



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ



Слободан Ђ. Росић

**РАЗВОЈ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА ДЕФИНИСАЊЕ
ПРИХВАТЉИВОГ НИВОА РИЗИКА ЗА СИСТЕМ
ДЕТЕКЦИЈЕ ПРЕПРЕКА КОД АУТОНОМНОГ
УПРАВЉАЊА ЖЕЛЕЗНИЧКИМ ВОЗИЛИМА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Текст ове докторске дисертације ставља се на увид јавности,
у складу са чланом 30., став 8. Закона о високом образовању
("Сл. гласник РС", бр. 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 44/2010,
93/2012, 89/2013 и 99/2014)

НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:

Овај текст сматра се рукописом и само се саопштава јавности (члан 7. Закона о ауторским и сродним правима, "Сл. гласник РС", бр. 104/2009, 99/2011 и 119/2012).

Ниједан део ове докторске дисертације не сме се користити ни у какве сврхе, осим за упознавање са њеним садржајем пре одбране дисертације.

Ниш, 2024.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING



Slobodan Đ. Rosić

**DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR
DEFINING AN ACCEPTABLE LEVEL OF RISK FOR
THE OBSTACLE DETECTION SYSTEM IN
AUTONOMOUS CONTROL OF RAILWAY VEHICLES**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2024.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	др Душан Стаменковић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Машински факултет
Наслов:	Развој методологије за дефинисање прихватљивог нивоа ризика за систем детекције препрека код аутономног управљања железничким возилима
Резиме:	<p>Безбедност саобраћаја потпуно аутоматизованих возова један је од најсложенијих изазова у области аутоматизације железничког саобраћаја. Највећи проблем са увођењем возова без машиновођа на јавну железничку инфраструктуру представљају ризици повезани са препрекама на прузи, који представљају најчешћи и најзначајнији безбедносни ризик у железничком саобраћају. Систем за детекцију препрека, који је саставни део аутономних железничких возила, мора успешно да испуни све безбедносне захтеве, али истовремено не би требало да доведе до погоршања ефикасности и економичности железничког саобраћаја.</p> <p>Предмет докторске дисертације је развој методологије за дефинисање прихватљивог нивоа ризика за систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима. Циљ истраживања је дефинисање прихватљивог нивоа ризика за систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима у складу са свим регулаторним захтевима. Развој система за детекцију препрека који испуњава захтеве у погледу прихватљивости ризика је основни услов за увођење потпуно аутономних железничких возила..</p>
Научна област:	Машинско инжењерство
Научна дисциплина:	
Кључне речи:	Аутономна железничка возила, безбедност саобраћаја, детекција препрека, прихватљивост ризика
УДК:	UDK 001.8[629.4.05:004.413.4(043.3)
CERIF класификација:	T 290 Технологија железничког транспорта
Тип лиценце Креативне заједнице	CC BY-NC

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Dr Dušan Stamenković, full professor, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering
Title:	Development of a methodology for defining an acceptable level of risk for the obstacle detection system in autonomous control of railway vehicles
Abstract:	<p>Traffic safety of fully automated train operations is one of the most complex challenges in the field of railway traffic automation. The biggest problem with the introduction of driverless trains to the public railway infrastructure are the risks associated with the obstacles on the line, which represent the most common and most significant safety risk in railway traffic. The obstacle detection system, which is an integral part of the driverless train operation, must successfully meet the safety requirements, but also should not lead to a deterioration in the efficiency and economy of the railway traffic.</p> <p>The subject of this thesis is the development of a methodology for defining an acceptable level of risk for an obstacle detection system on autonomous railway vehicles. The aim of the research is to define an acceptable level of risk for the obstacle detection system on autonomous railway vehicles in accordance with all regulatory requirements. The development of an obstacle detection system that meets the risk acceptability requirements is a basic requirement for the introduction of fully autonomous railway vehicles.</p>
Scientific Field:	Mechanical engineering
Scientific Discipline:	
Key Words:	Autonomous railway vehicles, traffic safety, obstacle detection, risk acceptability
UDC:	UDK 001.8[629.4.05:004.413.4(043.3)
CERIF Classification:	T290 Railway transport technology
Creative Commons License Type:	CC BY-NC

Захвалност аутора

Захваљујем свом ментору проф. др Душану Стаменковићу на усмеравању, сталном подстицању и саветима током израде докторске дисертације.

Захваљујем се на пружању помоћи проф. др Милану Банићу и проф. др Милошу Симоновићу који су посебним ангажовањем дали значајан допринос мојој дисертацији. Велику помоћ су ми пружили и остали чланови тима који су учествовале у реализацији пројекта SMART2.

Посебну захвалност дугујем проф. др Драгомиру Мандићу и проф. др Бранисалву Бошковићу који су пратили моје научно и професионално сазревање и у њему имали значајну улогу.

На крају, највећу захвалност дугујем својој породици и супрузи Драгани, без чије подршке, одрицања и разумевања ова дисертација не би била могућа.

Садржај

1. Уводна разматрања.....	1
2. Преглед релевантне литературе.....	7
3. Актуелно стање (state of the art) у области аутоматизације железничког саобраћаја и развоја система за детекцију препрека.....	23
4. Анализа постојећег регулаторног оквира у области железничких возила и безбедности железничког саобраћаја.....	40
4.1 Анализа регулаторног оквира за примарне захтеве у погледу безбедности за систем за детекцију препрека.....	41
4.2 Анализа регулаторног оквира за захтеве у погледу безбедности на нивоу техничких спецификација и националних прописа за систем за детекцију препрека....	43
4.3 Дефинисање регулаторних захтева за систем за детекцију препрека.....	45
5. Анализа и класификација препрека у железничком саобраћају и начина реаговања на њихову појаву.....	47
6. Анализа ризика повезаних са различитим категоријама препрека и њиховог утицаја на безбедност железничког саобраћаја.....	54
6.1 Анализа учесталости појаве различитих категорија препрека.....	55
6.2 Анализа утицаја различитих категорија препрека на безбедност железничког саобраћаја.....	61
7. Разматрање методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима.....	65
8. Експериментална верификација методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за систем за детекцију препрека код аутономног управљања железничким возилом.....	83
8.1 Процена прихватљивости ризика техничког аспекта система.....	85
8.2 Дефинисање критеријума прихватљивости ризика функционалног аспекта система	102
8.3 Утврђивање достизања прихватљивог нивоа ризика према захтевима за функционалне фазе.....	103
8.3.1 Дефинисани сценарио за тестирање OD&TID система у реалном саобраћају.....	105

