се једнобројна вредност за сваку локацију дефекта. Финијом анализом и смањењем шума могу се детектовати и мањи дефекти [120, 121].

Прототип *UCSD* система је постављен на инспекцијско возило *FRA DOTX-216* (слика 4.12) и испитивања су спроведена у септембру 2016. године за брзине возила у опсегу од ~40 km/h до ~130 km/h. Резултати досадашњих испитивања показали су успешну детекцију шинских дефеката, завара и шинских спојева [122 – 124].



Слика 4.11 Шематски приказ пасивне детекције акустичких таласа према [120, 121]



Слика 4.12 Пасивни UCSD прототип: положај прототипа на возилу FRA DOTX–216 (горе), начин повезивања сензорског система на возило (доле лево) и изглед сензорског система (доле десно) [121]

4.2 Испитивања заснована на мерењима буке и вибрација

Појава вибрација и механичких (акустичких) таласа дуж шине и у њеној околини, може настати услед различитих динамичких побуда, као што су импулсна побуда задата ударцем чекића, интеракција точак–шина, настајање и ширење прлина.

4.2.1 Испитивање акустичком емисијом

Испитивање акустичком емисијом (*Acoustic Emission – AE*) је врста динамичког испитивања које се заснива на детектовању акустичких догађаја емитованих приликом промене стања шине услед настанка и ширења прлина. Међутим, мерни системи базирани на акустичкој емисији су осетљиви и на нежељене изворе звука, као што су они који настају услед трења зидова прлине при њеном затварању током циклуса растерећења, као и звука насталог услед интеракције точак–шина, трења или неких других врста удара. Нежељене звучне сигнале је потребно одстранити из мерног сигнала, што се врши или применом додатног мерног система или одговарајућим филтрирањем сигнала [125].

У истраживању [126] описан је начин контроле хрпавости шине. Индиректна метода за контролу хрпавости шине користи акустичку емисију са системом микрофона постављених на точковима возила. Ови микрофони мере ниво буке у непосредној околини

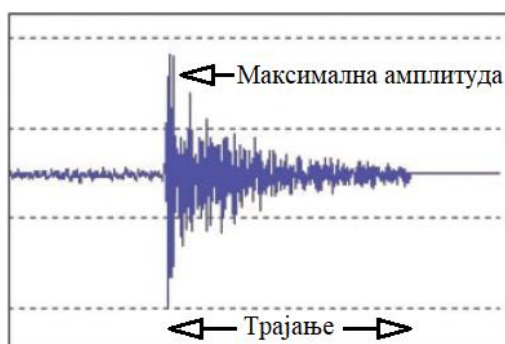
додира точка и шине (слика 4.13, лево). Сматра се да се коришћењем ове индиректне методе у комбинацији са повременом применом директне методе засноване на европском стандарду *EN 15610* [127], може вршити бржа и аутоматизована контрола храпавости шинске површи.

Могућност акустичког праћења стања шина помоћу возова који саобраћају великим брзинама, а на основу измерене буке која настаје у непосредној близини додира точка и шине, детаљно је описана у [128]. Мерни систем се састоји од *GPS* уређаја на мобилном телефону који прати брзину и позицију воза, као и од два система базирана на микрофонима за снимање и аквизицију акустичких сигнала (*MicW i436* и *Zoom H1*, приказани на слици 4.13, десно). Током обраде сигнала, потребно је умањити утицај акустичких сигнала насталих услед котрљања и неправилног облика точка, како би се појачали сигнали који одговарају осцилацијама услед постојања шинских дефеката. Да би се обезбедила довољна резолуција сигнала и у фреквентном и у временском домену, примењује се анализа помоћу *wavelet* трансформације са оптимизованим типом *wavelet*-а [128]. Оптимизација *wavelet*-а је посебно значајна за примену мерног система за мерење набраности шине, јер се тада јављају сигнали у нижим фреквентним опсезима који одговарају одређеним таласним дужинама набраности шине.



Слика 4.13 Поставка микрофона за индиректно мерење нивоа буке (лево) [126] и система микрофона постављених на последње обртно постоље возила (десно) [128]

У оквиру истраживања које су спровели *Shi* и *car*. [125] детаљно је приказана примена акустичке емисије за квантитативно праћење раста прслина током циклуса замора шинског челика, као и избор начина аквизиције и обраде *AE* сигнала. При настанку или расту прслине јавља се карактеристични акустички сигнал у облику нагло настале пригушене осцилације (слика 4.14). Максимална амплитуда и трајање тог сигнала, као и статистички параметар *spectral kurtosis* (*SK*) који представља меру пригушења сигнала, се одређују током извођења лабораторијских мерења помоћу опреме са два *AE* пиезоелектрична претварача постављена приближно 20 mm од зоне прслине. Закључено је да су и *SK* вредности погодне за детекцију *AE* догађаја. Међутим, потребно је проучити разне алгоритме за добијање *SK* вредности, како би се пронашао оптималан за процену озбиљности прслине.



Слика 4.14 Карактеристике звучног сигнала при акустичкој емисији [125]

4.2.2 Испитивање мерењем убрзања кућишта осовине

Процес одређивања опсега таласних дужина нерегуларности колосека мерењем вертикалних и бочних вибрација помоћу акцелерометара који су постављени на кућиште осовине (*Axle Box Acceleration – ABA*), као и на обртно постоље возила која се у редовном саобраћају крећу великим брзинама, приказан је у истраживању [129]. Уместо класичне фреквентне анализе сигнала, примењује се њен просторни еквивалент, тј. Фуријеова трансформација зависности вертикалног помераја од растојања дуж колосека. Као резултат ове анализе, добија се зависност амплитуде вертикалног помераја од таласне дужине нерегуларности на кратком растојању дуж колосека. Ова зависност је приказана 3D дијаграмом (амплитуда – таласна дужина – растојање), што омогућава брзо и интуитивно одређивање таласне дужине нерегуларности на појединим деоницама колосека. Утврђено је да су за нерегуларности малих таласних дужина, амплитуде мерних сигнала вертикалних убрзања веће у поређењу са бочним убрзањима.

Molodova и сар. [130] развили су сличан мерни систем који детектује вертикалне и подужне осцилације. Мерни систем се заснива на акцелерометрима уграђеним на специјализовано мерно возило. Циљ мерења је аутоматска детекција и класификација *squat* дефеката у четири категорије: *тривијалне*, *лаке*, *средње* и *тешке* [130]. Поред тога, аутори су предложили коришћење *wavelet* анализе добијених *ABA* сигнала, у циљу одређивања карактеристичних опсега фреквенција који одговарају претходно дефинисаним категоријама *squat* дефеката. Да би се разликовали тривијални од лаких *squat* дефеката, вредност скалиране усредњене снаге *wavelet-a* (*Scale-Averaged Wavelet Power – SAWP*) се одређује у два фреквентна опсега: 200 Hz – 400 Hz и 1000 Hz – 2000 Hz. За случај детекције средњих и тешких *squat* дефеката, *SAWP* вредност је одређена за опсег фреквенција од 200 Hz до 400 Hz. Коришћењем ове процедуре, постигнута је позитивна детекција до 78% за тривијалне и лаке *squat* дефекте, као и 100% за средње и тешке *squat* дефекте [130].

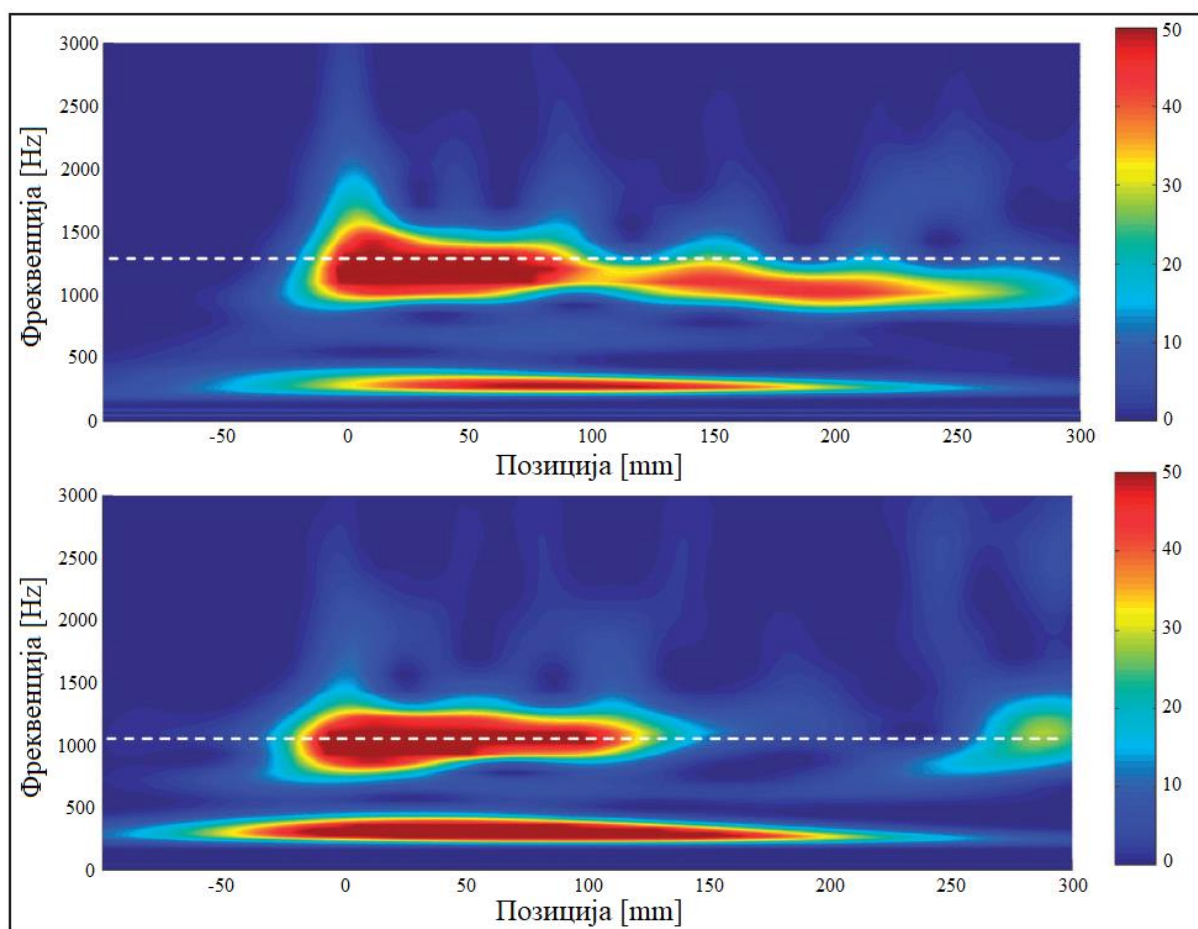
Детаљнија истраживања детекције само тешких *squat* дефеката заснована су на одређивању зависности спектралне густине снаге (*Power Spectrum Density – PSD*) измерених *ABA* сигнала од фреквенције за два фреквентна опсега: око 300 Hz и од 600 до 800 Hz [131]. Аутори су такође поредили резултате добијене *wavelet* анализом мерних сигнала и моделовањем дефеката коришћењем методе коначних елемената. Показано је да максималне вредности амплитуда у опсегу фреквенција око 300 Hz одговарају положају центра тешког *squat* дефекта у обе анализе (за брзине воза око 100 km/h). У опсегу фреквенција од 600 до 800 Hz, максималне вредности моделованих и мерних сигнала се не поклапају и зависе од брзине воза. Такође, резултати *wavelet* анализе у овом фреквентном опсегу показали су да се центри максимума не поклапају са стварним центрима *squat* дефеката, као и да је ширина максимума много већа од таласне дужине дефекта.

У истраживању *squat* дефеката [132], примећено је да се максимуми у спектру *ABA* сигнала јављају за следеће фреквенције: око 300 Hz, у опсегу од 1060 Hz до 1160 Hz и до 2000 Hz. Међутим, у истраживању [133], исти аутори проучавали су утицаје брзине воза, положаја *squat* дефекта у односу на праг, као и параметара конструкције колосека (растојање између прагова, начин причвршћења шине за праг, итд.) на мерни сигнал. Уочено је да максимум у *PSD* сигналу на фреквенцији од 300 Hz углавном не зависи од брзине воза преко 50 km/h. За фреквенције између 1000 Hz и 1200 Hz, зависност максимума у *PSD* сигналу од брзине воза се може представити полиномном функцијом другог реда. Да би се одредио утицај положаја *squat* дефекта на мерни сигнал, анализирани су спектралне густине снаге добијених сигнала и њихове *wavelet* трансформације за две позиције *squat* дефекта у колосеку: у зони изнад прага и зони између прагова.

Анализа *PSD* сигнала показала је да се амплитуде максимума јављају на истој фреквенцији (око 300 Hz) и да су њихове вредности приближно једнаке вредностима за оба положаја *squat* дефекта у односу на праг [133]. За фреквентни опсег од 1000 Hz до 1200 Hz, максимум у *PSD* сигналу се јавља на фреквенцији 1060 Hz за случај положаја *squat* дефекта у зони изнад прага, као и на фреквенцији 1160 Hz када се *squat* дефекат налази на половини растојања између прагова [133].

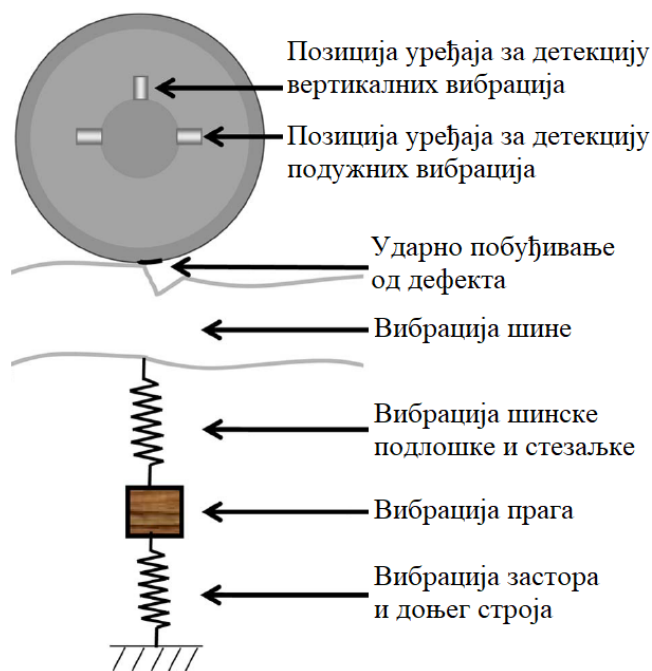
У случају *wavelet* анализе (слика 4.15), широки максимуми се јављају на фреквенцији 300 Hz за оба положаја *squat* дефекта, али је израженији онај који одговара положају дефекта у зони изнад прага [133]. Максимуми анализираних сигнала јављају се и на следећим фреквенцијама: (а) 1200 Hz за *squat* дефекат у зони између прагова, (б) 1060 Hz за *squat* дефекат у зони изнад прага. Оба јасно изражена максимума одговарају положају дефекта. Међутим, уочава се и појава локалног максимума за фреквенције око 1000 Hz на растојању 150 mm од положаја центра дефекта, што одговара близини следећег прага у колосеку.

У зависности од параметара конструкције колосека, при динамичкој побуди јављају се следеће вибрације резонантних учестаности: (а) 300 Hz што одговара анти-резонантним осцилацијама прагова, (б) 1000 Hz, 1530 Hz и 1900 Hz које одговарају вертикалним осцилацијама шине у односу на праг, и (в) 1160 Hz што одговара *pin-pin* осцилацијама (осцилације код којих је таласна дужина осцилације шине двоструко већа од растојања између суседних прагова) [133]. Да би се поуздано разликовали лаки *squat* дефекти од набораности, потребно је поред амплитуда сигнала које се јављају на фреквенцијама око 300 Hz и 1100 Hz анализирати и оне које се јављају на фреквенцијама око 1530 Hz и 1900 Hz.



Слика 4.15 Густина снаге *wavelet*-а за случај *squat* дефекта између прагова (горе) и изнад прага (доле), при чему се центар дефекта налази на позицији од 0 mm [133]

Упоредна анализа вертикалних и подужних АВА мерења за детекцију *squat* дефеката (слика 4.16) је описана у [134]. У поређењу са вертикалним АВА сигнаlima, подужни АВА сигнали не садрже вибрације које потичу од шине, система шинског причвршћења, прагова и застора. Зато су код подужних АВА сигнала израженије вибрације које потичу од ударних побуда. Фреквентна анализа и *wavelet* анализа показале су да је подужни АВА сигнал осетљивији у опсегу фреквенција од 1000 Hz до 2500 Hz, што је карактеристично за појаву лаких *squat* дефеката. Повећање осетљивости детекције лаких *squat* дефеката постигнуто је међусобном корелацијом, а затим и усредњавањем већег броја мерних сигнала, чиме се знатно смањило шум. Поред тога, уочени су периодично поновљиви максимуми који потичу од дефеката точка, а који су филтрирањем одстрањени из сигнала. У вертикалном АВА сигналу, вибрације на фреквенцијама испод 250 Hz одговарале су оштећењима точка, док су више фреквенције које одговарају лаким *squat* дефектима биле слабо изражене. Код подужних АВА сигнала, вибрације на фреквенцијама испод 250 Hz, које потичу од оштећења точка, биле су значајно слабије изражене, док су се јасно издвојила места која одговарају позицији *squat* дефеката. Коришћењем подужног АВА мерења и применом техника за смањење шума, повећана је вероватноћа детекције: (а) са 57% на 85% за тривијалне и лаке *squat* дефекте и (б) са 60% на 100% за средње и тешке *squat* дефекте. Даље унапређење АВА сигнала подразумевало би могућност детекције *squat* дефеката на обе шине у истом пресеку помоћу сигнала измерених са акцелерометара постављених на оба точка исте осовине [134].



Слика 4.16 Измерене вибрације у додиру точка и шине услед постојања дефекта шине [134]

4.3 Визуелно и аутоматско визуелно испитивање

Визуелна и аутоматска визуелна метода инспекције *RCF* дефеката су описане у европском стандарду [14].

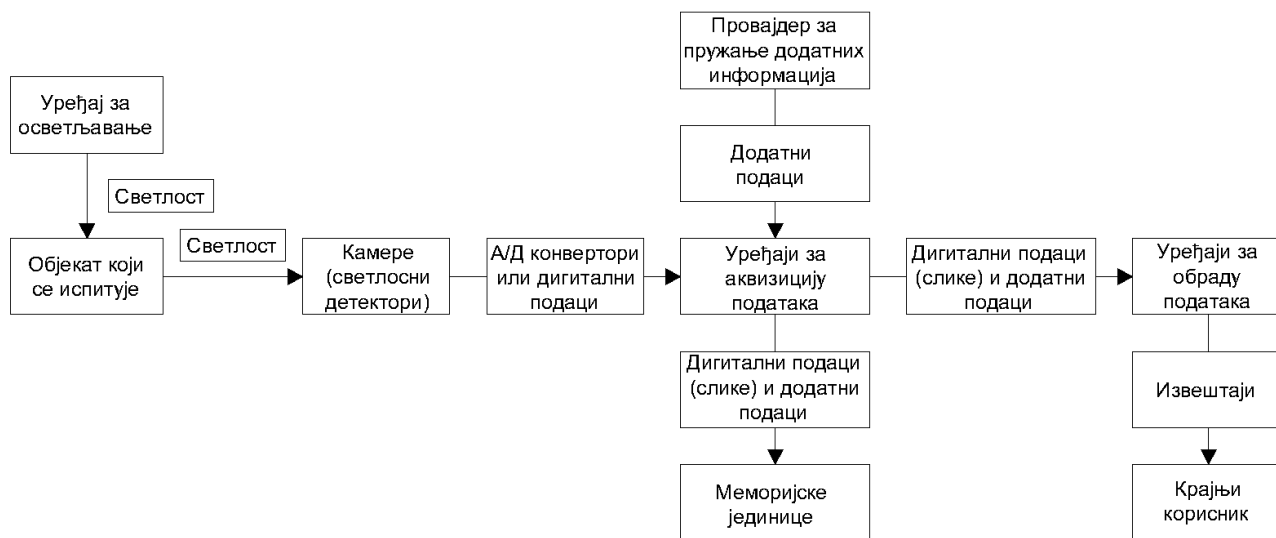
Визуелно испитивање (*Visual Testing – VT*) шина представља директни визуелни преглед стања горње површи главе шине и дели се на опште визуелно испитивање и детаљно визуелно испитивање [14]. Визуелно испитивање опходњом пруге је најједноставнији начин

инспекције. Међутим, ова метода је спора, небезбедна и зависи од знања и искуства особе која врши инспекцију [135]. За процену *RCF* дефеката, европски стандард [14] препоручује детаљно визуелно испитивање, које подразумева коришћење помоћног светлосног извора како би се постигла довољна осветљеност.

За инспекцију шина, све више се тежи примени аутоматске визуелне инспекције (*Automatic Visual Testing – AVT*). Принцип рада оваквог начина испитивања (слика 4.17) подразумева коришћење система који се састоји од светлосног извора за осветљавање шине, дигиталне камере која креира релативне слике и уређаја за обраду слике и идентификацију шинских дефеката [14].

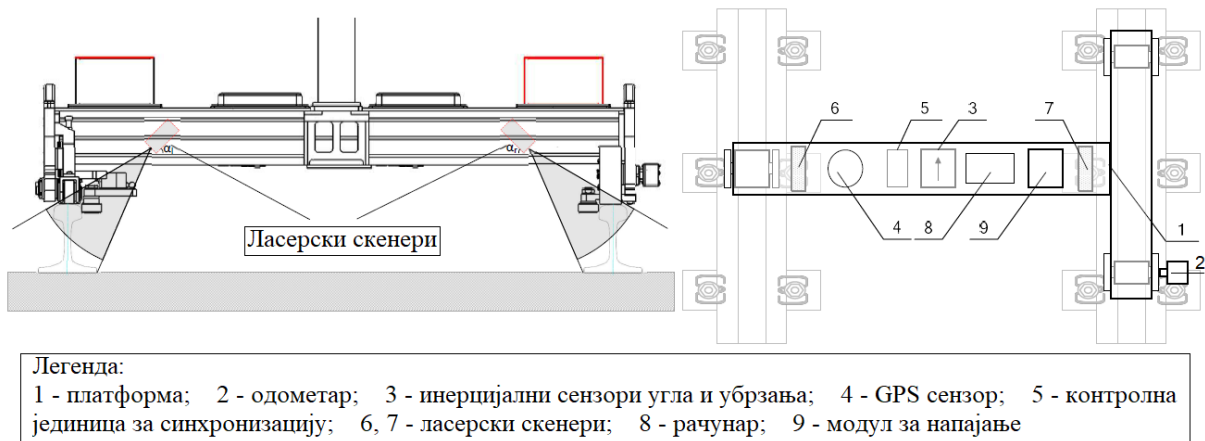
У случају детекције *squat* дефекта *VT* и *AVT* методама, могуће је дефинисати зону захваћену површинским дефектом као и његову дужину. За детекцију *HC* дефекта, наведеним методама се може одредити дужина површинске прслине, док се потповршинске хоризонталне прслине могу уочити преко видљивих тамних мрља на шинској површи. *VT* и *AVT* методе се могу комбиновати у циљу повећања поузданости детекције дефеката [136].

Први системи за аутоматску визуелну инспекцију састојали су се од линијске камере високе резолуције, додатног осветљења, прецизних мерача положаја (енкодери) и брзих процесора за добијање снимака велике просторне и временске резолуције [135, 137]. Детаљно испитивање је било омогућено за брзине возила до 10 km/h, међутим дубину прслине није било могуће одредити. Велики недостаци *AVT* методе били су потреба за отклањањем шума пре обраде слике, као и размазивање слике током кретања возила великим брзинама [135, 138].



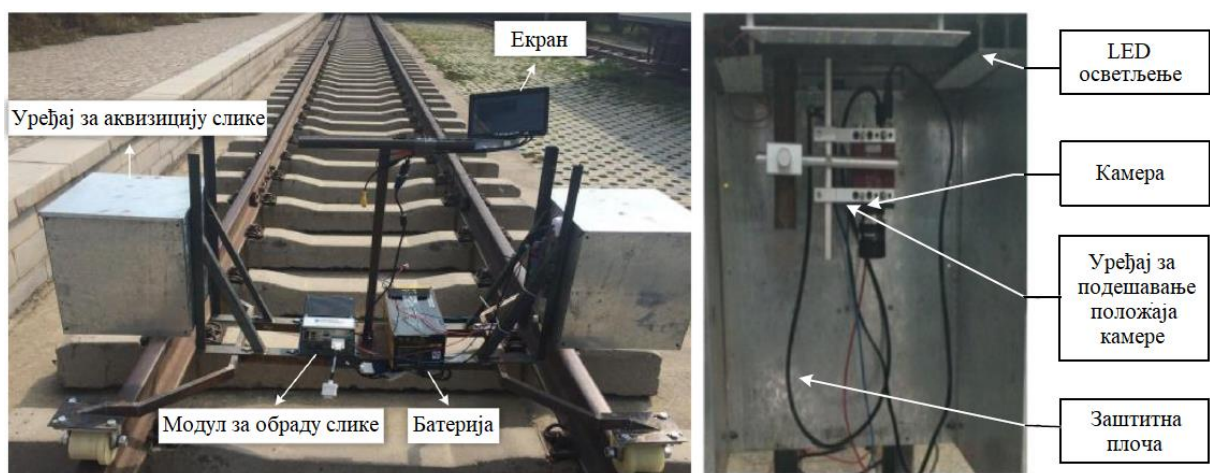
Слика 4.17 Принцип аутоматског визуелног испитивања према [14]

Унапређење *AVT* методе подразумева употребу система за тродимензионално ласерско снимање профила. У истраживању [138], описана је примена система који се састоји од два ласерска скенера на истој платформи (слика 4.18). Ласерски скенер садржи линијски ласер и камеру која је постављена под одређеним углом у односу на ласер. Поред ласерског скенера, потребни су и додатни сензори (*GPS* сензор, инерцијални сензори угла и убрзања и одометар) како би могао да се одреди положај дефекта и угаони положај платформе. Снимањем површине шине, добија се облак тачака, који се затим помоћу сложеног алгоритма упоређује са облаком података за шину идеалног профила. Аутори истраживања [138] су испитивали примену овог система за детекцију и класификацију различитих типова дефеката шине.



Слика 4.18 Платформа са два ласерска скенера [138]

Основни делови преносивог система за визуелну инспекцију описаног у [139] су заштитна плоча која спречава директан утицај спољашње светлости на површину шине која се испитује, помоћно *LED* осветљење и камера (слика 4.19). Снимљена слика се памти у *RGB* (*Red, Green, Blue*) моделу боја. Затим, слика се претвара у *HSL* (*Hue, Saturation and Lightness*) модел боја и добијају се *H* вредности које служе за даљу обраду слике кроз два поступка. Први поступак обухвата дељење слике на више сегмената и издвајање дела слике који се односи на главу шине. У другом поступку, примењују се алгоритми за детаљнију обраду издвојеног дела слике и њену даљу финију анализу. Експериментални резултати су показали да овај *VT* систем [139] може да се користи за детектовање дефеката у реалном времену при брзинама инспекције до 7 km/h.



Слика 4.19 Преносиви систем за визуелну инспекцију (лево) и делови уређаја за аквизицију слике (десно) [139]

Како визуелна инспекција пружа информације о видљивим површинским дефектима, за испитивање *RCF* дефеката потребно је да се комбинује са другим методама инспекције. Комбинација ултразвучног испитивања и испитивања вртложним струјама (метода инспекције која ће бити описана у потпоглављу 4.5) са визуелним системом инспекције разматрана је у [140]. Посебно је испитана могућност детекције *squat* дефеката који су се налазили на дубини од 2 mm до 5 mm испод шинске површи. Коришћене су ултразвучне сонде и сонде за испитивање методом вртложних струја које су биле прилагођене локацији *squat* дефеката, док је визуелно испитивање извршено помоћу две камере (за снимање леве и десне шине) и додатног система за осветљење. Број тачно детектованих (*True Positives – TP*) и погрешно детектованих (*False Positives – FP*) дефеката је процењен: појединачно за сваку

методу и за комбинације две или све три методе. Најпоузданија појединачна метода је била ултразвучна метода. Упоредивањем резултата добијених комбинацијом две методе или све три методе, закључено је да се најбољи резултати детекције (највећи проценат *TP* и најмањи проценат *FP* дефеката) добијају комбинацијом две методе. Разликовање *squat* дефеката од других типова дефеката омогућено је прегледањем видео снимака испитне деонице од стране два квалификована оператера. Да би се побољшала поузданост аутоматске детекције *squat* дефеката комбинацијом *AVT* методе са другим методама инспекције, потребно је оптимизирати параметре који се издвајају из резултата добијених сваком методом и користити технике машинског учења [140].

Други приступ детаљнијој визуелизацији потповршинских и површинских дефеката је описан у [141]. Предложен је регистрациони алгоритам под називом *Edge-Guided SURF*, који 2D видљивим сликама додаје информацију о температури која се добија термографском методом (метода инспекције која ће бити описана у потпоглављу 4.5.2). Експериментално поређење са другим регистрационим методама показало је да предложени алгоритам има бољу прецизност.

4.4 Испитивање магнетским честицама и пенетрантима

Метода испитивања магнетским честицама (*Magnetic Particle Testing – MT*) представља визуелну методу инспекције у којој је материјал који се испитује магнетисан или помоћу сталног магнета или коришћењем електричне струје. На местима дефекта се јавља расипни магнетски флуks. Шина која се испитује се прекрива челичним честицама и оне се концентришу на местима појављивања расипног магнетског флуksа, што се може визуелно уочити. Челичне честице могу бити у виду сувог праха или суспензије. Поред тога, честице могу бити и флуоресцентне. Да би се јасније уочио распоред магнетских честица у односу на позадину, примењује се одговарајућа контрастна боја за позадину (нефлуоресцентна боја), као што је описано у европском стандарду [14]. Према резултатима истраживања [142], утврђено је да и плитки потповршински дефекти (дубине од 1 mm до 2 mm) доводе до појаве расипног магнетског флуksа. Међутим, посматрањем распореда магнетских честица на површини шине не могу се поуздано идентификовати плитки потповршински дефекти.

Метода испитивања пенетрантима (*Penetrant Testing – PT*), који могу бити у виду течности или боје, представља визуелну методу инспекције која се користи за детекцију површинских дефеката шине. Ова метода захтева потпуно чисту површину која се испитује. Светло обојени или флуоресцентни пенетрант се слободно наноси на површину шине и оставља се да продре у површинске прслине или шупљине. Након одређеног временског периода уклања се вишак течног пенетранта са површине шине. Затим се примењује развијач који извлачи пенетрант из прслина на принципу повратног капиларног ефекта, како би се произвеле индикације на површини шине. Ове обојене индикације су шире од дефекта шине и због тога се лакше уочавају [14].

Методe *MT* и *PT* имају могућност детекције дужине површинске *RCF* прслине, али се ретко примењују за детекцију *squat* дефекта [14]. Такође, ове методе се користе у комбинацији са визуелном инспекцијом, јер се на тај начин омогућава боља видљивост дефеката шине. Примена наведених метода је могућа само за ручно испитивање на краћим деоницама колосека.

4.5 Испитивање вртложним струјама

Вртложне струје (*Eddy Current – EC*) у проводном материјалу изложеном временски променљивом магнетском пољу се јављају услед појаве електромагнетске индукције (слика 4.20). Највећа густина индукованих вртложних струја је на површини материјала, док потповршинска густина вртложних струја експоненцијално опада са повећањем растојања од површине материјала [143]. Зависност густине вртложних струја од растојања z_{ec} и од времена у комплексном домену, дата је следећим изразом [143]:

$$J(z_{ec}) = J(0) \cdot e^{-\frac{z_{ec}}{\delta}} \cdot e^{j(\alpha_0 - \frac{z_{ec}}{\delta})} \quad (4.1)$$

где су:

$J(0)$ – густина струје на површини материјала,

z_{ec} – растојање од површине материјала,

α_0 – почетна фаза на површини материјала,

δ – дубина продирања која представља карактеристични параметар који зависи од електромагнетских карактеристика материјала, као и од фреквенције побудне струје калема и дат је следећим изразом [143]:

$$\delta = \frac{1}{k} = \frac{1}{\sqrt{\pi f_{ec} \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (4.2)$$

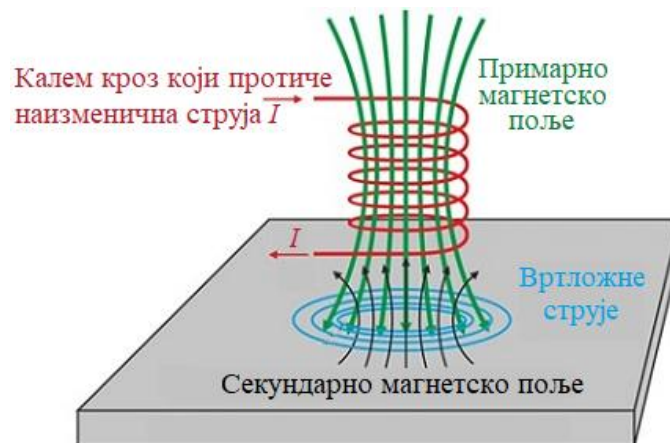
где су:

f_{ec} – фреквенција вртложних струја,

μ_0 – магнетска пермеабилност вакуума,

μ_r – релативна магнетска пермеабилност материјала,

σ – специфична проводност материјала.



Слика 4.20 Принцип испитивања методом вртложних струја [144]

Индуковане вртложне струје доводе до стварања индукованог секундарног магнетског поља и до загревања материјала на месту њихове појаве, односно имају и термички ефекат. Услед постојања малих површинских или потповршинских прелина у материјалу, пресеца се ток вртложних струја и мења се секундарно магнетско поље које оне стварају. Због тога се као мерни сигнали могу користити: (а) промене амплитуде и фазе индукованог магнетског поља, и (б) временске зависности промене температуре услед постојања дефекта шине.

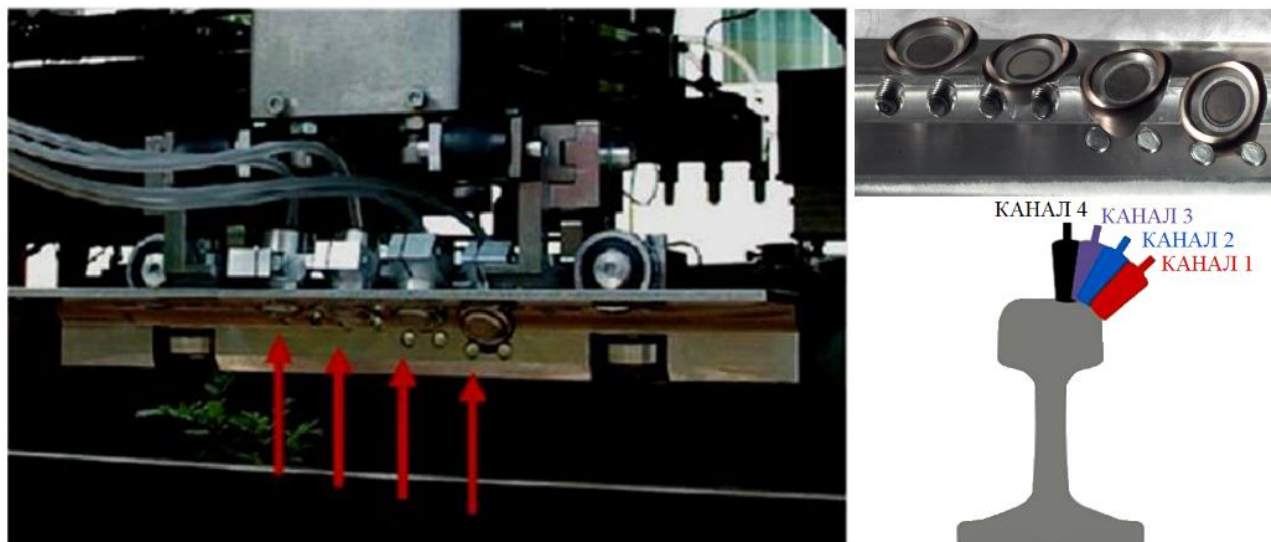
4.5.1 Испитивање вртложним струјама помоћу конвенционалних сонди

Због велике вредности релативне магнетске пермеабилности, дубина продирања вртложних струја је генерално мала код шинских челика. Зато ова метода има највећу осетљивост на површинске и плитке потповршинске дефекте шине [62, 63, 145]. Услед површинског ефекта (*skin effect*), дубина продирања се може регулисати избором оптималне фреквенције.

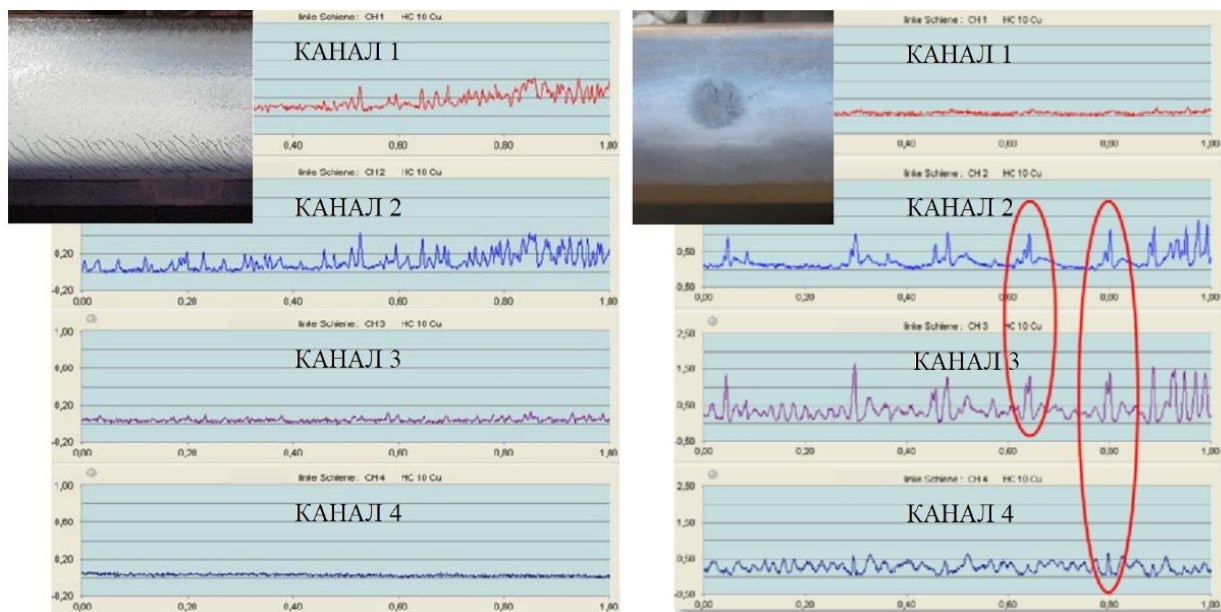
Типични уређај на бази вртложних струја састоји се од побудног калема, чија је оса нормална на површину шине, и додатног електричног кола за мерење промене импедансе калема. Опрема за испитивање вртложним струјама може да се састоји од једног или два калема. У првом случају, исти калем се користи и као побудна и као пријемна сонда. У другом случају, један калем се користи за побуду, док други служи за детекцију магнетског флукса услед вртложних струја.

Конвенционална *ЕС* метода је детаљно описана у европском стандарду [14, 20] као метода без разарања за детекцију *НС* и *squat* дефеката. *Squat* дефекти се могу детектовати овом методом, али се не може одредити њихова величина. У случају *НС* дефекта, максимална потповршинска дужина која се може измерити износи 10 mm, док се дубина прслине може израчунати на основу претпостављеног угла и измерене потповршинске дужине [14].

Испитивање вртложним струјама се може вршити употребом ручних система и аутоматских система уграђених у возило [14]. Инспекцијска возила су опремљена осмоканалним уређајима за испитивање вртложним струјама (слика 4.21). На тај начин се помоћу четири *ЕС* сонде на левој шини и четири *ЕС* сонде на десној шини врши инспекција у истом попречном пресеку шине у зони очекиване појаве *RCF* дефеката [145]. На слици 4.22 су приказани облици излазних сигнала са све четири *ЕС* сонде у случају испитивања *НС* дефекта и *squat* дефекта. Због једноставности коришћења ове методе, она се стално унапређује и комбинује са другим методама инспекције.



Слика 4.21 Уређај за испитивање вртложним струјама интегрисан у инспекцијско возило (лево) и положај *ЕС* сонди (десно) [145]



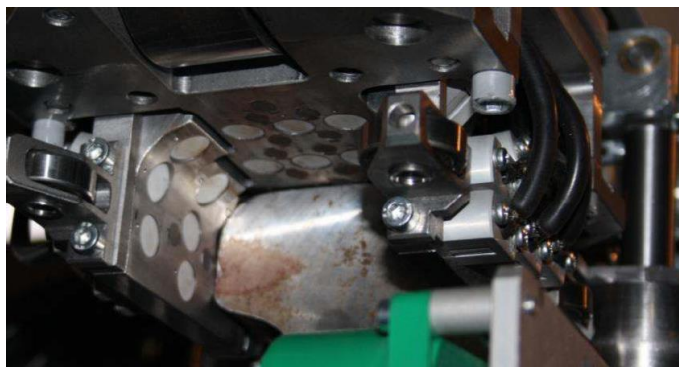
Слика 4.22 Излазни сигнали добијени испитивањем HC дефекта (лево) и squat дефекта (десно) методом вртложних струја [55, 145]

Поузданост, ограничења и могућа унапређења конвенционалне методе вртложних струја за инспекцију *RCF* дефеката разматрани су у истраживању [143]. Повод за испитивања, која су представљена у оквиру овог истраживања, био је појава озбиљних *RCF* дефеката две године након полагања шине у колосек. Непосредно након полагања шина, ови дефекти нису уочени примењеном аутоматском *ЕС* методом инспекције. Две године касније, озбиљни *RCF* дефекти су детектовани визуелном инспекцијом, што је захтевало хитну замену шине. Због тога су испитивани параметри који утичу на ограничења примене *ЕС* методе [143]. У оквиру истраживања показано је да на дубину продирања вртложних струја (која износи око 3 mm) утичу: (а) случајне промене магнетске пермеабилности шинског челика, (б) промена растојања *ЕС* сонде од површине шине (*lift-off* растојање), као и (в) повећање фреквенције индукованих вртложних струја у односу на фреквенцију побудне струје услед бржег померања сонде код аутоматског *ЕС* испитивања. Сви претходно наведени утицаји могу допринети детектовању непостојећих дефеката, нетачном одређивању величине дефеката, а посебно нетачном одређивању дубине дефеката већих од дубине продирања вртложних струја. Такође, на осетљивост *ЕС* методе утиче постојање великог броја блиско постављених плитких прслина које се не могу појединачно детектовати на основу промене амплитуде сигнала. Како се највеће промене у електромагнетским особинама челика јављају у површинском слоју, број лажно детектованих дефеката може се смањити сукцесивном применом *ЕС* методе и брушења шине.

Унапређења методе инспекције помоћу вртложних струја подразумевала би: (а) примену сонди оптималног облика, карактеристика и погодног распореда, као и (б) коришћење више мерних фреквенција наизменичне побудне струје или коришћење импулсних побудних струја [143].

Пример побољшане структуре сонде је мултидиференцијална *LEOTEST Type EC* сонда, која се састоји од четири калема, од којих су два побудна а преостала два пријемна [146, 147]. Ова сонда има следеће карактеристике: (а) побољшану осетљивост на кратке плитке и дуге плитке прслине, као и на друге локалне дефекте, (б) добру *lift-off* компензацију, (в) побољшану дубину продирања вртложних струја због могућности примене на ниским фреквенцијама, (г) добар однос величине сензора и дубине продирања, (д) задовољавајућу просторну резолуцију [147].

У истраживању [146], извршено је лабораторијско испитивање помоћу система који се састоји од 56 мултидиференцијалних *ЕС* сонди, од којих је 25 распоређено за детекцију дефеката главе шине (слика 4.23). Показано је да се начином побуде и распоредом појединачних сонди може унапредити осетљивост на одређене дефекте шине. Систем поседује и ваздушно чишћење површине шине која се испитује.



Слика 4.23 Положај LEOTEST Туре *ЕС* сонди за инспекцију главе шине [146]

Један од начина корекције утицаја *lift-off* растојања на *ЕС* сигнал, коришћењем диференцијалне *ЕС* сонде која се састоји од централног побудног калема и два пријемна калема симетрично постављена и прикључена у Витстонов мост, приказан је у [148]. Поред стандардног мерења напона у дијагонали моста (V_{dif}), мери се и збир напона на пријемним калемовима (V_{sum}). Напон V_{dif} зависи од: (а) положаја пријемних калемова у односу на положај дефекта, (б) врсте дефекта и (в) *lift-off* растојања калема. Са друге стране, на напон V_{sum} не утиче врста и положај дефекта већ само *lift-off* растојање калема. На основу мерења V_{dif} и V_{sum} за различите вредности *lift-off* растојања (од 0,4 mm до 6,4 mm) и за познате дефекте, успостављена је функционална зависност између нормализоване максималне вредности V_{dif} и V_{sum} . Приликом мерења прате се вредности и V_{dif} и V_{sum} . Након тога, врши се корекција напона V_{dif} на основу претходно утврђене функционалне зависности, тако да његова вредност зависи само од положаја и врсте дефекта [148]. Ова метода представља допринос детекцији дефеката у реалном времену.

4.5.2 Термографија помоћу импулсно побуђених вртложних струја

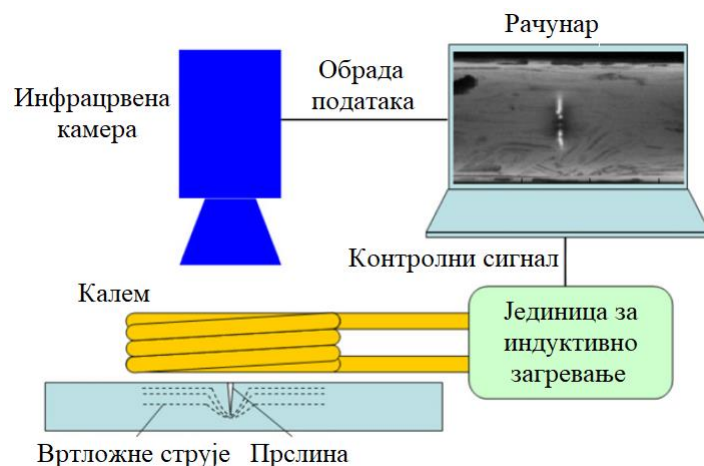
Термографија помоћу импулсно побуђених вртложних струја (*Pulsed Eddy Current – PEC*), која се назива и индукциона термографија, заснива се на краткотрајној електромагнетској импулсној побуди материјала који се испитује и индукцији вртложних струја које доводе до загревања материјала услед Џуловог ефекта. Када се вртложне струје стварају око дефекта, мења се њихова густина, што доводи до неравномерног загревања површине шине на месту дефекта и његове околине. Приликом термографског испитивања површине шине инфрацрвеном камером, показује се разлике у температурама делова површине са дефектима и без дефеката, како током процеса загревања тако и током процеса хлађења површине [149, 150].

Генерална предност термографских испитивања у односу на друге методе без разарања је могућност испитивања велике површине материјала за кратко време. Зато *PEC* термографија представља ефикасан метод детектовања и карактеризације дефеката током инспекције велике површине материјала [149, 151]. Као и код конвенционалне *ЕС* методе, на осетљивост детекције дефеката велики утицај има њихова оријентација у односу на смер индукованих струја, као и дубина дефекта [149].

Основна конфигурација *PEC* мерног система састоји се од: (а) калема за индуктивно загревање, (б) инфрацрвене камере за снимање површине и (в) пратеће опреме за контролу и синхронизацију делова система, као и за аквизицију и обраду сигнала (слика 4.24). За побуду калема се најчешће користе високо фреквентне (50 kHz – 500 kHz) струје велике јачине у трајању од 20 ms до 1 s [149].

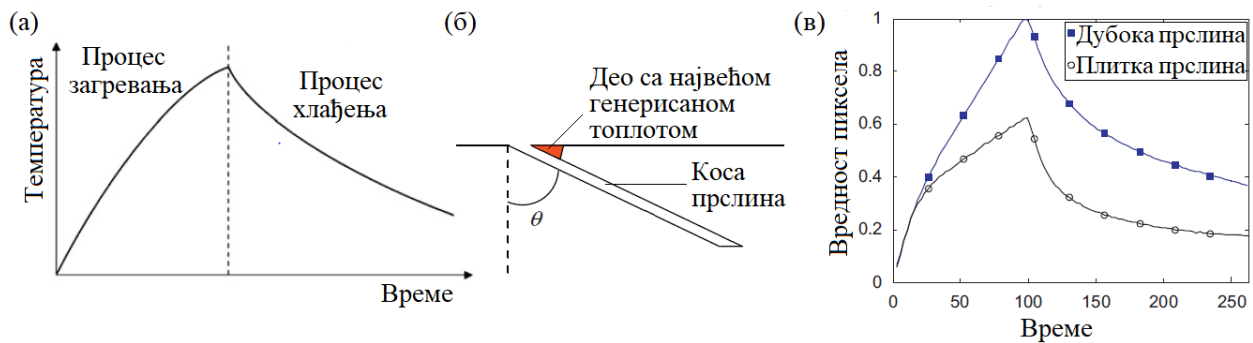
Раније је термографска метода представљала помоћну методу за детекцију дефеката. Стални развој инфрацрвених камера омогућава све већу просторну и температурну резолуцију снимака. На тај начин, термографска метода постаје самостална метода за детекцију дефеката, на основу које се могу добити квантитативни подаци о дефектима преко временске анализе снимака [150].

Временска зависност промене температуре сваког пиксела на снимку (који одговара малој површини материјала који се испитује) прати се током процеса загревања и хлађења материјала, као што је приказано на слици 4.25а [149]. У току загревања јављају се два супротна процеса: локално генерисање топлоте и дифузија топлоте кроз материјал од места загревања. Поређењем промена температуре током периода загревања и хлађења добијају се различите информација о дефекту. Утврђено је да врста и величина дефекта утичу на брзину загревања, достигнуту максималну температуру, као и на време хлађења.



Слика 4.24 Основна конфигурација мерног система заснованог на *PEC* термографији [149]

Расподела вртложних струја, али и одговарајућа расподела температуре, разликује се код вертикалних и косих прслина и зависи од њихове дужине и дубине [149]. Када је вертикална прслина кратка и дубока, површинске и потповршинске *ЕС* имају већу густину око крајева прслине. У случају дугачке и плитке вертикалне прслине, површинске *ЕС* су пресечене, док се потповршинске *ЕС* групишу испод крајева прслине па се највећа густина струја а самим тим и температура јавља испод прслине. Код косих прслина које се простиру под углом θ (слика 4.25б), највећа топлота се генерише у оштром (уском) делу материјала ограниченог прслином и површином материјала (врх прслине), јер прслина спречава одвођење топлоте кроз материјал са њене супротне стране. У случају дубоких прслина (за које је угао θ мали) и плитких прслина (за које је угао θ велики) исте дужине, пораст температуре има исти тренд на почетку процеса загревања, као што је приказано на слици 4.25в. Међутим, при наставку загревања, дисипација топлоте је бржа код плитких прслина, тако да температура спорије расте и достиже мањи максимум. Разлика се јавља и по престанку загревања, када је процес хлађења бржи код плитких прслина. *PEC* метода је погодна за инспекцију вишеструких шинских дефеката, али само при мањим брзинама возила за инспекцију, јер се при већим брзинама не може генерисати довољно топлоте за детекцију дефеката.



Слика 4.25 Временска зависност температуре током процеса загревања и хлађења (а), коса прслина (б) и утицај дубоке и плитке прслине на промену температуре (в) [149]

Аутори истраживања [152] предложили су праћење и временске и просторне промене температуре, као и комбиновање добијених резултата у циљу одређивања величине дефеката и њиховог броја. Показано је да је у почетној фази загревања могуће финије разликовати положај и број дефеката. У каснијој фази загревања долази до груписања термографских слика блиских (вишеструких) дефеката који се приказују као један већи дефект. На основу ове појаве, омогућена је боља процена стварне величине оштећења на месту вишеструких дефеката.

Мерна сонда добијена интеграцијом *EMAT* и *PEC* сонди детаљно је описана у [153]. *PEC* сонда је постављена између две *EMAT* сонде на заједничком носачу. Ова интегрисана сонда комбинује предности обе методе инспекције: локација и димензије дубљих дефеката могу се одредити помоћу *EMAT* сонди, док *PEC* сонда пружа детаљније информације у вези површинских и потповршинских дефеката. *EMAT* сонде, које су постављене у *pitch-catch* конфигурацији, омогућавају детекцију дефеката дубине до 20 mm. *PEC* сонда, којој може да се подешава *lift-off* растојање, користи се за детекцију плићких дефеката дубине до 5 mm. У случају испитивања вишеструких блиских прслина са продукцијом корозије, *PEC* сонда даје боље резултате, док *EMAT* сонда има бољу осетљивост при испитивању храпавих површина.

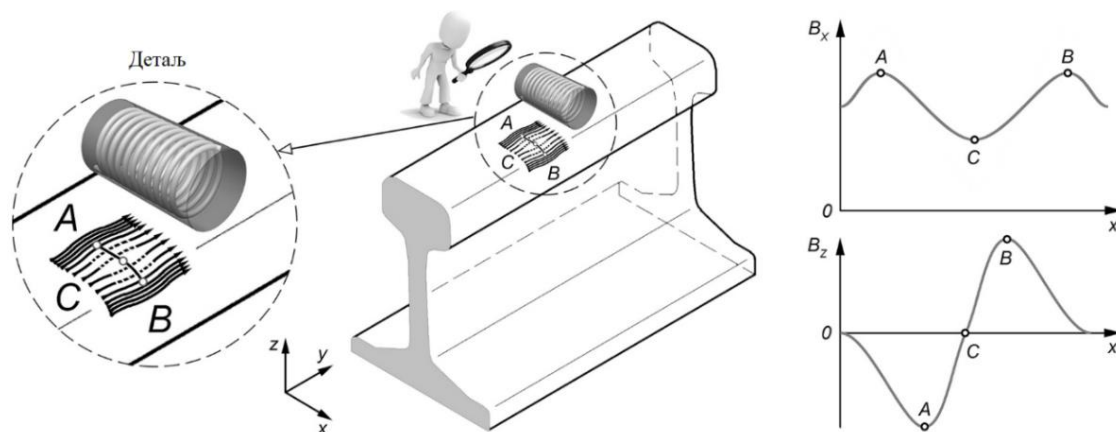
4.6 Испитивање наизменичним струјама

Код методе инспекције наизменичним струјама (*Alternating Current Field Measurement – ACFM*), индуковање наизменичних електричних струја на површини узорка врши се помоћу калема. Када се испитују дефекти главе шине, калем се поставља тангенцијално на површину главе шине која се испитује, тако да оса калема одговара оријентацији дефекта (слика 4.26). Током *ACFM* испитивања, дефинише се координатни систем на следећи начин: x оса одговара оријентацији попречног дефекта шине, y оса одговара правцу индукованих струја, а z оса је нормална на $x - y$ раван. Индуковане струје на површини имају већу густину на крајевима дефекта, а по дубини се простиру испод дефекта. На тај начин, оне стварају магнетско поље изнад површине дефекта, чија се магнетска индукција B мења у правцу x , y и z осе. У случају испитивања материјала без дефекта, компонента B_x има одређену константну вредност, док компоненте B_y и B_z имају вредност нула.

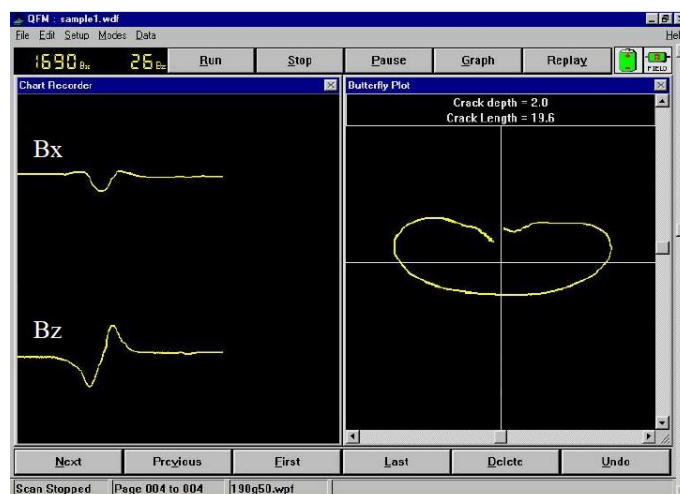
Компонента вектора магнетске индукције B_x се мења на карактеристичан начин дуж дефекта шине. Уочавају се два максимума на местима која одговарају крајевима дефекта (тачке A и B на слици 4.26) услед највеће густине индукованих струја на крајевима дефекта. Минимум у B_x сигналу (тачка C на слици 4.26) се јавља између крајева дефекта, где су

површинске индуковане струје прекинуте а потповршинске струје се простиру испод прслине. Што је прслина дубља, минимум је јасније изражен. Због закривљене путање индукованих струја око дефекта, компонента вектора магнетске индукције B_z има минимум у тачки A и максимум у тачки B . У области средине прслине (тачка C), компонента B_z има нулту вредност. На основу зависности B_x од x може се одредити дубина дефекта, док се дужина дефекта може одредити на основу зависности B_z од x .

Резултати мерења током ручног испитивања могу да се представе и графиком зависности B_x од B_z на екрану мерног инструмента, као што је описано у [154]. У случају наиласка на дефект, на екрану се појављује карактеристичан облик лептира (слика 4.27), што омогућава једноставно одређивање локације дефекта. Дубина и дужина дефекта се одређују накнадном обрадом B_x и B_z сигнала. Поред тога, мерење магнетске индукције може да се врши са најмање две сонде које мере компоненте B_x и B_z . Међутим, најчешће се користе низови сонди који истовремено читавају ове компоненте поља на више места. У случају постојања једног побудног калема, ствара се индукована струја само у једном смеру, па је испитивање ограничено на детектовање дефеката који се пружају нормално на правац струје. Са друге стране, коришћењем низа побудних калемова, који индукују струје у различитим смеровима, могућа је детекција прслина различитих оријентација [155]. У том случају, мерне сонде се користе и за мерење B_y компоненте, односно мери се магнетска индукција у сва три правца.



Слика 4.26 Примена ACFM методе за детекцију дефеката главе шине (лево) и компоненте магнетске индукције (десно)



Слика 4.27 Карактеристичан начин представљања ACFM сигнала у случају постојања дефекта [154]

Иако је *ACFM* метода, у поређењу са *EC* методом, мање осетљива на утицај промене *lift-off* растојања у опсегу од 0 mm до 5 mm, препоручује се контрола *lift-off* растојања како би се одредиле тачне димензије *RCF* дефеката. Уколико је оријентација прслине под углом мањим од 30° у односу на x осу (према усвојеном координатном систему на слици 4.26), може се користити једна побудна сонда за мерење B_x и B_z компоненти [155]. За аутоматску детекцију и карактеризацију *RCF* дефеката, развијена су специјална робот–колица са уграђеним *ACFM* системом која могу да се крећу брзином између 5 km/h и 20 km/h [156].

У оквиру *INTERAIL FP7* пројекта, развијен је систем инспекције који комбинује три модула заснована на: аутоматском визуелном испитивању, ултразвучном испитивању и *ACFM* методи [142, 157]. Овај интегрисани систем је предвиђен за уграђивање на возило за инспекцију са брзином кретања до 320 km/h. Сваки модул овог система пружа информацију о стању шине и омогућава детекцију оних дефеката на које је најосетљивији. Модул заснован на *ACFM* методи омогућава детекцију и процену озбиљности *RCF* дефеката (*HC*, *squat* и прслине возне ивице) [142, 157]. Софтверска обрада података са свих модула је прилагођена једноставном читавању од стране особља задуженог за одржавање. Резултати добијени помоћу овог интегрисаног система упоређивани су са следећим појединачним модулима: ручни *ACFM* модул, ултразвучни модул заснован на низу *phased array* сонди и модул заснован на високофреквентној анализи вибрација [142].

Даљи развој *ACFM* методе односи се на детекцију површинских шинских дефеката који се под косим углом у односу на површину простиру унутар главе шине [158], смањење шума у оквиру B_x сигнала [159] и повећање осетљивости на детекцију вишеструких блиско постављених прслина [160].

Како би се на основу сигнала са *ACFM* сензора одредио угао напредовања површинских прслина, у истраживању [158] се уводе нормализоване вредности B_x и B_z сигнала. Нормализована вредност минимума B_x сигнала, која представља однос измереног сигнала изнад прслине (B_x) и вредности сигнала за материјал без оштећења (B_{x0}), зависи од вертикалног угла прслине само за вредности мање од 30° . Нормализована вредност B_z сигнала представља однос минимума и максимума B_z сигнала, и обрнуто је сразмерна вредности вертикалног угла. Међутим, примећено је да позиција нуле у B_z сигналу не одговара месту отвора прслине, као што је у случају вертикалне прслине, већ се помера од отвора прслине ка делу испод кога се простире прслина. Уколико је вертикални угао мањи, тај померај је већи. Да би се истовремено узео у обзир и ефекат промене нормализованог B_z сигнала и положај нуле у B_z сигналу, прате се промене B_z сигнала у зависности од X и Y координата. У случају краћих дефеката, чија површинска дужина износи око 8 mm, а потповршинска дужина до 6 mm, добијени су задовољавајући резултати у одређивању угла. Међутим, код дужих дефеката, чија површинска дужина износи око 21 mm, а потповршинска дужина је већа од 6 mm, нормализовани B_z сигнал зависи и од вертикалног угла и од површинске дужине дефекта.

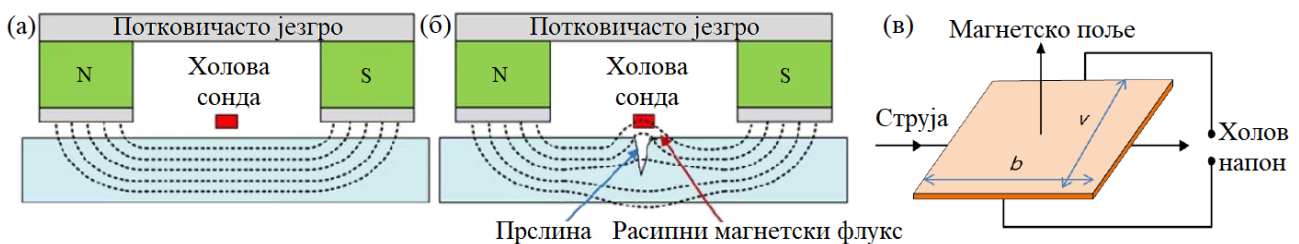
Постојање шума на месту минимума B_x сигнала доводи до мање осетљивости и немогућности одређивања дубине дефекта, нарочито при већим вредностима *lift-off* растојања сонде. У оквиру истраживања [159] се предлаже одстрањивање шума помоћу *B-spline* алгоритма у два корака. Прво се помоћу униформног *B-spline* алгоритма детектује само положај дефекта. Затим се добијени положај користи као улазни податак за примену неуниформног *B-spline* алгоритма како би се одредила дубина дефекта.

На основу *ACFM* сигнала добијених током детектовања вишеструких *RCF* прслина познатих параметара (површинска дужина, угао, број прслина и њихово међусобно растојање), применом алгоритама заснованих на вештачким неуралним мрежама, развијен је метод за разликовање вишеструких од појединачних прслина. Резултати испитивања су

показали да је грешка детектовања износила до 10% за већину вишеструких прслина, осим за случајеве код којих је у току детекције долазило до промене *lift-off* растојања [160].

4.7 Испитивање мерењем расипног магнетског флукса

Метода која се заснива на мерењу расипног магнетског флукса (*Magnetic Flux Leakage* – *MFL*), погодна је за детекцију површинских и потповршинских дефеката. Основна структура мерног система састоји се од магнетског кола које образује стални магнет или електромагнет у оквиру потковичастог језгра постављеног изнад феромагнетског материјала који се испитује и магнетске сонде (слика 4.28). За разлику од увођења временски променљивог магнетског поља, као што је у случају *EC* и *ACFM* метода, магнетско поље код *MFL* методе је константно у времену и не доводи до индуковања вртложних струја и појаве *skin* ефекта. Описана структура омогућава успостављање хомогеног магнетског поља унутар материјала на делу између полова потковичастог језгра, чије су линије паралелне са површином материјала који се испитује. Сонда за мерење јачине магнетске индукције B , која одговара расипном флуксу, поставља се на половини растојања између полова језгра. Најчешће се користе Холове сонде, које су у облику правоугаоне танке плочице (слика 4.28в). Ове сонде мере компоненту магнетске индукције нормалну на раван плочице [161].



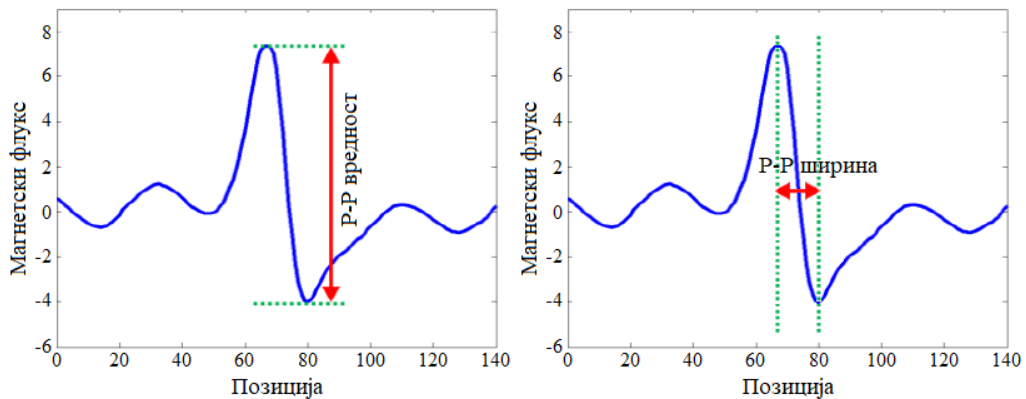
Слика 4.28 Примена *MFL* мерног система за испитивање материјала без дефекта (а) и са дефектом (б) и принцип рада Холове сонде (в) [161]

Током испитивања шине помоћу *MFL* методе, дефинише се координатни систем на следећи начин: x оса је паралелна површини материјала и одговара правцу линија успостављеног магнетског поља, y оса је нормална на правац линија магнетског поља, а z оса је нормална на $x - y$ раван.

Комбиновањем сензора магнетског поља могуће је правити 2D или 3D сензорске главе, које могу да мере више компоненти магнетске индукције (B_x , B_y , B_z , према усвојеном координатном систему) [162]. У току мерења, цео *MFL* систем се помера дуж x осе и одговарајуће компоненте магнетске индукције се мењају на карактеристичан начин у околини и изнад дефекта. У случају преласка сонде преко попречне прслине (у правцу y осе), изражен максимум B_x сигнала се јавља изнад отвора прслине. Код мерења B_y компоненте, највеће промене у сигналу се јављају при наиласку сонде изнад крајева попречне прслине. Највеће промене у вредности B_z компоненте се читавају при наиласку на предњу и на задњу бочну ивицу прслине, када се јасно читавају локални максимум и минимум (редом). Разлика између вредности максимума и минимума B_z сигнала (*peak to peak value* – *P-P* вредност) зависи од дубине прслине, док разлика положаја минимума и максимума дуж x осе (*peak to peak width* – *P-P* ширина) омогућава одређивање ширине прслине (слика 4.29) [163].

Добра страна *MFL* методе је стабилност успостављеног магнетског поља, које се постиже довољно јаким магнетисањем изнад вредности заостале магнетизације за материјал

који се испитује. Такође, површина материјала између полова магнета се може испитати у потпуности [164].



Слика 4.29 Зависност B_z сигнала од положаја сонде у правцу x осе при наиласку на прслину [163]

На промене вредности измерених MFL сигнала значајан утицај има *lift-off* растојање. Зато је, ради одржавања његове константне вредности, потребно прилагодити распоред и положај сонди облику површине материјала који се испитује.

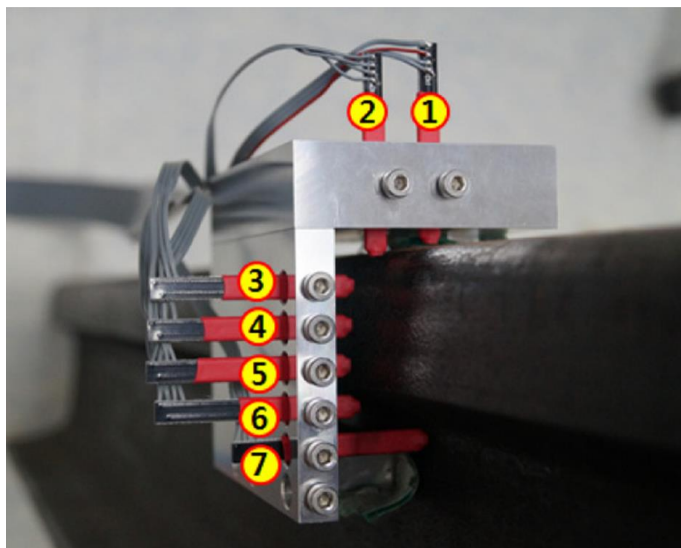
Мале промене *lift-off* растојања, као и промене електромагнетских особина материјала, доприносе постојању шума у MFL сигналу. Зато је потребно извршити додатну обраду сигнала пре читавања карактеристичних вредности ($P-P$ вредност и $P-P$ ширина). У оквиру истраживања [161], то је постигнуто филтрирањем помоћу дискретне *wavelet* трансформације и праћењем промене сигнала само у одређеном фреквентном опсегу.

Уместо одређивања претходно дефинисана два параметра B_z сигнала, анализирана је његова обвојница добијена Хилбертовом трансформацијом [163]. Обвојници је одређен праг коришћењем опште расподеле екстремних вредности (*Generalized Extreme Value – GEV*). Праг омогућава разликовање оштећеног и неоштећеног дела површине. Очитавају се четири параметра обвојнице сигнала: разлика максималне вредности обвојнице и прага, ширина обвојнице на нивоу прага, полуширина обвојнице на нивоу половине максималне вредности обвојнице и површина обвојнице изнад прага. Сваки параметар зависи и од дубине и од ширине прслине, тако да се појединачно не могу користити, већ их је потребно комбиновати. Такође, потребно је извршити велики број мерења на вештачки уведеним дефектима, како би се успоставила функционална зависност између ова четири параметра и самих карактеристика дефекта (његове дубине и ширине). Резултати ових мерења се користе као улазни подаци за двостепену анализу базирану на вештачким неуралним мрежама (*Two-step artificial neural network pattern recognition technique*). Овим приступом могу да се детектују и карактеришу дефекти мале дубине, који се класичном MFL методом не би могли одредити [163]. Описана анализа представља један од начина решавања инверзног проблема, тј. да се на основу више карактеристика измерених MFL сигнала реконструише локација, број, оријентација, дужина и дубина прслине. У оквиру истраживања [165] приказано је како се на основу више карактеристика измерених 2D MFL сигнала реконструише локација, број, оријентација и дужина прслине применом алгорита под називом *Canny edge detection algorithm*. Затим се у следећем кораку примењује алгорита под називом *Space mapping* и његови резултати се користе за инверзну процедуру на основу које се одређује дубина прслине.

Метод који се заснива на одређивању разлике измерених компоненти магнетске индукције расипног флуksа помоћу две блиско постављене Холове сонде на истом *lift-off* растојању је предложен, као и теоријски и експериментално испитан у истраживању [166]. Детаљно је испитана могућност смањења шума код оваквог мерног система у односу на

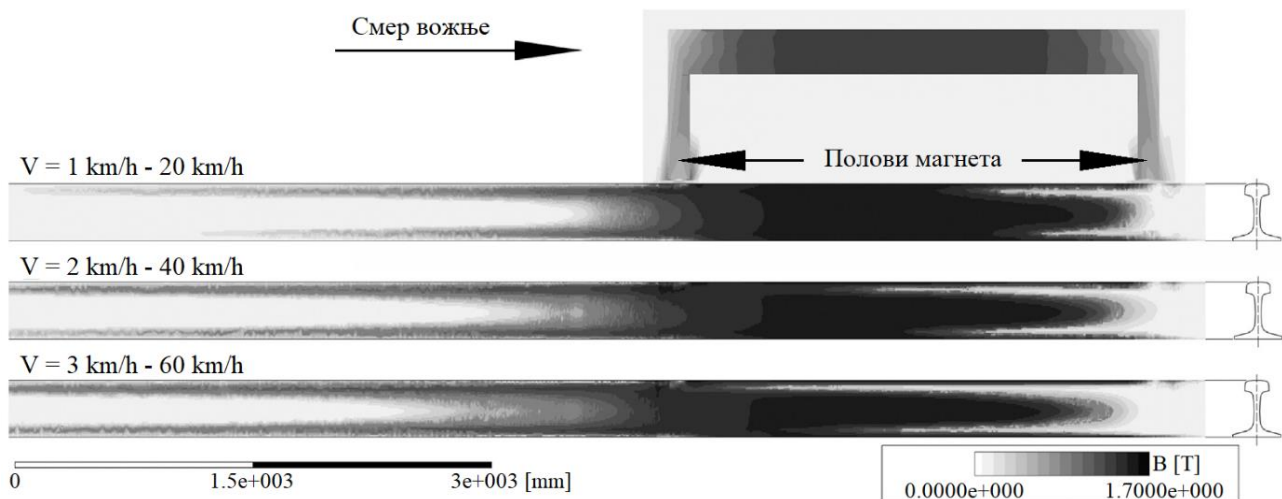
класичан *MFL* систем. Анализирана су три типа шума у *MFL* сигналу, који потичу од: (а) расипног флуksа удаљених дефеката, (б) флукуација магнетског поља калема и хардвера мерног система и (в) вибрација мерног система изазваних неравнинама површине која се испитује. Закључено је да се мерењем разлике B_z сигнала са две Холове сонде, сва три типа шума значајно елиминишу. Такође, погодним избором растојања између Холових сонди може се постићи максимална осетљивост код прелина одређене ширине и дубине.

Могућност коришћења *MFL* методе за испитивање шинских дефеката испитана је у [164]. Развијен је систем са седам малих сензорских глава, од којих се свака састоји од перманентног потковичастог магнета и Холове сонде која је постављена између полова магнета. Сензорске главе су распоређене тако да покривају половину попречног пресека главе шине, укључујући и прелазну зону из главе на врат шине (слика 4.30). Примећено је да је у случају поставке мерног система са једне стране осе шине могуће детектовати дефекте и одредити са које стране попречног пресека шине се они налазе. Ово истраживање [164] представља покушај развоја аутоматског система за детекцију дефеката шине. Међутим, развијена конфигурација система захтева побољшану обраду и моделовање сигнала са свих сензорских глава, како би се остварила боља карактеризација дефеката.



Слика 4.30 Систем са седам сензорских глава [164]

У оквиру истраживања [167], извршено је теоријско и експериментално испитивање *MFL* система уграђеног на возило за инспекцију. Посебно је испитан утицај брзине возила на рад *MFL* система, као и могућност детекције потповршинских и дубљих дефеката. У односу на основне карактеристике *MFL* система, при већим брзинама возила јављају се следећи додатни ефекти: (а) појава вртложних струја у шини, као и *skin* ефекта, нарочито у зонама у близини полова магнета, (б) магнетско поље између полова магнета није равномерно распоређено у односу на средишњу тачку, већ се максимална јачина поља јавља ближе задњем полу (гледано у смеру вожње), као што је приказано на слици 4.31 и (в) магнетско поље се јавља и иза задњег пола магнета (слика 4.31). Са повећањем брзине возила, сви ови ефекти су јаче изражени. Закључено је да је магнетске сензоре потребно поставити у зони између средишње тачке и задњег пола магнета [167]. На основу мерења познатих дефеката, нађена је зависност $P-P$ вредности од дубине дефекта и брзине возила. Ова зависност омогућава увођење поправки мерених резултата према познатој брзини возила. Опадање $P-P$ вредности са повећањем брзине (од 30 km/h до 80 km/h) мање је изражено у случају испитивања површинских и потповршинских дефеката и износи око 23% [167].



Слика 4.31 Расподела успостављеног магнетског поља у ишни за различите брзине инспекцијског возила [167]

Метод за визуелно детектовање расипног магнетског флукса на местима постојања дефекта у магнетском материјалу описан је у [168]. Овај метод комбинује *MFL* и визуелну методу, јер се уместо стандардних *MFL* магнетских сензора користе оптички сензори. Као оптички сензор користи се наноемулзија која у себи има феромагнетске наночестице реда величине 10 nm. Емулзија је затопљена између две паралелно постављене стаклене плочице на растојању од 300 μm . Овај сензор се поставља на 1 mm изнад испитиваног узорка. Магнетске наночестице у емулзији се прерасподељују у зависности од расипног магнетског поља и дају различито слабљење боја изнад и изван дефекта. На тај начин се визуелно или камером прати промена слике (расподела боја на површини плочице изнад дефекта). Испитивања су вршена за различите облике и дубине дефеката и праћена је промена интензитета светлости за различите таласне дужине светлости (*RGB* боје). Утврђено је да су добијени резултати упоредиви са резултатима мерења помоћу Холових сонди [168].

У истраживању [162] предлаже се мултифизички приступ детекцији дефеката. Упоредјују се 3D метода расипног магнетског флукса (*3D MFL*) и метода *PEC* термографије за детекцију вишеструких прслина (вештачки уведених и реалних *RCF* дефеката) различитих дубина, углова и међусобног растојања. Такође, вршено је моделовање и експериментално испитивање.

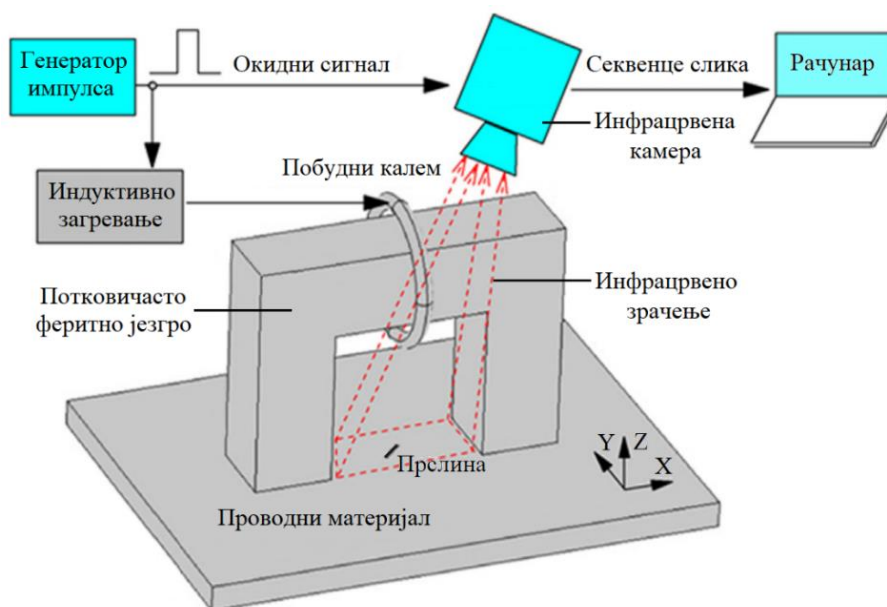
Код *3D MFL* методе, на основу упоређивања све три компоненте магнетске индукције расипног поља, утврђено је да се најбоља резолуција може добити на основу снимања B_x компоненте [162]. Међутим, уочено је да је B_x компонента осетљива на *lift-off* растојање. У случају испитивања вишеструких вештачко уведених прслина, утврђено је да се са порастом *lift-off* растојања (од 0,5 mm до 2 mm) значајно погоршава резолуција дефеката. На тај начин, локацију дефекта је могуће детектовати, али не и тачан број прслина у оквиру дефекта. У случају детекције реалних *RCF* дефеката, добри резултати се постижу на *lift-off* растојању од 0,5 mm. Међутим, услед недовољне резолуције није могуће одредити угао *RCF* дефеката, као и постојање јако малих прслина.

Код методе *PEC* термографије, очитаване су температуре и градијенти температуре у три карактеристична временска тренутка: (а) на почетку загревања, (б) у тренутку максималне температуре и (в) на средини периода хлађења [162]. На основу тих података, у случају испитивања вештачки уведених дефеката, могуће је одредити њихову позицију и могу се добити додатни подаци о дубини дефеката. Задовољавајући резултати детекције су постигнути за *stand-off* растојање инфрацрвене камере до 200 mm. У поређењу са *MFL* методом, испитивањем реалних *RCF* дефеката *PEC* методом добијена је детаљнија слика

вишеструких дефеката. На тај начин, могу се уочити мање прслине на површини шине, број, дубина и оријентација прслина, као и њихово евентуално потповршинско напредовање. Међутим, недостатак *PEC* термографије, у поређењу са *MFL* методом, је то што се снимање врши кроз побудни калем, који на неки начин блокира визуелизацију узорка испод калема, чиме је лимитирана површина детекције.

Након упоређивања *3D MFL* методе и *PEC* термографије, предложена је нова структура мерног система (слика 4.32) која комбинује предности ове две методе [162]. Овај систем комбинује потковичасто феритно језгро са побудним калемом око њега, што је карактеристично за структуру *MFL* методе. Побуда се врши помоћу високо фреквентних импулсних струја великог интензитета, што је карактеристично за *PEC* термографију.

На овај начин, високо фреквентна импулсна струја кроз калем врши успостављање временски променљивог магнетског поља у материјалу. Постојање површинских или потповршинских дефеката утиче на просторну расподелу успостављеног магнетског поља унутар материјала, као и индукованих струја које су последица магнетског поља и чија је густина већа око крајева дефекта. Уколико се магнетско поље простире дуж x осе, индуковане струје су врло осетљиве на попречне прслине (у правцу y осе) [169]. Са друге стране, брзопроменљиво магнетско поље калема које индукује вртложне струје утиче на њихову повећану густину око крајева дефекта. Ако су индуковане вртложне струје у правцу y осе, највећа осетљивост детекције се јавља код подужних прслина (у правцу x осе) [169]. У случају испитивања косе површинске прслине која се простире под одређеним углом у односу на x или y осу (слика 4.32), промене у магнетском пољу унутар материјала и густине вртложних струја се јављају код оба ефекта загревања, али са различитом осетљивошћу. На тај начин је комбинација *MFL* методе и *PEC* методе погодна за детекцију косих површинских прслина [169]. Топлотни ефекти су појачани постојањем хистерезиса у феромагнетском материјалу и загревањем услед брже промене магнетских домена због високофреквентног поља, што додатно утиче на осетљивост ове комбинације метода.



Слика 4.32 Предложени систем који обједињује предности *MFL* методе и *PEC* термографије [162]

Детаљни приказ и испитивање карактеристика претходно описаног система приказани су у оквиру истраживања [169]. Предност овог система је то што се највећи део магнетског флуksа концентрише у магнетско коло и води кроз објекат који се испитује. На тај начин, на месту испитивања ствара се широка област у којој је магнетско поље униформно. Са друге

стране, употреба феритног језгра омогућава мање губитке флукса, док смањена магнетска отпорност калема омогућава да се са истом струјом добије јаче магнетско поље на месту испитивања. Локална област између полова језгра ствара широку отворену област за визуелизацију помоћу инфрацрвене камере. Анализирана је промена температуре, као и промена првог извода температуре од времена. У случају вештачки уведених дефеката, аутори истраживања [169] уочили су добру корелацију (око 98%) првог извода временске промене температуре са различитим оријентацијама прслина. Код реалних прслина, корелација износи приближно 98,3% [169]. Код ове комбиноване методе, установљено је да при промени *lift-off* растојања од 0 mm до 15 mm, вредности очитаних температура и њихових првих извода варирају мање од 10%. Такође, испитивана је и успостављена корелација дубине дефекта (у опсегу од 2 mm до 4 mm) са очитаним температурама и првим изводима температура. Описани систем [169] има могућност одређивања оријентације прслина, што се не може постићи другим појединачним методама инспекције.

Магнетска метода заснована на магнетско–оптичком (*Magneto–Optical – MO*) сензору за детекцију промена у заосталом магнетском пољу изнад *RCF* шинских дефеката предложена је у [170]. Пошто нагле промене заосталог магнетског поља проузрокују значајну ротацију равни поларизације рефлектоване светлости у *MO* сензору, изнад прслине се уочава јасна промена у компоненти заосталог магнетског поља B_z . Представљена метода је лабораторијски доказана и предложена је конфигурација са преносивим микроскопом са поларизованом светлошћу за визуелизацију *RCF* прслина на терену.

4.8 Испитивање помоћу сензора базираних на оптичким

влакнима

Фибер оптички сензори (*Fiber Optic Sensors – FOS*) се све више користе за праћење стања конструкција због могућности њиховог коришћења у присуству јаких електромагнетских поља и у хемијски агресивним срединама. Поред тога, *FOS*–и су лагани, флексибилни, њихова конфигурација може бити произвољног облика и једноставно се прилагођавају мерном месту. Све је већа примена *FOS*–а у испитивању железничке инфраструктуре и праћењу железничког саобраћаја [171]. За могућност примене на железници [172], испитују се и развијају два типа ових сензора: фибер оптички сензори на бази уписаних Брагових решетке (*Fiber Bragg Grating – FBG*) и дистрибутивни сензори.

FBG сензори представљају тачкаст тип сензора који се користе за мерење истезања, температуре и вибрација на одређеној позицији дуж шине и на тај начин представљају оптичку варијанту мерних трака [173]. Брагова решетка представља просторну периодичну промену у индексу преламања језгра оптичког влакна на одређеној мерној дужини. На тај начин се тај део оптичког влакна понаша као рефлектор светлости чија таласна дужина (λ_B) зависи од просторног периода индекса преламања као [173]:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (4.3)$$

где су:

n – средња вредност индекса преламања језгра оптичког влакна,

Λ – просторна периодичност индекса преламања.