8.3.2 Тестирање функционисања OD&TID система.....	109
8.3.3. Утврђивање прихватљивости ризика по дефинисаним захтевима за функционалне фазе.....	117
8.4. Утврђивање укупне прихватљивости ризика везаног за употребу система за детекцију препрека.....	118
8.5 Анализа добијених резултата у погледу прихватљивости ризика.....	121
9. Закључци и даљи правци истраживања.....	123
Литература.....	128
Биографија.....	136

Списак скраћеница

ALARP	As low as reasonably practicable
ATO	Automatic Train Operation
ATP	Automatic Train Protection
CCS	Control Command and Signalling
DSS	Decision support system
GAME	Globalement au moins équivalent
GoA	Grade of Automation
HMI	Human – Machine Interface
EY	Европска Унија
ERA	European Union Agency for Railways
ERTMS	European Rail Traffic Management System
IoT	Internet of Things
MEM	Mminimum endogenous mortality
NMAU	Nicht mehr als unvermeidbar/Not more than unavoidable
OD	Obstacle Detection Systems
OD&TID	Obstacle Detection and Track Intrusion Systems
SMART	Smart Automation of Rail Transport
UAV	Unmanned aerial vehicle

Списак слика

Слика 3.1 Структура система AutoHaul на мрежи пруга „Рио Тинто“	24
Слика 3.2 Аутономни воз пролази путни прелаз на железничкој мрежи „Рио Тинта“ у Аустралији.....	25
Слика 3.3. Испитивање прототипа OD система на тереном возу на прузи Ниш-Скопље	29
Слика 3.4 Тестирање прототипа OD система у реалном саобраћају.....	29
Слика 3.5 SMART 2 Холистички OD систем који интегрише три OD подсистема.....	30
Слика 3.6 Евалуација SMART 2 прототипа OD система.....	31
Слика 3.7 Аутономни воз на приградској железници у Хамбургу.....	34
Слика 3.8 Центар за даљинско управљање пробним возовима у Француској.....	35
Слика 4.1. Основни елементи процеса сертификације у складу са регулативом ЕУ.....	41
Слика 6.1 Број значајних несрећа повезаних са препрекама на данским железницама 2019 године.....	56
Слика 6.2 Број минорних несрећа повезаних са препрекама на данским железницама 2019 године.....	57
Слика 6.3 Број прекурсора инцидената везаних за препреке на данским железницама 2019 године.....	58
Слика 7.1 Матрица ризика последице/вероватноћа.....	68
Слика 7.2 Хијерархија критеријума прихватљивости ризика (RAC).....	73
Слика 7.3. Област анализе података код Safety I и Safety II концепата.....	75
Слика 8.1: Блок дијаграм спровођења тестирања OD&TID уређаја у оквиру пројекта SMART2.....	83
Слика 8.2 Начин реаговања на препреке предвиђен „ATO over ETCS – GoA3/4“ спецификацијама.....	85
Слика 8.3 CAD модел интегрисаног система OD&TID на челу локомотиве.....	86
Слика 8.4 Беспилотна летелица позиционирана на станици за пуњење поред пруге.....	86
Слика 8.5 Приказ пруге Црвени Крст – Ниш и дела трасе на којој је извршено тестирање уређаја за детекцију препрека.....	104
Слика 8.6 Дигитализација трасе на којој ће се вршити тестирање.....	105
Слика 8.7 Сценарио за тестирање уређаја за детекцију препрека.....	106
Слика 8.8 Стабилни ласерски систем за детекцију препрека на путном прелазу Печењевце...107	
Слика 8.9 Прилаз објеката добијена коришћењем CenterNet модела.....	110

Списак табела

Табела 2.1 Преглед релевантних студија случаја у области аутономних возила на Железници.....	8
Табела 5.1. Класификација препрека према врсти и висини ризика.....	50
Табела 6.1 Категоризација железничких несрећа и незгода у Данској.....	55
Табела 6.2 Подаци о броју судара са препрекама из анкете машиновођа урађеној у оквиру пројекта SMART.....	59
Табела 7.1 THR и нивои SIL према стандарду EN 61508.....	69
Табела 7.2. Број налета воза на препреке на мрежи ИЖС у периоду 2010-2019.....	76
Табела 7.3 Укупан број појава препрека на мрежи ИЖС и број неуспешног реаговања машиновођа у периоду 2010 – 2019.....	77
Табела 7.4 Предности и недостаци могућих начина одређивања критеријума прихватљивости ризика и могућност њихове примене за систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима.....	79
Табела 8.1 Технички захтеви за подсистеме и компоненте OD&TID система.....	87
Табела 8.2 Резултати тестирања усаглашености подсистема и компоненти са техничким захтевима.....	90
Табела 8.3 Критеријуми прихватљивости ризика.....	102
Табела 8.4 Класификација постављених препрека за функционално тестирање OD&TID Система.....	108
Табела 8.5 Резултати детекције групе препрека 1).....	111
Табела 8.6 Резултати детекције групе препрека 2).....	112
Табела 8.7 Резултати детекције групе препрека 3).....	113
Табела 8.8 Резултати детекције групе препрека 4).....	114
Табела 8.9 Резултати детекције групе препрека 5).....	115
Табела 8.10. Испуњености захтева у погледу прихватљивости ризика.....	117
Табела 8.11 Матрица ризика.....	119