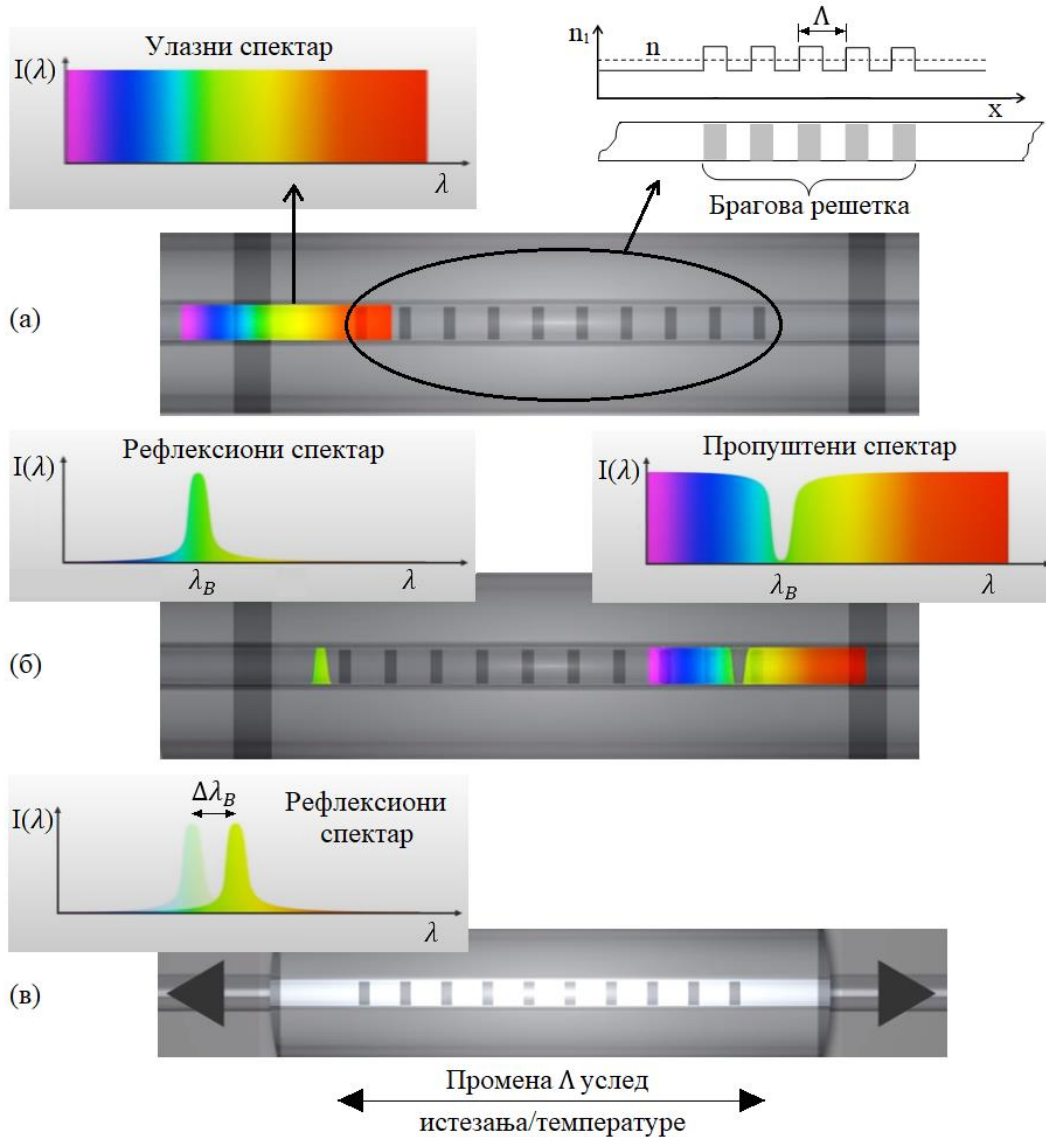
Када се светлост ширег опсега таласних дужина уведе у оптичко влакно, на месту Брагове решетке светлост таласне дужине λ_B се рефлектује док се светлост осталих таласних дужина пропушта даље дуж влакна. На сликама 4.33а и 4.33б су приказани спектри улазне,

рефлектоване и пропуштене светлости. Ако дође до промене Λ услед истезања (ε) и/или промене температуре (ΔT) (слика 4.33в), мења се λ_B и промена λ_B може се представити као [173]:

$$\Delta\lambda_B = k_\varepsilon\varepsilon + k_T\Delta T \quad (4.4)$$

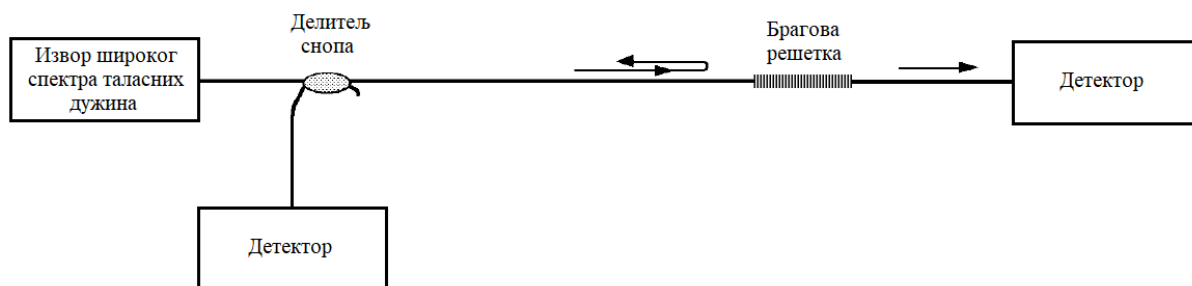
где су:

константа k_ε – осетљивост Брагове решетке на релативно истезање при константној температури,
 константа k_T – коефицијент температурске зависности при константном релативном издужењу.



Слика 4.33 Принцип рада сензора са уписаном Браговом решетком [174]

На слици 4.34 представљена је конфигурација мерног система који се састоји од светлосног извора широког спектра таласних дужина, делитеља снопа и оптичког влакна са уписаном Браговом решетком. У зависности од тога да ли се детектује рефлектована или пропуштена светлост, прати се промена таласне дужине помоћу детектора који је постављен на другом улазу делитеља снопа или на излазном крају влакна.



Слика 4.34 Конфигурација мерног система базираног на Браговим решеткама [173]

Начин уписивања Брагових решетки омогућава да се дуж једног оптичког влакна изради више *FBG* сензора на одређеним растојањима и да се једним сигналом, који се пошаље ка свим решеткама, измери промена таласне дужине на свакој појединачно. Поред тога, мрежа просторно дистрибуираних *FBG* сензора се може формирати коришћењем неколико влакана, повезати са једним интерогатором (уређајем који прецизно мери промене таласне дужине светлости) и причврстити (залепити) дуж колосека или на возило. Због своје диелектричне природе и малих димензија, *FBG* сензори не ометају компоненте под електричним напоном и не ремете успостављену расподелу напрезања на мерном месту. Примена *FBG* сензора за испитивања на карактеристичним деоницама колосека и на точковима возила описана је у [175, 176]. У оквиру истраживања [177] предложена је и испитана примена *FBG* сензора са унапређеним интерогаторским модулом за мерење великом брзином у случају детекције ултразвучних вођених таласа (у импулс–ехо конфигурацији и *pitch–catch* конфигурацији) током инспекције прслина шине. Поред *FBG* сензора, постоје и други типови тачкастих *FOS*-а који су разматрани у [178].

Код дистрибутивних *FOS*-а, оптичко влакно целом својом дужином представља сензор. Акустички сигнали који се јављају у околини сензора доводе до периодичног истезања влакна. Истежање и температурне промене дуж *FOS*-а се манифестују променама у простирању, рефлексији и расејању светлосних сигнала дуж влакна. На тај начин се промене стања оптичког влакна на целој његовој дужини могу посматрати праћењем рефлектованих или расејаних оптичких импулса током времена. Дистрибутивни сензори се заснивају на три врсте расејања светлости (Рејлијево, Брилуеново и Раманово расејање) и углавном користе две мерне технике: оптичку рефлектометрију у временском домену (*Optical Time Domain Reflectometry – OTDR*) и оптичку рефлектометрију у фреквентном домену (*Optical Frequency Domain Reflectometry – OFDR*). Захваљујући типу расејања и комбинацији мерних техника, могуће је мерити или детектовати различите величине (истезање и температуру, вибрације или само температурну расподелу) и постићи различиту просторну и временску резолуцију. Мерни систем заснован на стимулисаном Брилуеновом расејању светлости (најчешће коришћен тип расејања светлости) и његова примена у области железничке инфраструктуре описани су у [179, 180]. Закључено је да би овај систем био погодан за детекцију дефеката шине уколико би се побољшала просторна резолуција и брзина аквизиције података.

5 КРУТОСТ ШИНСКЕ ПОДЛОГЕ

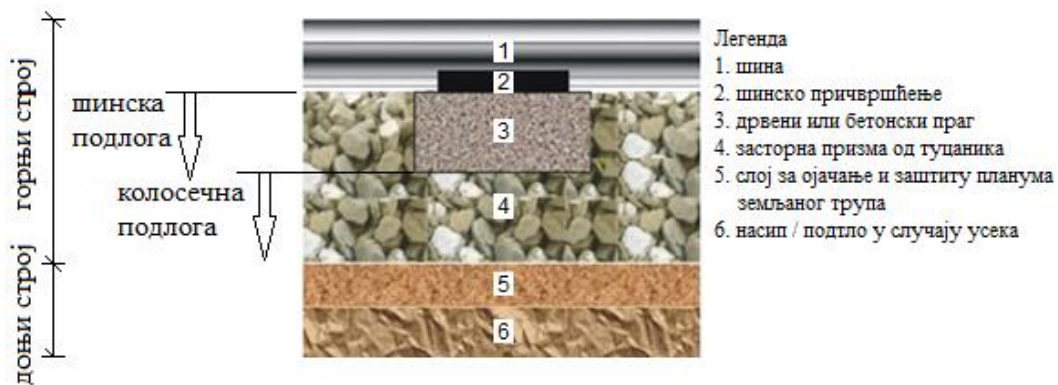
Шинска подлога обухвата све слојеве конструкције испод ножице шине, на које се шина ослања. Крутост шинске подлоге се обично изражава као вертикална крутост, односно као јединични угиб под вертикалном силом и изражава се у kN/mm.

Крутост шинске подлоге је значајан параметар са аспекта пројектовања, грађења и одржавања конструкције горњег и доњег строја железничких пруга. Током животног века колосечне конструкције, крутост шинске подлоге значајно утиче на пропадање геометрије колосека, замор шинског челика и пропадање осталих компоненти конструкције горњег и доњег строја пруге [181].

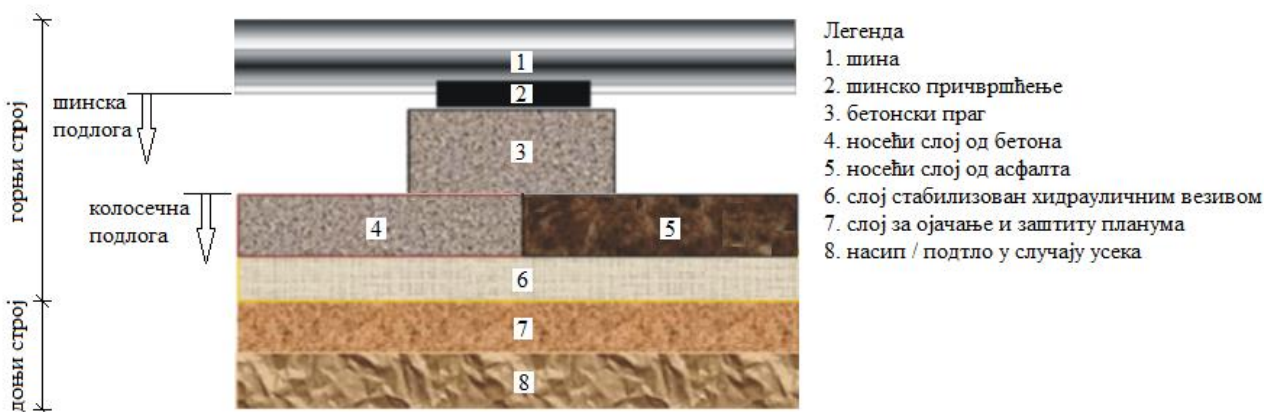
Квалитет геометрије колосека је кључни фактор који одређује удобност и безбедност вожње и утиче на животни век и трошкове одржавања железничке инфраструктуре и возила. Зато су разумевање, правилно дефинисање и избор оптималне вредности крутости при димензионисању конструкције колосека и колосечне подлоге, од изузетног значаја за очување геометрије колосека у прописаним границама толеранције у што дужем временском периоду [181]. Под колосечном подлогом се сматрају сви слојеви конструкције испод доње ивице прага, на које се праг ослања. Колосечна подлога је део шинске подлоге (слика 5.1 и слика 5.2).

Укупна крутост шинске подлоге зависи од крутости појединачних елемената вишеслојне подлоге на коју се шина ослања (слика 5.1 и слика 5.2), а коју у општем случају чине следећи слојеви [182]:

- еластични уметак или еластична шинска подлошка у оквиру система шинског причвршћења (слика 5.3 и слика 5.4),
- праг,
- застор од туцаника (слика 5.1) или бетонски/асфалтни носећи слој и слој стабилизован хидрауличним везивом (слика 5.2),
- слојеви конструкције доњег строја (слој за ојачање планума и заштиту од мрза, земљани насип, бетонска плоча пропуста, горњи строј моста, тунел),
- подтло.



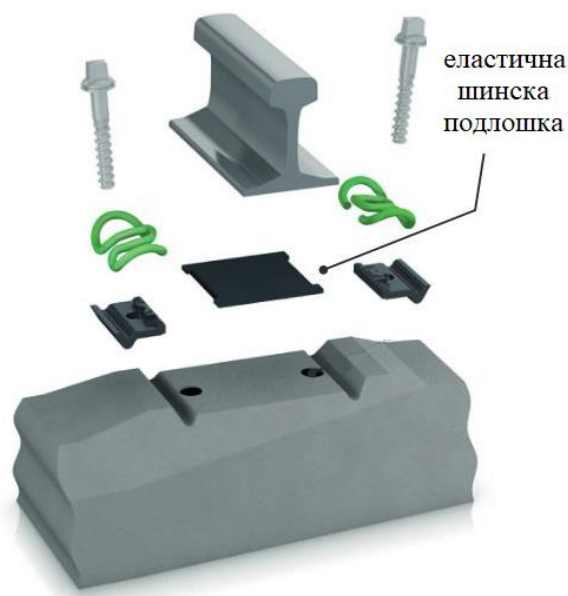
Слика 5.1 Елементи конструкције горњег и доњег строја за колосек у застору од туцаника, шинска и колосечна подлога [182]



Слика 5.2 Елементи конструкције горњег и доњег строја за колосек на чврстој подлози са попречним бетонским праговима на бетонској или асфалтној плочи, шинска и колосечна подлога [182]

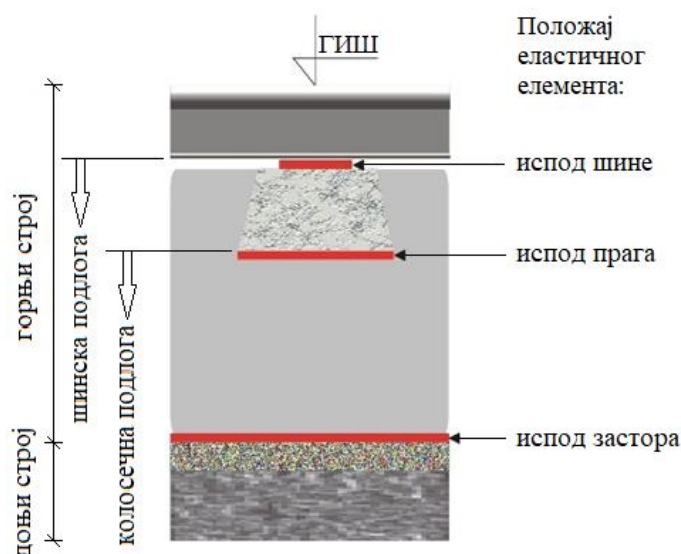


Слика 5.3 Еластични шински уметак у оквиру система шинског причвршћења



Слика 5.4 Еластична шинска подлошка у оквиру система шинског причвршћења

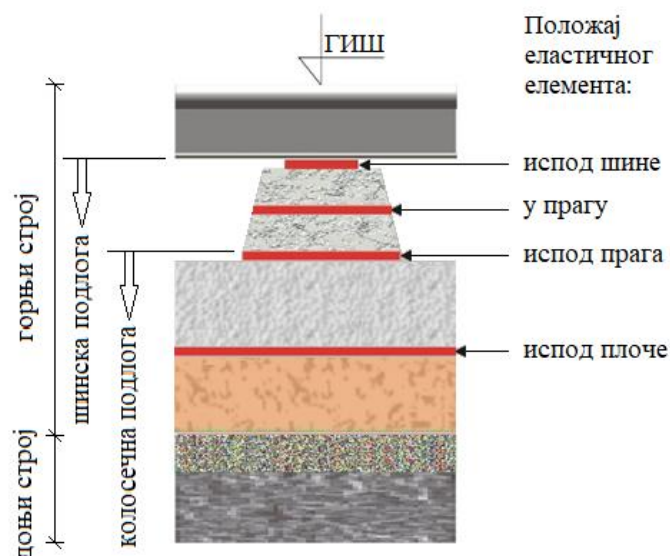
Код конструкције колосека у застору од туцаника, смањење вертикалне крутости постиже се уградњом следећих еластичних елемената: шинског уметка/шинске подлошке, подлошке испод прага и простирке испод туцаничке засторне призме (слика 5.5) [181].



Слика 5.5 Могући положаји еластичних елемената у оквиру конструкције колосека у застору од туцаника [181]

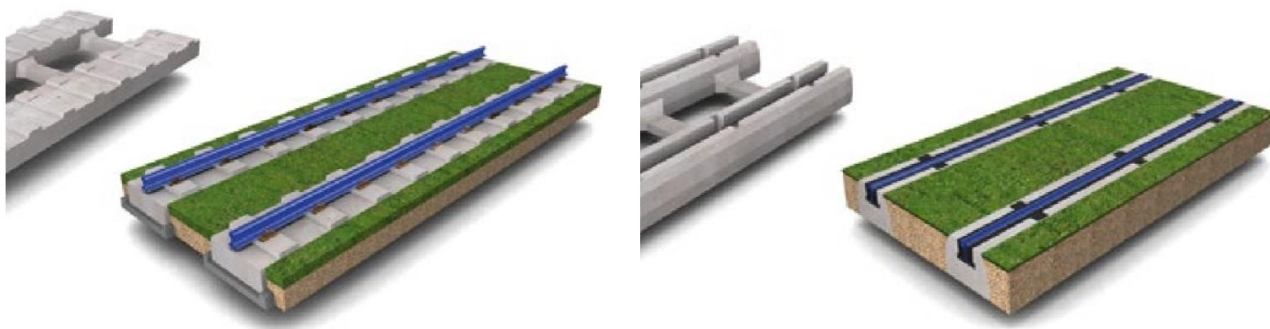
Код конструкције колосека на чврстој подлози, еластични елементи најчешће се налазе у оквиру шинског причвршћења, а могу се наћи унутар или испод прага и испод бетонске плоче (слика 5.6) [182].

Крутост шинске подлоге се разликује у случају статичког и динамичког оптерећења, тако да се у инжењерској пракси користе статичка и динамичка крутост. У случају једнаких интензитета статичке и динамичке силе, статичка крутост је мања у односу на динамичку крутост подлоге јер се због дужине деловања статичке силе остварује већи угиб подлоге.



Слика 5.6 Могући положаји еластичних елемената у оквиру конструкције колосека на чврстој подлози [182]

Ослањање шине на подлогу може бити дискретно (преко система попречних прагова) или континуално (слика 5.7).



Слика 5.7 Пример дискретног (лево) и континуалног (десно) ослањања шине на подлогу [183]

Модел дискретног шинског ослонца и модел шине као греде на континуалној еластичној Винклеровој подлози представљају традиционалне анализе понашања колосека под статичким вертикалним оптерећењем. У моделу дискретног шинског ослонца, крутост шинске подлоге се дефинише као константа опруге, док се у моделу континуалне шинске подлоге крутост означава модулом шинске подлоге [184].

Најопштија дефиниција статичке крутости еластичног шинског ослонца (тзв. константа опруге) изражава крутост k као однос између концентрисане силе у ослонцу Q и угиба шинског ослонца z у пресеку над прагом:

$$k = \frac{Q}{z} \quad (5.1)$$

С обзиром на то да се шински ослонац састоји од више еластичних елемената који су поређани један изнад другог, реципрчна вредност укупне крутости шинског ослонца k једнака је збиру реципрчних вредности појединачних крутости k_i елемената шинске подлоге у пресеку шине над ослонцем:

$$\frac{1}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (5.2)$$

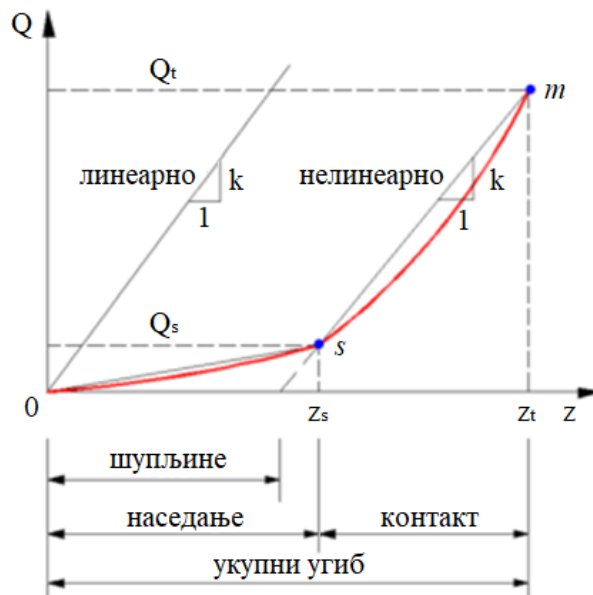
У моделу шине као греде на континуалној еластичној подлози, за карактеризацију укупне крутости колосека користи се модул еластичности шинске подлоге U , који се одређује као однос константе опруге k и осовинског растојања прагова L :

$$U = \frac{k}{L} \quad (5.3)$$

Елементи горњег и доњег строја се у стварности под оптерећењем не понашају ни линеарно, ни потпуно еластично. Познато је да крутост шинске подлошке у систему шинског причвршћења може бити нелинеарна. Такође, испод лоше ослоњених прагова могу постојати празнине (шупљине), које доводе до великих угиба при малом интензитету оптерећења (слика 5.8). Осим тога, при великим вредностима оптерећења, нелинеарност и повећање крутости шинске подлоге су последица збијања туцаничког застора и слојева доњег строја [181, 185]. Да би се узеле у обзир нелинеарности колосечне конструкције (слика 5.9), могу се користити и друге дефиниције крутости колосека, као што су секантна и тангентна крутост.



Слика 5.8 Зависност крутости од квалитета ослањања прага [186]



Слика 5.9 Билинеарна апроксимација дијаграма оптерећење – угиб [185]

На основу слике 5.9, секантну крутост је могуће дефинисати као:

$$k_{s-t} = \frac{\Delta Q}{\Delta z} = \frac{Q_t - Q_s}{z_t - z_s} \quad (5.4)$$

где су:

Q_s – гранично оптерећење („seating load“) након кога се остварује потпуни контакт доње површине прага са горњом површином застора од туцаника [kN],

Q_t – максимално оптерећење [kN],

z_s – гранични угиб након отклањања слабости у оквиру система шинског причвршћења и/или празнина (шупљина) испод прагова [cm],

z_t – укупни угиб [cm].

Тангентна крутост у одређеној тачки се дефинише као:

$$k_{tg,t} = \left. \frac{dQ(t)}{dz(t)} \right|_t \quad (5.5)$$

У литератури се често помиње динамичка крутост $k(f)$ колосека, која се дефинише као однос динамичког оптерећења $Q(f)$ и динамичког угиба $z(f)$ у одговарајућем фреквентном домену:

$$k(f) = \frac{Q(f)}{z(f)} \quad (5.6)$$

За анализу стања колосечне подлоге користи се и реципрочна вредност динамичке крутости $1/k(f)$ која се назива динамичка еластичност (флексибилност) колосека и означава $\alpha(f)$ [181, 184, 187].

$$\alpha(f) = \frac{z(f)}{Q(f)} \quad (5.7)$$

Крутост колосека је још увек неистражена област и у *TSI* се помиње као отворено питање. Отуда честа недоследност у приказивању крутости колосека као вертикалне крутости шинске или колосечне подлоге.

5.1 Мерење крутости колосека

У овом потпоглављу разматрају се методе за мерење крутости колосека, односно вертикалне крутости шинске подлоге или крутости колосечне подлоге. Преглед метода је објављен на међународном конгресу у раду [188].

Мерење стварне крутости колосека је од великог теоријског и практичног значаја за пројектовање нових железничких пруга, реконструкцију постојећих железничких пруга у циљу повећања брзине и/или осовинског оптерећења, као и за планирање радова на одржавању. Резултати мерења крутости могу указати на: (а) узрок пропадања геометрије колосека, (б) узрок појаве и напредовања шинских дефеката, (в) позицију лоше ослоњених прагова, (г) појаву меких слојева у колосечној подлози, (д) променљиву крутост у прелазним зонама, (ђ) вибрације шинске подлоге [39, 187, 189].

Одржавање железничких пруга углавном се заснива на примени метода за инспекцију горњег строја, док је стање доњег строја често непознато и могућа је само ограничена

визуелна инспекција. Лоше стање шинске подлоге може довести до смањења квалитета геометрије колосека, а затим и до повећаног динамичког оптерећења целокупне колосечне конструкције и бржег пропадања геометрије колосека, као и осталих компоненти колосечне конструкције [181, 187, 190].

У истраживању [191] вршено је испитивање утицаја различитих компоненти колосека на модул шинске подлоге. Закључено је да на промену укупног модула шинске подлоге највећи утицај има промена стања слојева доњег строја [191]. Међутим, спровођењем одговарајућих мера одржавања колосека, које најчешће подразумевају подбијање прагова, стабилизацију и чишћење (решетање) застора у циљу кориговања геометрије колосека у оквиру прихватљивих граница, није могуће поправити лоше стање доњег строја. Зато се током експлоатације може понављати пропадање геометрије колосека које је повезано са лошим стањем слојева доњег строја.

Значајан проблем представља и неравномерна крутост шинске подлоге дуж колосека, која има примарни утицај на пропадање геометрије колосека. У основне узроке настанка неравномерне крутости шинске подлоге спадају промена конструкције горњег строја дуж колосека, промена дебљине засторне призме, слоја за заштиту од мраза и слоја за заштиту планума, карактеристике материјала од кога је изграђен насип, влажност, геолошке карактеристике подгла [181].

Генерално, мерење крутости колосека се односи на мерење укупне крутости [184]. Крутост појединачних колосечних компоненти (на пример система шинских причвршћења) се може мерити у лабораторијским условима [192], док се крутост компонената колосечне подлоге може мерити помоћу метода за испитивање на терену или у лабораторијама (на пример узорци тла) [187].

Квазистатичке и динамичке побуде од возила доводе до појаве вибрација и буке које се преносе кроз тло. Квазистатичка побуда је одређена статичком компонентом оптерећења од точка, осовинским растојањем и брзином возила. Са друге стране, динамичке вертикалне силе у додиру точка и шине се јављају услед нерегуларности геометрије колосека (вертикално одступање нивелете колосека, шински дефекти, завари, механички шински спојеви, скретнице и укрштаји, итд), неравномерне крутости дуж колосека (прелазне зоне, лоше ослоњени прагови, пропусти, итд.) и/или неправилног облика точка [64, 66, 189].

Важан аспект ефикасног контролисања нивоа вибрација и спровођења ефикасног одржавања представља коришћење прецизних система за мерење и праћење вертикалне нерегуларности колосека [189]. Постоје различита мерна возила и уређаји за дискретна и континуална мерења крутости колосека.

Дискретна мерења крутости се спроводе помоћу квазистатичког или динамичког осовинског оптерећења. Резултат оваквих мерења је дијаграм угиб – оптерећење, који се може користити за одређивање крутости [193]. Методе за дискретно мерење крутости се углавном примењују за краће деонице, процес мерења траје дужи и захтевају затвор саобраћаја. Такође, оне не могу пружити информацију везану за промену крутости дуж пруге, зато што се примењују локално.

Док се дискретна мерења више користе за потребе истраживања, континуална мерења се користе за потребе одржавања. У већини постојећих метода, мери се померање у вертикалној равни (угиб) које се јавља услед оптерећења од точка, односно осовинског оптерећења [193]. Услед потребе за спровођењем мерења крутости на нивоу железничке мреже, развијене су различите методе и специјална возила за континуално мерење крутости дуж колосека у циљу оптималног управљања одржавањем. Међутим, мали број железничких управа има могућност да обезбеди возила за континуално мерење крутости, првенствено због њихове цене [187].

Уколико се упореде резултати две или више примењених метода на истој деоници колосека, измерене вертикалне крутости колосека се могу разликовати. Различити резултати се могу јавити услед различитих узрока: статичког предоптерећења, фреквенције побуде и брзине возила, просторне резолуције мерних система, модела зависности и степена утицаја нерегуларности геометрије колосека [187, 189, 193].

Информација о крутости шинске подлоге, у великој мери, зависи од анализе измерених података. До сада, не постоје квантитативна истраживања везана за однос крутости колосека и примењеног оптерећења, брзине, као и фреквенције побуде, што представља главни разлог за неадекватну анализу мерних података континуалног мерења крутости шинске подлоге [184].

5.1.1 Методе за дискретно мерење крутости

Дискретно мерење крутости колосечне подлоге подразумева да је мерна тачка унапред изабрана, а затим се укупна крутост може израчунати мерењем померања (угиба) услед вертикалне силе која делује у тој тачки [184].

Крутост колосека се може измерити на основу следећих метода [184, 187]:

- наношењем оптерећења помоћу хидрауличких клипова,
- наношењем оптерећења ударцем маља,
- методом са падајућим тегом (*Falling Weight Deflectometer – FWD*),
- методом наношења оптерећења помоћу возила (*Track Loading Vehicle – TLV*),
- *PANDA* уређајем,
- коришћењем различитих врста сензора (уређаја) – мерне траке, акцелерометри, претварачи померања итд.

Код методе наношења оптерећења помоћу хидрауличких клипова, одређена сила делује на шину, док се угиб шине мери помоћу мерача угиба (слика 5.10). Резултат мерења је дијаграм сила – угиб. Укупна крутост колосека се може израчунати у складу са дефиницијама секантне или тангенте крутости [181, 184].

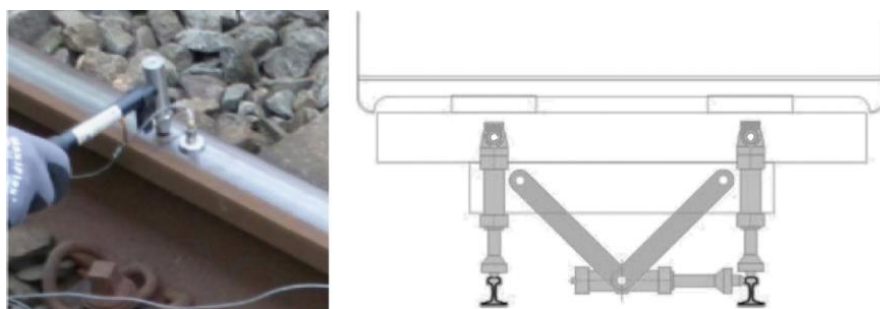
Применом методе наношења оптерећења ударцем маља, вибрације колосека се мере помоћу акцелерометара постављених на шину или прагове након што се импулс оптерећења нанесе на шину помоћу маља (слика 5.11, лево). Двоструком интеграцијом дијаграма вибрација може се одредити динамичка еластичност (флексибилност) [194]. Метода ударца помоћу маља може да обухвати опсег фреквенција од 50 Hz – 1500 Hz, у зависности од материјала главе маља. Глава маља од меке гуме је погодна за ниже фреквенције у односу на ону од метала. Метода ударца помоћу маља није поуздана за фреквенције ниже од 50 Hz [184].



Слика 5.10 Хидраулички клип за наношење оптерећења и мерач угиба [184]

Иако се *FWD* уређај (угибометар са падајућим тегом) користи за дискретна мерења крутости, мерења се изводе на брз и једноставан начин. У методи *FWD*, маса пада на подметач постављен на прагу. У исто време мери се одзив у виду вибрација. Стандардна *FWD* метода користи падајући тег тежине 125 kN, који пада на праг са познате висине. Сматра се да је утицај овог система оптерећења на колосек сличан осовинском оптерећењу од воза који саобраћа великом брзином. Одзив у виду вибрација колосека се обично мери претварачима брзине или геофонима [184, 187, 194].

TLV возило користи сопствену тежину за оптерећење колосека помоћу хидрауличких клипова. У поређењу са методом за наношење оптерећења помоћу хидрауличких клипова, ова метода је лакша за извођење и може да обезбеди већу вертикалну силу. Шведско *TLV* возило има тежину 49 t и може статички да оптеретити сваку шину до 150 kN и динамички до 200 Hz (слика 5.11, десно). Основна предност *TLV* возила за дискретно мерење у односу на мерења помоћу возила у покрету је да предоптерећење, динамичко оптерећење и опсег фреквенције могу варирати у већој мери. Међутим, процес мерења траје дужи и захтева затвор пруге [184, 194].



Слика 5.11 Метода наношења оптерећења ударцем маља (лево) и шведско *TLV* возило (десно) [184]

Испитивање пенетрације (статичко или динамичко) се користи широм света. За одређивање локалне крутости колосека може се користити *PANDA* уређај, који представља пенетрометар којим се одређује отпор слојева колосечне подлоге на утискивање конуса (слика 5.12). Мерењима на терену помоћу *PANDA* уређаја у комбинацији са ендоскопијом, могуће је идентификовати различите слојеве колосечне подлоге, њихове дебљине и отпорности на утискивање се могу повезати за сваки слој [187].



Слика 5.12 *PANDA* уређај [195] и идентификација слојева помоћу ендоскопије [196]

Угиб колосека се такође може мерити методом праћења брзине честица, корелацијом дигиталне слике, као и различитим конвенционалним сензорима, оптичким сензорима, геофонима, уређајима за истовремено мерење угиба на више дубина (*Multi-Depth Deflectometers – MDD*) (слика 5.13) и диференцијалним индуктивним трансформаторским претварачима (*Linear Variable Differential Transformers – LVDT*) (слика 5.14) [197].



Слика 5.13 Уређај за истовремено мерење угиба на више дубина [198]



Слика 5.14 Диференцијални индуктивни трансформаторски претварач (LVDT) [198]

Мерења помоћу сензора у виду мерних трака су се првобитно сматрали најтачнијим начином детекције динамичког оптерећења и брзине возова, иако су поседовали извесне недостатке (електромагнетне сметње, крхкост, прекомерна величина и велика зависност од температуре). Сензори под називом *MPQY (Multi-Purpose Q and Y load detector)*, који се састоје од мерних трака директно залепљених на посредни уређај, могу се поставити на врат шине и пружају могућност истовременог мерења вертикалних, бочних и подужних сила које делују на шину (слика 5.15, лево). Савремени сензори се ефикасно примењују у праћењу различитих инжењерских конструкција. Њихове предности су велики топлотни капацитет, мултиплексирање и отпорност на електромагнетне сметње [197].

За мерење угиба колосека користе се различите врсте покретних претварача. Иако претварачи померања доприносе само мерењу релативног померања, акцелерометри представљају најчешће коришћене типове претварача апсолутног померања због њихове једноставне монтаже, као и њихових великих динамичких и фреквентних распона. Поред тога, могу се користити геофони (сеизмички сензори) који имају бројне предности, као што су могућност мерења великих амплитуда померања, једноставно напајање, мала цена итд. Одговарајући угиб шинске подлоге се добија кроз узастопне интеграције (двоструки интеграл за акцелерометре и једноструки интеграл за геофоне), као што је приказано на слици 5.16. Такође, за одређивање угиба шина може се користити мерење брзине помоћу

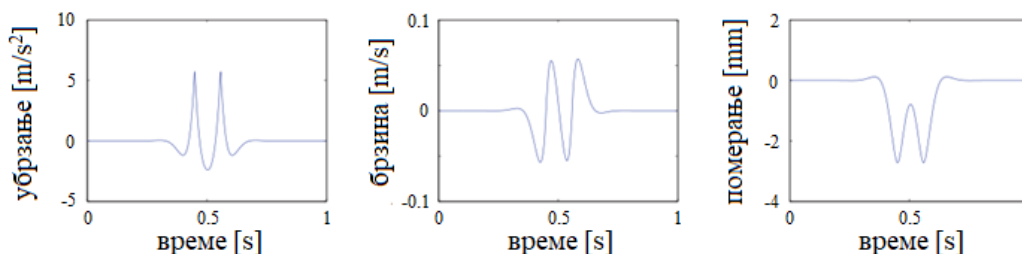
Доплеровог ефекта, као и видео камере велике брзине. Ове две методе коштају значајно више, у поређењу са геофонима [197].

Употреба акцелерометара у комбинацији са ефикасном обрадом сигнала, нуди елегантну алтернативу континуалном мерењу померања. Модерни акцелерометри попут микро електромеханичких система (*Micro Electro-Mechanical Systems – MEMS*) представљају интересантне и економски одрживе претвараче, који се заједно са другим врстама сензора (инклинометри, мерне траке, сензори за растојања) могу повезати у компактне системе за једноставно праћење стања железничке инфраструктуре коришћењем бежичне мреже [197].

Директно мерење угиба шине помоћу сензора са ласерским зраком и индиректно мерење угиба помоћу геофона на пружи за велике брзине у Шпанији (деоница Мадрид – Барселона), описани су у [187]. Пријемник ласерског зрака и геофон су причвршћени за ножицу шине, један поред другог (слика 5.15, десно). Након обраде сигнала, утврђено је да су максималне амплитуде померања измерене помоћу геофона одговарале вредностима амплитуда добијених помоћу ласерског система.



Слика 5.15 МРQУ сензор (лево) [199] и геофон и пријемник ласерског зрака причвршћени за ножицу шине (десно) [187]



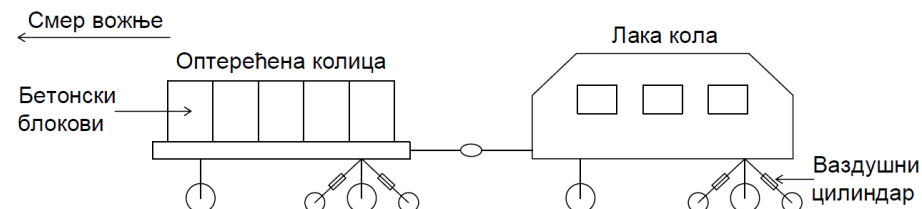
Слика 5.16 Убрзање (а), брзина (б) и вертикално померање (в) услед пролаза осовинског склопа обртног постоља возила [197]

5.1.2 Методе за континуално мерење крутости

Док се методе за дискретно мерење крутости примењују за мерења на нивоу деонице колосека, методе за континуално мерење крутости се користе за мерења на нивоу железничке мреже.

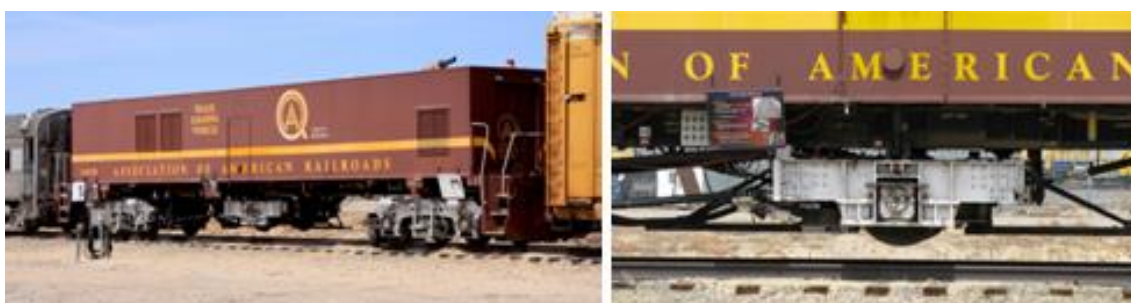
Кинеска академија наука за област железница (*China Academy of Railway Sciences – CARS*) је међу првима развила возило за континуално мерење статичке крутости. Возило се састоји од оптерећених колица и лаких кола на крају возила (слика 5.17). Осовинско оптерећење се може мењати помоћу одговарајућег броја бетонских блокова до максималних 250 kN. На тај начин, може се добити утицај различитих осовинских оптерећења на измерене

результате. Лака кола имају тежину од 40 kN и користе се да би се смањило утицај нерегуларности геометрије колосека на мерење крутости. Возило може да се креће брзинама до 60 km/h и мери геометрију колосека методом тетиве. Угиб измерен услед малог оптерећења представља нерегуларност геометрије колосека, а разлика између измерених угиба под оптерећењем од тешких и лаких кола представља флексибилност колосека. Детаљнији приказ овог возила је описан у [184, 187].



Слика 5.17 CARS возило за континуално мерење крутости [187]

Центар за транспортну технологију у општини Пуебло у Колораду (*Transportation Technology Center, Inc. – TTCI*) развио је возило за мерење бочне и вертикалне статичке крутости при дискретном мерењу, као и при кретању брзином до 16 km/h. Принцип рада је заснован на методи тетиве, где се користе различита осовинска оптерећења, како би се направила разлика између нерегуларности геометрије колосека и угиба колосека. Као што је приказано на слици 5.18, ово возило се састоји од тешких кола, лаких кола, и вучне локомотиве. Тешка кола имају централни (пети) осовински склоп, који се може оптеретити хидраулички (вертикално и бочно) у опсегу између 4 kN – 267 kN. Оптерећење од лаких кола је мање и износи 13,3 kN. Крутост се мери при оптерећењу до 44 kN или до 178 kN, а нерегуларност геометрије колосека до 8,9 kN. Уколико возило саобраћа два пута, под оптерећењем од 178 kN, мерење померања обухвата колосек и колосечну подлогу, док мерење под оптерећењем од 44 kN обухвата шине, прагове и застор [184, 187, 200]. У случају тестирања са само једним пролазом возила, мерења се врше под празним колима. Ова кола су опремљена централним обртним постољем које може да примени оптерећење од 9 kN. Угиб измерен услед малог оптерећења представља нерегуларност геометрије колосека, а разлика између угиба измерених под мањим и већим оптерећењем представља флексибилност колосека [187].



Слика 5.18 TTCI возило за мерење крутости шинске подлоге [201]

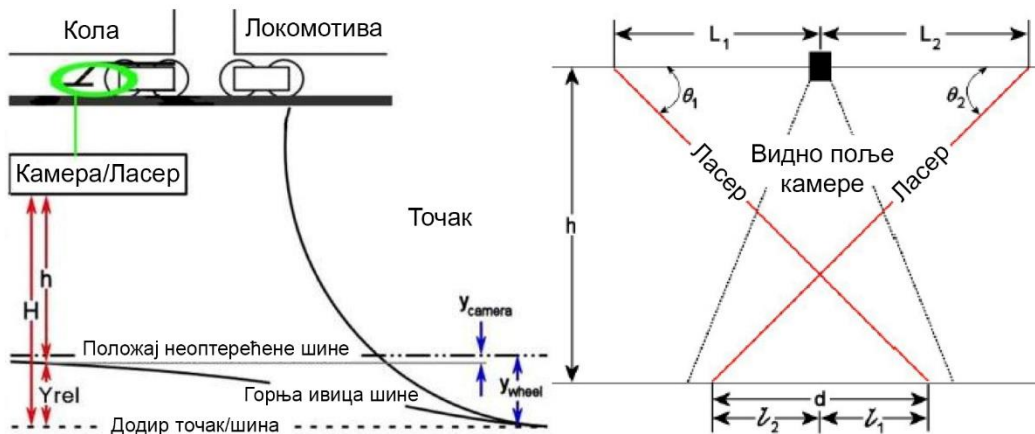
Брзина возила за континуално мерење статичке крутости које су развиле Швајцарске железнице (*Schweizerische Bundesbahnen – SBB*) износи 10 km/h – 15 km/h (слика 5.19, лево). Метода мерења се састоји у мерењу релативног угиба колосека између лаких и тешких кола. Због веома малог осовинског оптерећења, угиб колосека настао под лаким колима може се занемарити. Осовинско оптерећења тешких кола је 200 kN. Мерења се обично не користе за детекцију неослоњених прагова, али постоје испитивања нерегуларности већих таласних дужина насталих услед варијација у својствима тла, на мостовима, као и услед утицаја

еластичних подлошки испод прагова, итд. За добијање криве угиба, обично се примењују нископропусни филтери. Разлог за њихову примену је да и јако мала одступања од правилног облика точка знатно утичу на резултате мерења [189].

Компанија *M-Rail* је комерцијализовала методу развијену од стране Универзитета Небраска у Линколну (*University of Nebraska at Lincoln – UNL*). Мерно возило користи два ласерска извора за мерење релативног угиба шине, који су постављени на обртно постоље (слика 5.19, десно). Принцип мерења је приказан на слици 5.20. Релативни угиб се мери помоћу два ласера и камере која мери растојање (d) између две линије ласера. Како се сензор помера (ближе или даље) у односу на горњу површ главе шине, растојање између линија ласера се мења. Измерени угиб и модул колосека/крутост се доводе у везу на основу модела Винклерове подлоге [184, 187, 189].