1. Уводна разматрања

Аутоматизација железничког саобраћаја је последњих година опште прихваћен тренд и представља један од главних услова за даљи развој овог вида саобраћаја. Као крајњи циљ овог процеса сматра се увођење аутономних железничких возила. Главни разлози који се наводе су: повећање ефикасности, смањење потрошње енергије, унапређење квалитета услуга и смањење радног оптерећења машиновођа. Најкомплекснији изазов у том погледу је очување достигнутог високог нивоа безбедности железничког саобраћаја. Увођење аутономних железничких возила је један од најсложенијих проблема у области аутоматизације железничког саобраћаја. Док су друге компоненте у процесу аутоматског управљања возовима већ успешно развијене (регулација и контрола саобраћаја, оптимизација потрошње енергије, аутоматско управљање отварањем и затварањем врата и сл.) управљање возовима без машиновође, такозвани АТО 4 ниво аутоматизације, је до сада успешно развијен само за системе у специфичном окружењу (метро и индустријске пруге у слабо насељеним подручјима). Највећи проблем за увођење аутономних железничких возила на јавној железничкој инфраструктури су ризици повезани са појавом препрека на прузи. Препреке на прузи представљају најчешћи и најзначајнији безбедносни ризик у железничком саобраћају. Према извештајима Агенције европске уније за железнице (ERA) несреће чији су узрок препреке на прузи чине преко 83 % свих значајних несрећа на европским железницама, а настрадали у таквим несрећама чине преко 99 % од укупног броја настрадалих лица у железничком саобраћају. На железницама ЕУ годишње скоро 1000 људи настрада у оваквим несрећама. Препреке на прузи изазивају и велику материјалну штету. Чак и скоро безначајне препреке као што је опало лишће на прузи могу имати значајан негативан утицај. По неким проценама годишњи трошкови које та појава изазива на железничкој мрежи у Великој Британији достижу до 350 милиона фунти. Препреке на прузи, укључујући и спровођење процедура повезане са таквим догађајима су узрок великих застоја у железничком саобраћају и повећаних трошкова оквиру система.

Без обзира што се пут вожње воза контролише и што по правилу на њему не би требало да постоје било какве препреке, ефективност те контроле не омогућава одсуство ризика повезаних са различитим врстама препрека. Није реално очекивати ни у будућности, сем у неким специфичним случајевима, да се било каквим техничким или оперативним мерама омогући потпуно одсуство оваквих ризика. Зато је за увођење

аутономних железничких возила неопходно да се развије систем за детекцију препрека који ће задовољити све захтеве у погледу безбедности саобраћаја, али при томе неће довести до смањења ефикасности и економичности железничког саобраћаја.

Питање дефинисања захтева за систем за детекцију препрека код аутономних железничких возила је директно повезано са регулаторним условима за њихову сертификацију или ауторизацију. Постојеће спецификације и национални прописи тренутно не обухватају уређаје за детекцију препрека на железничким возилима тако да је услове за њихову сертификацију неопходно тек дефинисати. То је веома специфично јер према тренутном регулаторном оквиру у ЕУ област детектовања препрека у путу вожње воза и реаговања на њих припада функционалном делу железничког система и тако је регулисана јер је то одговорност машиновође. Међутим систем за детекцију препрека на аутономним возилима би сам по себи представљао структурни део железничког система па постојећи регулаторни оквир и методе које се користе за дефинисање техничких и регулаторних захтева у погледу безбедности нису у потпуности примењиве за развој тог система. У таквој ситуацији уобичајени приступ дефинисања захтева за развој нових техничких система на железници није адекватан јер се захтеви дефинишу унапред, према важећим стандардима, дефинисаним циљевима и расположивом технологијом у оквиру тзв. "пројектног приступа" (*project-based approach*).

Успешно детектовање препрека није само себи циљ у погледу безбедности железничког саобраћаја већ је то елиминисање или максимално умањење њеног негативног утицаја. Да би се то остварило поред успешног детектовања препреке неопходно је адекватно реаговање на њу. Зато је у погледу дефинисања захтева у погледу безбедности за овакав систем потребно поћи од анализе захтева у погледу адекватног реаговања на препреке, а не од захтева у погледу детекције препрека. То подразумева примену приступа базираном на ризицима (*risk-based approach*).

Процена ризика је у европском регулаторном оквиру један од најважнијих елемената сертификације и ауторизације техничких, оперативних и организационих делова железничког система. Примена поступка процене ризика и начин њеног спровођења је прописана у већем броју ЕУ директива и уредаба који уређују овај систем. Пре доношења ове регулативе тј. пре стварања јединствених железничког тржишта у ЕУ процена ризика је углавном била део инжењерских и кост-бенефит анализа и студија. Међутим њено укључивање у законску регулативу довело је до додатних захтева за спровођење тог поступка јер он сада са собом експлицитно повлачи и питање

усаглашености са законским условима и правном одговорношћу. Ово се посебно односи на област аутоматског управљања возовима јер без људског фактора у процесу управљања возила главна законска одговорност у случају несрећа у току вожње (које се у саобраћају ни у најидеалнијим условима не могу потпуно искључити) прелази на подручје сертификације и ауторизације система за аутоматско управљање возилима.

Дефинисање захтева за сертификацију система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима при примени приступа базираном на ризицима подразумева процену ризика повезаних са његовим увођењем у железнички систем. Један од кључних елемената сваког поступка процене ризика, посебно у погледу усаглашености са законским условима је дефинисање Критеријума прихватљивости ризика (RAC – “Risk Acceptance Criteria”). Постојећа европска регулатива у железничком сектору не прописује прецизно начин утврђивања ових критеријума па се у пракси примењују општи принципи из области процене ризика. То оставља простор за различите интерпретације шта је то законски прихватљив ризик и који је његов тачан ниво. За техничке системе регулатива упућује на такозване „усклађене пројектне циљеве” (Уредба (ЕУ) бр. 402/2013 о заједничкој безбедносној методи за вредновање и процену ризика) али се то односи искључиво на ризике повезане са техничким кваровима система. Други начини базирани на коришћењу података о достигнутом нивоу безбедности у протеклом периоду нису директно применљиви у случају система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима јер овакви уређаји до сада нису постојали на железницама. Ни искуства из других видова саобраћаја се не могу користити у већој мери због великих техничких и регулаторних разлика у односу на железнички саобраћај.

Предмет научног истраживања ове докторске дисертације је дефинисање прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима у складу са европским регулаторним оквиром и захтевима за безбедност железничког саобраћаја.

Општи циљ научног истраживања је развој методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима. Из општег циља истраживања произилазе следећи појединачни циљеви:

- Анализа постојећег регулаторног оквира у области железничких возила и безбедности железничког саобраћаја,

- Анализа и класификација препрека у железничком саобраћају и начина реаговања на њихову појаву,
- Анализа и оцена ризика повезаних са различитим категоријама препрека,
- Развој методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима,
- Експериментална верификација методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за систем за детекцију препрека код аутономног управљања железничким возилом.

Полазећи од природе проблема, предмета и циља истраживања, у овом раду постављене су следеће хипотезе:

- У железничком саобраћају није могуће потпуно одсуство ризика (такозвани нулти ризик). Сходно томе основни захтев у погледу безбедности саобраћаја за сваки део железничког система је дефинисање прихватљивог нивоа безбедности које он мора да достигне;
- Тренутни регулаторни оквир није адекватан за развој система за детекцију препрека код аутономних железничких возила јер се ради о систему који прелази из подручја функционалног подсистема у подручје структурног подсистема;
- Детектовање препреке у путу вожње обухвата одређивање нивоа ризика повезаног са њом.

Садржај докторске дисертације проистекао је из истраживачког проблема, предмета и циља истраживања, као и постављених хипотеза. Поред уводног разматрања, закључка и коришћене литературе, садржај ове докторске дисертације чини седам поглавља:

- Преглед релевантне литературе;
- Актуелно стање (state of the art) у области аутоматизације железничког саобраћаја и развоја система за детекцију препрека;
- Анализа постојећег регулаторног оквира у области железничких возила и безбедности железничког саобраћаја;
- Анализа и класификација препрека у железничком саобраћају и начина реаговања на њихову појаву;
- Анализа и оцена ризика повезаних са различитим категоријама препрека;
- Разматрање методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима;

- Експериментална верификација методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за систем за детекцију препрека код аутономног управљања железничким возилом;

У уводном делу дисертације наведен је предмет истраживања, циљ истраживања, хипотезе од којих се пошло у истраживању, приказ садржаја истраживања и примењене методе истраживања.

У другом поглављу је изложен преглед релевантне литературе. Ова литература обухвата две групе:

- Радови који се баве проблемима увођења аутономних возила на железници;
- Радови који се баве уређајима за детекцију препрека за аутономна железничка возила;

У трећем поглављу је изложен преглед актуелног стања у области аутоматизације железничког саобраћаја и развоја система за детекцију препрека. Преглед актуелног стања у области аутоматизације железничког саобраћаја обухвата до сада уведене системе са аутономним возилима у области јавног градско-приградског превоза путника и на индустријским железницама као и тренутно стање са тестирањем ових система на јавној железничкој мрежи у различитим земљама.

У четвртном поглављу су изложени резултати извршене анализе важећег регулаторног оквира у области железничких возила и безбедности железничког саобраћаја у ЕУ и Србији који су релевантни за увођење аутономних возила у железнички систем. На основу ове анализе идентификовани су регулаторни захтеви за развој и сертификацију система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима.

У петом поглављу су изложени резултати извршене анализе препрека које се појављују у железничком саобраћају и приказана њихова класификација у погледу ризика које различите категорије препрека представљају по безбедност у железничком саобраћају као и према начину реаговања на њихову појаву.

У шестом поглављу изложени су резултати анализе и оцене ризика које различите категорије препрека представљају по безбедност железничког саобраћаја.

У седмом поглављу, на основу резултата изложених у претходним поглављима, приказана је критичка анализа могућих начини за дефинисање прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима као кључног елемента за поступак сертификације ових уређаја. На основу тога предложена је нова методологија за дефинисање прихватљивог нивоа ризика за увођење

система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима у јавни железнички систем.

У осмом поглављу изложени су резултати експерименталне верификација методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за систем за детекцију препрека код аутономног управљања железничким возилом.

Закључак ове докторске дисертације обухвата остварене резултати истраживања и научни допринос ове докторске дисертације као и предложене правце даљег истраживања.

Истраживање и рад на докторској дисертацији обављени су применом стандардног методолошког поступка и следећих научних метода:

- аналитичке и методе компилације различитих извора за анализу и дефинисање регулаторног оквира и анализу и класификацију препрека;
- методе статистичке анализе и методе за оцену и процену ризика за одређивање нивоа ризика повезаног са појединим категоријама препрека и за одређивање прихватљивог нивоа ризика;
- експериментална метода за тестирање и верификацију остварености прихватљивог нивоа ризика кроз испитивања у условима реалног одвијања железничког саобраћаја.

Експериментална метода за верификацију предложене методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека код аутономних железничких возила је спроведена у оквиру пројекта SMART2.

2. Преглед релевантне литературе

Литература релевантна за област истраживања овог рада може да се подели у две групе:

- Радови који се баве проблемима увођења аутономних возила на железници;
- Радови који се баве уређајима за детекцију препрека за аутономна железничка возила;

Потпуна аутоматизација железничког система тј. увођење аутономних железничких возила је одавно предмет интересовања бројних истраживача. Већи број радова и студија на ову тему је почео да се објављује у другој половини седамдесетих година када су пројектовани и пуштени у саобраћај први вођени транспортни системи са аутономним возилима. У радовима из овог периода су поред проблема техничког развоја разматрана и системска питања повезана са увођењем шинских возила без машиновође/возача. Један од важнијих аутора у том периоду је и академик Вукан Вучић који у својим радовима [1][2][3] разматра предности и главне проблеме за увођење потпуно аутоматизованог рада у шинским системима јавног градског превоза. Сматра да је с обзиром на веће трошкове и већу техничку сложеност система потпуна аутоматизација оправдана само ако она доведе до реалног повећања капацитета и смањења оперативних трошкова. Као један од главних проблема за увођење возила без возача он наводи питање контроле пруге због препрека и неопходност развоја ефикаснијих система за благовремено регистровање страних предмета на отвореним деоницама пруге и станицама. Као остале проблеме за увођење аутономних возила наводи питање комуникације са путницима у хитним случајевима, отпор синдиката увођењу аутоматизацији због губитка радних места и конзервативни приступ менаџмента и регулаторних тела. Увођење аутономних возила је у овом периоду разматрано искључиво у оквиру система јавног превоза јер су тадашња технологија, економско стање и тада актуелна социјални ставови били такви да примена оваквих возила у железничком систему није сматрана реалном.