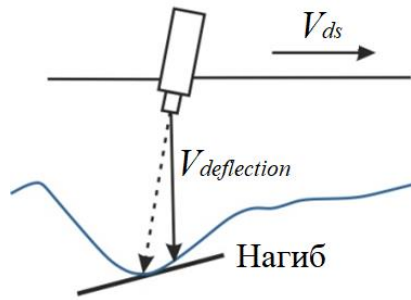


Слика 5.19 SBB возило за мерење крутости колосека (лево) [184, 189] и поставка UNL мерног система на возило (десно) [184]



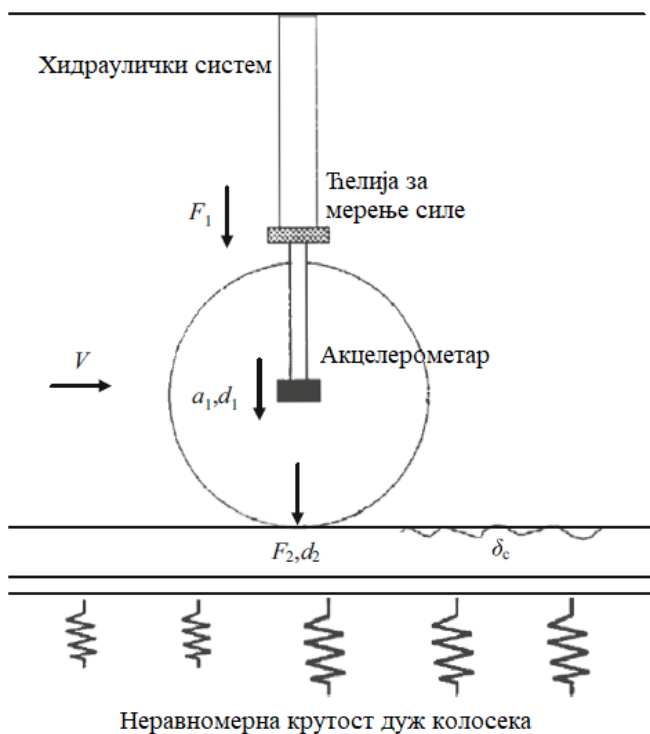
Слика 5.20 Шематски приказ UNL мерног система [194, 200]

Универзитет Вухан у Кини (*ZOYON Technology Co., Ltd of Wuhan University*) и Технички универзитет у Делфту у Холандији развили су методу засновану на мерењу брзине деформације у циљу њене примене у возилима за мерење крутости. Према овој методи, однос промене вертикалног угиба колосека у јединици времена у једној тачки ($V_{deflection}$) и брзине померања оптерећења дуж колосека (V_{ds}) представља нагиб линије угиба колосека у тој тачки (слика 5.21). За мерење брзине угиба колосека користи се дефлектограф велике брзине. Принцип мерења се заснива на ласер Доплер сензорима, који су повезани са железничким возилом које се може кретати брзином до 130 km/h. Међутим, ова метода за мерење статичке крутости има ограничену примену, јер не узима у обзир утицај нерегуларности геометрије колосека [184].



Слика 5.21 Мерни принцип ZOYON методе [184]

Циљ *Eurobalt II* (*EUropean Research for an Optimised BALLasted Track*) пројекта, који је спровела шведска управа за железнице (*Banverket*), био је развој колица за континуално мерење квазистатичке и динамичке вертикалне крутости колосека (слика 5.22). Статичко оптерећење ових колица је 60 kN, динамичко оптерећење 20 kN, а максимална брзина износи 30 km/h. Колица не могу да се користе у кривинама радијуса мањег од 1200 m или у скретницама. Ова колица могу бити побуђена са различитим фреквенцијама, али за сваки наилазак само са једном фреквенцијом [184, 194]. У истраживању [202], спроведена су испитивања помоћу ових колица применом различитих комбинација фреквенције побуде и брзине, како би се потврдила поновљивост резултата мерења. Пронађена је значајна корелација између крутости колосека и геотехничких услова подлоге [194, 202].



Принцип рада базира се на:

1. Равнотежи вертикалних сила ($F_2 = F_1 - ma_1$)
2. Двострукој интеграцији убрзања ($d_1 = DIa_1$)
3. Укупном угибу шине који узима у обзир и утицај од нерегуларности геометрије колосека ($d_2 + \delta_c$)
4. Филтрирању сигнала у уском опсегу око фреквенције побуде ($F_{2\text{Filt}}, d_{2\text{Filt}}$)
5. Занемаривању утицаја од нерегуларности геометрије колосека δ_c
6. Пребацивању зависности од времена у зависност од положаја (дуж x осе)
7. Прорачуну крутости ($k = F_{2\text{Filt std}} / d_{2\text{Filt std}}$)

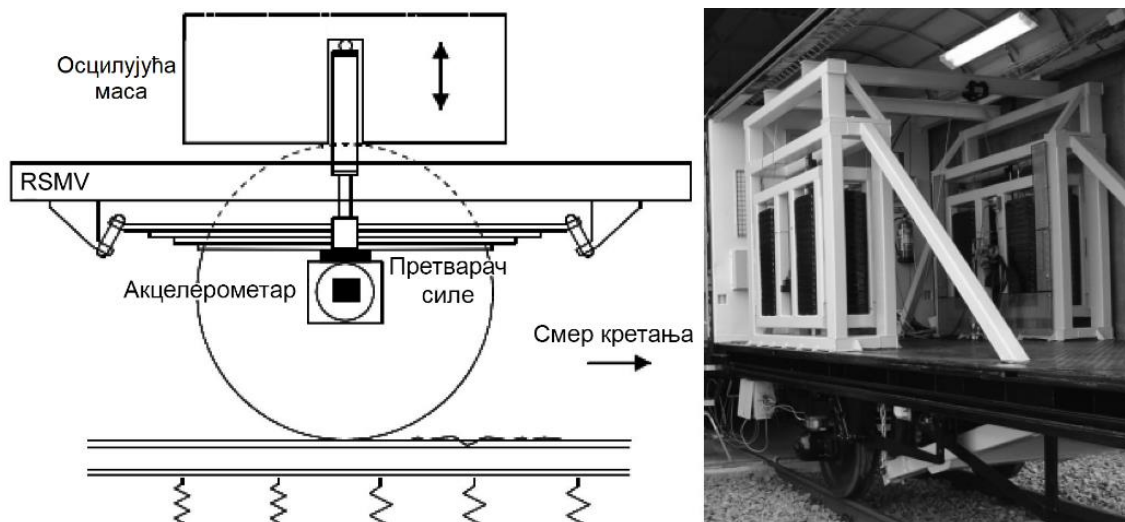
DI - двострука интеграција

Std - усредњавање вредности на дужини прозора од 3m који клизи дуж x осе

Слика 5.22 Принцип мерења помоћу колица за континуално мерење крутости [184]

Након развоја претходно поменутих колица, *Banverket* и Краљевски институт за технологију (*KTH*) у Шведској су започели нови истраживачки пројекат. Циљ пројекта је био да се побољша постојећа мерна техника кроз развој новог возила под називом *RSMV* (*Rolling Stiffness Measurement Vehicle*) и укаже на постојање везе између крутости колосека и пропадања/одржавања стања колосека [194]. Помоћу овог возила мере се квазистатичке и динамичке вертикалне крутости колосека. *RSMV* представља обновљена двоосовинска теретна кола са уграђеном опремом за наношење оптерећења и мерење (слика 5.23).

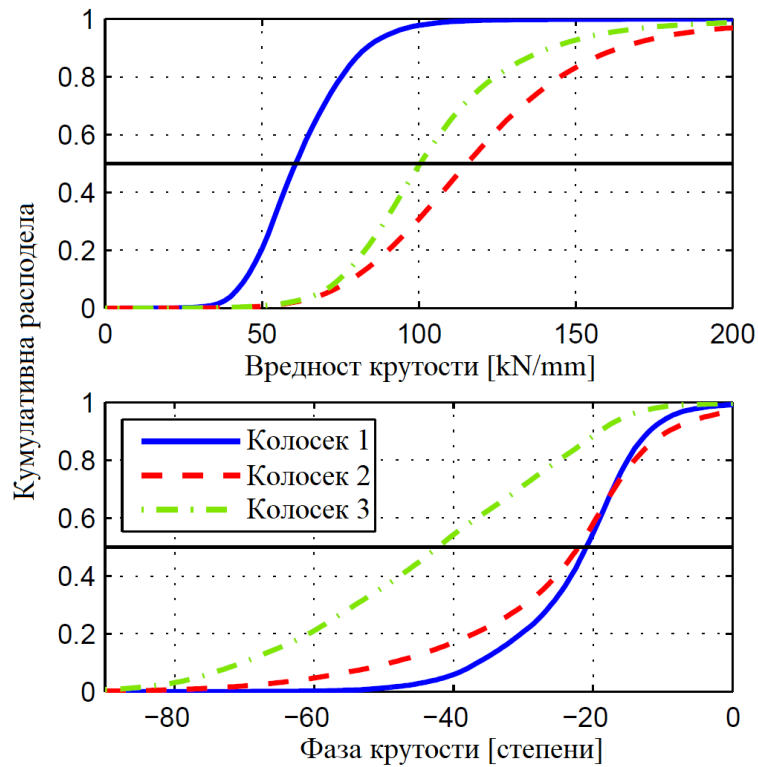
Динамичка побуа колосека током кретања возила се остварује помоћу две осцилујуће масе (по 4 t) изнад једног осовинског склопа. Минимално статичко осовинско оптерећење је 180 kN, док максимална амплитуда динамичког осовинског оптерећења износи 60 kN. RSMV може да мери динамичку крутост колосека при фреквенцијама до 50 Hz. Могуће је извести мерења брзином до 50 km/h, као и детаљна испитивања при брзинама до 10 km/h. Просторна резолуција зависи од комбинације брзине мерења и фреквенције побуа [184, 187, 189]. Главна предност коришћења описаног возила за испитивање вибрација које се преносе кроз тло је његова способност да детектује резонантне фреквенције деонице колосека на меком тлу [189].



Слика 5.23 Принцип мерења и опрема возила под називом RSMV [184]

Резултати мерења крутости три различита типа колосека помоћу RSMV возила описани су у [189, 203]. Колосек 1 представља деоницу са дрвеним праговима, колосек 2 је деоница са бетонским праговима и мањим бројем дрвених прагова, комбинацијом меких и крутих шинских подлошки, док колосек 3 чине бетонски прагови и меке шинске подлошке. Када се пореде вредности крутости за сва три колосека, уочава се њихова значајна варијација (слика 5.24, горе). Колосек 1, са добрим стањем доњег строја, има изразито ниже вредности крутости у поређењу са друга два колосека. Када се посматра фаза крутости, уочава се значајно одступање у случају колосека 3 (слика 5.24, доле). Дуж доњег строја овог колосека заступљене су зоне од глиновитог материјала, па се јављају велика фазна кашњења крутости при динамичкој побуа.

У оквиру *Innotrack* пројекта [204], француски истраживачки центар (*Centre d'Experimentation et de Recherche – CETE*) и инжењерски одсек националног друштва француских железница (*Engineering Department of SNCF*) су развили *Portancemetre* возило са вибрирајућим осовинским склопом за мерење динамичке крутости колосека. Мерно возило се састоји из два дела, мерног система и кола са пратећом техничком опремом (слика 5.25, лево). Статичко оптерећење овог возила може да варира између 70 и 120 kN, док се максимална амплитуда динамичког оптерећења може повећати до 70 kN. Поменуто возило може мерити крутост услед побуа колосека помоћу фреквенције до 35 Hz. Како би било могуће измерити хистерезис криву оптерећење – угиб, максимална брзина мерења не може бити велика и износи око 15 km/h. Мерни систем возила је опремљен следећим сензорима (слика 5.25, десно): акцелерометрима неогибљене масе (вибрирајући осовински склоп), акцелерометрима огибљене масе, фазним сензорима и енкодером за мерење пређеног растојања [184, 187, 190].



Слика 5.24 Кумулативна расподела динамичке крутости колосека за три различита колосека [189, 203]

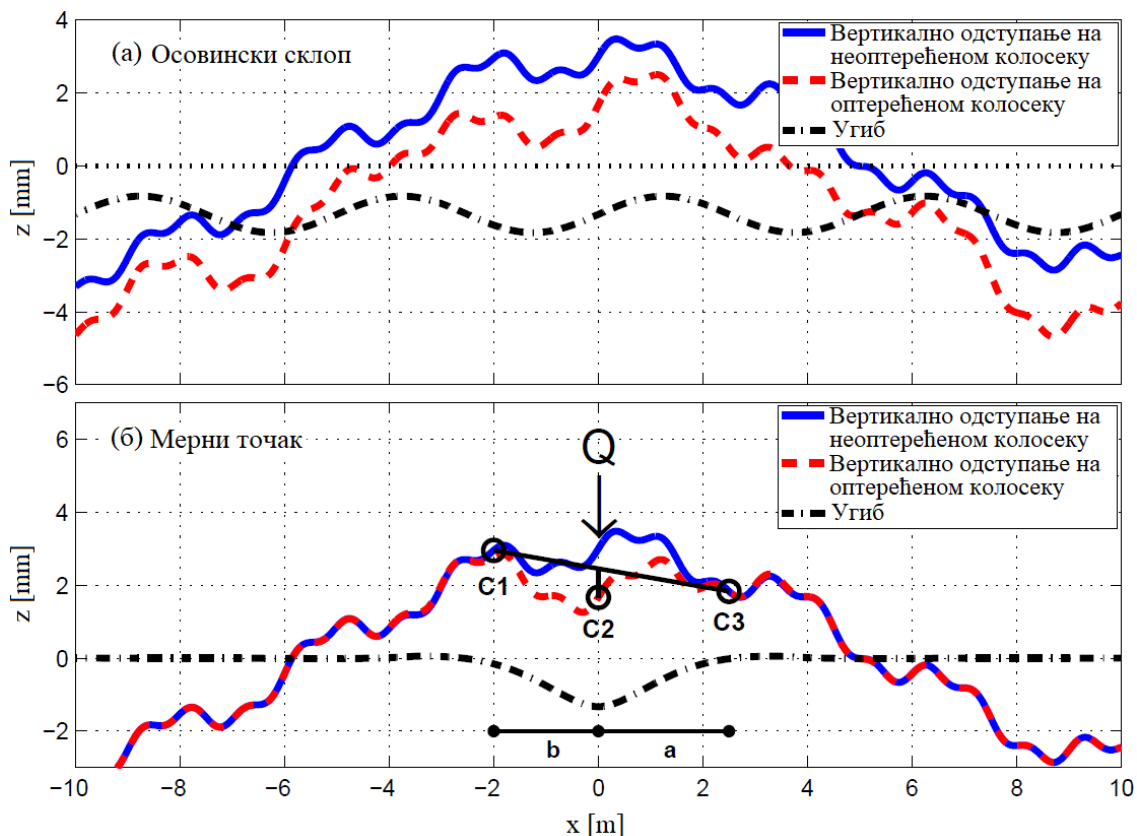


Слика 5.25 Шематски приказ Portansemetre возила и поставка возила за извођење мерења на терену (лево), поставка сензора мерног система возила (десно) [190]

EnSCO и Volpe National Transportation System Center, уз подршку савезне управе за железницу FRA (Federal Railroad Administration) спровели су истраживање са идејом да се две осовине различитих статичких оптерећења опреме акцелерометрима. Систем је сличан мерним системима из Кине, TTCI и SBB. Мерни систем је доста једноставнији и са развојем технологије сензора може се добити довољна тачност мерења [187].

EVS (EBER Vertical Stiffness) метода се заснива на чињеници да се мерење геометрије колосека (*longitudinal level*) под оптерећеном осовином састоји из два дела. Први део се односи на нерегуларност геометрије неоптерећеног колосека (плава линија на слици 5.26а), а други део се односи на угиб услед оптерећене осовине (црна линија на слици 5.26а). На тај

начин, параметар геометрије колосека за оптерећен колосек (црвена линија на слици 5.26а) се одређује као збир параметра геометрије неоптерећеног колосека и угиба услед оптерећења. Такође, мерења се могу спровести и помоћу методе тетиве. На слици 5.26б приказан је пример угиба колосека под оптерећеним мерним точком (C2), који се налази између спољашњих лакше оптерећених мерних тачкова (C1 и C3). *EVS* метода има за циљ раздвајање геометрије неоптерећеног колосека од геометрије оптерећеног колосека, како би се смањило утицај нерегуларности геометрије неоптерећеног колосека на мерење крутости. Ова метода је имплементирана на *Infranord* возило *IMV100*, које има могућност извођења мерења брзином до 100 km/h. Показало се да је метода погодна за детекцију великих промена крутости колосека услед лошег ослањања прагова [189].



Слика 5.26 Пример одређивања угиба колосека услед оптерећења осовинским склопом (а) и мерним тачком (б) [189]

5.2 Геофизичке методе за посредно утврђивање крутости

У експерименталном делу Дисертације (Поглавље б) коришћене су две геофизичке методе за посредно утврђивање стања колосечне подлоге:

- електрометријска метода техником профилисања,
- сеизмометријска метода техником профилисања.

Поред теоријског описа обе методе, детаљно је описан поступак мерења и приказана је анализа резултата мерења. Посебно је разматрана корелација резултата детаљне визуелне инспекције шинских дефеката и посредно утврђеног стања колосечне подлоге.

Поменуте геофизичке методе су изабране на основу параметара које дају, а који омогућују посредно утврђивање стања колосечне подлоге. Примена обе методе задовољава

захтеве савременог комплексног приступа геофизичких мерења с обзиром на то да се дефинисани модел подлоге добија у мултипараметарском облику.

У случају електрометријске методе се на основу специфичне електричне отпорности може утврдити разлика и стање слојева колосечне подлоге. У том смислу користи се својство да слој туцаника који садржи шупљине између зрна испуњене ваздухом има високу специфичну електричну отпорност, док глине у слојевима подлоге, као и садржај воде између зрна материјала (туцаник, шљунковито–песковити и земљани материјали) имају ниску отпорност.

У случају сеизмометријске методе се на основу брзине простирања сеизмичких таласа посредно утврђују карактеристике и стање слојева колосечне подлоге. Сеизмички таласи се простиру великом брзином у материјалима велике густине и чврстоће, а малом брзином у меким и слабо консолидованим материјалима.

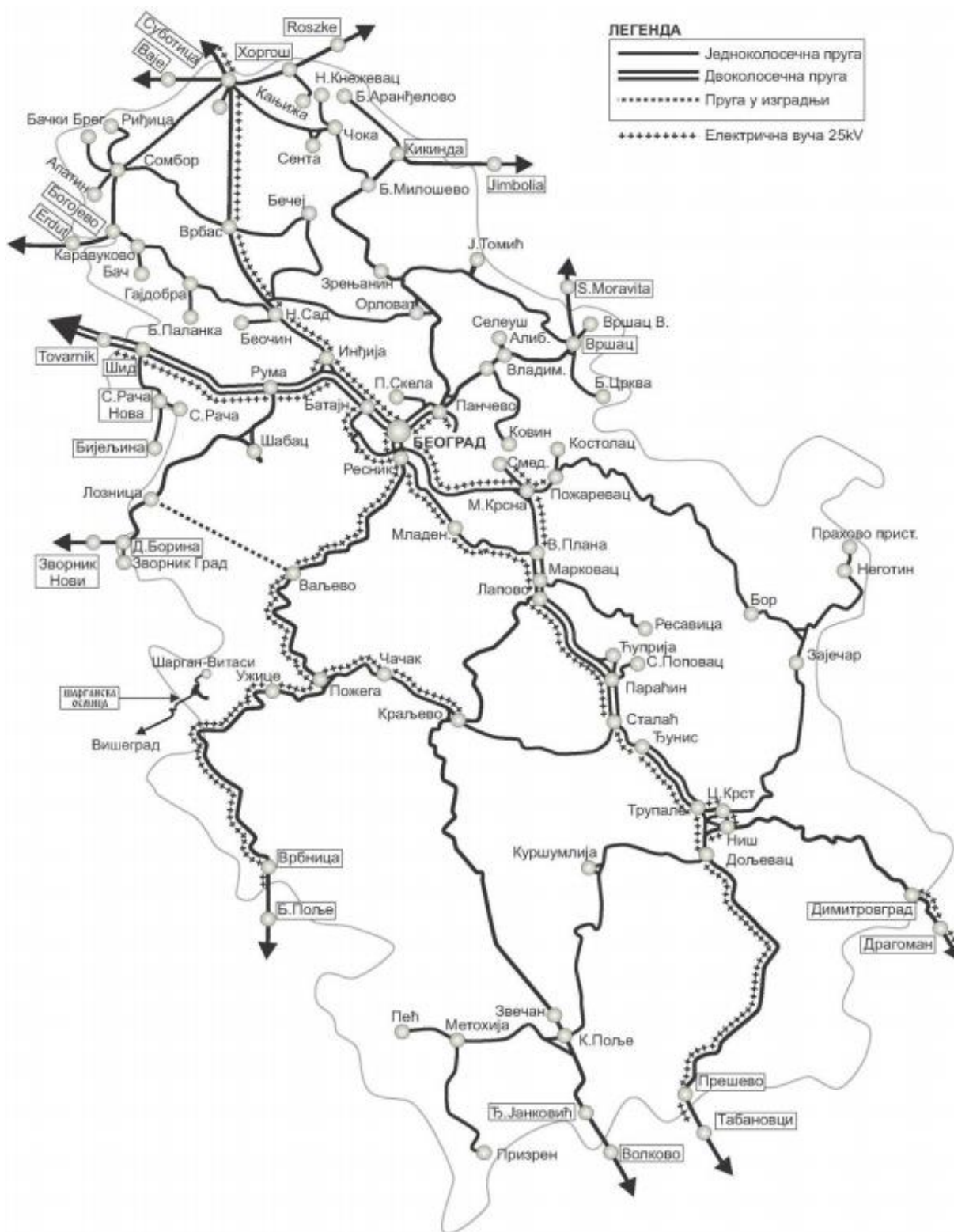
6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО ИСТРАЖИВАЊА – УТИЦАЈ СТАЊА КОЛОСЕЧНЕ ПОДЛОГЕ НА ПОЈАВУ *SQUAT* ДЕФЕКТА

У овом Поглављу су приказани резултати експерименталних истраживања спроведених у станици Панчево Варош применом метода без разарања са циљем да се утврди утицај крутости колосечне подлоге на појаву и развој шинских дефеката типа *squat*.

6.1 Опис мерне деонице

Експериментални део истраживања обухвата визуелну инспекцију *squat* дефеката и геофизичка испитивања доњег строја без разарања у станици Панчево Варош на магистралној прузи Београд Центар – Панчево Главна – Вршац – граница Румуније. На слици 6.1 приказана је мрежа железничких пруга у Републици Србији које су обухваћене Националним програмом за период од 2017. до 2021. године, којим се утврђују планови изградње нове, реконструкције и одржавања постојеће железничке инфраструктуре у складу са одредбама Закона о железници [205]. Овим програмом обухваћени су инфраструктурни пројекти које је потребно реализовати у циљу повећања безбедности и ефикасности железничког саобраћаја, унапређења приступачности железничке инфраструктуре и заштите животне средине. На слици 6.1 се види положај поменуте пруге на мрежи Србије, која је од станице Панчево Главна до границе са Румунијом једноколосечна.

Магистрална пруга Београд Центар – Панчево Главна – Вршац – граница Румуније дужине 102 km припада источном/источно–медитеранском коридору (Рута R4 на слици 6.2), односно део је правца Јадран – Румунија. Рута R4 повезана је са Коридором X.

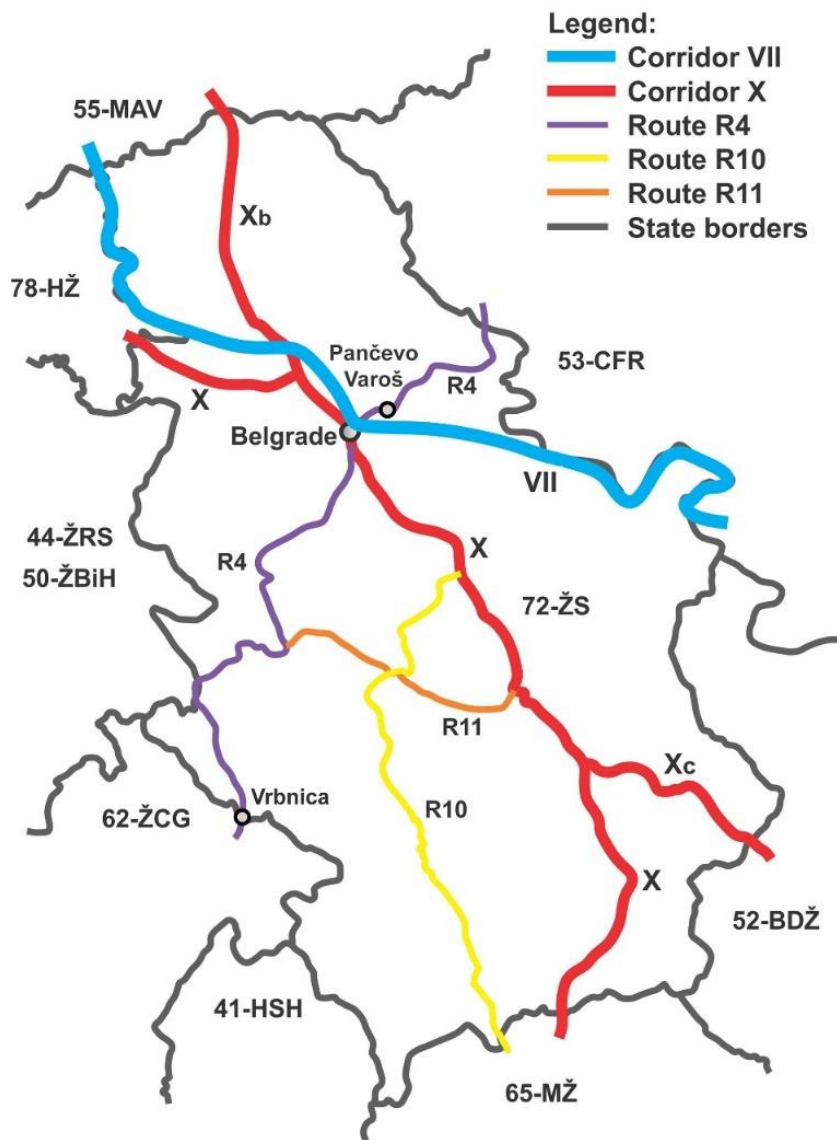


Слика 6.1 Мрежа железничких пруга у Републици Србији према [205]

Последња реконструкција станице Панчево Варош била је 1992. године и укључивала је израду тампон слоја и нову конструкцију горњег строја станичних колосека. У периоду од 2017. до 2021. године планиране су активности на пројекту реконструкције, модернизације и електрификације постојеће деонице пруге Панчево Главна – Вршац – граница Румуније за брзине до 120 km/h [205]. Планирана реконструкција треба да укључи израду другог колосека од станице Панчево Главна до границе са Румунијом. Ова реконструкција у

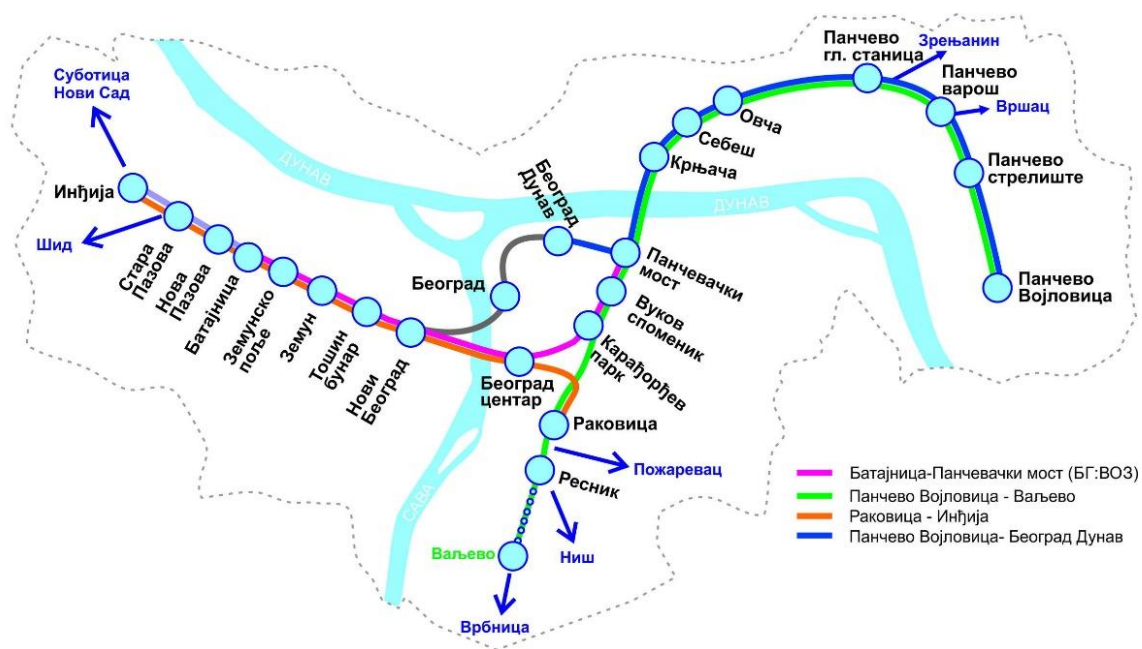
станици Панчево Варош подразумева испуњавање захтева приступачности, замену тампон слоја и целокупне конструкције горњег строја. Ова станица ће планираном реконструкцијом добити нову улогу у путничком подсистему Панчевачког железничког чвора.

Станица Панчево Варош је међустаница на прузи Београд Центар – Панчево Главна – Вршац – државна граница (Стамора Моравита). Ова станица је уједно и одвојна станица локалне пруге Панчево Варош – Панчево Војловица, као и регионалне пруге Панчево Варош Распутници 2А (Јабука), која се повезује са регионалном пругом Панчево Главна станица – Зрењанин – Кикинда – државна граница (Jimbolia).



Слика 6.2 Позиција станице Панчево Варош на железничкој мрежи Републике Србије

Дуги низ година ова станица је имала значајну улогу у приградском саобраћају на релацији Београд – Панчево. У периоду од 1992. године до 2017. године, станица Панчево Варош служила је и за пријем и отпрему путничких возова који су саобраћали на линији приградске железнице (Беовоз). Током година, улога станице у приградском саобраћају се мењала. Након 2002. године, приградски путнички возови су саобраћали на релацији од станице Панчево Војловица до Дунав станице (слика 6.3) у тактном систему на 60 минута. Нажалост, данас не саобраћају Беовозови на релацији Панчево – Београд, тако да је станица изгубила улогу у приградском саобраћају.



Слика 6.3 Линије Беовоза у периоду од 2002. године до децембра 2017. године [206]

Станица Панчево Варош је отворена за:

- пријем и отпрему путника,
- пријем и отпрему колских пошиљака у унутрашњем и међународном саобраћају,
- увозно – извозно царинење пошиљака.

У станици Панчево Варош постоји укупно 8 колосека, који су нумерисани у растућем низу у смеру од станичне зграде (слика 6.4):

- колосек број 1 је манипулативни и служи за утовар и истовар колских пошиљки,
- колосек број 2 је главни пролазни колосек за пругу Панчево Главна – Панчево Војловица,
- колосек број 3 је главни пролазни колосек за пругу Панчево Главна – Вршац,
- колосеци број 4 и 5 су пролазни колосеци,
- колосеци број 6, 7 и 8 су радионички.



Слика 6.4 Колосеци 1, 2, 3 и 4 у станици Панчево Варош (путничка гарнитура на колосеку број 2 и теретни воз на колосеку број 4)

Пријемно–отпремну групу колосека за путничке возове чине колосеци број 2 и 3. У изузетним условима колосек број 1 се користи за пријем путничких возова. Пријемно–

отпремну групу колосека за све теретне возове чине колосеци број 4 и 5. Радионички колосеци број 6, 7 и 8 су слепи колосеци и повезани су скретницом број 8 са колосеком број 5. У станици Панчево Варош електрифицирани колосеци у станици су колосеци број 1, 2, 3, 4 и 5.

Испред станичне зграде за потребе уласка и изласка путника у воз налазе се три ниска станична бетонска перона, чија је стационажа дата по прузи Београд Центар – Панчево Главна станица – Вршац – државна граница:

- уз први колосек први ниски станични перон од km 18+131,00 до km 18+223,00, ширине 1,60 m,
- између првог и другог колосека налази се други ниски станични перон од km 18+105,00 до km 18+345,00, ширине 1,60 m,
- између другог и трећег колосека налази се трећи ниски станични перон од km 18+100,00 до km 18+364,00, ширине 1,60 m.

У оквиру наредне реконструкције планирани су нови перони висине 55 cm изнад коте ГИШ–а.

Према постојећем стању, у станици Панчево Варош скретницом број 16 одваја се индустријски колосек НИС „Рафинерија нафте Панчево“. Из распоредне станице Панчево Главна станица бруто за НИС ад „Рафинерију нафте Панчево“ допрема се кружним теретним возовима до станице Панчево Варош, а даље према индустријском колосеку маневарским саставима.

6.2 Визуелна инспекција *squat* дефеката

Током маја 2017. године, спроведена је општа визуелна инспекција *squat* шинских дефеката главних пролазних колосека (колосеци број 2 и број 3) железничке станице Панчево Варош (слика 6.5). Визуелна инспекција је изведена опходњом пруге под саобраћајем. Циљ визуелне инспекције било је одређивање деонице колосека са најизраженијим дефектима типа *squat*, како би се на њој спровела детаљна визуелна инспекција под затвором колосека.

Након опште, извршена је детаљна визуелна инспекција на колосеку број 2 на дужини приближно 60 m (од стационаже km 18+134,00 до стационаже km 18+190,36).

У главне пролазне колосеке уграђене су шине *UIC 49* (данашња ознака према европском стандарду *EN 13674-1* је *49 E1*), као што је приказано на слици 6.6.

Визуелним прегледом *squat* дефеката на возним шинама, прикупљен је сет релевантних података са циљем да се формира ефикасна методологија за спровођење инспекције, класификације и санације шинских дефеката насталих током експлоатације. Резултати обављене визуелне инспекције и њихова статистичка анализа, као и одговарајући закључци објављени су у раду на међународном конгресу 2018. године [136].

С обзиром на то да су главни пролазни колосеци у правцу, посебна пажња током визуелног прегледа посвећена је зонама кочења и покретања возила у станици, зонама у околини и изнад колосечних прагова (слика 6.7), као и зонама са наглом променом крутости колосечне подлоге.



Слика 6.5 Нумерација колосека у станици Панчево Варош



Слика 6.6 Рељефна ознака на возној шини у колосеку број 2

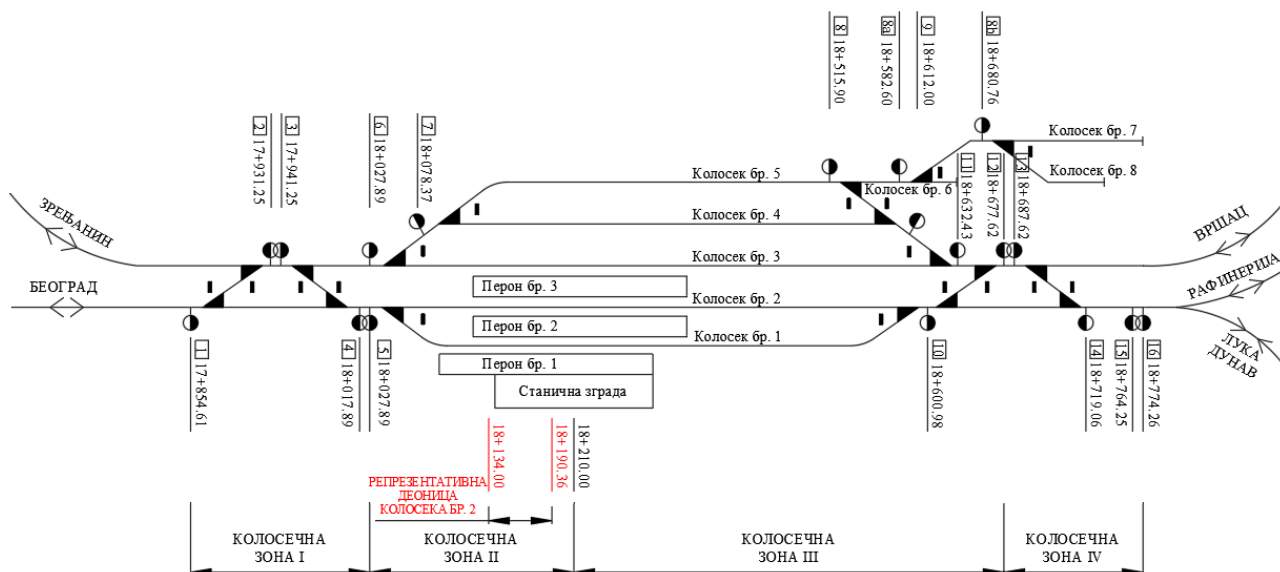


Слика 6.7 Пример сукцесивне појаве squat дефекта у околини и изнад прага

Током прелиминарне визуелне инспекције главних пролазних колосека станице Панчево Варош извршена је подела главних пролазних колосека на четири зоне, као што је приказано на слици 6.8. Након тога, спроведена је детаљна визуелна инспекција шинских дефеката на главним пролазним колосецима по зонама:

- зона I на колосеку број 2 – од скретнице број 1 до скретнице број 5 (стационажа km 17+854,61 – km 18+027,89),
- зона II на оба главна пролазна колосека – од скретнице број 5 до станичне зграде (стационажа km 18+027,89 – km 18+210,00),

- зона III на оба главна пролазна колосека – од станичне зграде до скретнице број 14 (стационажа km 18+210,00 – km 18+719,06),
- зона IV на колосеку број 2 – од скретнице број 14 до скретнице број 16 (стационажа km 18+719,06 – km 18+774,26).



Слика 6.8 Зонирање главних пролазних колосека за потребе визуелне инспекције

Уочени шински дефекти типа *squat* су фотографисани, измерена је њихова дубина, одређена је њихова стационажа, а прикупљени подаци су унети у *excel* документ. Стационажа дефеката је утврђивана мерењем помоћу пантљике (слика 6.9). Остали типови шинских дефеката на колосецима број 2 и 3 искључени су из разматрања.

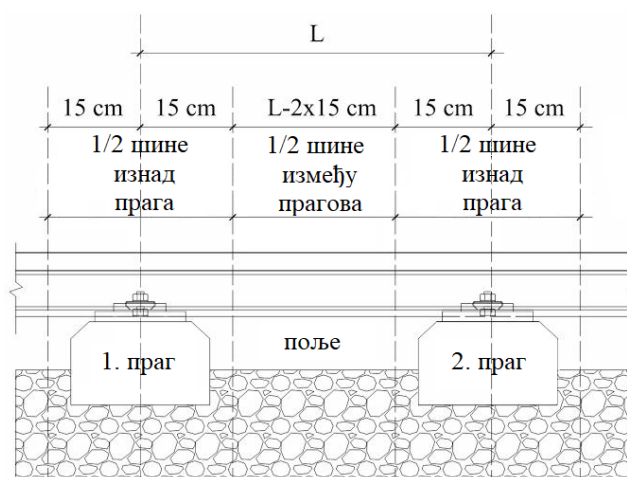


Слика 6.9 Одређивање дужине мерне деонице дуж колосека број 2

Статистичка обрада прикупљених података, коришћењем формираних *excel* база података о уоченим *squat* дефектима, извршена је за оба главна пролазна колосека.

6.2.1 Статистичка анализа резултата опште визуелне инспекције

Базе података су формиране за леву и десну возну шину за оба главна пролазна колосека (колосеци број 2 и број 3) станице Панчево Варош, у складу са наведеним поделама на четири зоне за визуелну инспекцију. Шински дефекти типа *squat*, уочени визуелном инспекцијом, разврстани су према стационачима. Затим је за обе шине извршена расподела дефеката према месту појављивања у односу на праг (изнад прага или у зони између два прага), у складу са сликом 6.10. Такође, у базу података се уносе растојања између прагова као и подаци о типовима прагова (дрвени и бетонски прагови).



Слика 6.10 Зоне појаве *squat* дефеката у односу на праг [64, 136]

Визуелном инспекцијом уочен је следећи број шинских дефеката типа *squat*:

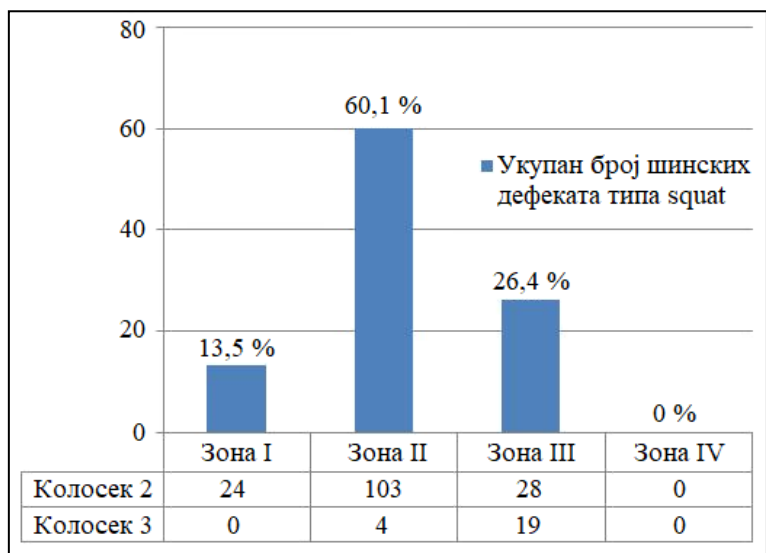
- 155 на прегледаној дужини (920 m) колосека број 2,
- 23 на прегледаној дужини (650 m) колосека број 3.

Од укупног броја детектованих *squat* дефеката, 87% се налази на колосеку број 2, док се 13% налази на колосеку број 3. Колосек број 2 користи се примарно за пријем и отпрему електромоторних путничких гарнитура, док се колосек број 3 примарно користи за пријем и отпрему теретних возова.

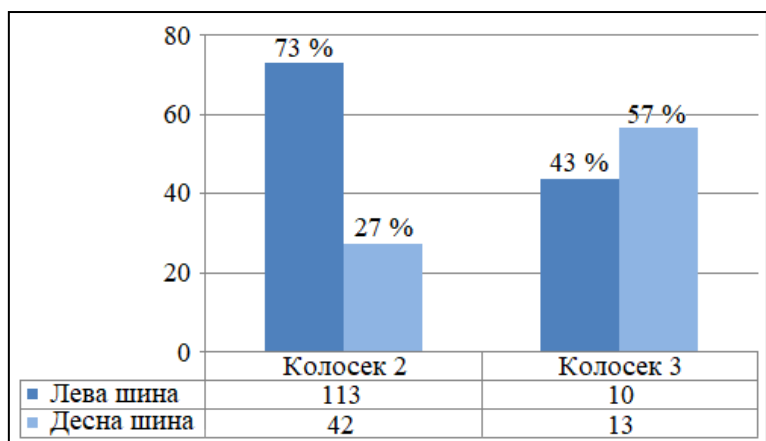
Највећи број *squat* дефеката је уочен у зонама II и III на оба колосека, које представљају зоне кочења и покретања возова у станици (слика 6.11).

Укупан број шинских дефеката типа *squat* на левој и десној шини главних пролазних колосека приказан је на слици 6.12. На колосеку број 3 је уједначена расподела *squat* дефеката на обе возне шине (10 на левој и 13 на десној шини), као што је и очекивано. Међутим, значајно већи број дефеката типа *squat* (113) уочен је на левој возној шини у односу на број дефеката (42) на десној возној шини колосека број 2. Уочени феномен је вредан даљег истраживања у смислу испитивања утицаја крутости колосечне подлоге на неравномерност појаве и развоја дефекта типа *squat*.

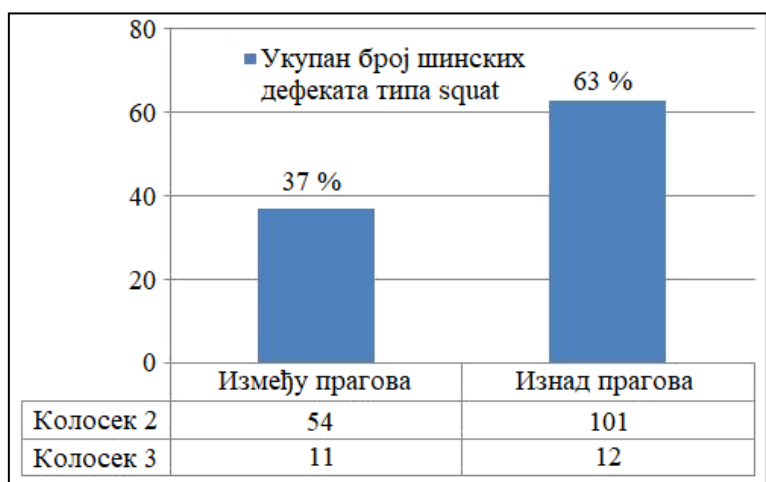
Следећа статистичка анализа се односи на укупан број *squat* дефеката у зони изнад прага и у зони између прагова. Поменуто зоне су дефинисане на основу слике 6.10, а резултати статистичке анализе су приказани на слици 6.13. У статистичкој анализи посебно су разматрани размаци прагова који су мањи, односно већи или једнаки 60 cm (слика 6.14).