Напредак технологије почетком 21. века довео је до појачаног интересовања за аутоматизацију железничких возила. У прегледном раду [4] аутори наводе да је претраживање база података најважнијих издавача научне литературе (Elsevier, IEEE, Springer, SAGE, Emerald, etc.) показало да постоји више од хиљаду радова који садрже појмове “autonomous trains”, “freight train automation”, “passenger train automation”, “autonomous train technologies”, “rail automation advantages”, “rail automation

challenges”, “autonomous train safety”, “autonomous train reliability” и “rail automation perception”. Међутим, велика већина тих радова је фокусирана на аутономна возила у друмском саобраћају. У раду је анализирано 69 студија случаја које су сматране релевантним за област аутономних возила у железничком систему (табела 2.1). Ови радови су класификовани у следеће категорије:

1) CAV (connected* and autonomous vehicle) технологије и њихова примена на железници;

2) општа питања повезана са аутономним возилима;

3) корисничка перцепција и поглед на аутономна возила;

4) дизајн и технологије за аутономна возила;

5) аутономна возила и путни прелази.

На основу анализе ових студија аутори закључују да су главне предности увођења аутономних возила на железници:

- побољшање укупне безбедности због елиминисања људске грешке;
- побољшање поузданости услуге;
- повећање флексибилности система и коришћења возног парка;
- побољшање енергетске ефикасности.

Табела 2.1 Преглед релевантних студија случаја у области аутономних возила на железници ^[4]

Р. бр.	Аутори рада, назив и година публикавања	Циљ истраживања
CAV (connected* and autonomous vehicle) технологије и њихова примена на железници		
1.	S. A. Bagloee, M. Tavana, M. Asadi, and T. Oliver, Autonomous vehicles: Challenges, opportunities, and future implications for transportation policies, 2016.	Анализа различитих изазова и могућности у погледу транспортних политика и регулативама повезаним са CAV технологијама
2.	X. Krasniqi and E. Hajrizi, Use of IoT technology to drive the automotive industry from connected to full autonomous vehicles, 2016.	Истраживање актуелног стања на CAV тржишту и технолошких трендова од прелиминарне фазе до потпуно аутономних возила
3.	M. Crains, A future with autonomous vehicles: Issues, the potential for research topics, and a personal perspective, in Proc. Can. Transp. Res. Forum 52nd Annu. Conf.-Can. Transp., 2017.	Приказ перспективе будућег развоја аутономних возила у свим видовима транспорта у
4.	P. Bucsky, Autonomous vehicles and freight traffic: Towards better efficiency of road, rail, or urban logistics, 2018.	Студија постојећег стања у робном саобраћају и примене CAV технологија у транспорту робе
5.	GHSА. Preparing for Automated Vehicles. 2018.	Одређивање потенцијалних проблема при примени система аутономне возње

6.	D. Elliot, W. Keen, and L. Miao, Recent advances in connected and autonomous vehicles, 2019.	Детаљни преглед скорашњих достигнућа у САV технологијама
7.	CRS. Issues in Autonomous Vehicle Testing and Deployment, 2020.	Истраживање проблема повезаних са развојем и тестирањем САV
Општа питања повезана са аутономним возилима		
8.	O.Gebauer and W.Pree, Towards autonomously driving trains, 2008	Одређивање концептуалних, техничких и правних изазова повезаних са развојем аутономних возова
9.	O. Gebauer, W. Pree, G. Hanis, and B. Stadlmann, Towards autonomously driving trains on tracks with open access, 2012	
10.	O. Gebauer, W. Pree, and B. Stadlmann, Towards autonomously driving trains on tracks-concept, system architecture, and implementation aspects, 2012	
11.	O. B. Dordal and B. C. Ávila, Autonomous driving trains to pass in bidirectional crossing loop preventing stops, 2016	Израда софтверског система заснованог на агенту за координацију возова
12.	J. Hazan, N. Lang, J. Chua, X. Doubara, T. Steffens, and P. Ulrich, Will autonomous vehicles derail trains? 2016	Студија утицаја увођења аутономних возила на железнички транспорт
13.	J. P. Powell, A. Fraszczyk, C. N. Cheong, and H. K. Yeung, Potential benefits and obstacles of implementing driverless train operation on the tyne and wear metro: A simulation exercise, 2016	Процена бенефита и изазова увођења аутономних возова на Тјун и Вер линији метроа (УК)
14.	Y.Wang, M.Zhang, J.Ma, and X.Zhou, Survey on driverless train operation for urban rail transit systems, 2016	Преглед коришћења возова без машиновођа у урбаним шинским системима
15.	D. Trentesaux, R. Dahyot, A. Ouedraogo, D. Arenas, S. Lefebvre, W. Schön, and H. Chéritel, The autonomous train, 2018.	Истраживање предности и недостатака увођења аутономних возова
16.	A. Wardrop, Autonomous freight trains in Australia, in Proc. 2019.	Идентификација изазова повезаних са увођењем теретних возова у удаљеним подручјима
17.	A. Antolini, Road, railways-autonomous driving vehicles: The development of driverless and autonomous trains SNCF plans semi autonomous trains to enter market in 2020, 2020.	Одређивање потенцијалних изазова увођења аутономних возова у железничкој компанији SNCF
18.	F. Kemmeter. Autonomous Trains: A Brief Review, 2020.	Истраживање изазова увођења аутономних возова
19.	S. Muller, Autonomous trains in freight transport Should the railway not have the advantage over trucks, 2020	Евалуација организационих проблема због увођења аутономних теретних возова
20.	J.-A. Pattinson, H. Chen, and S. Basu, Legal issues in automated vehicles: Critically considering the potential role of consent and interactive digital interfaces, 2020	Разматрање и анализа легалних питања повезаних са аутономним возилима
21.	J. Wang, L. Zhang, Y. Huang, and J. Zhao, Safety of autonomous vehicles, 2020	Студија безбедносних питања у вези САV
22.	K. Othman, Public acceptance and perception of autonomous vehicles: A comprehensive review, 2021	Спровођење компресивног прегледа прихватљивости и перцепције јавности у погледу аутономних возила

23.	H. Karvonen, I. Aaltonen, M. Wahlström, L. Salo, P. Savioja, and L. Norros, Hidden roles of the train driver: A challenge for metro automation, 2011.	Истраживање изазова повезаних са увођењем аутономних возова у метро системе
24.	J.M.Cohen,A.S.Barron,R.J.Anderson,and D.J.Graham, Impacts of unattended train operations on productivity and efficiency in metropolitan railways, 2015.	Одређивање ефеката аутоматизације на рад метро линије
25.	T. Cassauwers. Driverless Trains are Coming, But What About the Workers, 2020.	Студија питања у вези запослености код увођења аутономних возова
Корисничка перцепција и поглед на аутономна возила		
26.	A. Fraszczyk, P. Brown, and S. Duan, Public perception of driverless trains, 2015.	Студија перцепције јавности суштинских промена у железничком транспорту повезаних са аутономним возовима
27.	A. Fraszczyk and C. Mulley, Public perception of and attitude to driver less train: A case study of sydney, australia, 2017.	Истраживање перцепције корисника и њиховог става према аутономним возовима у Сиднеју (Аустралија)
28.	C.PakuschandP.Bossauer, User acceptance of fully autonomous public transport, 2017.	Студија прихватања технолошких иновација у аутономном јавном превозу од стране корисника
29.	M. Henne, A. Schwaiger, and G. Weiss, Managing uncertainty of AI based perception for autonomous systems, 2019.	Идентификовање корисничке перцепције изазова код примене вештачке интелигенције на аутономним возилима
Дизајн и технологије за аутономна возила		
30.	U. Bock and G. Bikker, Design and development of a future freight train concept-virtually coupled train formations, 2000.	Развој новог оперативног концепта за железничке услуге
31.	A. E. Haxthausen and J. Peleska, Formal development and verification of a distributed railway control system, 2000.	Предлог контролисаног дистрибутивног система за железнице
32.	M.Matsumoto, S. Kitamura, and M. Sato, High assurance technologies for autonomous decentralize train control system, in Proc. 2001,	Пројекат децентрализованог аутономног система управљања возовима
33.	M. Matsumoto, The revolution of train control system in JAPAN, 2005,	Преглед различитих типова система контроле возова који су у употреби у Јапану
34.	R. M. Castells, I. R. Graham, C. Andrade, G. Churchill, and C. J. Cox, Automated metro operation: Greater capacity and safer, more efficient transport, 2011.	Студија оперативних карактеристика аутономних возова на метро линијама
35.	S. Marrone, R. Nardone, A. Orazio, I. Petrone, and L. Velardi, Improving verification process in driverless metro systems: The MBAT project, 2012.	Студија процеса верификације различитих система аутономних возова
36.	T. S. Mohammed, W. F. Al-Azzo, M. A. Akaak, and M. L. Suroor, Full automation in driverless trains: A microcontroller-based proto type, 2014.	Развој прототипа аутономног воза базираног на микроконтролерима
37.	S. Balasubramaniam, Internet of trains A safer autonomous long distance transportation, 2016,	Истраживање различитих IoT процесора који могу бити примењени за увођење аутономних возова у даљинском саобраћају

38.	P.Fraga-Lamas,T.M.Fernández-Caramés,andL.Castedo, Towards the Internet of smart trains, 2017.	Преглед развоја железничких комуникационих технологија
39.	D. Romano, S. Zazzaro, L. Lenzi, L. Niro, V. Improta, and A. Surine, Driverless systems: Cutting-edge technology for smart transportation, 2017.	Студија постојећих аутономних метро система и потреба за променама
40.	K. V. Bharathi, D. Divya, S. Raseeda, N. S. Tejaswini, and C. B. Shankaralingappa, Auto metro train shuttle between two stations, 2018.	Креирање технологије за аутоматску контролу и управљање возовима
41.	R. Lagay and G. M. Adell, The autonomous train: A game changer for the railways industry, 2018.	Разматрање различитих карактеристика пројекта увођења аутономних возова у Француској
42.	Arup, Future of Rail 2050, 2019.	Преглед нових трендова у железничком транспорту
43.	Y. Kimiagar, What are the Artificial Intelligence Applications in Rail Transit? 2019.	Преглед развојних трендова технологија које се користе за шинске урбане системе
44.	J. Pickering, J. Whitaker, B. Glazer, and K. J. Burnha, An investigation into the closer running of autonomous trains, 2020.	Креирање симулационог модела за истраживање примене аутономних возова
45.	T. Kunifuji, K. Mori, T. Miura, and J. Nishiyama, A proposal of exible railway signaling system utilizing autonomous decentralized technology, 2009.	Креирање алтернативног железничког сигналног система
46.	J. Harb, N. Rébéna, R. Chosidow, G. Roblin, R. Potarusov, and H. Hajri, A large-scale traffic light dataset for autonomous trains, 2020.	Развој скупа података за препознавање и детекцију железничких светлосних сигнала
47.	M. Brenna, F. Foadelli, and M. Longo, Application of genetic algorithms for driverless subway train energy optimization, 2016.	Оптимизација потрошње енергије код аутономних метро возова
48.	C.Y.Mandara,S.Chandana, A.Charan, V. Ankitha, and M. Levy, Fully automated metro train with enhanced safety, 2019.	Предлог за прототип потпуно аутоматизованог метро воза са унапређеним карактеристикама безбедности
49.	F.Richert, Japanese Partnership to Develop Railway System With Fuel Cell, 2020.	Приказ нове генерације возова са алтернативним извором енергије
50.	M.Gschwandtner, W. Pree, and A. Uhl, Track Detection for Autonomous Trains, 2010.	Развој методе коришћења технике детекције саобраћајне траке за аутономна железничка возила
51.	J. Weichselbaum, C. Zinner, O. Gebauer, and W. Pree, Accurate 3D vision-based obstacle detection for an autonomous train, 2013.	Предлог за систем за детекцију препрека за аутономна возила базиран на 3-D визији
52.	Y. Xie, M. Khlif-Bouassida, and A. Toguyéni, Well-formed Petri net based pattern for modeling logic controllers for autonomous trains, 2017.	Развој контролера дискретних догађаја за контролни систем аутономних возова
53.	J. Talvitie, T. Levanen, M. Koivisto, K. Pajukoski, M. Renfors, and M. Valkama, Positioning of high-speed trains using 5G new radio syn chronization signals, 2018.	Предлог методе за позиционирање возова
54.	M.Yin, K.Li, and X.Cheng, A review on artificial intelligence in high speed rail, 2020.	Преглед апликација базираним на вештачкој интелигенцији за железничке системе великих брзина