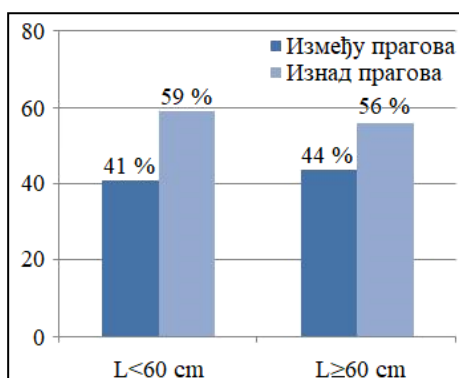
Слика 6.11 Расподела уочених squat дефеката по зонама главних пролазних колосека



Слика 6.12 Укупан број squat дефеката на левој и десној шини главних пролазних колосека

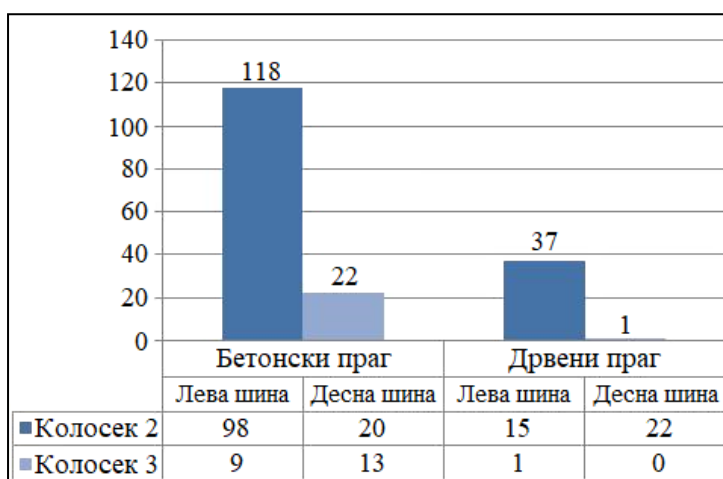


Слика 6.13 Укупан број squat дефеката у зони изнад и у зони између прагова (независно од растојања између прагова)



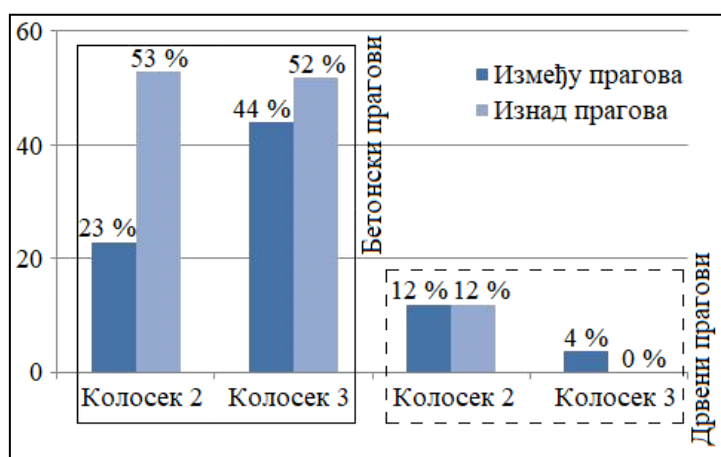
Слика 6.14 Укупан број *squat* дефеката у зони изнад и у зони између прагова за растојање прагова $L < 60$ cm и $L \geq 60$ cm

На слици 6.15 су приказани статистички подаци о укупном броју *squat* дефеката уочених на главним пролазним колосецима у зонама са дрвеним праговима и зонама са бетонским праговима (колосечне зоне II и III). Од укупног броја детектованих *squat* дефеката, уочава се знатно већи број шинских дефеката на шинама изнад бетонских прагова.



Слика 6.15 Укупан број *squat* дефеката у зонама са бетонским и дрвеним праговима

На слици 6.16 приказани су резултати статистичке анализе уочених дефеката у зонама изнад прагова и између прагова. Уочен је већи проценат дефеката у зонама изнад бетонских прагова на оба главна пролазна колосека.



Слика 6.16 Укупан број *squat* дефеката у зонама изнад и између бетонских/дрвених прагова

6.2.2 Дискусија резултата статистичке анализе

Резултати статистичке анализе су показали да је појава *squat* дефеката израженија на колосеку број 2, при чему је ова појава значајно израженија на левој возној шини. Такође, појава дефеката је израженија у зонама изнад прагова у односу на зоне између прагова, као што је и појава дефеката изнад бетонских прагова израженија у односу на појаву дефеката изнад дрвених прагова.

Уочени резултати статистичке анализе података о *squat* дефектима у станици Панчево Варош упућују на израженију појавност ове врсте дефеката на колосеку број 2. Како би се истражила и објаснила ова појава, одабрана је репрезентативна деоница колосека број 2 у оквиру колосечне зоне II (зона кочења путничких возова у смеру ка Вршцу, односно покретања у смеру ка Београду, слика 6.17) како би се на њој спровела детаљна визуелна инспекција *squat* дефеката на возним шинама, као и геофизичка истраживања колосечне подлоге. Репрезентативна деоница колосека број 2 почиње на стационажи km 18+134,00, обухвата 95 бетонских прагова и завршава се на стационажи km 18+190,36. У Прилогу 2 представљени су подаци о нумерацији и размаку бетонских прагова. У Прилогу 3 приказане су фотографије возних шина са и без *squat* дефеката на целој дужини репрезентативне деонице колосека број 2, које су снимљене током детаљне визуелне инспекције *squat* дефеката. Визуелни кључ за квантификацију озбиљности *squat* дефекта, као и нумеричко оцењивање стања дефеката на сваком прагу, на дужини сегмента од средине претходног до средине наредног прага, приказани су у Прилогу 4.



Слика 6.17 Позиција покретања воза на колосеку број 2 у смеру ка Београду (прагови број 93 – 94)

6.3 Геофизичка испитивања колосечне подлоге

За испитивање стања колосечне подлоге примењене су две геофизичке методе: електрометријска и сеизмометријска метода. Техничку подршку за геофизичка испитивања пружио је Центар за недеструктивна тестирања и геофизику (CNTG) из Београда.

6.3.1 Електрометријска метода техником профилисања

Електрометријско профилисање у станици Панчево Варош је изведено 25. маја 2017. године у циљу утврђивања стања колосечне подлоге (засторне призме, планума и земљаног трупа) дуж колосека број 2 (од стационаже km 18+134,00 до стационаже km 18+190,36), на коме је визуелном инспекцијом утврђена неуједначена појава *squat* дефеката на возним шинама. Мерења су изведена под делимичним затвором саобраћаја у станици у складу са званичним одобрењем за приступ железничкој инфраструктури за потребе мерења које је издала „Инфраструктура железнице Србије“ (број. 11/17–3–56 од 11. 04. 2017. године).

6.3.1.1 Опис електрометријске методе

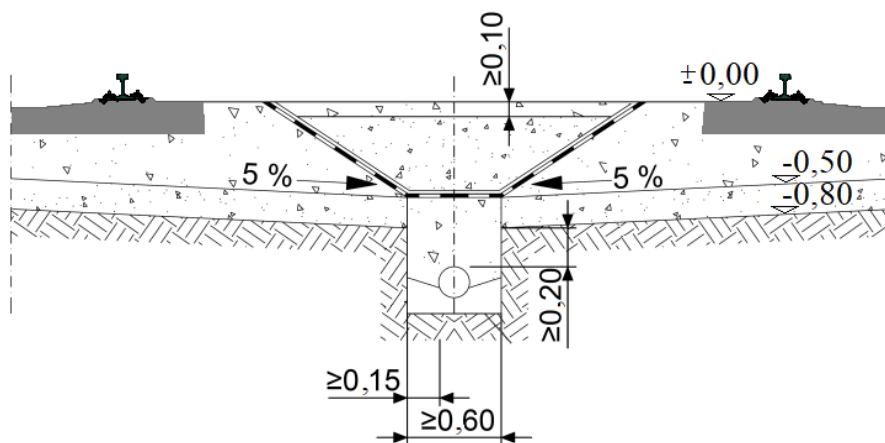
Електрометрија је једна од девет геофизичких метода која је заснована на анализи дистрибуције стационарног и квазистационарног електричног поља у зони истраживања. На основу начина дистрибуције флуksа електричног поља у зони истраживања, могуће је формирати модел дистрибуције параметра специфичне електричне отпорности ($\rho - SEO$).

У случају испитивања стања колосечне подлоге у станици Панчево Варош, геофизичким испитивањем применом електрометријске методе спроведена је техника профилисања, која омогућава формирање 2D модела дуж испитиваног колосека. Током рада на три уздужна профила колосека (леви, средњи и десни уздужни профил) узорковане су вредности напона на потенцијалним електродама, као и интензитет електричне струје на струјним електродама, на основу чијих вредности су прорачунате вредности привидних специфичних електричних отпорности [207]. Специфична електрична отпорност је реципрочна вредност специфичне електричне проводности и као таква представља карактеристику саме супстанце независно од геометријског облика материјала.

Електрометријско профилисање је засновано на примени електрометријског поступка који даје податке распоређене у равни управној на површину полупростора који се испитује. У случају испитивања колосека број 2 у станици Панчево Варош, подаци су распоређени у уздужној вертикалној равни са леве стране, у средини и са десне стране поменутог колосека. Као таква, ова техника је оријентисана ка 2D моделовању података. Када се поменута техника примењује кроз мерења на претходно постављеном великом броју равномерно распоређених електрода дуж трасе профила, она се назива мултиелектродно скенирање или континуално скенирање.

Електрометријско профилисање најчешће се користи за израду сложенијих 2D модела до максималних дубина од око 50 m. При већим захватима дубина значајно се губи резолуција због чега се ређе користи за испитивања на већим дубинама.

Мултиелектродно скенирање уздужних профила у станици Панчево Варош извршено је до референтне дубине 2 m испод нивоа мерења (ниво горње површи засторне призме). Избор овакве дубине испитивања омогућава разматрање стања засторне призме (дубина до око -0,5 m), тампонског слоја (дубина од око -0,5 m до око -0,8 m) и земљаног трупа (дубина од око -0,8 m до око -2 m). На слици 6.18 представљене су референтне дубине захвата које одговарају слојевима колосечне подлоге. Треба имати у виду да је на слици 6.18 горња ивица прага (ГИП) представљена на истој висини као и горња површина засторне призме, што у практичним условима није случај. Грешка која настаје због претпоставке да ГИП одговара равни мерења (нулта висинска кота на горњој површини засторне призме) није од значаја за тумачење резултата мерења применом мултиелектродног електрометријског скенирања.



Слика 6.18 Референтне дубине разматрања резултата применом мултиелектродног електрометријског скенирања [208]

За испитивања у станици Панчево Варош примењена је техника профилисања кроз поступак специфичне електричне отпорности (*SEO*) у варијанти мултиелектродног скенирања. Електроде су постављене у *Wenner*–овом линијском диспозитиву на међусобном растојању a (у средини између два суседна прага). Минимално растојање електрода током испитивања у станици Панчево Варош одговара растојању прагова a . Растојање између прагова на мерној деоници варира од 58 cm до 61 cm (Прилог 2).

На слици 6.19 шематски је приказан принцип примене диспозитива током мултиелектродног скенирања на више нивоа дубинског захвата, у општем случају.

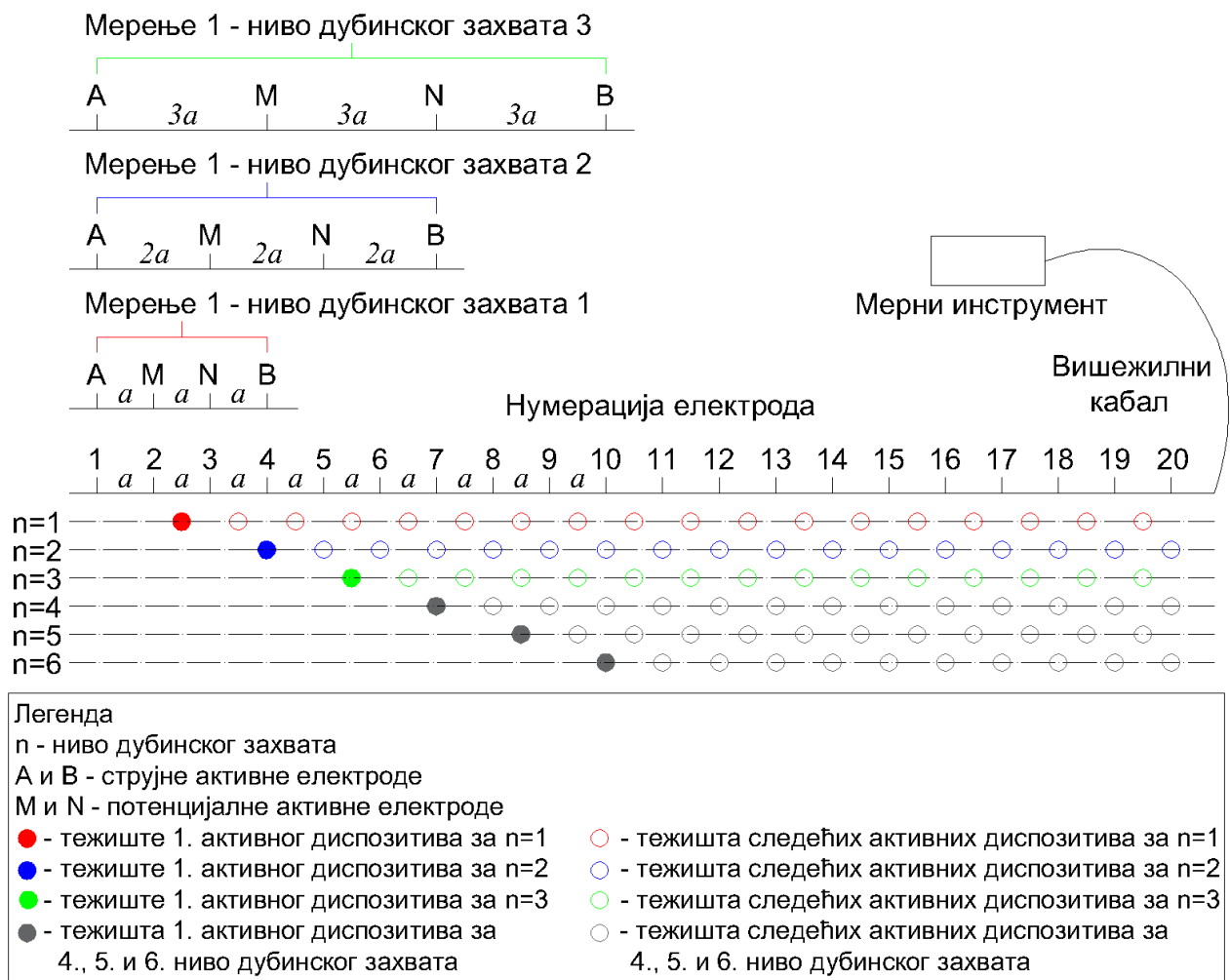
Такав вишеелектродни еквидистантни линијски диспозитив током мерења се користи парцијално, тако да изабране четири активне електроде („квартет“ електрода) чине класичан *Wenner*–ов диспозитив.

Прво се бирањем по четири суседне електроде одређује привидна специфична електрична отпорност дуж целог диспозитива. На тај начин се добијају подаци првог нивоа, односно користи се најмањи дубински захват.

На првом дубинском нивоу испитивања, растојање електрода једнако је минималном растојању a . За прво мерење активирају се прве четири електроде (1, 2, 3 и 4). Крајње електроде (1 и 4) су струјне, док су средње електроде (2 и 3) потенцијалне. За наредно мерење, сукцесивно се активира следећи „квартет“ електрода (2, 3, 4 и 5) по истом принципу. Мерене вредности привидне *SEO* одговарају електричном тежишту тренутно активног диспозитива. Поступак се на исти начин сукцесивно понавља активирањем сваког следећег квартета електрода дуж целе мерне деонице, све док се не изврше мерења на првом дубинском нивоу.

Затим се прелази на други ниво дубинског захвата коришћењем, такође, по четири електроде тако да се између сваке суседне активне електроде налази једна неактивна електрода. Прво мерење на другом нивоу дубинског захвата обухвата активне електроде 1, 3, 5 и 7 које се налазе на међусобном растојању $2a$. Електроде 1 и 7 су струјне, док су електроде 3 и 5 потенцијалне. Електроде 2, 4 и 6 су неактивне у првом мерењу, чиме се постиже већи размак активних електрода ($2a$), односно пропорционално већа дубина захвата. Даља мерења на другом нивоу дубинског захвата врше се сукцесивним понављањем активирања следећих „квартета“ електрода (2, 4, 6 и 8) на међусобном растојању $2a$.

На трећем нивоу се између суседних активних електрода налазе по две неактивне електроде, на четвртном по три, итд.



Слика 6.19 Шематски приказ распореда електрода и мерених нивоа по дубини

Класичним профилисањем *Wenner*-овим диспозитивом добијају се подаци распоређени у вертикалној равни. На основу мерених података формира се секција привидних *SEO*. Дубина на коју се односе мерене вредности, апроксимативно се одређује према једначини (6.1):

$$D = 0.48a \quad (6.1)$$

где су:

D – дубина захвата испитивања [m],

a – растојање активних електрода [m].

Инверзијом прикупљених података и применом адекватног софтвера за моделовање, сваки податак за вредност *SEO* прорачунава се на реалну дубину. Мерни подаци се уносе у вертикалну раван, тако што се на апсцису (x оса – подужна оса колосека) наноси растојање мерне тачке у односу на почетак диспозитива, док се на ординату (z оса) наноси вредности одговарајућих дубина прорачуна. Положај и оријентација оса координатног система приказана је на слици 6.20.



Слика 6.20 Положај оса релативног просторног правоуглог десног координатног система XYZ у колосеку

6.3.1.2 Мерни систем

Геофизичка испитивања су изведена инструментом *4-point light HP resistivity meter* (немачки произвођач *LGM Lippmann*) са екстерним напајањем, дигиталним електрометријским аквизиционим системом са пратећим електродама и кабловима (слика 6.21). Електроде се постављају у линијском еквидистантном низу и повезују се вишежилним кабловима са мерним инструментом. Као што је претходно описано у потпоглављу 6.3.1.1, постављене електроде могу бити активне и неактивне током мерења, док активне електроде могу бити струјне или потенцијалне. Мерни инструмент се прикључује на рачунар, како би се прикупили и сачували мерни подаци.



Електрода са вишежилним кабловима



Мерни инструмент *4-point light HP resistivity meter* (десно) са екстерним напајањем (лево)

Слика 6.21 Мерни систем примењен за мултиелектродно електрометријско скенирање на колосеку 2

Електрометријско профилисање изведено је дуж три профила у колосеку број 2, са следећим параметрима аквизиције:

- екстерно напајање: 12 V,
- излазна фреквенција: 0,26 – 30 Hz,
- максимални излазни напон: 380 V_{p-r},
- излазна струја: 1 μ A – 100 mA,
- улазна импеданса: 20 M Ω ,
- максимални улазни напон: \pm 500 mV,
- резолуција: 100 nV.

Обрада мерних података и моделовање су извршени помоћу лиценцираних софтвера *GEO test* и *RES2D-INV*. Оптимизација и визуелизација обрађених мерних података изведени су применом програмских пакета *Golden Software Surfer* и *Golden Software Grapher*.

6.3.1.3 Електрометријско профилисање дуж колосека број 2

У станици Панчево Варош спроведено је електрометријско скенирање за три паралелна профила у правцу уздужне осе (*x* оса, слика 6.20) колосека број 2, и то:

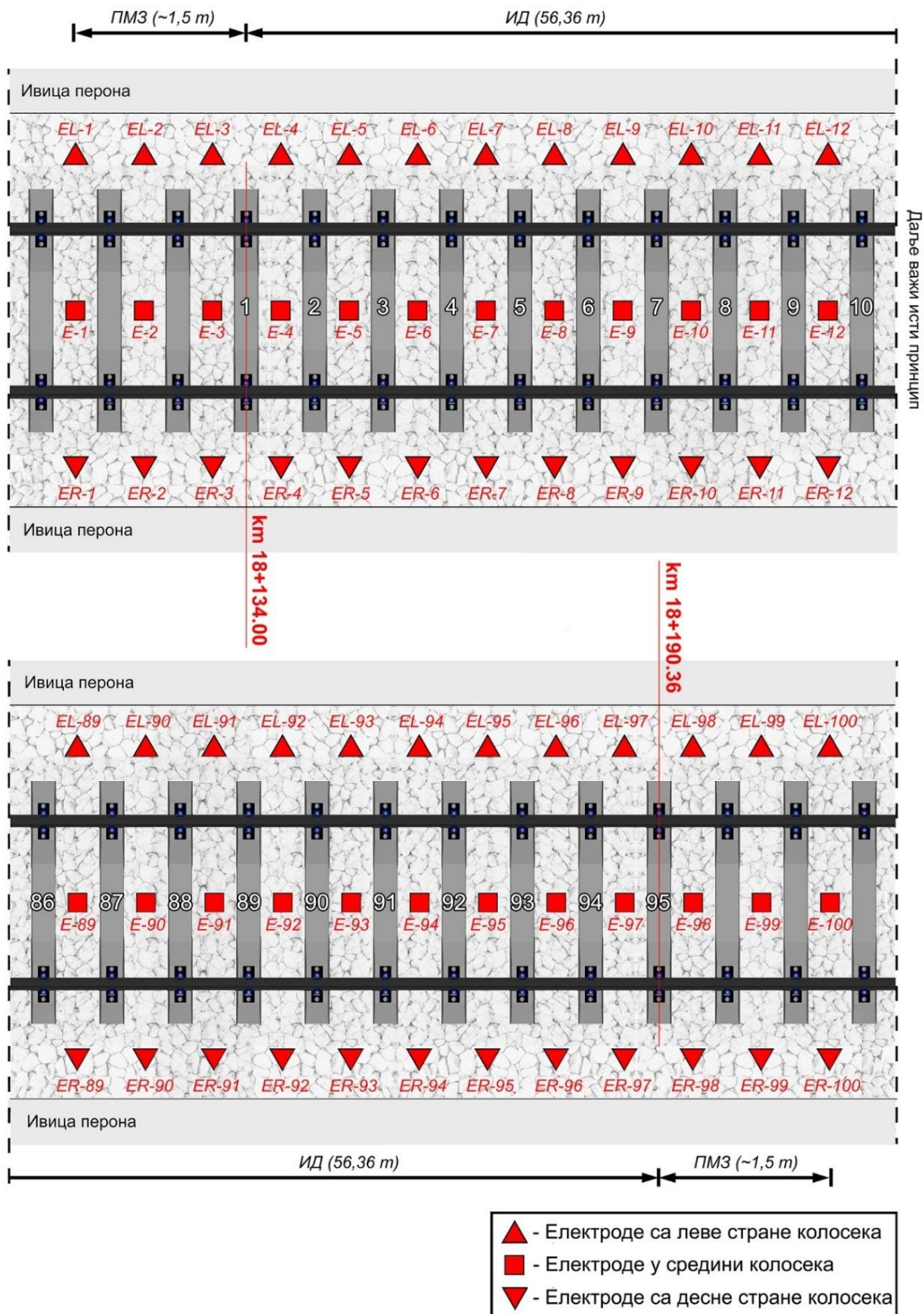
- профил *ES-1* са леве стране колосека (електроде од *EL-1* до *EL-100*, слика 6.22),
- профил *ES-2* у осе колосека (електроде од *E-1* до *E-100*, слика 6.22),
- профил *ES-3* са десне стране колосека (електроде од *ER-1* до *ER-100*, слика 6.22).

Испитивање је изведено помоћу 100 електрода, које су постављене у простору између прагова (слика 6.22) на међусобном растојању око 60 cm (Прилог 2). На слици 6.22 је приказана позиција електрода у односу на прагове за сва три профила, с тим што су на терену профили снимани један по један, уз премештање електрода. Како би већ подаци првог нивоа били мерени у домену од почетне до крајње стационаже, одлучено је да се прве и последње три електроде позиционирају пре почетка, односно након краја испитиване деонице (ради бољег покривања зоне испитивања дефинисане почетном и крајњом стационажом). Почетне електроде за сва три профила дуж колосека број 2 су постављене на растојању од приближно 1,5 m у односу на почетну стационажу km 18+134,00. Исти принцип важи и за крајње електроде. На слици 6.22 приказана је испитивана деоница (ИД) са нумерацијом прагова од 1 до 95 (94 растојања између прагова), као и продужење ангажоване зоне за потпуно покривање опсега мерења (ПМЗ – продужена мерна зона) испред прага број 1 и иза прага број 95.

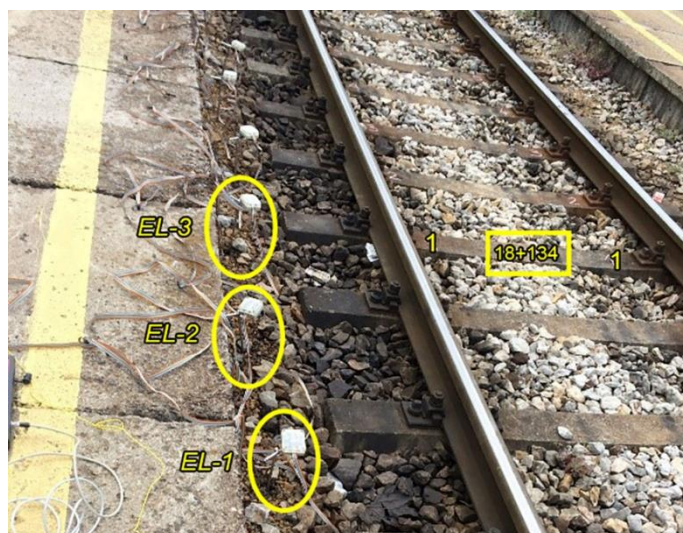
Појединачна дужина свих профила дуж испитиваног колосека износи 59,36 m. Дужина сваког профила укључује следеће дужине:

- три растојања између прагова на дужини ПМЗ (слика 6.22 горе, слика 6.23) испред прага број 1,
- 94 растојања између подужних оса колосечних прагова на дужини ИД, мерено од прага број 1 (km 18+134,00) до прага број 95 (km 18+190,36),
- три растојања између прагова на дужини ПМЗ (слика 6.22 доле) иза прага број 95.

На сликама 6.24, 6.25 и 6.26 приказан је положај електрода за електрометријско скенирање по профилима дуж испитиваног колосека.



Слика 6.22 Шематски приказ диспозитива електрометријских профила (ES-1, ES-2, ES-3) на колосеку број 2 са почетном ПМЗ (горе) и завршном ПМЗ (доле)



Слика 6.23 Изглед ПМЗ испред прага број 1 за електрометријско скенирање профила ES-1



Слика 6.24 Положај електрода за електрометријско скенирање профила ES-1 (леви профил)



Слика 6.25 Положај електрода за електрометријско скенирање профила ES-2 (средњи профил у оси колосека)

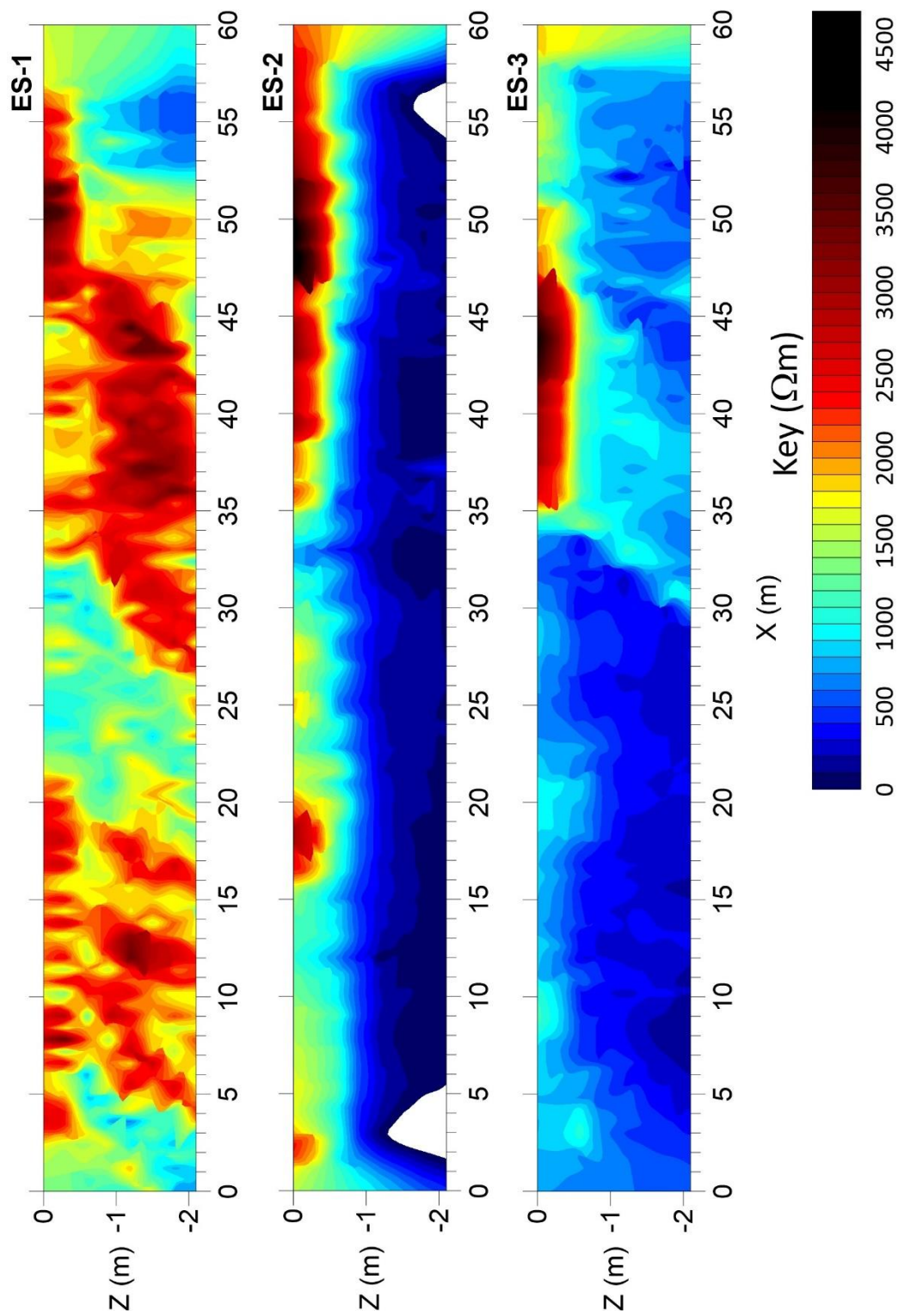


Слика 6.26 Положај електрода за електрометријско скенирање профила *ES-3* (десни профил)

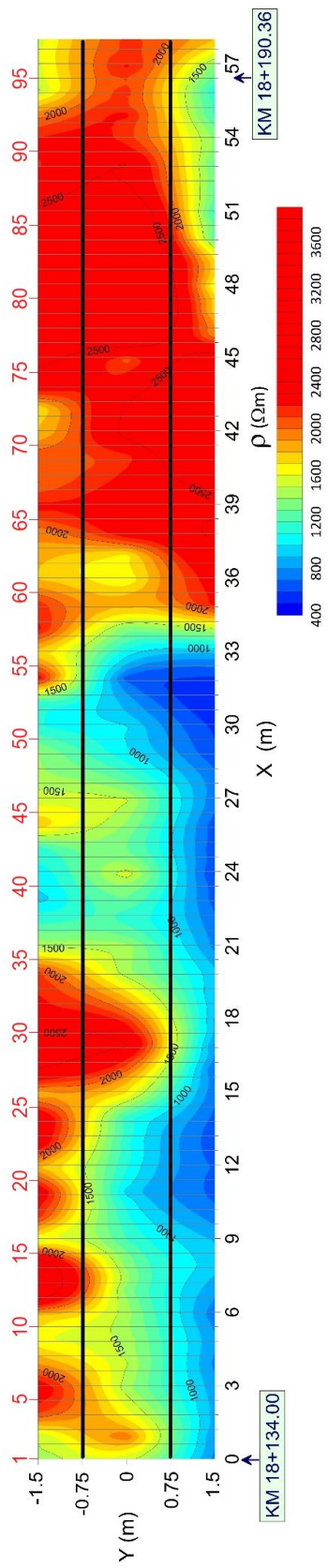
6.3.1.4 Резултати мерења

На слици 6.27 приказане су секције истините специфичне електричне отпорности (*SEO*) формиране на основу мерених података мултиелектродног електрометријског скенирања, за три профила (*ES-1*, *ES-2* и *ES-3*). Приказани су 2D модели дистрибуције *SEO* на профилима, након седам циклуса итерације. Топографска корекција није рађена због тога што је зона истраживања хоризонтална. Као што је претходно поменуто, коришћен је диспозитив са обостраним препустом дужине 1,5 m у односу на дужину испитиване зоне. С обзиром на то, мерни инструмент уписује нулу на месту прве електроде, а први мерни податак је на 0,9 m од ње. На слици 6.27 приказани су профили на дужини која обухвата ПМЗ испред првог и иза последњег прага испитиваног колосека тако да се координатни почетак налази на почетку ПМЗ испред првог прага.

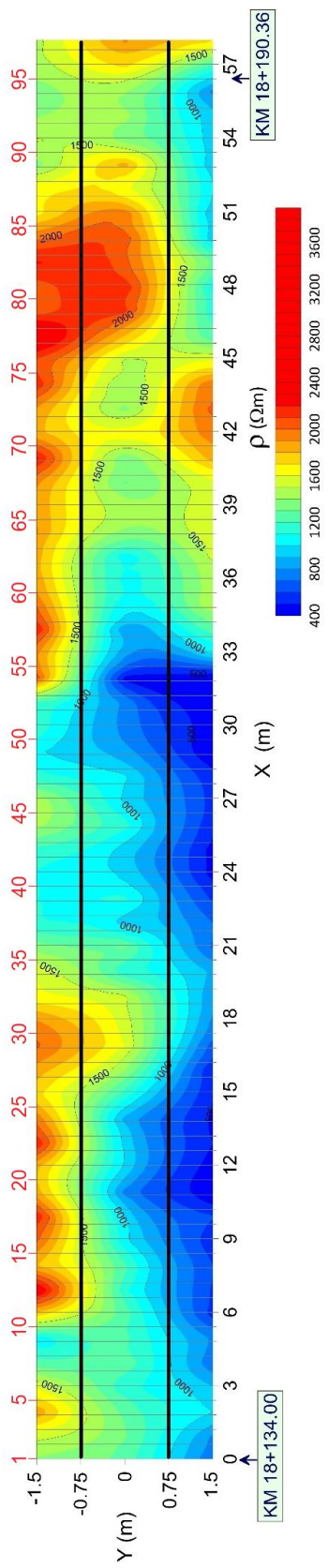
Како би графички прилози били референцирани у односу на позицију првог прага, коригована је позиција координатног почетка на картама (слика 6.28) и на профилима (слике 6.29 – 6.31) тако да одговара почетној стационажи km 18+134,00 испитиване деонице. Поред тога, на слици 6.28 су уцртане позиције возних шина на осном растојању 1500 mm, што одговара нормалној ширини колосека 1435 mm. На тај начин се олакшава поређења резултата мерења са резултатима претходно спроведене детаљне визуелне инспекције. Такође, на картама (слика 6.28) и профилима (слике 6.29 – 6.31) су означене позиције прагова у испитиваном колосеку како би се анализирали подаци који осликавају аномалије у полупростору на дужинама које одговарају осном растојању прагова. На сликама 6.28 – 6.31 уцртана мрежа танких паралелних линија означава позицију прагова од броја 1 до броја 95, односно од km 18+134,00 до km 18+190,36. Слике 6.29 – 6.31 показују узастопне сегменте за леви (*ES-1*), средњи (*ES-2*) и десни (*ES-3*) профил са уцртаним позицијама дубинских нивоа кроз засторну призму (-0,25 m), на плану (-0,5 m) и кроз тампон (-0,75 m). Подела на сегменте (од прага број 1 до 34 на слици 6.29, од прага број 34 до 67 на слици 6.30 и од прага број 67 до 95 на слици 6.31) је извршена да би се повећао ниво детаљности приказа. На сликама 6.28 – 6.31 црвеном бојом је уписана нумерација прагова (нумерација сваког петог прага на картама, односно нумерација парних прагова на профилима).



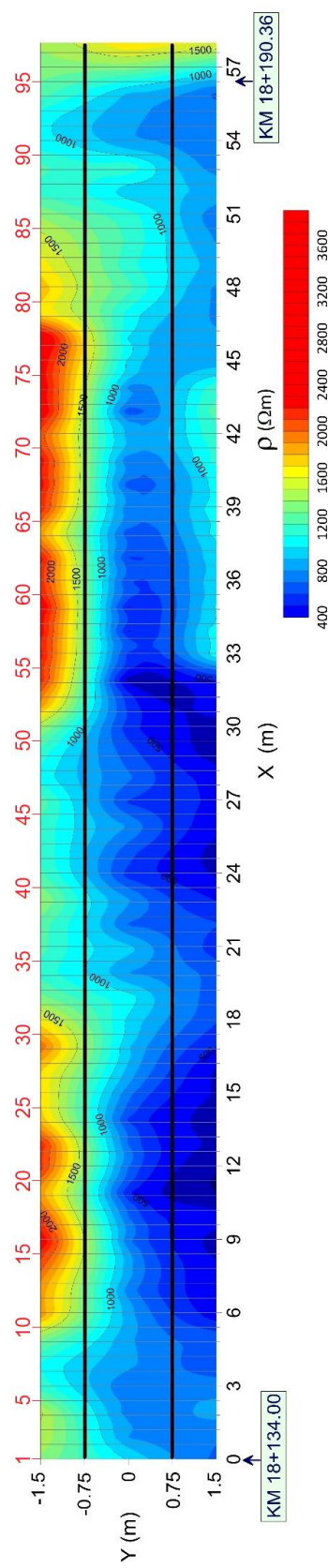
Слика 6.27 Профили ES-1, ES-2 и ES-3 испитиване SEO са ПМЗ испред првог и иза последњег прага испитиване деонице



а) дубина 0,25 m (пресек кроз засторну призму)

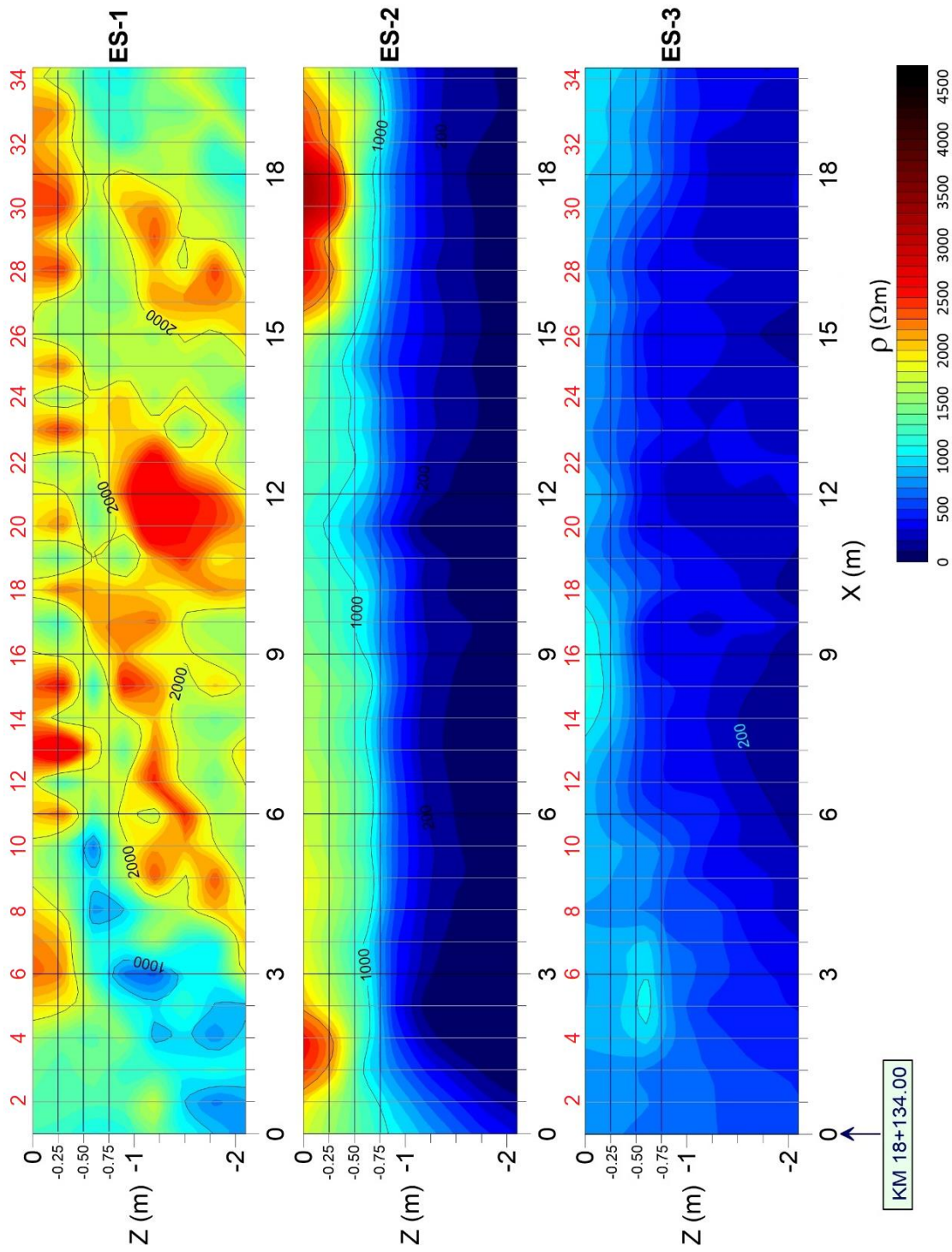


б) дубина 0,50 m (пресек у нивоу плануума)

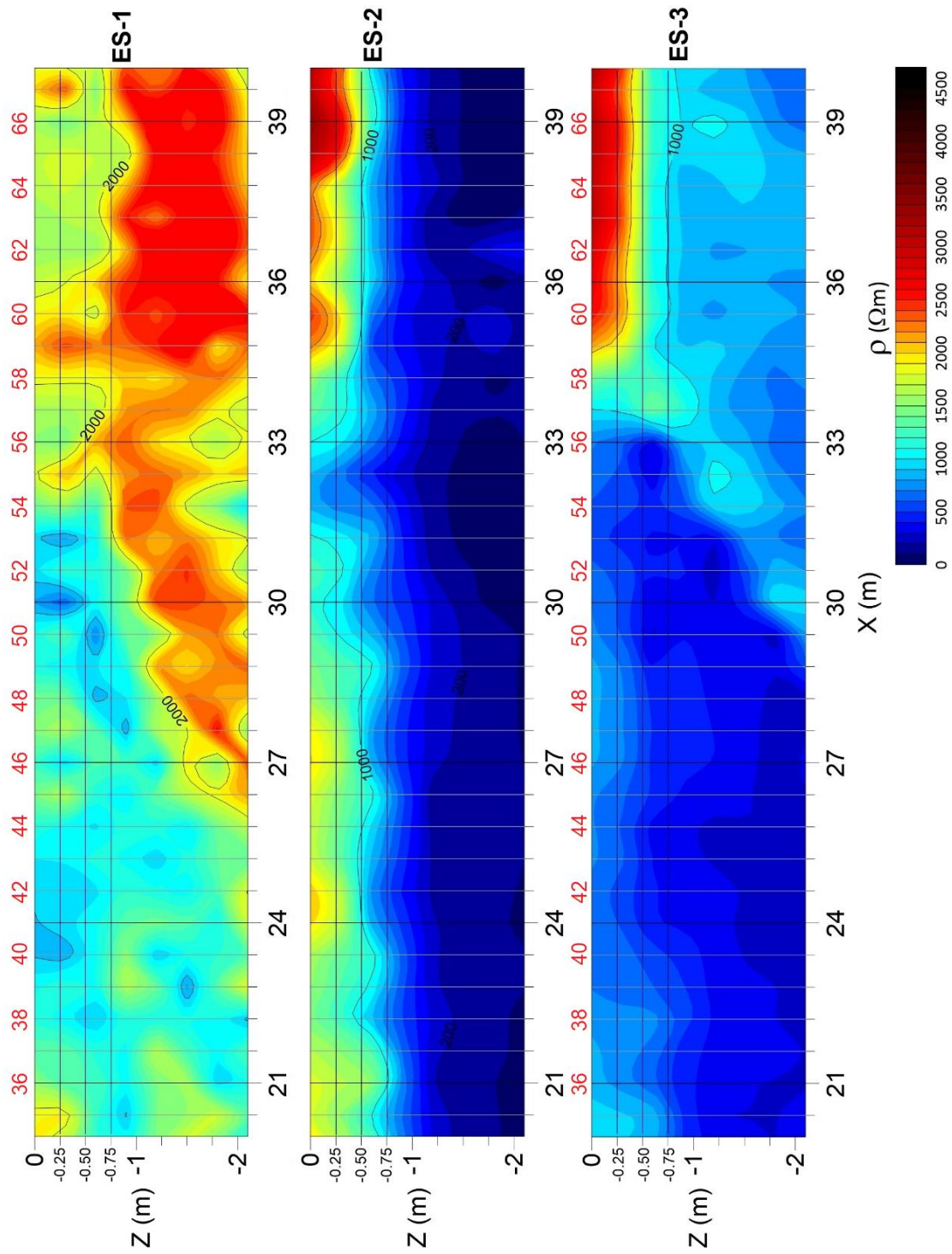


в) дубина 0,75 m (пресек кроз тампон)

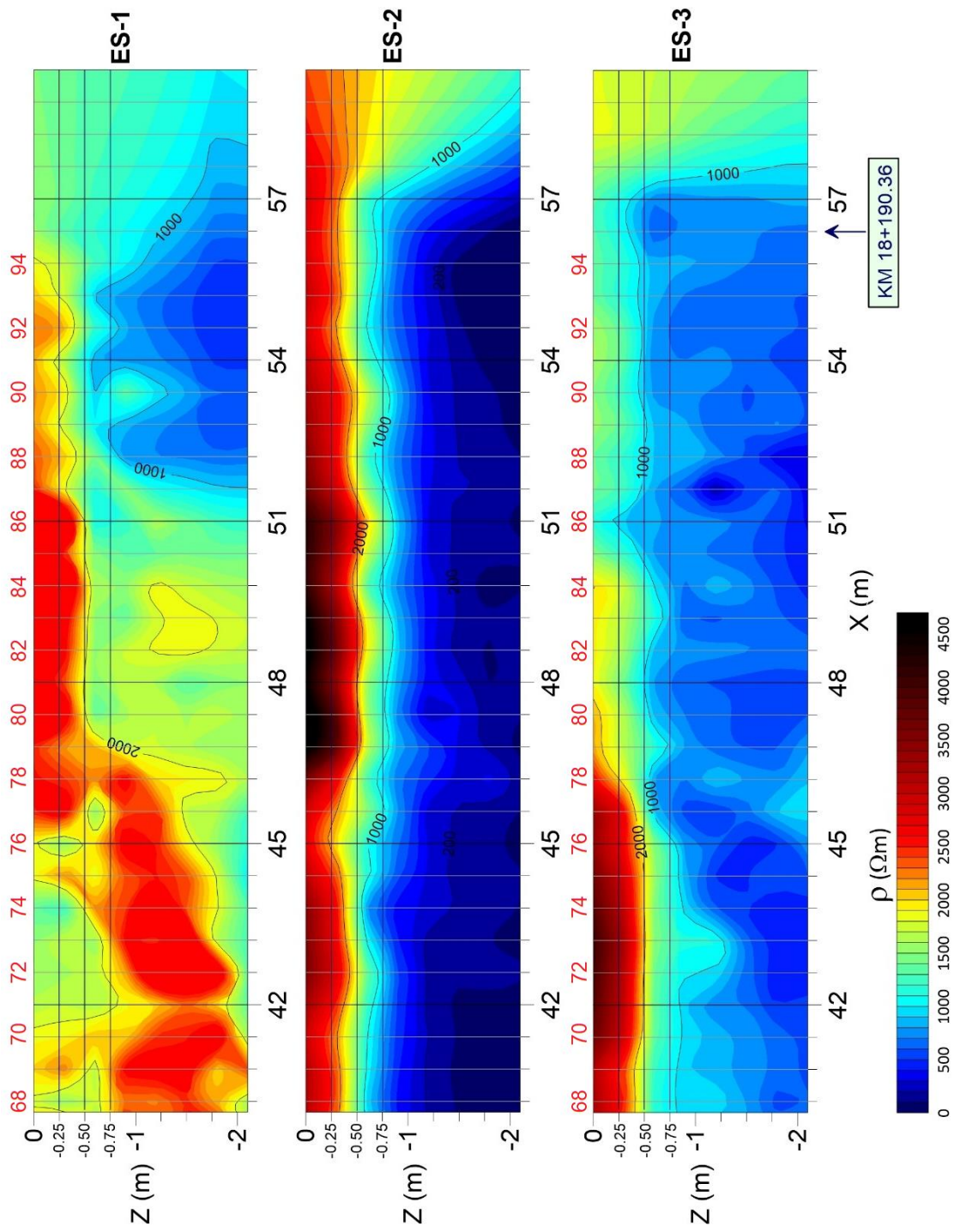
Слика 6.28 Карте интегрисане на основу података ES-1, ES-2 и ES-3 на три дубинска нивоа



Слика 6.29 Профили ES-1, ES-2, ES-3 од прага број 1 до прага број 34



Слика 6.30 Профили ES-1, ES-2, ES-3 од прага број 35 до прага број 67



Слика 6.31 Профили ES-1, ES-2, ES-3 од прага број 68 до прага број 95

6.3.1.5 Дискусија резултата мерења

У складу са сликом 6.18, стање засторне призме се уочава са профила *ES-1*, *ES-2* и *ES-3* на сликама 6.29 – 6.31, узимајући у обзир дубине до 0,50 m, као и на карти за дубину 0,25 m представљеној на слици 6.28.

У случају новог туцаника, са карактеристикама према стандарду *EN 13450* [209], који је уграђен у засторној призми (слика 6.32), додир између зрна се остварује преко малих додирних површина туцаника, а простор између оштробридних зрна је испуњен ваздухом. Кроз време неминовно долази до прљања засторне призме: (а) испадањем течних и чврстих материја из железничких кола (угаљ, песак, цурење уља и сл.), (б) наношењем прашине ветром, (в) ломљењем и заобљавањем зрна туцаника под динамичким оптерећењем од саобраћаја (слика 6.33), (г) продором материјала из планума у засторну призму. Запрљана засторна призма постаје добра подлога за развој вегетације у колосеку и има смањену ефикасност одводњавања, као и смањену носивост. На тај начин се формира механизам који убрзава прљање расквашене засторне призме до појаве блата на површини застора у зонама ослањања и око прагова (слика 6.34).



Слика 6.32 Изглед зрна новог туцаника

Слика 6.33 приказује изглед површине засторне призме на колосеку број 2 у сувим условима (слика 6.33, лево) и у условима влажне засторне призме (слика 6.33, десно). Ефекат ломљења зрна туцаника под утицајем саобраћаја, уз таложење fine абразивне прашине на површини прагова и засторне призме, уочава се у виду „белих површина“ на праговима и засторној призми. Овај ефекат може да се запази само по сувом времену. „Беле површине“ указују да је дошло до лома туцаника услед лошег ослањања прага на горњу површину застора, при чему се испод прага јавља празан простор у зони нарушеног ослањања. На слици 6.33 лево, жутом бојом су означене „беле површине“ које се јављају целом дужином ослањања прагова (тзв. „висећи прагови“ без ослањања на засторну призму), односно са десне или леве стране прага (прагови који се у зони испод једне возне шине не ослањају на застор). Лоше ослоњени и неослоњени прагови представљају побуду за повећање динамичких сила од саобраћаја у условима када засторна призма има мању носивост у односу на пројектовану. Интересантно је приметити да се у условима мокрог застора (слика 6.33, десно) не уочавају „беле површине“ које указују на лом засторне призме. Због тога детаљну визуелну инспекцију стања колосека и засторне призме треба планирати по сувом времену да би се олакшала визуелна идентификација лоше ослоњених прагова. Такође, киша спира абразивну прашину, која попуњава празнине између зрна туцаника те на тај начин смањује еластичност засторне призме у сувом стању и доприноси задржавању воде у засторној призми у влажним условима.



Слика 6.33 „Беле површине“ услед ломљења зрна туцаника под саобраћајем (сува засторна призма, слика лево) и мокра засторна призма (слика десно)



Слика 6.34 Изглед екстремно задрљане и расквашене засторне призме (праг број 51 на слици десно)

У случају електрометријске методе користи се својство да незадрљана засторна призма, са зрнима туцаника чији је међупростор испуњен ваздухом, има високу специфичну електричну отпорност, што би могло да укаже на еластичну колосечну подлогу или на постојање празнина у засторној призми које су испуњене ваздухом. Са друге стране, садржај воде и глиновитих честица између зрна туцаника у задрљаној засторној призми изазива ниску специфичну електричну отпорност.

На профилима (слике 6.29 – 6.31) се уочава изразита неравномерност стања засторне призме с обзиром да се специфична електрична отпорност мења у распону од 500 до 4000 Ωm . Такође, уочава се изразита неравномерност стања засторне призме у околини леве и десне возне шине колосека број 2 (дубина 0,25 m на карти (слика 6.28a) и на профилима (слике 6.29 – 6.31)). Тако на пример, целом дужином леве шине уочава се изразита наизменична промена стања застора (дубина 0,25 m на слици 6.28), док се дуж десне шине уочавају два сегмента (до прага број 57 влажан и задрљан застор и од прага број 57 сув застор са присуством ваздуха). Међутим, већ на дубини 0,50 (пресек у нивоу планума) уочава се изразита промена стања застора и на десној шини од прага број 57 до краја испитиване деонице. Прегледом резултата визуелне инспекције *squat* дефеката утврђена је изразита

разлика у појави дефеката на левој и десној шини. Дуж леве шине, испод које се на карти уочава изразита наизменична промена стања застора, јавља се већи број дефеката. Такође, на десној шини се највећи број дефеката уочава управо у зони након прага број 57 где се на карти уочава изразита наизменична промена стања застора.

Интересантна је појава зоне са изразито великом специфичном електричном отпорношћу преко 3500 Ωm (изразито тамно обојене зоне) на површини средњег електрометријског профила *ES-2* у околини прагова број 31, 64, 66 и од 78 до 88. Ова појава се објашњава лошим ослањањем средњег дела прагова на застор (појава празнина испуњених ваздухом испод средине прагова [39]), као што показују фотографије на слици 6.35. У средњем делу прага број 79 уочавају се „бела“ зрна туцаника која су заобљена трењем услед вибрација прага који се лоше ослања на застор.



Слика 6.35 Део електрометријског профила *ES-2* (лево) и појава заобљених зрна туцаника на средњем делу прага број 79

На левом и десном електрометријском профилу се не могу уочити празна места испод прагова испуњена ваздухом због тога што су електроде постављане обострано испред чела прагова. С обзиром да су карте генерисане на основу снимљених профила, на њима такође није могуће уочавање празних места испод неослоњених крајева прагова.

Међутим, тумачење појаве дефеката типа *squat* и стања ослањања прагова није могуће коришћењем само електрометријских профила без увида у карте за различите нивое дубина испод горње површи прага. Табеле 6.1, 6.2 и 6.3 приказују појаву прагова „играча“ који се увек јављају у низу [39], тако да свака табела понаособ показује групу узастопних прагова чији крајеви (један или оба) у зони возних шина нису ослоњени на застор. С обзиром на то да је ова појава често праћена и појавом блата из доњих расквашених слојева који су положени испод застора, на фотографијама у поменути табелама су приказани и тзв. прагови „прскавци“, као и приложене карте и профили који јасно указују на продор воде из доњих слојева ка површини застора.

Табела 6.1 показује праг број 36 који је на свом левом крају лоше ослоњен на застор, а приликом проласка возила доња површина прага удара о застор и побуђује продор воде из доњих слојева. Вибрирање прага број 36 преноси се на околне прагове, тако да се на фотографији види следећи побуђени праг „играч“ (праг број 35). Приложена карта у табели 6.1 јасно указује на продор воде са десне ка левој страни колосека, док се на фотографијама јасно уочава нарушено ослањање прагова које напредује од леве ка десној страни. Изнад прага број 36 уочава се дефекат типа *squat* који је иницијална побуда за растресање застора испод левог краја прага.

Табела 6.2 приказује групу узастопних лоше ослоњених прагова од броја 41 до броја 44. На левој шини се изнад свих прагова јасно уочавају дефекти типа *squat* који су побуђивали вибрирање застора испод и у околини прагова током проласка возила, услед чега су се

развиле празнине испод крајева прагова. На карти се јасно уочава продор воде са десне стране ка левој страни колосека. На средњем електрометријском профили $ES-2$ се уочава појава ваздуха испод прагова број 41 и 42 што указује на лоше ослањање, односно појаву шупљина испод средњег дела поменутих прагова. Такође, уочава се развој „белих површина“ на застору од леве ка десној страни колосека.

Табела 6.3 показује групу узастопних прагова који се доњом површином не ослањају на застор, тако да су практично „обешени“ о возне шине када је колосек у неоптерећеном стању. Посебно драстичан пример са продором воде у околини десног краја неослоњеног прага приказан је на фотографији прага број 51. Појава блата указује на продор воде из доњих слојева колосечне подлоге што се јасно уочава на приложеним профилима и карти.

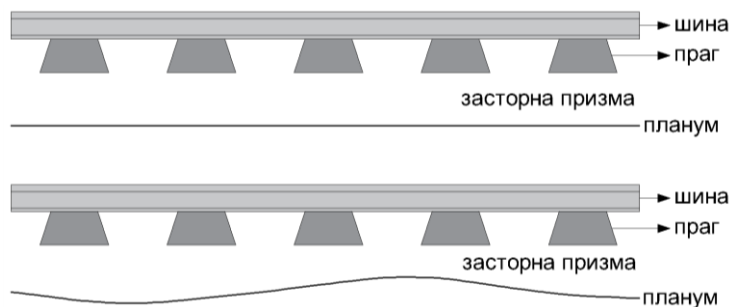
Резултати електрометријског профилисања и картирања указују на влажност колосечне подлоге због лошег одводњавања планума у условима високог нивоа подземне воде који одговара нивоу површине језера („изданско око“) које се налази у непосредној близини станице (слика 6.36).



Слика 6.36 Ниво подземне воде у „изданском оку“ непосредно поред колосека у станици Панчево Варош



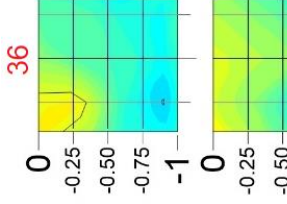
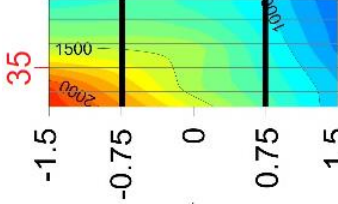


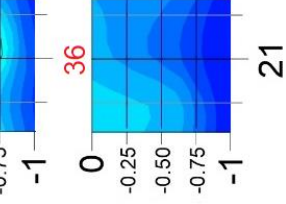
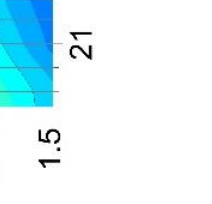
Такође, профили и карте указују на мешање материјала из запрљаног застора и влажног тампона, што доводи до нарушавања равности планума (слика 6.37).

У нормалним условима, оптерећење се равномерно преноси са застора на планум пруге и са планума пруге на земљани труп. У условима запрљаног застора и влажне подлоге на коју се застор ослања долази до прекорачења носивости застора и деформације планума. У формираним удубљенима у плануму задржава се вода, што упућује на даљи развој механизма пропадања колосечне подлоге.



Слика 6.37 Нормално стање (горе) и деформисано стање (доле) планума



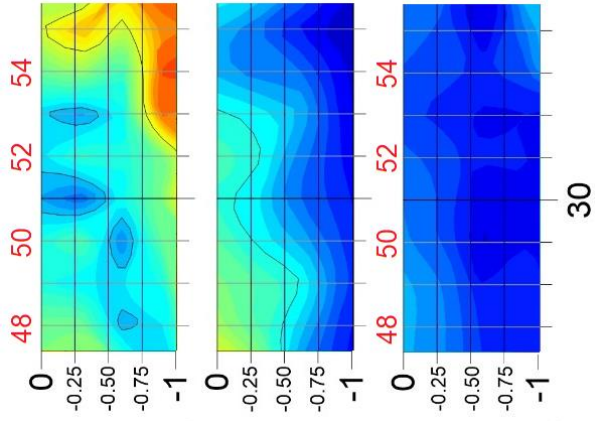


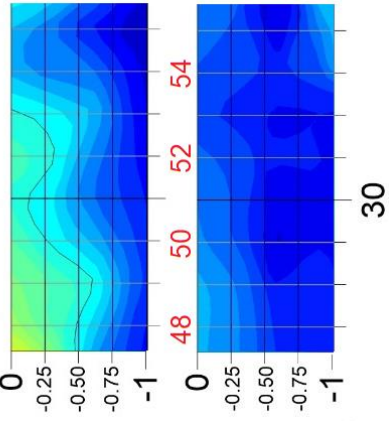


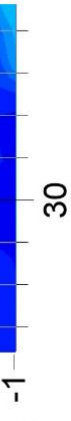
Табела 6.1 Поређење стања дефеката типа sqnat, стања застора, као и приказ на профилима и карти у околини прагова 35 и 36

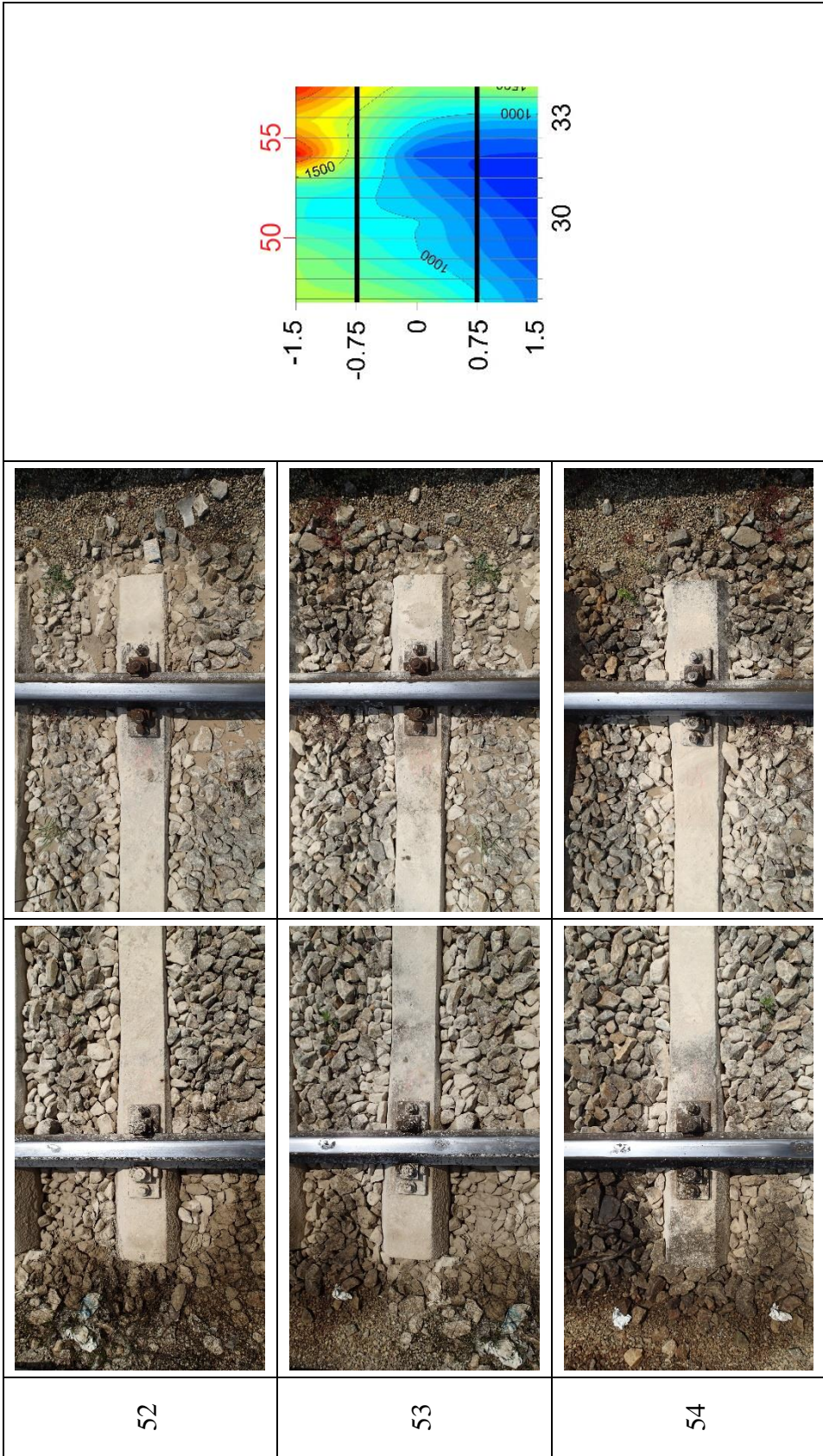
Бр. прага	Лева шина	Десна шина	Профили ES-1, ES-2 и ES-3	Карта на дубини 0,25 m
35				
36				

Табела 6.2 Поређење стања дефеката типа *sq* и *st*, стања застора, као и приказ на профилима и карти у околини прагова 41 – 44

Бр. прага	Лева шина	Десна шина	Профили <i>ES-1</i> , <i>ES-2</i> и <i>ES-3</i>	Карта на дубини 0,25 m
41				
42				
43				
44				

Табела 6.3 Поређење стања дефеката типа *squat*, стања застора, као и приказ на профилима и карти у околини прагова 49 – 54

Бр. прага	Лева шина	Десна шина	Профили ES-1, ES-2 и ES-3 и карта на дубини 0,25 m
49			
50			
51			



6.3.2 Сеизмометријска метода техником профилисања

На испитиваној деоници је, поред електрометријске методе, примењена и сеизмометријска метода. Примењен је рефрактивни поступак техником профилисања. Уз резултате испитивања помоћу електрометријске методе, сеизмометријском методом је остварен комплексан увид у истражни простор (колосечна подлога) на основу моделовања додатним атрибутом, односно брзином простирања примарних сеизмичких таласа (V_p). Овако комплексним приступом моделовању постигнуто је прецизније утврђивање стања колосечне подлоге (стање застора, планума и тампон слоја). С обзиром на то да брзина таласа V_p зависи од еластичности и густине средине, сеизмометријска метода је подесна за испитивање стања слојевите колосечне подлоге, чија се еластичност и густина мењају по дубини подлоге (са порастом дубине расту крутост и густина).

Сеизмометријско профилисање колосека број 2 у станици Панчево Варош изведено је дан након електрометријског испитивања, 26. маја 2017. године. Испитивање је обухватило исту деоницу колосека број 2 од прага број 1 до прага број 95, како би се резултати стања колосечне подлоге, добијени помоћу обе геофизичке методе, упоредили са резултатима детаљне визуелне инспекције *squat* дефеката на возним шинама. Мерења су, такође, изведена под делимичним затвором саобраћаја у станици у складу са званичним одобрењем за приступ железничкој инфраструктури за потребе мерења, које је издала „Инфраструктура железнице Србије“ (број. 11/17-3-56 од 11. 04. 2017. године).

Крајњи циљ поређења резултата детаљне визуелне инспекције, електрометријског и сеизмометријског профилисања је анализа утицаја крутости колосечне подлоге на појаву и развој *squat* шинског дефекта на испитиваној деоници колосека број 2.

Позиција изведеног сеизмометријског профила на колосеку број 2 одређена је положајем два бочна бетонска перона дуж испитиваног колосека (слика 6.17), јер се претпоставило да бетонски перони могу да маскирају користан сигнал профила. Из тог разлога профил је позициониран на средњем растојању између оба перона, односно дуж осе колосека број 2.

Будући да се примена сеизмометријске методе заснива на особини сеизмичких таласа да се њихова брзина простирања мења у зависности од физичких својстава унутар испитиване структуре, ова метода је погодна за испитивање стања слојева колосечне подлоге. У Србији је сеизмометријска метода први пут примењена за испитивање стања колосечне подлоге на деоници Лајковац – Ваљево, као што је описано у [210, 211].

6.3.2.1 Опис сеизмометријске методе

За праћење простирања примарних таласа у полупростору примењује се индуковани режим, што подразумева иницијацију сеизмичког таласа у тачки извора и осматрање његовог простирања кроз испитивану средину. Као детектори сеизмичких таласа, користе се геофони који бележе чак и најслабије наиласке сеизмичких таласа насталих рефракцијом и рефлексацијом на границама где се еластична својства слојева у полупростору мењају.

У случају испитивања стања колосечне подлоге у станици Панчево Варош, примењена је сеизмометријска метода поступком рефракције. Сеизмометријска рефракција укључује детекцију сеизмичког таласа, који се након простирања кроз виши слој рефрактује на граничној равни са нижим слојем и наставља да се простира паралелно самој граничној равни. Током простирања дуж граничне равни, талас путује већом брзином доње средине и током свог простирања наставља да побуђује све тачке које леже на граничној равни. Овако

побуђене тачке генеришу секундарне таласне фронтове, који се простиру према површини и побуђују геофоне на сеизмометријском диспозитиву.

Иницијација сеизмичких таласа током испитивања у станици Панчево Варош је вршена вештачким путем, односно ударцем маља о тefлонски блок. Геофони који детектују рефрактоване таласе су постављени дуж уздужне осе колосека број 2. Детектоване механичке осцилације таласа се претварају у електричне импулсе, а затим се шаљу на одговарајући уређај сеизмичког мерног система који их региструје.

Сеизмометријски поступак рефракције заснива се на преламању еластичних таласа. Приликом преласка из једне у другу средину, у општем случају, јачина и смер пропуштеног таласа зависе од упадног угла и разлике брзина простирања таласа у датим срединама. Због промене правца простирања пропуштеног таласа, ова појава се назива преламање таласа на граничној површини. У општем случају, повезаност упадног и преломног угла и брзина простирања сеизмичких таласа у одговарајућим срединама је дата преко *Snell*-овог закона:

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} \quad (6.2)$$

где су:

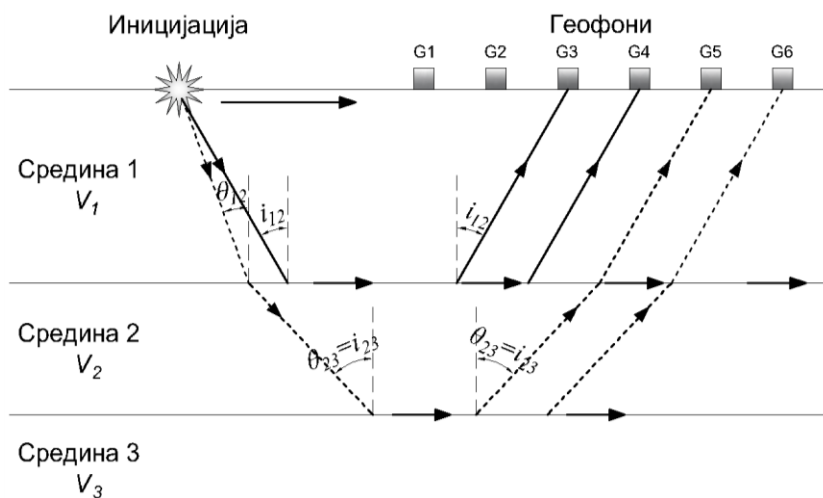
θ_1 – упадни угао под којим талас долази на граничну површину из средине 1,
 θ_2 – преломни угао под којим се талас простира у средини 2 након преламања,
 V_1 – брзина простирања таласа у средини 1,
 V_2 – брзина простирања таласа у средини 2.

При преласку таласа из средине са мањом брзином простирања V_1 у средину са већом брзином простирања таласа V_2 , сеизмички таласи долазе под различитим упадним угловима. У посебном случају постоји упадни угао за који је преломни угао једнак 90° . Тај упадни угао је максимални упадни угао (θ_{max}) и назива се критични угао. За тај угао и све упадне углове веће од њега не постоји рефракција на граничној равни. Због тога се критични угао назива и угао тоталне рефлексije (једначина 6.3).

$$\sin i = \sin \theta_{max} = \frac{V_1}{V_2} \quad (6.3)$$

У том случају, талас (који се под критичним углом i простира ка граничној површини брзином V_1) се након преламања простира дуж контактне површине двеју средина брзином V_2 и побуђује све тачке на контактної површини које генеришу нове таласне фронтове према површини. Зрак који ће са побуђене контактне површине први погодити геофон кретаће се такође под критичним углом i брзином V_1 . Ова појава се може уочити на свакој граничној површини и на свим дубинама. На слици 6.38 угао θ_{12} представља преломни угао једног сеизмичког зрака, а i_{12} критични угао, за границу између средина 1 и 2. Приликом преламања под критичним углом, преломљени зрак путује дуж граничне равни брзином средине 2. Претходно поменути зрак који се преломио под углом θ_{12} продире у средину 2 упадајући под углом θ_{23} на границу између средина 2 и 3. Угао θ_{23} представља критични угао за границу између средина 2 и 3. Као што је раније описано, и овај зрак након преламања путује дуж границе између средина 2 и 3. На овај начин оба зрака преломљена под критичним углом побуђују границе, у првом случају границу између средина 1 и 2, а у другом случају дубљу границу између средина 2 и 3. Тако побуђене границе зраче своје таласне фронтове, од којих поједини зраци путују према површини терена. На основу *Snell*-овог закона, излазни зраци са граничних равни за најкраће време прелазе растојања уколико се крећу под критичним угловима за те границе. Приликом мерења, у геофоне ближе тачки иницијације први стижу директни таласи, у геофоне који се налазе нешто даље први стижу рефрактовани зраци са

границе између средина 1 и 2, а у најдаље геофоне први стижу рефрактовани таласи са границе између средина 2 и 3.



Слика 6.38 Основни принцип сеизмометријског поступка рефракције

Параметар који се мери сеизмометријским поступком рефракције је време које је потребно сеизмичком таласу да од тачке иницијације дође до геофона, било да путује директно или преламајући се на границама по претходно описаном принципу рефракције. На основу ових мерења и података за геометријски облик мерног диспозитива, формира се дијаграм зависности времена наилаaska таласа од растојања (ходохрона), а затим се на основу великог броја иницијација, инверзним моделовањем, формира и 2D модел дистрибуције брзина лонгитудиналних или трансверзалних сеизмичких таласа дуж профила.

6.3.2.2 Мерни систем

Геофизичка испитивања су спроведена помоћу мерног система *RAS-24* (амерички произвођач *Seistronix*), сеизмометријским аквизиционим двадесетчетворо-каналним системом са 24 геофона и пратећим кабловима (слика 6.39). На слици 6.40 приказан је мерни систем инсталиран на колосеку број 2 у станици Панчево Варош. Сеизмометријско профилисање је изведено из три сегмента, уз коришћење 3 x 24 геофона и преклапање од 50% (слика 6.41 у потпоглављу 6.3.2.3), чиме је постигнуто континуално покривање полупростора подацима на целој испитиваној деоници на колосеку број 2.



Слика 6.39 Мерни систем *RAS-24* [212]



Слика 6.40 Мерни систем инсталиран на колосеку број 2 у станици Панчево Варош

Сеизмометријско профилисање моделовано је у софтверу као јединствен профил у оси колосека број 2 са следећим параметрима аквизиције:

- број геофона: 48 (3 x 24 геофона са преклапањем на 50% дужине сегмента),
- растојање између геофона: око 1,20 m (двоструко растојање између прагова),
- сопствена фреквенција геофона: 14 Hz,
- број тачака иницијације: 26,
- растојање између тачака иницијације: око 2,40 m,
- извор сеизмоакустичких таласа: маљ масе 8 kg,
- интервал узорковања: 0,25ms,
- дужина снимка: 100 ms,
- појачање: 48 dB.

Обрада мерних података и њихово моделовање извршени су помоћу програмских пакета *RAS-24 System Software* и *Rayfract*. Оптимизација и визуелизација обрађених мерних података изведени су применом програмских пакета *Golden Software Surfer* и *Golden Software Grapher*.

Геофон који окида аквизициони ситем (тригер) налази се уз саму тачку иницијације (слика 6.43 у потпоглављу 6.3.2.3) и његов је задатак да стартује аквизицију у моменту стварања сигнала у тачки иницијације.

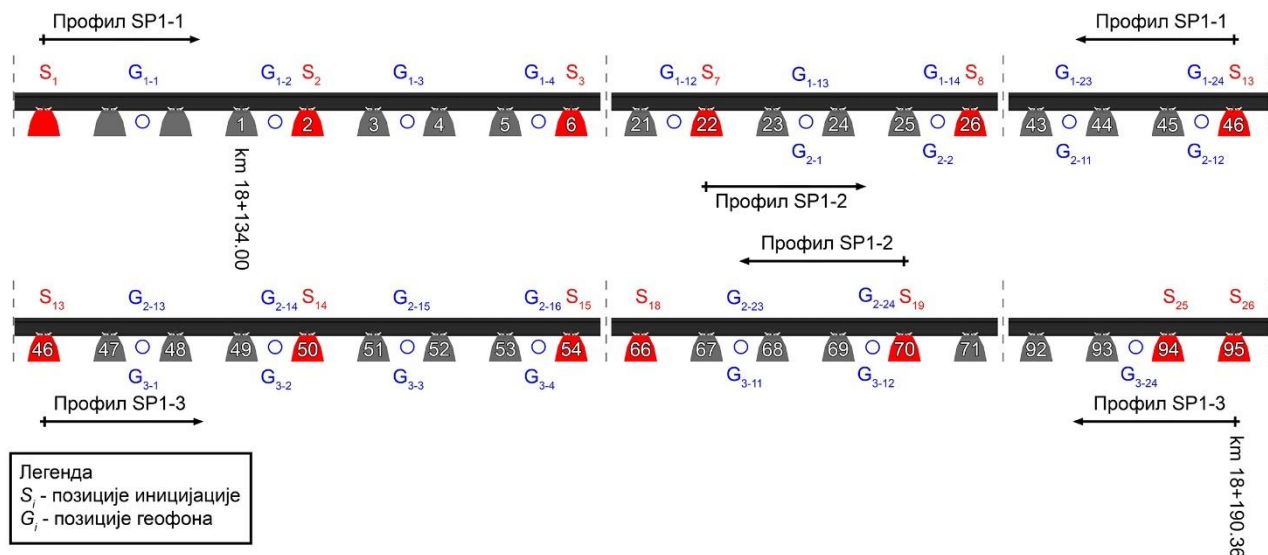
6.3.2.3 Сеизмометријско профилисање дуж колосека број 2

За испитивање стања колосечне подлоге у станици Панчево Варош, применом сеизмометријске методе кроз поступак рефракције примењена је техника профилисања. Сеизмометријско профилисање је спроведено дуж осе колосека број 2 како би се омогућило формирање 2D модела дистрибуције брзина лонгитудиналних сеизмичких таласа.

Сеизмометријским поступком рефракције изведена су три профила (*SP1-1*, *SP1-2* и *SP1-3*) дуж осе колосека број 2. Ова три профила су изведена тако да њихово међусобно преклапање износи 50%, како би се њиховом интеграцијом добио профил одговарајуће дужине (од km 18+134,00 до km 18+190,36) и резолуције. Геофони су били распоређени на сваком другом растојању између прагова, како би се остварила висока резолуција мерења. Из

тог разлога на испитиваној деоници је било неопходно извршити мерења дуж три појединачна преклопљена профила која су у поступку моделовања интегрисана у јединствен сет података (профил *SP1*).

Шематски приказ распореда геофона и тачака иницијације дуж осе испитиване деонице колосека број 2 представљен је на слици 6.41.



Слика 6.41 Шематски приказ диспозитива сеизмометријског профила *SP1*

Прва иницијација је задата на трећем прагу пре почетне стационаже км 18+134,00 (стационажа осе прага број 1), као што приказује слика 6.42. Друга иницијација је на прагу број 2, а свака наредна је на сваком четвртном прагу (прагови број 6, 10, 14, ... 86, 90, 94). На крају профила *SP1-3* (праг број 95) је 26-ом иницијацијом постигнута симетричност позиција иницијација у односу на почетак профила *SP1-1* (слика 6.41).



Слика 6.42 Позиција прве иницијације

Први геофон је постављен на растојању око 0,9 m након прве тачке иницијације, односно на растојању око 0,9 m пре прага број 1 (слика 6.41, слика 6.42). Други геофон је постављен на средини растојања прагова 1 и 2. Растојање између геофона дуж целе испитиване деонице колосека одговара двоструком растојању прагова (слика 6.41).

Слика 6.43 приказује важне детаље у вези спровођења методе сеизмометрије на мерној деоници колосека број 2 у станици Панчево Варош.

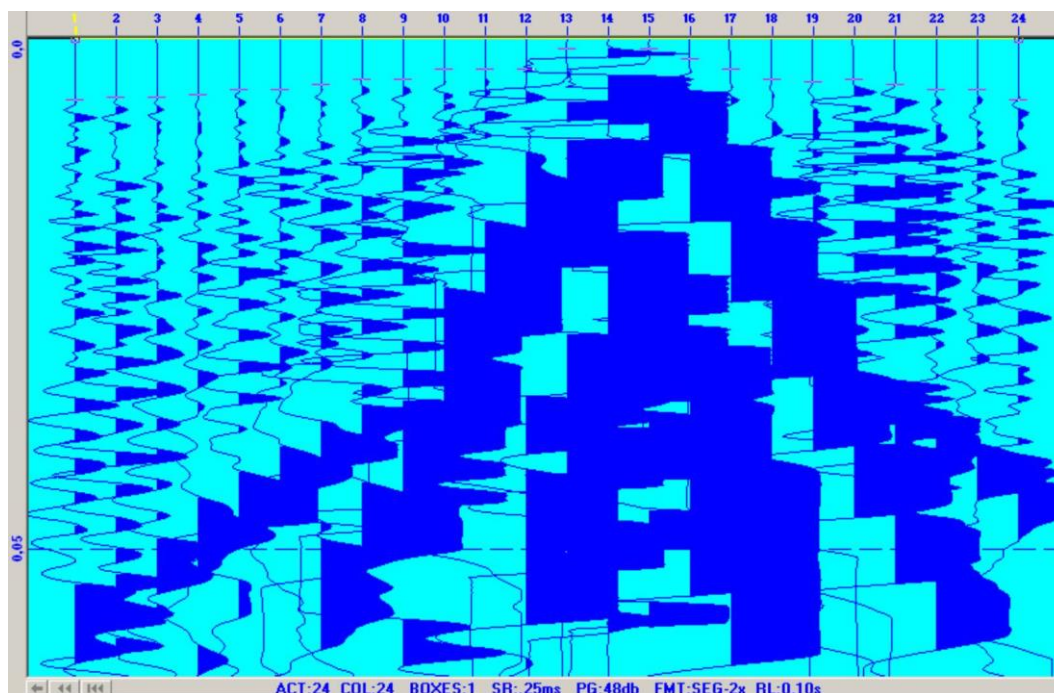


Слика 6.43 Детаљи примене сеизмометрије на колосеку број 2

С обзиром на високу резолуцију спроведених мерења, дубина колосечне подлоге до које су допрли сеизмички зраци износи 5,5 m. Такође, у складу са потребом да се анализира стање засторне призме, планума пруге и тампонског слоја, анализа модела је обухватила сегмент профила до дубине од 2 m.

Слика 6.44 приказује сеизмометријски снимак који је извршен мерним системом RAS-24 на колосеку број 2. На слици 6.44 се јасно уочавају први наиласци сеизмоакустичког

таласа на 24 геофона. На хоризонталној оси су представљени геофони 1 – 24, док је на вертикалној оси представљено време.

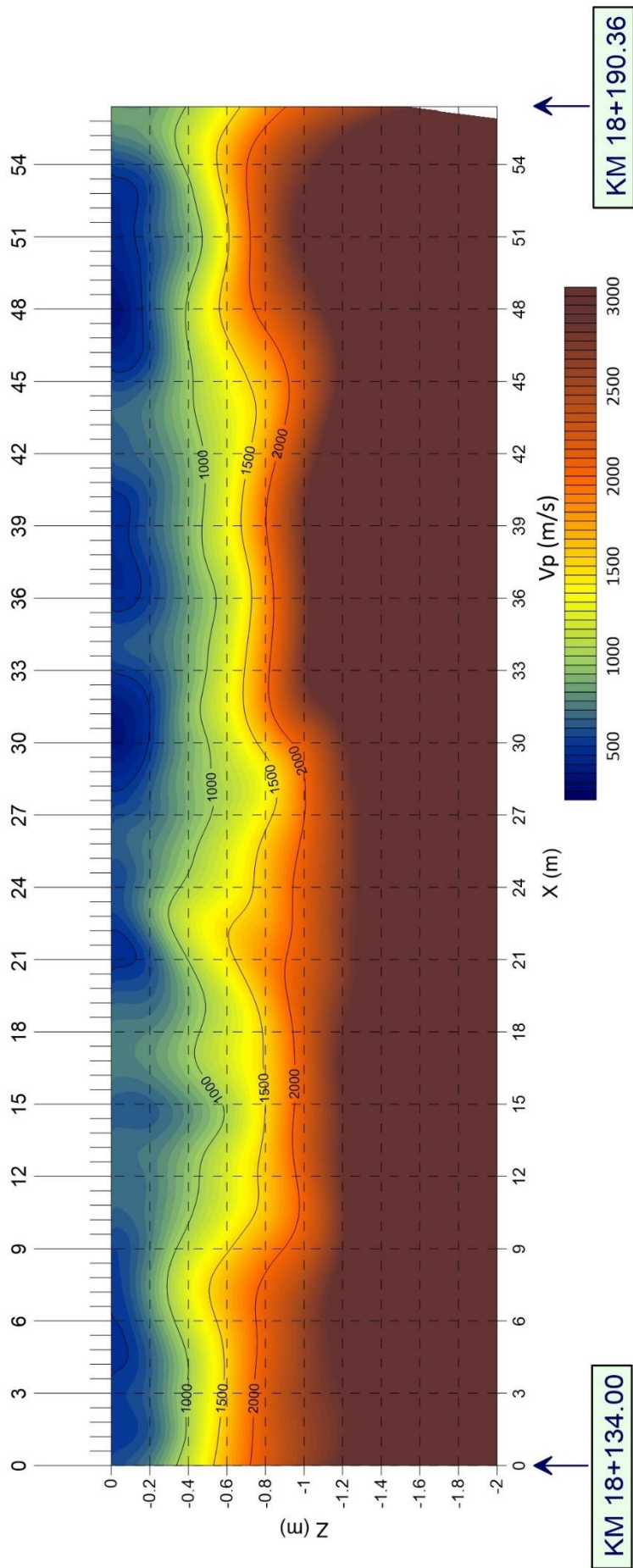


Слика 6.44 Сеизмометријски рефрактивни снимак са маркираним првим наиласцима

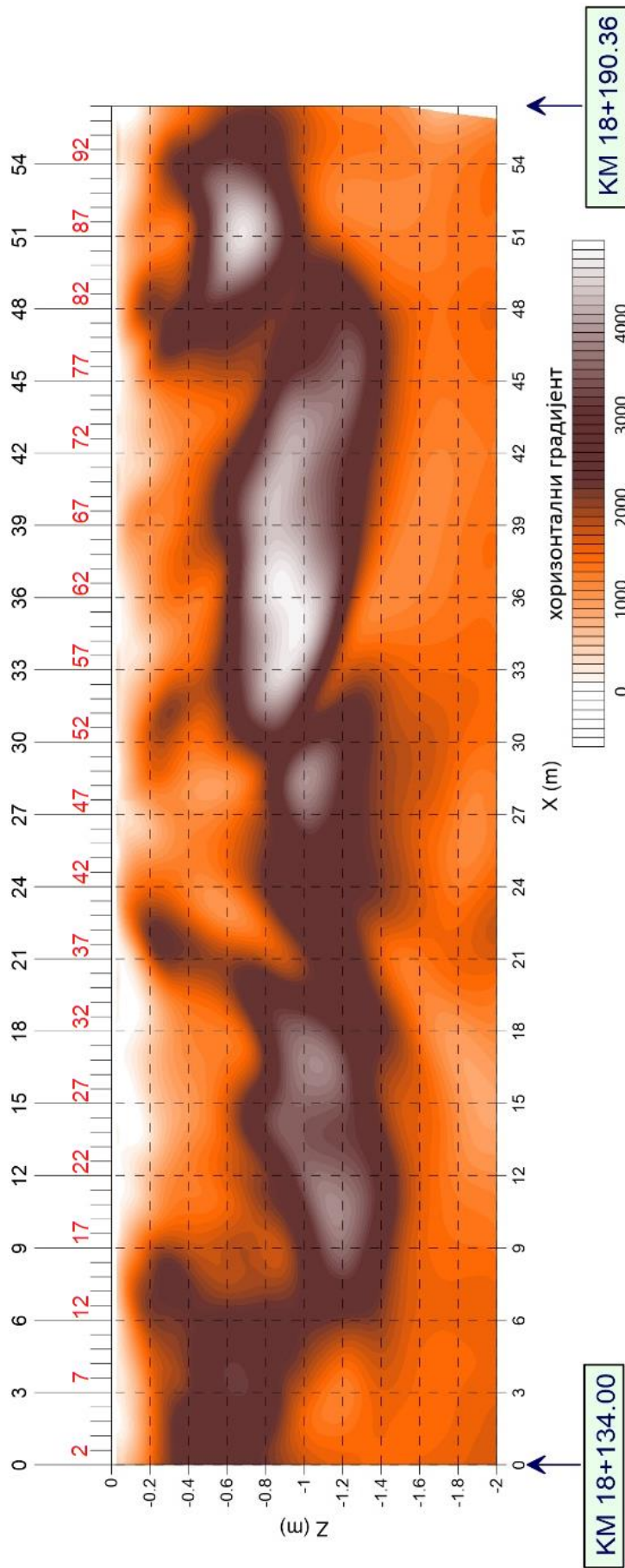
6.3.2.4 Резултати мерења

На слици 6.45 приказана је дистрибуција параметра брзине дуж испитиваног профила колосека број 2. Дуж x осе су приказана растојања изражена у метрима (означен је сваки трећи метар) и маркиране су позиције прагова у колосеку број 2. На вертикалној оси је приказана дубина профила изражена у метрима. Координатни почетак профила се налази у осе прага број 1 у испитиваном колосеку број 2.