Аутономна возила и путни прелазни		
55.	C. Hsu and E. Jones, Transmission range evaluations of connected vehicles at highway-rail grade crossings, 2017.	Анализа захтева у погледу домета преноса података за CAV на пружним прелазима
56.	B. Zaouk and K. Ozdemir, Implementing connected vehicle and autonomous vehicle technologies at highway-rail grade crossings, 2017.	Истраживање различитих алтернатива базираних на CAV алтернативама за унапређење безбедности на пружним прелазима
57.	T. Voegel, B. Godziejewski, S. Grand-Perret, N. Merat, Ø. Rødseth, and M. Schijndel-de Nooij, Connected and Automated Transport, 2017.	Истраживање различитих аспеката и ефеката аутоматизације
58.	U.S. DOT. Preparing for the Future of Transportation: Automated Vehicles, 2018.	Разматрање различитих карактеристика аутоматизације и како се припремити за будућност
59.	U.S. DOT. AVs at Highway-Rail Grade Crossings – US DOT FRA Final Report, 2018.	Одређивање сета примарних захтева за безбедан прелаз аутономних возила преко пружних прелаза
60.	R. Bertini and H. Wang, Connected Vehicle Application Roadmap for Oregon as Part of Preparing a Possible Oregon Road Map for Connected Vehicle/Cooperative Systems Deployment Scenarios. 2016	Припрема мапе пута за примену CAV у Орегону (САД)
61.	GAO, Grade-Crossing Safety, 2018.	Анализа безбедносних изазова на пружним прелазима
62.	D. Neumeister, R. Campbell, J. Sharkey, and J. Utterback, Prototype rail crossing violation warning (RCVW) Advancing the use of connected vehicle technologies to prevent crashes at rail grade crossings by warning vehicle drivers of predicted violations, 2019.	Креирање система за упозорење на непоштовање прописа на пружним прелазима
63.	A. Virtanen, A. Silla, M. Jokela, and K. Kauvo, Railroad level crossing and an autonomous vehicle, 2019.	Разматрање потенцијалних проблема повезаних са саобраћајем аутономних возила преко пружних прелаза
64.	X. Wang, J. Li, C. Zhang, and T. Z. Qiu, Active warning system for highway-rail grade crossings using connected vehicle technologies, 2019.	Предлог новог активног система упозоравања базираног на CAV
65.	G. Knapp, M. Bullock, and C. Stogios, Connected and Automated Vehicle Technologies Insights for Codes and Standards in Canada, 2020.	Преглед прописа и стандарда за увођење CAV возила
66.	Y. Li and Q. Liu, Intersection management for autonomous vehicles with vehicle-to-infrastructure communication, 2020.	Предлог стратегије за управљање укрштањима, узимајући у обзир присуство аутономних возила
67.	M. Rosyidi, N. Irawati, S. Nugroho, S. Bismantoko, T. Widodo, A. Harvono, and U. Chasanah, Development of radar-based sensor system for smart level crossing technology, 2020.	Унапређење безбедности на пружним прелазима
68.	U.S. DOT., Identification of Railroad Requirement for Future Automated and Connected Vehicle (AV-CV) Environment, 2020.	Истраживање најбољег приступа за припрему за увођење CAV
69.	U.S. DOT., Automated Vehicles Comprehensive Plan, 2021	Развој свеобухватног плана за увођење аутономних возила

Аутори наводе и главне изазове у развоју аутономних железничких возила истакнуте у анализираним радовима. Међу њима су:

- Потребно је детаљније истражити аутономну вожњу у случају опасних ситуација. Због велике дужине код железничких возила зауставни путеви морају да се оптимизују у случају таквих ситуација. Неопходно је извршити побољшања у конструкцији возила како би се у случају аутономне вожње осигурало правилно реаговање у опасним ситуацијама;

- значајан изазов за развој и примену аутономних возила је повезан са правним питањима. Постојећи закони и прописи стављају велики нагласак на безбедност и захтевају опсежно тестирање нових технологија пре него што могу да се примене у пракси;

- током саобраћаја аутономних железничких возила, увек постоји ризик упада људи или објеката на колосек. Потребно је побољшати постојеће технологије комуникације и надзора како би се осигурало да неочекивани објекти на шинама буду благовремено откривени, како би се обезбедило да аутономна возила могу правилно да реагују на њихову појаву.

- упркос чињеници да се постојећа аутономна возила ослањају на различите технологије засноване на вештачкој интелигенцији, потребно је више истраживања ради унапређења процеса прикупљања информација, одлучивања и учења. Ови процеси треба да се изводе у складу са различитим физичким и оперативним карактеристикама, као што су брзина и локација воза, брзина и локација других возова на истој прузи, присуство објеката на колосецима, статус железничких сигнала и др. Ефективни процеси прикупљања информација, одлучивања и учења могу знатно да побољшају поузданост саобраћаја са аутономним возилима;

Да би се пронашла ефикасна решења за главне изазове аутори предлажу спровођење даљих истраживања. Између осталих предлажу спровођење низа интервјуа са широком групом машиновођа (нпр. машиновође различитог пола, старости, националности итд.) да би се боље разумеле све одговорности и функције које су потребне за ефикасно и безбедно кретање воза. Резултати спроведених интервјуа треба да се користе у дизајну аутономних возила да би се обезбедило да се при саобраћају таквих возила извршавају све кључне улоге и функције.

У радовима [5][6] разматрају се концептуални, технички и регулаторни проблеми повезани са увођењем аутономних возила на постојећим железничким пругама, које нису део затвореног система и стога захтевају поуздано препознавање препрека на

колосеку. У њима се сумирају резултати испитивања прототипа аутономног система возова названог autoVAHN. Аутори наводе као важан захтев за регулаторну сертификацију нових железничких система постизање „глобално најмање једнако добру” (GAMAB) безбедност у поређењу са постојећим процедурама и системима.

Рад [7] анализира досадашњи развој и будуће трендове у увођењу шинских система са аутономним возилима. Аутори указују да међу главне изазове за увођење тих система спадају безбедносни проблеми и реаговање у ванредним ситуацијама. Зато закључују да је у циљу смањења ризика код система са аутономним возилима важно дефинисати начин систематске процене нивоа безбедности и надзорни оквир за стандардизацију и управљање процесом развоја и верификације таквих система. Рад се фокусира на системе јавног превоза па се проблеми процене нивоа безбедности и верификације разматрају искључиво у погледу поузданости и техничких карактеристика уређаја за контролу, управљање и детекцију. Аутори наводе да детекција и управљање ванредним ситуацијама треба да укључи саобраћајне диспечере, чак и за највиши ниво GoA 4.