На пољу дистрибуције брзина извршена је анализа оријентисаних хоризонталних градијената. Анализирани градијенти оријентисани су у правцу z осе, како би се њима потенцијала свака промена у срединама по параметру брзине. На слици 6.46 приказана је дистрибуција хоризонталних градијената брзине. Дуж x осе су приказана растојања изражена у метрима (означен је сваки трећи метар) и маркиране су позиције прагова. Нумерација прагова је приказана црвеном бојом, уз нумерисање сваког петог прага почевши од прага број 2. На вертикалној оси је приказана дубина профила изражена у метрима. Координатни почетак профила се налази у осе прага број 1 у испитиваном колосеку број 2. На слици 6.46 се уочавају просечне вредности градијената, обојене наранџастом бојом, док максималне вредности које коинцидирају са дисконтинуитетима имају смеђе и беле нијансе.



Слика 6.45 Профил $SP1 - 2D$ дистрибуција брзине V_p

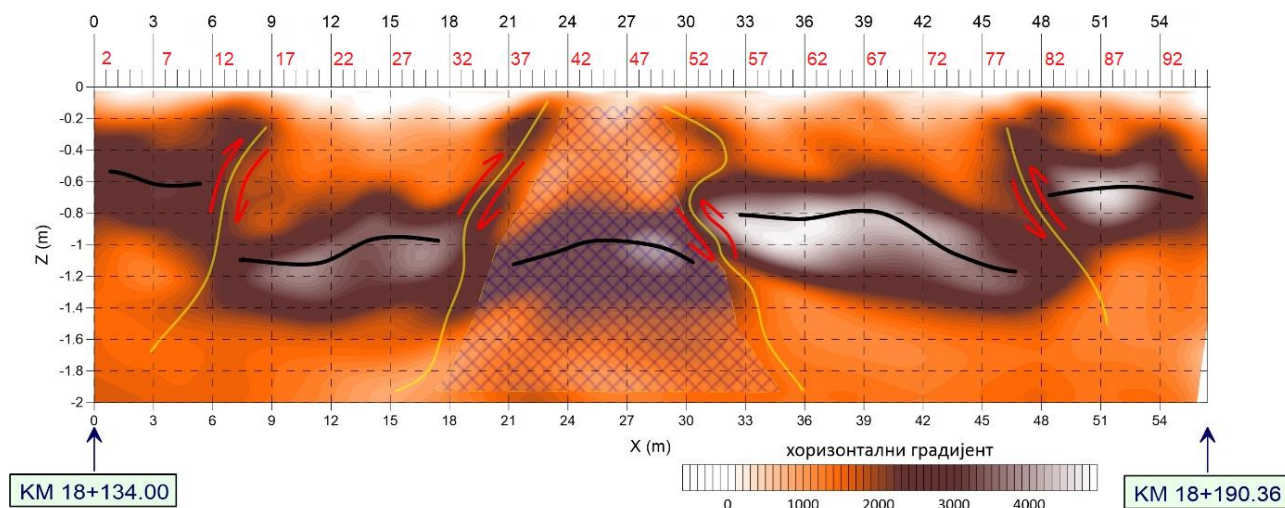


Слика 6.46 Профил SP1 – 2D дистрибуција хоризонталног градијента V_p

6.3.2.5 Дискусија резултата мерења

На основу профила дистрибуција брзине V_p (слика 6.45) уочава се повећање брзина по дубини слојева колосечне подлоге, што указује на пораст густине и крутости по дубини подлоге. Ово одговара реалној ситуацији, где је густина и крутост застора мања у односу на слој тампона, односно густина и крутост тампона су мањи у односу на материјал земљаног трупа. Међутим, на профилу $SP1$ се уочавају деформисане границе густине материјала, што указује на деформацију носећих слојева колосечне подлоге под утицајем оптерећења од саобраћаја. Са друге стране, присуство влаге у подлози додатно утиче на деформисане границе између материјала различитих густина. С обзиром на то да су геофони постављани дуж средине испитиваног колосека број 2, приказани профил дистрибуција брзине V_p односи се на стање колосечне подлоге дуж подужне осе колосека. На основу слике 6.45 може се закључити да је дошло до деформације носећих слојева колосечне подлоге, односно до мешања материјала из различитих носећих слојева, као и продора влаге. Са друге стране, с обзиром на положај профила $SP1$ не могу се донети закључци о стању колосечне подлоге у околини ослањања возних шина на прагове. Генерално се може закључити да је подлога дуж колосека број 2 изразито нехомогена у погледу еластичности.

За ближе сагледавање стања колосечне подлоге користи се профил дистрибуције хоризонталног градијента, који означава меру релативног кретања два суседна слоја различитих густина и еластичности. На слици 6.47 је приказан профил дистрибуције хоризонталног градијента V_p на основу кога се могу уочити зоне пропадања планума и горње површи земљаног трупа дуж средине колосека број 2, са уцртаним жутим линијама које су границе сегмената са различитим нивоима пропадања планума. Шрафирана зона представља зону са најдубљим пропадањем планума. С обзиром да се приказани профил дистрибуције хоризонталног градијента односи на подлогу дуж испитиваног колосека, не могу се доносити закључци у вези изразито различитог броја дефеката на левој и десној возној шини, али се може закључити да неједнака вертикална крутост подлоге дуж колосека доприноси појави и развоју дефеката типа *squat*.



Слика 6.47 Подела профила $SP1$ на сегменте са уцртаним границама максималних промена хоризонталног градијента V_p

7 ЗАКЉУЧАК И СМЕРНИЦЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА

Управљање неравнинама малих таласних дужина на горњој површи главе шине у зони додира са точковима железничких возила је изузетно важан део управљања животним веком возних шина у железничком колосеку. Са порастом брзина савремених железничких возила, ова област управљања добија све већи значај на савременим железницама широм света. Поред економског аспекта, управљање неравнинама малих таласних дужина има и изузетно важан утицај на безбедност савременог железничког саобраћаја. У том смислу, приступ теми истраживања у овој Дисертацији заснован је на одрживом развоју железничке инфраструктуре који укључује комплексне и често супротно усмерене захтеве корисника, железнице, привреде, животне средине и друштвене заједнице. Опредељење Републике Србије да развија железнички транспорт у оквирима европске транспортне политике чини да ова тема постане изузетно актуелна и у оквирима железничке мреже у Србији.

У оквирима истраживања на светском нивоу, ова тема још увек представља отворено питање, што потврђује све већи број истраживача који прате и анализирају узроке појаве и развоја неравнина малих таласних дужина. У овој Дисертацији представљен је оригинални приступ истраживањима који је заснован на испитивању утицаја крутости колосечне подлоге на појаву и развој дефеката типа *squat*. До сада је у литератури било уобичајено представљање резултата испитивања интеракције точак/шина у специфичним режимима вожње (кочење/убрзавање), уз подразумевање да не постоји утицај подлоге на феномен *squat* дефеката. Нажалост, велики број железничких несрећа широм света, од којих је најпознатија несрећа у Енглеској на излазу из станице Хетфилд (*Hatfield*), показују да УИ још увек нису овладали управљањем неравнинама малих таласних дужина.

Истраживања у овој Дисертацији су део напора да се овај проблем анализира са аспекта утицаја конструкције и стања колосечне подлоге. У том смислу, концепт управљања неравнинама развијан је у оквирима интегралног одржавања конструкције горњег и доњег строја током целокупног животног века железничке инфраструктуре (Поглавље 2). Поред тога, анализирани су изузетно комплексни утицаји на животну средину током грађења (смернице за правилну примену пепела у грађењу доњег строја) и одржавања (смернице за управљање брушењем шинског челика) железничке инфраструктуре.

Спроведено истраживање на нивоу постојећих савремених знања (*state of the art*) у области разумевања механизма појаве и развоја неравнина малих таласних дужина при

цикличном понављању котрљања точкова шинских возила на возној површи главе шина у колосеку било је основа за дефинисање општих смерница за управљање *RCF* дефектима. У Поглављу 3 приказане су опште смернице на основу којих сваки УИ треба да развије сопствену стратегију у складу са перформансама инфраструктуре и возног парка, као и са особеностима финансирања одржавања (планови одржавања и начин њиховог финансирања, модел усклађивања одржавања возила и инфраструктуре). Смернице за управљање су обухватиле комплексне утицаје променљивог коефицијента трења у додиру точак/шина, металуршки аспект шинског челика са смерницама за избор квалитета шинског челика, утицај променљиве крутости подлоге дуж возних шина, као и разматрање различитих стратегија одржавања са аспекта примене савремених технологија репрофилисања главе возних шина и подмазивања у зонама додира бока главе возне шине и венца точка.

У Дисертацији је указано на важност откривања дефеката у што ранијој фази њиховог развоја. Посебно је указано на ограничене могућности уобичајених метода инспекције које се користе на железничкој мрежи у Србији, као и реалне опасности од непрепознавања *RCF* дефеката на деловима главе шине са сложеном геометријом. Приказане су стандардизоване методе инспекције које се примењују на европској железничкој мрежи, као и савремене методе без разарања које би се могле применити за инспекцију шинских дефеката *squat* и *НС*. Посебно су разматране методе ултразвучног испитивања, испитивања на основу мерења буке и вибрација, електромагнетско и магнетско испитивање, испитивање сензорима базираним на оптичким влакнима, као и методе визуелне инспекције. Поред тога, разматрана је могућност комбиновања две или више метода инспекције са циљем да се повећа вероватноћа ране детекције *RCF* дефеката у условима несметаног функционисања железничког саобраћаја, што је један од захтева одрживог развоја савременог железничког транспорта. За сваку анализирану методу детекције *RCF* дефеката приказани су параметри дефекта које је могуће одредити њеном применом.

У Поглављу 5 је приказан теоријски поступак за одређивање укупне крутости шинске подлоге која се користи за димензионисање конструкције горњег строја и представљени су узроци неслагања теоријске и измерене крутости колосека. У том смислу, указано је на изузетну важност развоја метода за што тачније одређивање вертикалне крутости колосека, како би се омогућила прогноза развоја неравнина на горњој површи главе шине у циљу дефинисања плана одржавања (избор активности одржавања и утврђивање термина за њихово спровођење). У оквиру представљања савремених метода за одређивање вертикалне крутости колосека, посебно су представљене геофизичке методе које су примењене за утврђивање неравномерне крутости дуж испитиваног колосека у станици Панчево Варош, где је обављен експериментални део истраживања у оквиру ове Дисертације.

Експериментални део истраживања обухватио је општу и детаљну визуелну инспекцију *squat* дефеката и геофизичка испитивања доњег строја за утврђивање крутости подлоге дуж колосека, као и дуж возних шина. Критеријуми за избор експерименталне деонице, опис експерименталне деонице, опис примењених метода са описом мерних система, опис спровођења експеримената на терену и резултати испитивања са пратећим дискусијама представљени су у Поглављу 6. Примењене су две геофизичке методе (електрометријска и сеизмометријска метода) како би се задовољили комплексни захтеви за дефинисање модела колосечне подлоге у мултипараметарском облику. На основу модела израђени су профили и карте који су били основа за анализу узрока пропадања геометрије колосека, узрока појаве и напредовања шинских дефеката, позиције лоше ослоњених прагова, као и појаве меких и влажних слојева у колосечној подлози.

С обзиром на то да је у пријави Дисертације постављена хипотеза да крутост шинске подлоге утиче на појаву и развој неравнина малих таласних дужина на возној површи шине у колосеку, посебну важност има дискусија резултата геофизичких испитивања колосечне

подлоге која је извршена уз поређење са резултатима спроведене детаљне визуелне инспекције. Резултати визуелне инспекције су недвосмислено указали на специфичну појавност већег обима *squat* дефеката на возној површи леве шине у испитиваном колосеку. Овај необични феномен је поређен са резултатима обе геофизичке методе, који су недвосмислено указали на нехомогеност колосечне подлоге дуж колосека. С обзиром на то да је сеизмометријска метода примењена дуж средине испитиваног колосека, резултати су указали на нехомогеност колосечне подлоге дуж средине испитиваног колосека. Са друге стране, резултати испитивања применом електрометријске методе омогућили су израду три електрометријска профила (са леве стране, у средини и са десне стране колосека) и карте за три дубинска нивоа (ниво застора, планума и тампона), тако да је утврђена значајна разлика услова ослањања дуж леве и десне шине, као и постојање празнина испод средњег дела лоше ослоњених прагова. У дискусији резултата недвосмислено је указано да изражене нагле промене крутости подлоге испод леве возне шине могу да се доведу у корелацију са значајно израженијом појавом *squat* дефеката на површини ове возне шине (73% на левој и 27% на десној шини).

Поред тога, спроведена истраживања су доказала да возна средства имају такође значајан утицај на појаву и развој дефеката. Од укупног броја детектованих *squat* дефеката, 87% се налази на колосеку број 2, док се 13% налази на колосеку број 3. Колосек број 2 користи се примарно за пријем и отпрему електромоторних путничких гарнитура, док се колосек број 3 примарно користи за пријем и отпрему теретних возова. Овакав закључак се у потпуности слаже са резултатима статистичког истраживања дефеката типа *squat* на железничкој мрежи у Швајцарској.

Такође, утврђено је да појавност и облик *squat* дефекта зависе од услова организације саобраћаја. У литератури се облик *squat* дефекта описује уз дефинисање тзв. „водеће“ и „пратеће“ прслине које се уочавају у границама карактеристичне локалне депресије возне површи на глави шине. Визуелна инспекција на терену показује да у условима двосмерног саобраћаја не постоји оваква хијерархија и оријентација прслина, односно *squat* дефекат садржи мрежу неправилних прслина.

Даља истраживања треба да обухвате утврђивање стања колосечне подлоге непосредно након прихватања изведених радова на горњем и доњем строју (изградња нових и реконструисаних колосека). На тај начин, спроведена испитивања би се могла третирати као нулта секвенца геофизичког мониторинга, што би омогућило спровођење мониторинга у даљем периоду ради праћења стања колосечне подлоге током експлоатације колосека. Циљ оваквог мониторинга био би предузимање правовремених активности одржавања колосечне подлоге како би се продужио животни век конструкције и смањили укупни трошкови њеног одржавања.

С обзиром на то да је у међувремену, због коришћења геотермалне енергије за грејање стамбених објеката у оближњем насељу, дошло до исушивања „изданског ока“ (слика 6.36), неопходно је поновити истраживање стања колосечне подлоге у условима драстичног опадања нивоа подземних вода у околини станице Панчево Варош. На тај начин би се испитао утицај промене нивоа подземних вода на стање колосечне подлоге и развој дефеката на возној површини шина у претходно испитиваном колосеку.

У наредним испитивањима требало би обухватити испитивање стања колосечне подлоге у зонама ослањања возних шина на прагове како би се добили резултати који указују на квалитет ослањања прагова на застор. Циљ оваквог испитивања био би утврђивање лоше ослоњених прагова, како током пријема радова, тако и током експлоатације. Правовремено откривање и санирање лоше ослоњених прагова утицало би на одлагање развоја дефеката на возној површи шина у колосеку.

Сврха спроведених истраживања је унапређење ефикасности одржавања железничке инфраструктуре, нарочито у области управљања неравнинама малих таласних дужина на возној површи главе шине. Очекује се да се резултати истраживања примене у техничким прописима за одржавање железничке инфраструктуре у Републици Србији.

Литература

- [1] Vilotijević, M., Vukićević, M., Lazarević, L., Popović, Z. (2018). Sustainable railway infrastructure and specific environmental issues in the Republic of Serbia. *Tehnički vjesnik*, 25(Supplement 2), 516-523. <https://doi.org/10.17559/TV-20171019124644>.
- [2] CEN: EN 13231-3:2012, Railway applications - Track - Acceptance of works - Part 3: Acceptance of reprofiling rails in track. European Standard, Brussels, Belgium, 2012, p. 39.
- [3] CEN: EN 13231-5:2018, Railway applications - Track - Acceptance of works - Part 5: Procedures for rail reprofiling in plain line, switches, crossings and expansion devices. European Standard, Brussels, Belgium, 2018, p. 39.
- [4] CEN: EN 13848-1:2019, Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 1: Characterization of track geometry. European Standard, Brussels, Belgium, 2019, p. 50.
- [5] CEN: EN 13848-2:2020, Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 2: Measuring systems - Track recording vehicles. European Standard, Brussels, Belgium, 2020, p. 45.
- [6] CEN: EN 13848-3:2009, Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 3: Measuring systems - Track construction and maintenance machines. European Standard, Brussels, Belgium, 2009, p. 25.
- [7] CEN: EN 13848-4:2011, Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 4: Measuring systems - Manual and lightweight devices. European Standard, Brussels, Belgium, 2011, p. 29.
- [8] CEN: EN 13848-5:2017, Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 5: Geometric quality levels - Plain line, switches and crossings. European Standard, Brussels, Belgium, 2017, p. 25.
- [9] CEN: EN 13848-6:2014, Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 6: Characterisation of track geometry quality. European Standard, Brussels, Belgium, 2014, p. 28.
- [10] Office of rail regulation: Train derailment at Hatfield - A final report by the independent investigation board, London, 2006, p. 245. https://www.railwaysarchive.co.uk/documents/HSE_HatfieldFinal2006.pdf

- [11] D-RAIL project: D1.1–Summary report and database of derailments incidents, 2012, p. 74. http://d-rail-project.eu/IMG/pdf/DR-D1-1-F1-Summary_Report_and_Database_of_derailment_incidents_20120405.pdf
- [12] Magel, E., Mutton, P., Ekberg, A., Kapoor, A. (2016). Rolling contact fatigue, wear and broken rail derailments. *Wear*, 366, 249-257. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.06.009>
- [13] International Union of Railways: UIC Code 712 - Rail Defects. Paris, France, 2002, p. 111.
- [14] CEN: EN 16729-3:2018, Railway applications - Infrastructure - Non-destructive testing on rails in track - Part 3: Requirements for identifying internal and surface rail defects. European Standard, Brussels, Belgium, 2018, p. 37.
- [15] Дирекција за железнице: Правилник о техничким условима и одржавању горњег строја железничких пруга. Службени гласник РС, бр. 39/2016, pp. 152-189 и 74/2016, pp. 14-26. <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/drugidrzavniorganizacionizacije/pravilnik/2016/39/4/reg>
- [16] International Union of Railways: UIC Code 725 - Treatment of rail defects. Paris, France, 2007, p. 32.
- [17] Република Србија: Закон о интероперабилности железничког система. Службени гласник РС, бр. 41/2018, pp. 108-119. <http://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2018/41/9/reg/>
- [18] Commission regulation (EU) No 1299/2014: Technical specifications for interoperability relating to the ‘infrastructure’ subsystem of the rail system in the European Union. Official Journal of the European Union, L356, 2014, pp. 1-109. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1299&from=EN>
- [19] CEN: EN 16729-1:2016, Railway applications - Infrastructure - Non-destructive testing on rails in track - Part 1: Requirements for ultrasonic inspection and evaluation principles. European Standard, Brussels, Belgium, 2016, p. 40.
- [20] CEN: EN 16729-2:2020, Railway applications - Infrastructure - Non-destructive testing on rails in track - Part 2: Eddy current testing of rails in track. European Standard, Brussels, Belgium, 2020, p. 32.
- [21] Vilotijević, M. (2015). Еколошки аспект конкурентности железничког транспорта. *Izgradnja*, 69(3-4), 106-116.
- [22] European Commission: White paper - European transportation policy for 2010: Time to decide. Office for official publications of the European communities, Luxembourg, 2001, p. 126. https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/strategies/doc/2001_white_paper/lb_texte_complet_en.pdf
- [23] European Commission: White paper on transport - Roadmap to a single European transport area - Towards a competitive and resource efficient transport system. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2011, p. 32. https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/strategies/doc/2011_white_paper/white-paper-illustrated-brochure_en.pdf
- [24] Република Србија: Закон о потврђивању Кјото протокола уз оквирну конвенцију Уједињених Нација о промени климе. Службени гласник РС – Међународни уговори, бр. 88/2007 и 38/2009.
- [25] United Nations: Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998, p. 21. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

- [26] Popović, Z., Lazarević, L. (2014). Javni putnički saobraćaj na razdaljinama do 800 km. *Put i saobraćaj*, 60(3), 49-59.
- [27] Popović, Z., Lazarević, L., Vukićević, M., Vilotijević, M., Mirković, N. The modal shift to sustainable railway transport in Serbia. In *MATEC Web of Conferences*, 2017, Vol. 106, pp. 967-976. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710605001>
- [28] Commission regulation (EU) No 1300/2014: Technical specifications for interoperability relating to accessibility of the Union's rail system for persons with disabilities and persons with reduced mobility. Official Journal of the European Union, L356, 2014, pp. 110-178. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1300&from=EN>
- [29] Ernst, J., Kieffer, E. (2006). Barrierefreies Reisen durch Harmonisierung der Einstiegshöhen: Bahnhöfe. *ETR. Eisenbahntechnische Rundschau*, 55(5), 281-288.
- [30] European Commission: Passengers' accessibility to heavy rail systems. European research area: Structural aspects - COST Action 335. Office for official publications of the European communities, Luxembourg, 2004, p. 98. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/63b70ceb-7ebd-4064-a529-eda2c48f67ce/language-en>
- [31] Popović, Z., Stevanović, K., Puzavac, L. (2009). Railway terminals: Accessibility for persons with reduced mobility. *Spatium*, (20), 60-67.
- [32] Popovic, Z., Puzavac, L., Lazarevic, L. (2012). Improving the accessibility of passenger railways in the Republic of Serbia. *RTR-Railway Technical Review-English Edition*, 52(2), 25-29.
- [33] International Union of Railways: Leaflet 140 – Accessibility to stations in Europe. France, Paris, 2008, p. 49.
- [34] Vukićević, M., Popović, Z., Despotović, J., Lazarević, L. (2018). Fly ash and slag utilization for the Serbian railway substructure. *Transport*, 33(2), 389-398. <https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1252427>
- [35] Република Србија: Закон о управљању отпадом. Службени гласник РС, бр. 36/2009, 88/2010, 14/2016 и 95/2018, pp. 115-135. <http://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SIGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2009/36/14/reg>
- [36] Република Србија: Уредба о техничким и другим захтевима за пепео, као грађевински материјал намењен за употребу у изградњи, реконструкцији, санацији и одржавању инфраструктурних објеката јавне намене. Службени гласник РС, бр. 56/2015, pp. 3-4. <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SIGlasnikPortal/viewdoc?uuid=10c305de-8cd8-411b-a35e-a9f71268aad5>
- [37] Институт за испитивање материјала (ИМС) и Грађевински факултет Универзитета у Београду: Коришћење летећег пепела и шљаке произведених у ТЕ ЈП ЕПС за потребе железнице, Студија, Београд, 2015, p. 156.
- [38] Popović, Z., Puzavac, L., Lazarević, L. Kontrola buke u dodiru točka i šine. In *Međunarodna naučna konferencija "Održivi razvoj u funkciji zaštite životne sredine"*, Beograd, Srbija, 18 - 20. april, 2011, pp. 184-185.
- [39] Lazarević, L., Vučković, D., Popović, Z. (2016). Assessment of sleeper support conditions using micro-tremor analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(8), 1828-1841. <https://doi.org/10.1177/0954409715615629>
- [40] Popović, Z., Lazarević, L. (2013). The role of railway in the European transport policy. *Izgradnja*, 67(7-8), 285-291.

- [41] Popović, Z., Lazarević, L., Brajović, L., Gladović, P. (2014). Managing rail service life. *Metalurgija*, 53(4), 721-724.
- [42] Popović, Z., Lazarevic, L., Vatin, N. (2015). Railway gauge expansion in small radius curvature. *Procedia Engineering*, 117, 841-848. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.149>
- [43] Lichtberger, B. (2007). Das System Gleis und seine Instandhaltung. *Eisenbahningenieur (EI)*, 58(1), 10-19.
- [44] Fei, J., Jie, Y., Hong, C., Yang, C. (2020). Comparative analysis of design parameters for high-speed railway earthworks in different countries and a unified definition of embankment substructure. *Baltic Journal of Road & Bridge Engineering (RTU Publishing House)*, 15(2), 127-144. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.476>
- [45] CEN: EN 13674-1:2011, Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above. European Standard, Brussels, Belgium, 2011, p. 108.
- [46] CEN: EN 13231-1:2013, Railway applications - Track - Acceptance of works - Part 1: Works on ballasted track - Plain line, switches and crossings. European Standard, Brussels, Belgium, 2013, p. 30.
- [47] CEN: EN 13231-4:2013, Railway applications - Track - Acceptance of works - Part 4: Acceptance of reprofiling rails in switches and crossings. European Standard, Brussels, Belgium, 2013, p. 9.
- [48] Popović, Z., Puzavac, L., Lazarević, L. (2011). Rail defects due to rolling contact fatigue. *Građevinski materijali i konstrukcije*, 54(2), 17-29.
- [49] UIC/WEC Joint research project on rail defect management: Analytical Modelling of Rail Defects and Its Applications to Rail Defect Management, U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts, 2003, p. 31. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/8995>
- [50] Cannon, D. F., Pradier, H. (1996). Rail rolling contact fatigue research by the European Rail Research Institute. *Wear*, 191(1-2), 1-13. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06650-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06650-0)
- [51] Heyder, R., Brehmer, M. (2014). Empirical studies of head check propagation on the DB network. *Wear*, 314(1-2), 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.035>
- [52] Schoech, W., Heyder, R., Grohmann, H. D. Contact geometry and surface fatigue - guidelines for appropriate rail maintenance. In *Proceedings of the 7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2006)*, Brisbane, Australia, September 24-27, 2006, p. 7.
- [53] Grohmann, H. D. Beschädigungsarten an der Schiene - verursacht durch den Betrieb. In *Internationales Symposium Schienenfehler*, Brandenburg, Germany, November 16-17, 2000, pp. 27-38.
- [54] Heyder, R., Girsch, G. (2005). Testing of HSH[®] rails in high-speed tracks to minimise rail damage. *Wear*, 258(7-8), 1014-1021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.050>
- [55] Dey, A., Casperson, R., Pohl, R., Thomas, H. M., Bam, B. Die Klassifizierung von Oberflächenfehlern in Schienen mit der Wirbelstromprüfung. In *DGZfP-Jahrestagung*, Münster, Germany, 18-20 Mai, 2009, S. 9.
- [56] Zoeteman, A., Dollevoet, R., Li, Z. (2014). Dutch research results on wheel/rail interface management: 2001–2013 and beyond. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(6), 642-651. <https://doi.org/10.1177/0954409714524379>

- [57] Dollevoet, R. P. B. J. Design of an anti-head checking profile based on stress relief. PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2010, p. 152
- [58] Steenbergen, M., Dollevoet, R. (2013). On the mechanism of squat formation on train rails– Part I: Origination. *International Journal of fatigue*, 47, 361-372. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.04.023>
- [59] Steenbergen, M., Dollevoet, R. (2013). On the mechanism of squat formation on train rails– Part II: Growth. *International journal of fatigue*, 47, 373-381. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.04.019>
- [60] Krishna, V. V., Hossein-Nia, S., Casanueva, C., Stichel, S. (2020). Long term rail surface damage considering maintenance interventions. *Wear*, 460, 203462. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203462>
- [61] Andersson, R. Squat defects and rolling contact fatigue clusters – Numerical investigations of rail and wheel deterioration mechanisms. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2018, p. 62.
- [62] Popović, Z., Radović, V., Lazarević, L., Vukadinović, V., Tepić, G. (2013). Rail inspection of RCF defects. *Metalurgija*, 52(4), 537-540.
- [63] Popović, Z., Brajović, L., Lazarević, L., Milosavljević, L. (2014). Rail defects head checking on the Serbian railways. *Tehnički vjesnik*, 21(1), 147-153.
- [64] Popović, Z., Radović, V. (2013). Analysis of cracking on running surface of rails. *Građevinar*, 65(3), 251-259. <https://doi.org/10.14256/JCE.877.2012>
- [65] Popović, Z., Radović, V. Rolling contact fatigue of rails. In *Proceedings of 3rd International Scientific and Professional Conference „CORRIDOR 10 - A sustainable way of integrations“*, Belgrade, Serbia, October 25, 2012, pp. 227-237. <https://www.yumpu.com/en/document/read/32263838/zbornik-radova-koridor-10-kirilo-savia/116>
- [66] Popović, Z., Lazarević, L., Brajović, L., Vilotijević, M. The importance of rail inspections in the urban area-aspect of head checking rail defects. In *International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities (Spbuicemf-2015)*, 2015, Vol. 117, pp. 596-608. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.220>.
- [67] Satoh, Y., Iwafuchi, K. (2008). Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan. *Wear* 265(9–10), 1342–1348. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.036>
- [68] Ishida, M. (2013). Rolling contact fatigue (RCF) defect of rails in Japanese railways and its mitigation strategies. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(1), 67-74.
- [69] Ishida, M. (2018). History of mitigating rolling contact fatigue and corrugation of railway rails in Japan-Review. *EPI International Journal of Engineering*, 1(2), 13-24. <https://doi.org/10.25042/epi-ije.082018.02>
- [70] Zhai, W., Gao, J., Liu, P., Wang, K. (2014). Reducing rail side wear on heavy-haul railway curves based on wheel-rail dynamic interaction. *Vehicle System Dynamics*, 52(sup.1), 440–454. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.906633>
- [71] Liu, J. P., Zhou, Q. Y., Zhang, Y. H., Liu, F. S., Tian, C. H., Li, C., Zhi, X. Y., Li, C. G., Shi, T. (2019). The formation of martensite during the propagation of fatigue cracks in pearlitic rail steel. *Materials Science and Engineering: A*, 747, 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.049>

- [72] Australian Rail Track Corporation: Rail Defects Handbook, Engineering Practices Manual Civil Engineering, 2006, p. 68. <https://extranet.artc.com.au/docs/eng/track-civil/guidelines/rail/RC2400.pdf>
- [73] Pal, S., Valente, C., Daniel, W., Farjoo, M. (2012). Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation. *Wear*, 284-285, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.02.013>
- [74] Pal, S., Daniel, W., Farjoo, M. (2013). Early stages of rail squat formation and the role of a white etching layer. *International Journal of Fatigue*, 52, 144-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.02.016>
- [75] Marich, S. (2005). Rail grinding strategies adopted in Australia. *Rail engineering international*, 34(1), 4–6.
- [76] Merrick, J.R.W., Soyer, R., Mazzuchi, T.A. (2005). Are maintenance practices for railroad tracks effective?. *Journal of the American Statistical Association*, 100(469), 17-25. <https://doi.org/10.1198/016214504000002104>
- [77] Ghofrani, F., Pathak, A., Mohammadi, R., Aref, A., He, Q. (2020). Predicting rail defect frequency: An integrated approach using fatigue modeling and data analytics. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(2), 101-115. <https://doi.org/10.1111/mice.12453>
- [78] Бижић, М. Истраживање утицајних параметара у интеракцији точак-шина на стабилност кретања железничких возила. Докторска дисертација, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитет у Крагујевцу, 2015, p. 241.
- [79] Kaneta, M., Matsuda, K., Murakami, K., Nishikawa, H. (1998). A possible mechanism for rail dark spot defects. *ASME Journal of Tribology*, 120(2), 304–309. <https://doi.org/10.1115/1.2834426>
- [80] Radović, V. Upravljanje defektima usljed zamora šinskog čelika. Magistarski rad, Građevinski fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, 2012, p. 103.
- [81] Esveld, C. (2001). *Modern railway track, Second edition*. Delf University of Technology, MRT-Productions, The Netherlands.
- [82] Саобраћајни институт ЦИП: Узроци убрзаног трошења точкова шинских возила ЈП "Железнице Србије" и могућности побољшања стања, Студија, Београд, 2008, p. 429.
- [83] Popović, Z. (2004). *Osnove projektovanja železničkih pruga*. Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, p. 266.
- [84] Wu, B., An, B., Wen, Z., Wang, W., Wu, T. (2019). Wheel–rail low adhesion issues and its effect on wheel–rail material damage at high speed under different interfacial contaminations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(15), 5477-5490. <https://doi.org/10.1177%2F0954406219842285>
- [85] Zhao, X., Li, Z., Dollevoet, R. (2013). The vertical and the longitudinal dynamic responses of the vehicle–track system to squat-type short wavelength irregularity. *Vehicle system dynamics*, 51(12), 1918-1937. <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.847466>
- [86] International Union of Railways: UIC Code 721 - Recommendations for the use of rail steel grades. Paris, France, 2005, p. 15.
- [87] INNTRACK GUIDELINE: Definitive guidelines on the use of different rail grades, Deliverable report D4.1.5GL, 2006, p. 45. http://www.charmec.chalmers.se/innotrack/deliverables/sp4/d415-f3-railgrade_selection.pdf

- [88] Grassie, S.L., Fletcher, D.I., Gallardo Hernandez, E.A., Summers, P. (2012). Studs: a squat-type defect in rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(3), 243-256. <https://doi.org/10.1177/0954409711421462>
- [89] Deng, X., Qian, Z., Li, Z., Dollevoet, R. (2018). Investigation of the formation of corrugation-induced rail squats based on extensive field monitoring. *International Journal of Fatigue*, 112, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.03.002>
- [90] Sshöch, W. (2008). Entwicklung von Schleifstrategien gegen Rollkontaktermüdung: Ein internationaler Überblick. *ZEV rail Glasers Annalen*, 132(10), 426-434.
- [91] Hijazi, A.: Introduction to non-destructive testing techniques, Ultrasonic testing. <https://eis.hu.edu.jo/acuploads/10526/ultrasonic%20testing.pdf>
- [92] Olympus. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-beam/steering/>
- [93] Chinta, P.K., Standop, S., Fuchs, G., Koers, D. Ultrasonic testing of rails using phased array. In *12th European Conference on Non-destructive Testing (ECNDT)*, Gothenburg, Sweden, June 11-15, 2018, p. 7. <http://www.ecndt2018.com/abstract/ultrasonic-testing-of-rails-using-phased-array/>
- [94] Alaix, R. High speed rail testing with phased array probes. In *Proceedings of the 7th World Congress on Railway Research (WCRR)*, Montreal, Canada, June 4-8, 2006, p. 6.
- [95] Zhang, Y., Gao, X., Peng, C., Wang, Z., Li, X. Rail inspection research based on high speed phased array ultrasonic technology. In *2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, Nanchang, China, June 22-24, 2016, pp. 181-184. <https://doi.org/10.1109/FENDT.2016.7992020>
- [96] Socomate International. <https://www.socomate.com/phased-array-faast>
- [97] Kenderian, S.H.A.N.T., Djordjevic, B.B., Cerniglia, D., Garcia, G. (2006). Dynamic railroad inspection using the laser-air hybrid ultrasonic technique. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 48(6), 336-341. <https://doi.org/10.1784/insi.2006.48.6.336>.
- [98] Cerniglia, D., Garcia, G., Kalay, S., Prior, F. Application of laser induced ultrasound for rail inspection. In *Proceedings of the 7th World Congress on Railway Research (WCRR)*, Montreal, Canada, June 4-8, 2006, p. 7.
- [99] Kenderian, S., Cerniglia, D., Djordjevic, B.B., Garcia, G. (2005). Laser-air hybrid ultrasonic technique for dynamic railroad inspection applications. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 47(6), 336-340. <https://doi.org/10.1784/insi.47.6.336.66454>.
- [100] Edwards, R.S., Clough, A.R., Rosli, M.H., Hernandez-Valle, J.F., Dutton, B. Detection and characterisation of surface cracking using scanning laser techniques. In *AIP Conference Proceedings*, 2012, Vol. 1433, No. 1, pp. 563-566. <https://doi.org/10.1063/1.3703250>
- [101] Dutton, B., Clough, A.R., Rosli, M.H., Edwards, R.S. (2011). Non-contact ultrasonic detection of angled surface defects. *NDT & E International*, 44(4), 353-360. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.02.001>.
- [102] Hernandez-Valle, F., Clough, A.R., Edwards, R.S. (2014). Stress corrosion cracking detection using non-contact ultrasonic techniques. *Corrosion Science*, 78, 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.10.018>.
- [103] Rose, J.L., Avioli, M.J., Mudge, P., Sanderson, R. (2004). Guided wave inspection potential of defects in rail. *NDT & E International*, 37(2), 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.04.001>.

- [104] Sohn, Y., Krishnaswamy, S. (2004). Interaction of a scanning laser-generated ultrasonic line source with a surface-breaking flaw. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(1), 172-181. <https://doi.org/10.1121/1.1630997>.
- [105] di Scalea, F.L. (2000). Advances in non-contact ultrasonic inspection of railroad tracks. *Experimental Techniques*, 24(5), 23-26. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2000.tb02352.x>.
- [106] Han, S.W., Cho, S.H., Jang, G.W., Park, J.H. (2016). Non-contact inspection of rail surface and internal defects based on electromagnetic ultrasonic transducers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(3), 427-434. <https://doi.org/10.1177/1045389X15610910>.
- [107] Ultrakraft, JSC. <https://www.ultrakraft.ru/en/technology/emat>
- [108] Petcher, P.A., Potter, M.D.G., Dixon, S. (2014). A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail. *NDT & E International*, 65, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.03.007>.
- [109] European Commission: RIFLEX (Rail inspection by Flexible Electromagnetic Acoustic Transducer), Final Report Summary, 2016. <https://cordis.europa.eu/project/id/605115/reporting>
- [110] Dhayalan, R., Murthy, V.S.N., Krishnamurthy, C.V., Balasubramaniam, K. (2011). Improving the signal amplitude of meandering coil EMATs by using ribbon soft magnetic flux concentrators (MFC). *Ultrasonics*, 51(6), 675-682. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2011.01.009>.
- [111] Mariani, S. Non-contact ultrasonic guided wave inspection of rails: next generation approach. PhD Thesis, University of California, San Diego, USA, 2015, p. 320.
- [112] Mariani, S., Nguyen, T., Phillips, R.R., Kijanka, P., di Scalea, F.L., Staszewski, W.J., Fateh, M., Carr, G. (2013). Noncontact ultrasonic guided wave inspection of rails. *Structural Health Monitoring*, 12(5-6), 539-548. <https://doi.org/10.1177/1475921713498533>.
- [113] Mariani, S., Nguyen, T., Zhu, X., di Scalea, F.L. (2017). Field test performance of noncontact ultrasonic rail inspection system. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 143(5), 04017007. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000026>.
- [114] Coccia, S., Phillips, R.R., Bartoli, I., Salamone, S., Rizzo, P., di Scalea, F.L.: On-line high-speed rail defect detection - Part II. Final Report No. DOT/FRA/ORD-12/02, Federal Railroad Administration, Office of Research and Development, Department of Transportation, Washington, DC, 2012, p. 140. https://www.fra.dot.gov/eLib/details/L01290#p18_z5_gD_IRO_IRT_y2012
- [115] Garcia, G., Kalay, S., Cerniglia, D., Prior, F. (2006). U-Rail laser-based ultrasonic inspection system prototype" System overview and status". *Railway Track and Structures*, 102(10), 19-21.
- [116] European Commission: U-RAIL (Non-contact Ultrasonic System for Rail Track Inspection), Final Report Summary, 2011. https://www.cordis.europa.eu/result/rcn/52078_en.html
- [117] European Commission: Improved rail inspection boosts safety, 2012. https://www.cordis.europa.eu/result/rcn/89339_en.html
- [118] INNOTRACK: D4.4.1 - Rail Inspection Technologies, Project no. TIP5-CT-2006-031415, 2008, p. 43. http://www.charmec.chalmers.se/innotrack/deliverables/sp4/d441-f3p-rail_inspection_technologies.pdf

- [119] Mariani, S., di Scalea, F.L. (2018). Predictions of defect detection performance of air-coupled ultrasonic rail inspection system. *Structural Health Monitoring*, 17(3), 684-705. <https://doi.org/10.1177/1475921717715429>.
- [120] Zhu, X., Sternini, S., Capriotti, M., Liang, A., Mariani, S., di Scalea, F.L., Wilson, R. High-speed non-contact passive-only ultrasonic inspection of rails from deconvolutions of wheel-generated noise. In *11th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM 2017)*, Stanford, California, USA, September 12-14, 2017, pp. 2840- 2846. <https://doi.org/10.12783/shm2017/14188>
- [121] di Scalea, F.L., Zhu, X., Capriotti, M., Liang, A.Y., Mariani, S., Sternini, S. (2018). Passive extraction of dynamic transfer function from arbitrary ambient excitations: Application to high-speed rail inspection from wheel-generated waves. *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, 1(1), 011005. <https://doi.org/10.1115/1.4037517>.
- [122] di Scalea, F.L., Zhu, X., Capriotti, M., Liang, A., Mariani, S., Sternini, S., Wilson, R. High-speed non-contact ultrasound system for rail track integrity evaluation. In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems XII*, Denver, Colorado, United States, March 4-8, 2018, Vol. 10600, p. 106000J. <https://doi.org/10.1117/12.2295634>
- [123] FRA Office of Research, Development and Technology: Current Research Projects, TRB Annual Conference, 2018. https://www.fra.dot.gov/eLib/details/L19275#p1_z25_gD_ICW_IOP
- [124] UC San Diego, Jacobs school of engineering: Structural engineering – Research highlights, 2018. http://se.ucsd.edu/sites/se.ucsd.edu/files/research/StructuralEngineering16_17_LowRes.pdf
- [125] Shi, S., Han, Z., Liu, Z., Vallely, P., Soua, S., Kaewunruen, S., Papaelias, M. (2018). Quantitative monitoring of brittle fatigue crack growth in railway steel using acoustic emission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(4), 1211-1224. <https://doi.org/10.1177/0954409717711292>.
- [126] Schwanen, W., Kuijpers, A., Torbijn, J. Ten years of rail roughness control in the Netherlands–Lessons learned. In *Euronoise 2015*, Maastricht, The Netherlands, May 31 - June 3, 2015, pp. 2683-2688.
- [127] CEN: EN 15610:2019, Railway applications - Acoustics - Rail and wheel roughness measurement related to noise generation. European Standard, Brussels, Belgium, 2019, p. 36.
- [128] Synodinos, A. Identification of railway track components and defects by analysis of wheel-rail interaction noise. In *23rd International Congress on Sound and Vibration (ICSV 23) - From Ancient to Modern Acoustics*, Athens, Greece, July 10-14, 2016, Vol. 4, pp. 2422-2429.
- [129] Lee, J.S., Choi, S., Kim, S.S., Kim, Y.G., Kim, S.W., Park, C. (2012). Waveband analysis of track irregularities in high-speed railway from on-board acceleration measurement. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 6(6), 750-759. <https://doi.org/10.1299/jmmp.6.750>.
- [130] Molodova, M., Li, Z., Núñez, A., Dollevoet, R. (2014). Automatic detection of squats in railway infrastructure. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(5), 1980-1990. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2307955>.
- [131] Molodova, M., Li, Z., Dollevoet, R. (2011). Axle box acceleration: Measurement and simulation for detection of short track defects. *Wear*, 271(1-2), 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.003>.

- [132] Molodova, M. Detection of early squats by axle box acceleration. PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 2013, p. 138.
- [133] Molodova, M., Li, Z., Núñez, A., Dollevoet, R. (2015). Parametric study of axle box acceleration at squats. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(8), 841-851. <https://doi.org/10.1177/0954409714523583>.
- [134] Li, Z., Molodova, M., Núñez, A., Dollevoet, R. (2015). Improvements in axle box acceleration measurements for the detection of light squats in railway infrastructure. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(7), 4385-4397. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2389761>.
- [135] Santur, Y., Karaköse, M., Akin, E. Random forest based diagnosis approach for rail fault inspection in railways. In *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO 2016)*, Bursa, Turkey, December 1-3, 2016, pp. 745-750.
- [136] Vilotijević, M., Brajović, L., Pustovgar, A. (2018). Methodology for statistical analysis of squat rail defects. In *Proceedings of the XVIII Scientific-expert conference on railways-RAILCON 18*, Faculty of Mechanical Engineering, Niš, Serbia, October 11-12, 2018, pp. 157-160.
- [137] Marino, F., Distante, A., Mazzeo, P.L., Stella, E. (2007). A real-time visual inspection system for railway maintenance: automatic hexagonal-headed bolts detection. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(3), 418-428. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.893278>.
- [138] Xiong, Z., Li, Q., Mao, Q., Zou, Q. (2017). A 3D laser profiling system for rail surface defect detection. *Sensors*, 17(8), 1791. <https://doi.org/10.3390/s17081791>.
- [139] Min, Y., Xiao, B., Dang, J., Yue, B., Cheng, T. (2018). Real time detection system for rail surface defects based on machine vision. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018(1), article number 3. <https://doi.org/10.1186/s13640-017-0241-y>.
- [140] Szugs, T., Krüger, A., Jansen, G., Beltman, B., Gao, S., Mühlmeil, H., Ahlbrink, R. Combination of ultrasonic and eddy current testing with imaging for characterization of rolling contact fatigue. In *19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)*, Munich, Germany, June 13-17, 2016, Vol. 2, pp. 1603-1610.
- [141] Tang, C., Tian, G.Y., Chen, X., Wu, J., Li, K., Meng, H. (2017). Infrared and visible images registration with adaptable local-global feature integration for rail inspection. *Infrared Physics & Technology*, 87, 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.09.013>.
- [142] Pedrosa, N., Pinto, M., Papaalias, M. INTERAIL-Towards a safer and reliable European Railway. In *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*, Paris, France, April 14-17, 2014, p. 10.
- [143] Rajamäki, J., Vippola, M., Nurmikolu, A., Viitala, T. (2016). Limitations of eddy current inspection in railway rail evaluation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(1), 121-129. <https://doi.org/10.1177/0954409716657848>.
- [144] EMWorks, Inc. <https://www.emworks.com/blog/ndt/eddy-current-testing-3d-simulation-probe-different-excitation-frequencies-crack-sizes-ems>.
- [145] Popović, Z., Brajović, Lj., Lazarević, L. Rail inspection by eddy current method. In *Proceedings of 3rd International Scientific and Professional Conference „CORRIDOR 10 - A sustainable way of integrations“*, Belgrade, Serbia, October 25, 2012, pp. 238-251.

<https://www.yumpu.com/en/document/read/32263838/zbornik-radova-koridor-10-kirilo-savia/116>

- [146] Opanasenko, A., Iurchenko, A., Lutsenko, G., Uchanin, V. Eddy current multi-channel module for in-line high-speed inspection of railroad rails. In *19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)*, Munich, Germany, June 13-17, 2016, Vol. 6, pp. 4478-4484.
- [147] Uchanin, V. New type multidifferential eddy current probes for surface and subsurface flaw detection. In *Zeszyty problemowe Badania nieniszczące*, Warsaw, Poland, 2001, No. 6, pp. 201-204.
- [148] Gutierrez, M., Fava, J.O., Di Fiore, T.A., Ruch, M.C., Romero, R., Vorobioff, J. Development of a differential test device for eddy current rail inspection. In *12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT)*, Gothenburg, Sweden, June 11-15, 2018, p. 8. <http://www.ecndt2018.com/abstract/development-of-a-differential-test-device-for-eddy-current-rail-inspection/>.
- [149] Wilson, J., Tian, G., Mukriz, I., Almond, D. (2011). PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue. *NDT & E International*, 44(6), 505-512. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.05.004>.
- [150] Vaibhav, T., Balasubramaniam, K., Thomas, R., Bose, A.C. Eddy current thermography for rail inspection. In *13th International Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT 2016)*, Gdańsk, Poland, July 4-8, 2016, pp. 862-869. <https://doi.org/10.21611/qirt.2016.138>.
- [151] Peng, J., Zhang, K., Yang, K., He, Z., Zhang, Y., Peng, C., Gao, X. The early stage wheel fatigue crack detection using eddy current pulsed thermography. In *AIP Conference Proceedings*, 2017, Vol. 1806, No. 1, p. 100010. <https://doi.org/10.1063/1.4974675>.
- [152] Yang, R., He, Y., Gao, B., Tian, G.Y., Peng, J. (2015). Lateral heat conduction based eddy current thermography for detection of parallel cracks and rail tread oblique cracks. *Measurement*, 66, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.024>.
- [153] Edwards, R.S., Sophian, A., Dixon, S., Tian, G.Y., Jian, X. (2006). Dual EMAT and PEC non-contact probe: applications to defect testing. *NDT & E International*, 39(1), 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.06.001>.
- [154] Lugg, M., Topp, D. Recent developments and applications of the ACFM inspection method and ACSM stress measurement method. In *9th European Conference on Non - Destructive Testing (ECNDT)*, Berlin, Germany, September 25-29, 2006, Tu.3.6.5, p. 14. <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.6.5.pdf>.
- [155] Papaelias, M.P., Davis, C., Roberts, C., Blakeley, B., Lugg, M. INTERAIL: Development of a novel integrated inspection system for the accurate evaluation of the structural integrity of rail tracks – implementation of the ACFM rail inspection module. In *10th European Conference on Non - Destructive Testing (ECNDT)*, Moscow, Russia, June 7-11, 2010, Vol. 3, pp. 2271-2283. https://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_10_33.pdf.
- [156] Rowshandel, H. The development of an autonomous robotic inspection system to detect and characterise rolling contact fatigue cracks in railway track. PhD Thesis, University of Birmingham, UK, 2014, p. 195.
- [157] Papaelias, M., Kerkyras, S., Papaelias, F., Graham, K. The future of rail inspection technology and the INTERAIL FP7 project. In *51st Annual Conference of the British Institute of Non - Destructive Testing (BINDT)*, Northamptonshire, UK, September 11-13, 2012, p. 9.

- [158] Shen, J.L., Zhou, L., Rowshandel, H., Nicholson, G.L., Davis, C.L. (2015). Determining the propagation angle for non-vertical surface-breaking cracks and its effect on crack sizing using an ACFM sensor. *Measurement Science and Technology*, 26(11), 115604. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/11/115604>.
- [159] Munoz, J.C., Márquez, F.G., Papaalias, M. (2013). Railroad inspection based on ACFM employing a non-uniform B-spline approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 40(2), 605-617. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.05.004>.
- [160] Rowshandel, H., Nicholson, G.L., Shen, J.L., Davis, C.L. (2018). Characterisation of clustered cracks using an ACFM sensor and application of an artificial neural network. *NDT & E International*, 98, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.04.007>.
- [161] Kim, J.W., Park, J., Yu, B.J., Park, S. MFL sensing based NDE technique for defect detection of railway track. In *8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2016)*, Bilbao, Spain, July 5-8, 2016, Vol. 3, pp. 2220-2227. https://www.ndt.net/events/EWSHM2016/app/content/Paper/274_Kim_Rev1.pdf.
- [162] Gao, Y., Tian, G.Y., Li, K., Ji, J., Wang, P., Wang, H. (2015). Multiple cracks detection and visualization using magnetic flux leakage and eddy current pulsed thermography. *Sensors and Actuators A: Physical*, 234, 269-281. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.09.011>.
- [163] Kim, J.W., Park, S. (2018). Magnetic flux leakage sensing and artificial neural network pattern recognition-based automated damage detection and quantification for wire rope non-destructive evaluation. *Sensors*, 18(1), 109. <https://doi.org/10.3390/s18010109>.
- [164] Kang, D., Kim, J.W., Park, S.Y., Park, S. (2014). Non-contact local fault detection of railroad track using MFL technology. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(5), 275-282. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.5.275>.
- [165] Ravan, M., Amineh, R.K., Koziel, S., Nikolova, N.K., Reilly, J.P. (2010). Sizing of multiple cracks using magnetic flux leakage measurements. *IET Science, Measurement & Technology*, 4(1), 1-11. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-smt.2009.0054>.
- [166] Dehui, W., Lingxin, S., Xiaohong, W., Zhitian, L. (2017). A novel non-destructive testing method by measuring the change rate of magnetic flux leakage. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 36(2), article number 24. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0396-6>.
- [167] Antipov, A.G., Markov, A.A. (2018). 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection. *NDT & E International*, 98, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.04.011>.
- [168] Mahendran, V., Philip, J. (2013). Naked eye visualization of defects in ferromagnetic materials and components. *NDT & E International*, 60, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.07.011>.
- [169] Gao, Y., Tian, G.Y., Wang, P., Wang, H., Gao, B., Woo, W.L., Li, K. (2017). Electromagnetic pulsed thermography for natural cracks inspection. *Scientific reports*, 7(1), article number 42073, p. 9. <https://doi.org/10.1038/srep42073>.
- [170] Chotzoglou, A., Pissas, M., Zervaki, A.D., Haidemenopoulos, G.N., Pissas, T. (2019). Visualization of the rolling contact fatigue cracks in rail tracks with a magneto-optical sensor. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 38(3), 68. <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0606-5>.
- [171] Du, C., Dutta, S., Kurup, P., Yu, T., Wang, X. (2020). A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 303, 111728. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111728>.

- [172] European Commission: ACEM Rail (Automated and Cost Effective Maintenance for Railway), Final Report Summary, 2014. https://cordis.europa.eu/result/rcn/141730_en.html
- [173] Kersey, A.D., Davis, M.A., Patrick, H.J., LeBlanc, M., Koo, K.P., Askins, C.G., Putnam, M.A., Friebele, E.J. (1997). Fiber grating sensors. *Journal of lightwave technology*, 15(8), 1442-1463. <https://doi.org/10.1109/50.618377>.
- [174] FBGS Technologies GmbH. <https://www.youtube.com/watch?v=gi1KDEvs8c4>.
- [175] Lai, C.C., Kam, J.C., Leung, D.C., Lee, T.K., Tam, A.Y., Ho, S.L., Tam, H.Y., Liu, M.S. (2012). Development of a fiber-optic sensing system for train vibration and train weight measurements in Hong Kong. *Journal of Sensors*, 2012, article ID 365165. <https://doi.org/10.1155/2012/365165>.
- [176] Buggy, S.J., James, S.W., Staines, S., Carroll, R., Kitson, P., Farrington, D., Drewett, L., Jaiswal, J., Tatam, R.P. (2016). Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors. *Measurement Science and Technology*, 27(5), 055201. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/5/055201>.
- [177] Wang, J., Yuan, M., Ni, Y.Q. Rail crack monitoring using fiber optic based ultrasonic guided wave detection technology. In *11th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM 2017)*, Stanford, California, USA, September 12-14, 2017. <https://doi.org/10.12783/shm2017/14057>.
- [178] García, Y.R., Corres, J.M., Goicoechea, J. (2010). Vibration detection using optical fiber sensors. *Journal of Sensors*, 2010, article ID 936487. <https://doi.org/10.1155/2010/936487>.
- [179] Minardo, A., Porcaro, G., Giannetta, D., Bernini, R., Zeni, L. (2013). Real-time monitoring of railway traffic using slope-assisted Brillouin distributed sensors. *Applied optics*, 52(16), 3770-3776. <https://doi.org/10.1364/AO.52.003770>.
- [180] Yoon, H.J., Song, K.Y., Kim, J.S., Kim, D.S. (2011). Longitudinal strain monitoring of rail using a distributed fiber sensor based on Brillouin optical correlation domain analysis. *NDT & E International*, 44(7), 637-644. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.07.004>.
- [181] Puzavac, L., Popović, Z., Lazarević, L. (2012). Influence of track stiffness on track behaviour under vertical load. *Promet-Traffic&Transportation*, 24(5), 405-412. <https://doi.org/10.7307/ptt.v24i5.1176>
- [182] Popović, Z. (2010). *Konstrukcije koloseka na čvrstoj podlozi*. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Akademska misao, Srbija, p. 145.
- [183] Firmengruppe Max Bögl. <http://max-boegl.de>
- [184] Wang, P., Wang, L., Chen, R., Xu, J., Xu, J., Gao, M. (2016). Overview and outlook on railway track stiffness measurement. *Journal of Modern Transportation*, 24(2), 89-102. <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0104-8>
- [185] Sussmann, T.R., Selig, E.T. Track component contributions to track stiffness. In *78th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, January 10-14, 1999, p.20.
- [186] Sysyn, M., Nabochenko, O., Kovalchuk, V. (2020). Experimental investigation of the dynamic behavior of railway track with sleeper voids. *Railway Engineering Science*, 28(3), 290-304. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00217-8>
- [187] INNTRACK GUIDELINE: Methods of track stiffness measurements, Deliverable D2.1.11, 2006, p. 36. http://www.charmec.chalmers.se/innotrack/deliverables/sp2/d2111-f3-methods_of_track_stiffness_measurements.pdf

- [188] Vilotijević, M., Brajović, Lj., Lazarević, L., Mirković, N. Methods for track stiffness measurement - state of the art. In *Proceedings of the 6th International Symposium New Horizons 2017 of Transport and Communications*, Doboj, Bosnia and Herzegovina, November 17–18, 2017, pp. 378-387. <http://novihorizonti.sf.ues.rs.ba/wp-content/uploads/2016/10/Proceedings-New-Horizons-2017.pdf>
- [189] Nielsen, J., Berggren, E., Lölgen, T., Müller, R., Stallaert, B., Pesqueux, L: Overview of methods for measurement of track irregularities important for ground-borne vibration. Railway Induced Vibration Abatement Solutions (RIVAS), Deliverable D2.5, 2013, p. 49. http://www.rivas-project.eu/fileadmin/documents/RIVAS_CHALMERS_WP2_D2_5_FINAL.pdf
- [190] Hosseingholian, M., Froumentin, M., Robinet, A. Dynamic track modulus from measurement of track acceleration by Portancemetre. In *Proceedings of the 9th World Congress on Railway Research (WCRR)*, Lille, France, May 22-26, 2011, p. 12. http://www.railway-research.org/IMG/pdf/c1_hosseingholian_mohsen.pdf
- [191] Selig, E.T., Li, D. (1994). Track modulus: Its meaning and factors influencing it. *Transportation Research Record*, (1470), 47-54. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1994/1470/1470.pdf>
- [192] Vilotijević, M., Popović, Z., Lazarević, L. (2017). Test methods and requirements for fastening systems for concrete sleepers. *Građevinski materijali i konstrukcije*, 60(2), 33-47.
- [193] Hosseingholian, M., Froumentin, M., Lavacher, D. (2009). Continuous method to measure track stiffness - A new tool for inspection of rail infrastructure. *World Applied Sciences Journal*, 6(5), 579-589.
- [194] Berggren, E. Railway track stiffness: Dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance. PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2009, p. 44.
- [195] Macben. <http://www.macben.be/s9-draagkracht/?lang=en>
- [196] BSGeoscopie. https://bsgeoscopie.com/#software_en
- [197] Kouroussis, G., Caucheteur, C., Kinet, D., Alexandrou, G., Verlinden, O., Moeyaert, V. (2015). Review of trackside monitoring solutions: from strain gages to optical fibre sensors. *Sensors*, 15(8), 20115-20139. <https://doi.org/10.3390/s150820115>
- [198] Gräbe, H. Track deflection measurement using particle image velocimetry. In *Railways & Harbour conference*, Cape Town, South Africa, March 4-6, 2009. <http://www.slideshare.net/RailwaysandHarbours/rail-deflection>
- [199] Molatefi, H., Mozafari, H. (2013). Analysis of new method for vertical load measurement in the barycenter of the rail web by using FEM. *Measurement*, 46(8), 2313-2323. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.008>
- [200] Greisen, C.J. Measurement, simulation, and analysis of the mechanical response of railroad track. PhD Thesis, University of Nebraska, Lincoln, 2010, p. 115.
- [201] Trip Reports. <http://www.drgw.net/trips/report.php?tr=TTCL3>
- [202] Berggren, E., Jahlénus, Å., Bengtsson, B.E. Continuous track stiffness measurement: An effective method to investigate the structural conditions of the track. In *Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition (Railway Engineering Conference)*, London, UK, July 3-4, 2002.
- [203] Li, M.X.D., Berggren, E.G. (2010). A study of the effect of global track stiffness and its variations on track performance: simulation and measurement. *Proceedings of the Institution*

of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 224(5), 375-382.
<https://doi.org/10.1243/09544097JRRT361>

- [204] INNOTRACK: Adapted “Portancemetre” for track structure stiffness measurement on existing tracks, Deliverable D2.1.9, 2009, p. 56.
- [205] Република Србија: Национални програм јавне железничке инфраструктуре за период од 2017. до 2021. године. Службени гласник РС, бр. 53/2017, pp. 3-30.
http://www.parlament.gov.rs/upload/archive/files/lat/pdf/ostala_akta/2017/RS22-17%20lat.pdf
- [206] ЈКП „Београдски метро и воз“. <https://www.bgmetro.rs/index.php/sr-rs/bg-voz/istorijat-bg-voza>
- [207] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
- [208] MÁV: D.11 Utasítás: Vasúti alépítmény tervezése, építése, karbantarása és felújítása (Design, construction, maintenance and renew of railway substructure), Vol. 1, MÁV, Budapest, 2014, p. 279. <https://docplayer.hu/19038312-D-11-i-mav-zrt-1-279-magyar-allamvasutak-zrt-utasitas-vasuti-alepitmeny-tervezese-epitese-karbantartasa-es-felujitasa-i-kotet-budapest-2014.html>
- [209] CEN: EN 13450:2013, Aggregates for railway ballast. European Standard, Brussels, Belgium, 2013, p. 33.
- [210] Лазаревић, Ј. Одређивање квалитета геометрије колосека применом фракталне анализе мерених података. Докторска дисертација, Грађевински факултет, Универзитет у Београду, 2016, p. 236.
- [211] Lazarević, L., Vučković, D., Vilotijević, M., Popović, Z. (2019). Application of seismic tomography for assessment of the railway substructure condition. *Structural Health Monitoring*, 18(3), 792-805. <https://doi.org/10.1177/1475921718774778>.
- [212] RAS-24 Exploration Seismograph. http://www.seistronix.com/ras_g.htm

ПРИЛОЗИ

ПРИЛОГ 1

Прилог 1.1. Класификација метода инспекције са аспекта способности детекције RCF дефеката шине

КЛАСИФИКАЦИЈА МЕТОДА ИНСПЕКЦИЈЕ И ПАРАМЕТРИ ДЕФЕКТА КОЈЕ ЈЕ МОГУЋЕ ДЕТЕКТОВАТИ														
Метод инспекције	1. UT			2. N&V		3. VT		4. MT	5. RT	6. EC	7. RES	8. ACFM	9. MFL	10. FOS
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1							
Параметри дефекта	Л, ПД, Д	Л	Л, ПД, Д	Л, ПД, Д, О	Л	Л, Д	Л	Л, ПД	Л, ПД	Л, ПД, Д*	Л, ПД, Д, О, Б	Л, ПД, Д, О, Б	Л, ПД, Д, О, Б	Л
Начини испитивања	ТИ	ТИ	ТИ	ЛИ, ТИ	ЛИ, ТИ	ЛИ, ТИ	ТИ	ТИ	ТИ	ЛИ, ТИ	ЛИ	ЛИ	ЛИ	ЛИ

Легенда:

Метод инспекције дефеката шине	1.1		1.2		1.3		1.4		1.5		1.6		1.7		1.8		1.9		1.10	
	Испитивање конвенционалним ултразвучним сондама		Испитивање вођеним таласима		Испитивање <i>phased array</i> сондама		Испитивање засновано на ласерском побуђивању ултразвучних таласа		Испитивање електромагнетским акустичким претварачима		Испитивање ултразвучним сондама са ваздухом као контактним медијумом		Испитивање акустичком емисијом		Испитивања мерењем убрзања кућишта осовине		Опште и детаљно визуелно испитивање		Аутоматско визуелно испитивање	
1.	UT (eng. <i>Ultrasonic testing</i>) - Ултразвучно испитивање																			
2.	N&V (eng. <i>Noise and vibration</i>) - Испитивања заснована на мерењима буке и вибрација																			
3.	VT (eng. <i>Visual testing</i>) - Визуелно испитивање																			
4.	MT (eng. <i>Magnetic particle testing</i>) - Испитивање магнетским честицама																			
5.	RT (eng. <i>Penetrant testing</i>) - Испитивање пенетрантима																			
6.	EC (eng. <i>Eddy current</i>) - Испитивање вртложним струјама помоћу конвенционалних сонди																			
7.	RES (eng. <i>Pulsed eddy current</i>) - Термографија помоћу импулсно побуђених вртложних струја																			
8.	ACFM (eng. <i>Alternating current field measurement</i>) - Испитивање наизменичним струјама																			
9.	MFL (eng. <i>Magnetic flux leakage</i>) - Испитивање мерењем расипног магнетског флукса																			
10.	FOS (eng. <i>Fiber optic sensors</i>) - Испитивање помоћу сензора базираних на оптичким влакнима																			

	Методе инспекције које су предмет стандарда EN 16729-3
Параметри дефекта које је могуће детектовати	
Л	Локација пррелине
ПД	Димензије пррелине на површини главе шине
Д	Дубина пррелине
Д*	Дубина пррелине са недовољном тачношћу
О	Оријентација пррелине
Б	Број пррелина у оквиру вишеструког дефекта
Начини испитивања (према подацима из доступне литературе)	
ЛИ	Лабораторијска испитивања
ТИ	Теренска испитивања

Прилог 1.2. Комбинације метода инспекције за поузданију детекцију RCF дефеката шине

Метод инспекције		МОГУЋЕ КОМБИНАЦИЈЕ МЕТОДА ИНСПЕКЦИЈЕ И ПАРАМЕТРИ ДЕФЕКТА КОЈИ ПОВЕЋАВАЈУ ПОУЗДАНОСТ ДЕТЕКЦИЈЕ ДЕФЕКТА У ДЕФИНИСАНИМ УСЛОВИМА ИСПИТИВАЊА														
		1. UT			2. N&V			3. VT		4. MT	5. PT	6. EC	7. RES	8. ACFM	9. MFL	10. FOS
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	3.1	3.2					
1.1											● Л					
1.2																
1.3																
1.4						● Л, ТИ										
1.5					●									● Л, ПД, Д, ЛИ		
1.6					● Л, ТИ											

МОГУЋЕ КОМБИНАЦИЈЕ МЕТОДА ИНСПЕКЦИЈЕ И ПАРАМЕТРИ ДЕФЕКТА КОЈИ ПОВЕЋАВАЈУ ПОУЗДАНОСТ ДЕТЕКЦИЈЕ ДЕФЕКТА У ДЕФИНИСАНИМ УСЛОВИМА ИСПИТИВАЊА																		
Метод инспекције	1. UT										3. VT	4. MT	5. PT	6. EC	7. PEC	8. ACFM	9. MFL	10. FOS
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2. N&V		3.1	3.2								
2. N&V																		
2.1																		
2.2																		
3. VT																		
3.1																		
3.2	● Л																	
4. MT																		
5. PT																		
6. EC																		
7. PEC																		
7. PEC					● Л, ПД, Д, ЛИ													
8. ACFM	●																	
9. MFL																		
10. FOS																		

ПРИЛОГ 2


Број прага	Размак између прагова [cm]	Тип прага
Праг број 1 - Праг број 2	60	Бетонски
Праг број 2 - Праг број 3	60	Бетонски
Праг број 3 - Праг број 4	59	Бетонски
Праг број 4 - Праг број 5	60	Бетонски
Праг број 5 - Праг број 6	61	Бетонски
Праг број 6 - Праг број 7	60	Бетонски
Праг број 7 - Праг број 8	61	Бетонски
Праг број 8 - Праг број 9	61	Бетонски
Праг број 9 - Праг број 10	60	Бетонски
Праг број 10 - Праг број 11	60	Бетонски
Праг број 11 - Праг број 12	59	Бетонски
Праг број 12 - Праг број 13	59	Бетонски
Праг број 13 - Праг број 14	61	Бетонски
Праг број 14 - Праг број 15	61	Бетонски
Праг број 15 - Праг број 16	60	Бетонски
Праг број 16 - Праг број 17	58	Бетонски
Праг број 17 - Праг број 18	59	Бетонски
Праг број 18 - Праг број 19	60	Бетонски
Праг број 19 - Праг број 20	61	Бетонски
Праг број 20 - Праг број 21	61	Бетонски
Праг број 21 - Праг број 22	60	Бетонски
Праг број 22 - Праг број 23	60	Бетонски
Праг број 23 - Праг број 24	61	Бетонски
Праг број 24 - Праг број 25	61	Бетонски
Праг број 25 - Праг број 26	60	Бетонски
Праг број 26 - Праг број 27	61	Бетонски
Праг број 27 - Праг број 28	61	Бетонски
Праг број 28 - Праг број 29	61	Бетонски
Праг број 29 - Праг број 30	61	Бетонски
Праг број 30 - Праг број 31	60	Бетонски
Праг број 31 - Праг број 32	61	Бетонски
Праг број 32 - Праг број 33	60	Бетонски
Праг број 33 - Праг број 34	60	Бетонски
Праг број 34 - Праг број 35	59	Бетонски
Праг број 35 - Праг број 36	60	Бетонски
Праг број 36 - Праг број 37	58	Бетонски
Праг број 37 - Праг број 38	61	Бетонски
Праг број 38 - Праг број 39	59	Бетонски
Праг број 39 - Праг број 40	60	Бетонски
Праг број 40 - Праг број 41	59	Бетонски
Праг број 41 - Праг број 42	59	Бетонски
Праг број 42 - Праг број 43	58	Бетонски
Праг број 43 - Праг број 44	59	Бетонски
Праг број 44 - Праг број 45	58	Бетонски
Праг број 45 - Праг број 46	60	Бетонски
Праг број 46 - Праг број 47	61	Бетонски
Праг број 47 - Праг број 48	60	Бетонски
Праг број 48 - Праг број 49	58	Бетонски
Праг број 49 - Праг број 50	59	Бетонски










Праг број 50 - Праг број 51	58	Бетонски
Праг број 51 - Праг број 52	59	Бетонски
Праг број 52 - Праг број 53	60	Бетонски
Праг број 53 - Праг број 54	59	Бетонски
Праг број 54 - Праг број 55	60	Бетонски
Праг број 55 - Праг број 56	60	Бетонски
Праг број 56 - Праг број 57	61	Бетонски
Праг број 57 - Праг број 58	61	Бетонски
Праг број 58 - Праг број 59	60	Бетонски
Праг број 59 - Праг број 60	60	Бетонски
Праг број 60 - Праг број 61	61	Бетонски
Праг број 61 - Праг број 62	61	Бетонски
Праг број 62 - Праг број 63	60	Бетонски
Праг број 63 - Праг број 64	60	Бетонски
Праг број 64 - Праг број 65	61	Бетонски
Праг број 65 - Праг број 66	61	Бетонски
Праг број 66 - Праг број 67	60	Бетонски
Праг број 67 - Праг број 68	60	Бетонски
Праг број 68 - Праг број 69	58	Бетонски
Праг број 69 - Праг број 70	60	Бетонски
Праг број 70 - Праг број 71	58	Бетонски
Праг број 71 - Праг број 72	61	Бетонски
Праг број 72 - Праг број 73	60	Бетонски
Праг број 73 - Праг број 74	60	Бетонски
Праг број 74 - Праг број 75	61	Бетонски
Праг број 75 - Праг број 76	60	Бетонски
Праг број 76 - Праг број 77	61	Бетонски
Праг број 77 - Праг број 78	61	Бетонски
Праг број 78 - Праг број 79	61	Бетонски
Праг број 79 - Праг број 80	61	Бетонски
Праг број 80 - Праг број 81	61	Бетонски
Праг број 81 - Праг број 82	60	Бетонски
Праг број 82 - Праг број 83	59	Бетонски
Праг број 83 - Праг број 84	59	Бетонски
Праг број 84 - Праг број 85	60	Бетонски
Праг број 85 - Праг број 86	58	Бетонски
Праг број 86 - Праг број 87	60	Бетонски
Праг број 87 - Праг број 88	60	Бетонски
Праг број 88 - Праг број 89	60	Бетонски
Праг број 89 - Праг број 90	59	Бетонски
Праг број 90 - Праг број 91	60	Бетонски
Праг број 91 - Праг број 92	59	Бетонски
Праг број 92 - Праг број 93	60	Бетонски
Праг број 93 - Праг број 94	61	Бетонски
Праг број 94 - Праг број 95	60	Бетонски

ПРИЛОГ 3

Број прага и стационажа	Лева шина		Десна шина	
<p>Праг број 1 km 18+134,00</p>				
<p>Праг број 2 km 18+134,60</p>				
<p>Праг број 3 km 18+135,20</p>				

<p>Праг број 4 km 18+135,79</p>	<p>Праг број 5 km 18+136,39</p>	<p>Праг број 6 km 18+137,00</p>
		
		
		
		

		
		
		
		
<p>Праг број 7 km 18+137,60</p>	<p>Праг број 8 km 18+138,21</p>	<p>Праг број 9 km 18+138,82</p>

		
		
		
		
<p>Пар број 10 km 18+139,42</p>	<p>Пар број 11 km 18+140,02</p>	<p>Пар број 12 km 18+140,61</p>

		
		
		
		
<p>Прав број 13 km 18+141,20</p>	<p>Прав број 14 km 18+141,81</p>	<p>Прав број 15 km 18+142,42</p>

		
		
		
		
<p>Παρ broj 16 km 18+143,02</p>	<p>Παρ broj 17 km 18+143,60</p>	<p>Παρ broj 18 km 18+144,19</p>

<p>Пар број 19 km 18+144,79</p>			
<p>Пар број 20 km 18+145,40</p>			
<p>Пар број 21 km 18+146,01</p>			

		
		
		
		
<p>Пар број 22 km 18+146,61</p>	<p>Пар број 23 km 18+147,21</p>	<p>Пар број 24 km 18+147,82</p>

		
		
		
		
<p>Пипар број 25 km 18+148,43</p>	<p>Пипар број 26 km 18+149,03</p>	<p>Пипар број 27 km 18+149,64</p>

		
		
		
		
<p>Пар број 28 km 18+150,25</p>	<p>Пар број 29 km 18+150,86</p>	<p>Пар број 30 km 18+151,47</p>

		
		
		
		
<p>Прав број 31 km 18+152,07</p>	<p>Прав број 32 km 18+152,68</p>	<p>Прав број 33 km 18+153,28</p>

<p>Прав број 34 km 18+153,88</p>	<p>Прав број 35 km 18+154,47</p>	<p>Прав број 36 km 18+155,07</p>
		
		
		
		










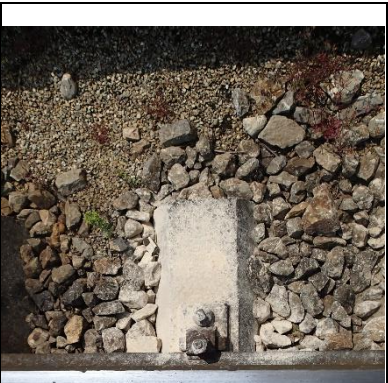
<p>Пар број 37 km 18+155,65</p>	<p>Пар број 38 km 18+156,26</p>	<p>Пар број 39 km 18+156,85</p>
		
		
		
		

<p>Пар број 40 km 18+157,45</p>	<p>Пар број 41 km 18+158,04</p>	<p>Пар број 42 km 18+158,63</p>
		
		
		
		

<p>Пар број 43 km 18+159,21</p>	<p>Пар број 44 km 18+159,80</p>	<p>Пар број 45 km 18+160,38</p>
		
		
		
		

		
		
		
		
<p>Пар број 46 km 18+160,98</p>	<p>Пар број 47 km 18+161,59</p>	<p>Пар број 48 km 18+162,19</p>

<p>Прав број 49 km 18+162,77</p>			
<p>Прав број 50 km 18+163,36</p>			
<p>Прав број 51 km 18+163,94</p>			

<p>Παρ broj 52 km 18+164,53</p>	<p>Παρ broj 53 km 18+165,13</p>	<p>Παρ broj 54 km 18+165,72</p>
		
		
		
		

<p>Пар број 55 km 18+166,32</p>			
<p>Пар број 56 km 18+166,92</p>			
<p>Пар број 57 km 18+167,53</p>			


		
		
		
		
<p>Пар број 58 km 18+168,14</p>	<p>Пар број 59 km 18+168,74</p>	<p>Пар број 60 km 18+169,34</p>


<p>Пар број 61 km 18+169,95</p>	<p>Пар број 62 km 18+170,56</p>	<p>Пар број 63 km 18+171,16</p>
		
		
		
		

		
		
		
		
<p>Прав број 64 km 18+171,76</p>	<p>Прав број 65 km 18+172,37</p>	<p>Прав број 66 km 18+172,98</p>



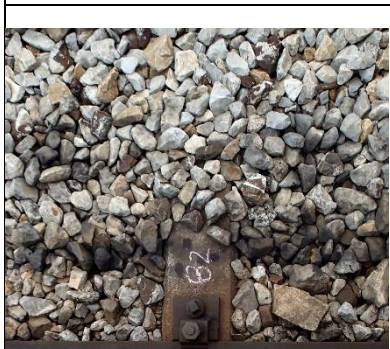
		
		
		
		
<p>Пар број 67 km 18+173,58</p>	<p>Пар број 68 km 18+174,18</p>	<p>Пар број 69 km 18+174,76</p>













		
		
		
		
<p>Прав број 70 km 18+175,36</p>	<p>Прав број 71 km 18+175,94</p>	<p>Прав број 72 km 18+176,55</p>













		
		
		
		
<p>Пар број 73 km 18+177,15</p>	<p>Пар број 74 km 18+177,75</p>	<p>Пар број 75 km 18+178,36</p>

		
		
		
		
<p>Пар број 76 km 18+178,96</p>	<p>Пар број 77 km 18+179,57</p>	<p>Пар број 78 km 18+180,18</p>


<p>Пар број 79 km 18+180,79</p>	<p>Пар број 80 km 18+181,40</p>	<p>Пар број 81 km 18+182,01</p>
		
		
		
		

		
		
		
		
<p>Пар број 82 km 18+182,61</p>	<p>Пар број 83 km 18+183,20</p>	<p>Пар број 84 km 18+183,79</p>

		
		
		
		
<p>Прав брпој 85 km 18+184,39</p>	<p>Прав брпој 86 km 18+184,97</p>	<p>Прав брпој 87 km 18+185,57</p>

		
		
		
		
<p>Παρ έργoj 88 km 18+186,17</p>	<p>Παρ έργoj 89 km 18+186,77</p>	<p>Παρ έργoj 90 km 18+187,36</p>

<p>Пар број 91 km 18+187,96</p>	<p>Пар број 92 km 18+188,55</p>	<p>Пар број 93 km 18+189,15</p>
		
		
		
		

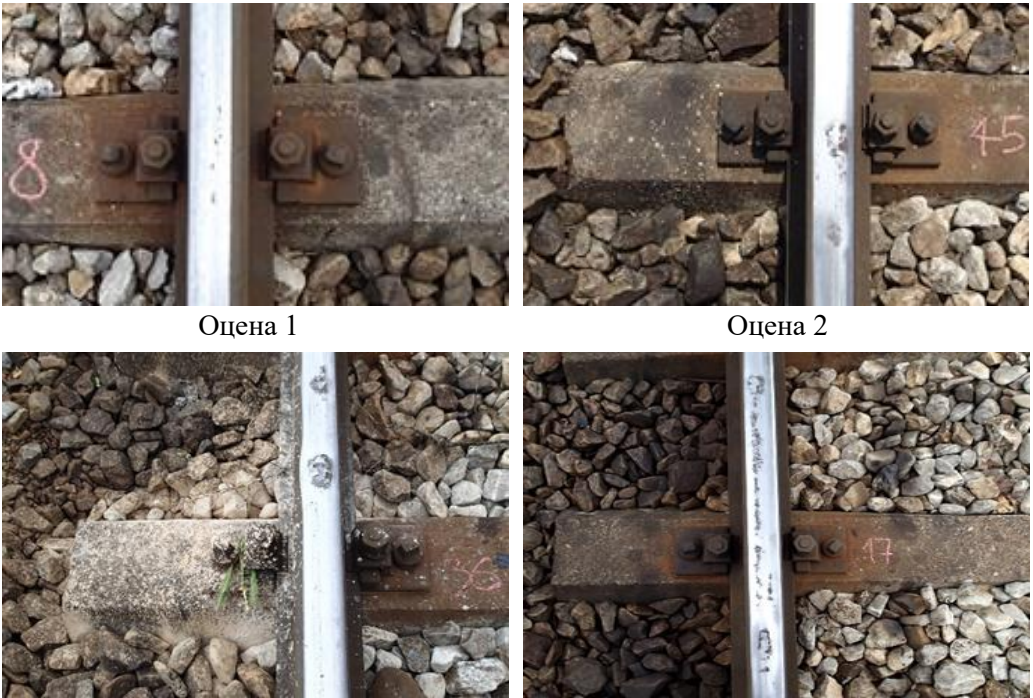
<p>Пар број 94 km 18+189,76</p>	
<p>Пар број 95 km 18+190,36</p>	

ПРИЛОГ 4

Прилог 4.1. Визуелни кључ за квантификацију озбиљности *squat* дефекта

Критеријуми за нумеричко оцењивање озбиљности *squat* дефеката:

- 0 – стање без дефеката,
- 1 – лако оштећење шине,
- 2 – средње оштећење шине,
- 3 – тешко оштећење шине,
- 4 – тешко оштећење са сукцесивном појавом дефеката.



Оцена 1

Оцена 2

Оцена 3

Оцена 4

Прилог 4.2 Нумеричко оцењивање озбиљности *squat* дефекта дуж испитиване деонице колосека број 2 у станици Панчево Варош

Број прага	Лева шина	Десна шина
S1	–	–
S2	0	0
S3	0	2
S4	0	2
S5	0	0
S6	0	0
S7	0	0
S8	0	1
S9	1	0
S10	2	0
S11	4	0
S12	4	0
S13	4	0
S14	0	0
S15	1	0
S16	3	0
S17	4	0
S18	4	0
S19	0	0
S20	1	0
S21	1	0

S22	0	0
S23	0	0
S24	0	0
S25	0	0
S26	1	0
S27	1	0
S28	0	0
S29	0	0
S30	0	0
S31	0	0
S32	1	0
S33	1	0
S34	1	2
S35	1	2
S36	3	0
S37	3	0
S38	3	0
S39	3	3
S40	3	3
S41	3	0
S42	3	0
S43	3	0
S44	2	0
S45	2	0
S46	2	0
S47	0	0
S48	3	0
S49	4	0
S50	4	0
S51	4	0
S52	3	0
S53	3	0
S54	3	0
S55	2	0
S56	0	0
S57	2	0
S58	2	0
S59	0	0
S60	0	0
S61	0	0
S62	0	0
S63	0	0
S64	0	0
S65	0	0
S66	0	0
S67	0	0
S68	0	2
S69	0	2
S70	0	3
S71	0	3
S72	0	3
S73	0	0
S74	0	0
S75	0	0
S76	0	0

S77	0	0
S78	0	0
S79	0	0
S80	0	0
S81	0	0
S82	2	0
S83	2	3
S84	0	3
S85	0	2
S86	0	2
S87	0	0
S88	0	0
S89	0	2
S90	0	2
S91	1	0
S92	2	0
S93	0	0
S94	0	0
S95	–	–

Напомена: лева и десна шина у зонама изнад прагова S1 и S95 су искључени из разматрања.

Биографија аутора

Милица Мићић је рођена 23.10.1986. године у Ужицу, где је са одличним успехом завршила Основну школу и Гимназију.

Основне студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, на Одсеку за путеве, железнице и аеродроме, завршила је 2009. године са просечном оценом 8,94 и оценом 10 на синтезном пројекту. Мастер студије завршила је са просечном оценом 9,57 и мастер рад одбранила са оценом 10. Докторске студије на Грађевинском факултету уписала је 2012. године и положила све испите са просечном оценом 9,875.

У току 2010. године обављала је стручну праксу у ЈП „Дирекција за грађевинско земљиште и изградњу Београда“. По завршетку факултета запослила се у Градској управи града Београда, Агенцији за инвестиције и становање, на пословима реализације „Пројекта обнове града Београда“ и „Пројекта унапређења београдског јавног превоза и саобраћајне инфраструктуре“.

У зимском семестру школске 2014/2015. године била је ангажована је као студент–демонстратор на Грађевинском факултету. Од 24.12.2014. године запослена је на Грађевинском факултету у звању асистента–студента докторских студија за уже научне области Планирање и пројектовање железница и Конструкција, грађење и одржавање железница. Ангажована је на извођењу вежби из предмета: Планирање и пројектовање железница 1, Планирање и пројектовање железница 2, Горњи строј железница, Одржавање железничких пруга, Железничке станице и Саобраћајнице и животна средина. Учествује у комисијама за одбрану дипломских радова.

Као аутор и коаутор, објавила је 29 научних радова, од којих 2 припадају категоријама М21а и М23. Према подацима из Scopus базе, остварила је 26 хетероцитата и h-index 4. Учесник је Технолошког пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије од 2017. године.

Удата је и мајка једног детета.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Милица С. Мићић

Број индекса: 909/12

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

УПРАВЉАЊЕ НЕРАВНИНАМА МАЛИХ ТАЛАСНИХ ДУЖИНА НА ГЛАВИ ШИНЕ

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Милица С. Мићић

Број индекса: 909/12

Студијски програм: Грађевинарство

Наслов рада: УПРАВЉАЊЕ НЕРАВНИНАМА МАЛИХ ТАЛАСНИХ
ДУЖИНА НА ГЛАВИ ШИНЕ

Ментор: проф. др Зденка Поповић, дипл.грађ.инж.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

УПРАВЉАЊЕ НЕРАВНИНАМА МАЛИХ ТАЛАСНИХ ДУЖИНА НА ГЛАВИ ШИНЕ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.