У раду [8] је разматрана улога и задаци машиновођа у метро систему Хелсинкија као припрема за увођење аутономних возила. Истраживање је спроведено методом интервјуа са машиновођама и њиховим руководиоцима, надзором њиховог рада и радионицама на којима се дискутовало о њиховом раду. Резултати сугеришу да постоји много више задатака при вожњи метро возова него што се на први поглед чини. Машиновође не само да управљају возом на прузи и станицама, већ доприносе и низу других важних функција у систему метроа. На пример, возачи предвиђају, посматрају, тумаче и реагују на догађаје у окружењу. Они су значајна интеракцијска веза између различитих актера у оквиру система. Аутори закључују да у случају да се не узму у обзир све идентификоване улоге машиновођа, прелазак на потпуно аутоматизовани систем може негативно утицати на квалитет услуге и ниво безбедности.

Аутори у раду [9] указују да у досадашњим радовима проблеми при саобраћају возова без машиновође нису детаљно описани и да се често групишу само у једну категорију догађаја (ванредне ситуације). Они на основу података са Шведске железничке мреже детаљније анализирају непланиране догађаје током вожње и улогу машиновође при таквим дешавањима и самим тим задацима система за аутоматско управљање возилима при вишим степенима аутоматизације. Коришћени подаци су веома прецизни јер су преузети из дневника кашњења који су водили саобраћајни диспечери током 2019. године. Аутори елаборирају постојеће дефиниције нивоа

аутоматизације (GoA) и на основу своје анализе предлажу ревидирани модел који наглашава више аспеката улоге машиновођа. Идентификовали су шест категорија основних улога возача: детектовање, пријављивање, провера, корекција, усмеравање путника у опасним ситуацијама, извршавања наредби лица која руководе саобраћајем. У раду наводи да законодавство и регулаторни оквир за употребу аутономних возила на железници имају најмање два аспекта. Један је везан за улогу машиновође и одговорности које су традиционално њему додељене. Други аспект је сертификација технологија потребних за аутоматска возила, а посебно за област вештачке интелигенције чему се у последње време посвећује све већа пажња. За први аспект аутори наводе да регулаторно припада систему управљања безбедношћу који се сертификаује од стране надлежних регулаторних тела за безбедност на железници.

И у раду [10] се закључује да је неопходно детаљније проучити и описати поступке при вожњи воза да би се при увођењу аутономних возила у железничком теретном саобраћају избегле грешке и погрешне интерпретације. Рад даје преглед општег процеса управљања железничким возилима разграничавајући његове различите фазе. Посебно описује процес вожње теретног воза и његове посебне карактеристике. Аутори указују на суштинске разлике између отворених и затворених железничких мрежа и задатке који потенцијално могу бити аутоматизовани. Они резимирају релевантне таксономије за аутономне железничке системе и закључују да треба унапредити дефиниције таксономије и оквира за класификацију нивоа аутоматизације у железничком теретном саобраћају да би се боље идентификовали сложени изазови који предстоје у њиховом развоју и увођењу у саобраћај.

Потребом прецизног дефинисања термина степена аутоматизације (асистенција, аутоматизација, аутономност) се бави и рад [11]. Аутори посебно истичу разлику у случају неочекиваних поремећаја у систему. Аутоматизован систем тежи да се постави у безбедно резервно стање (обично заустављање у железничком саобраћају) док се поремећај не реши од споља а аутономни систем попут човека покушава да постигне примену решење на основу своје стратегије. Стога за аутономни систем „интелигенција“ је уграђена, док је за аутоматизовани она у централном контролном ентитету.

У раду [12] предлажу визију будуће контроле возова која се заснива на постојећим парадигмама аутоматског управљања, заштите и контроле возова. Они дефинишу основне концепте аутономне вожње у такозваном дигиталном железничком систему и резимирају њену изводљивост у погледу изазова и могућности. Аутори истичу разлику између аутоматских и аутономних система. Овај други би требало да буде “. . .

способан да самостално одлучује, учи из искуства и прилагођава се променама у окружењу”. Системи заштите возова који аутори разматрају у овом раду имају „умерени“ степен аутономије, реагују нпр. код појаве препрека и сметњи у вези одређивања положаја воза, успоравањем и одлуком о повратку на нормалну брзину након уклањања препреке или кад прецизне информације о позиционирању воза буду доступне. Ове реакције се, међутим, заснивају на унапред дефинисаним детерминистичким моделима понашања и не зависе од вештачке интелигенције или „учења на примерима“. За неке информације системи заштите возова, као што је на пример, модул детекције препрека, користи се технологија заснована на вештачкој интелигенцији, као што је класификација слика заснована на неуронским мрежама. Аутори сматрају да је ова ограниченост у односу на истински аутономне системе од суштинског значаја за омогућавање сертификације за рад аутономних возова на европској железничкој инфраструктури. За све варијанте аутономних железничких возила, аутори се залажу за стриктно раздвајање између аутоматизованих система заштите воза (АТР) и система аутоматског управљања возилом (АТО), јер сматрају да су први критични за безбедност и захтевају сертификацију према највишем степену интегритета безбедности СИЛ-4, док би други могли бити сертифицирани према nižем СИЛ-у, пошто АТР систем обезбеђује да ће воз остати безбедан, чак и у случају сметњи на АТО систему.

Питања сертификације система са аутономним возилима у железничком систему са детаљно бави рад [13]. Они предлажу нову структуру аутономног система управљања возовима који покрива функције аутоматске заштите воза (АТР - Automatic Train Protection) и аутоматски рад возова (АТО - Automatic Train Operation) тј. употребу аутономних железничких возила. Предложена структура је погодна за ниво GoA 4 у отвореном окружењу. У раду разматрају које врсте технологије се могу развијати и сертифицивати већ данас на основу постојећих железничких стандарда а које захтевају њихову модификације или проширење да би се омогућило њихово увођење у реалну употребу на железници. Аутори се залажу за строго одвајање између конвенционалних контролних подсистема (АТР) и нових подсистема заснованих на вештачкој интелигенцији који су потребни да би се омогућила вожња без машиновођа. У раду се закључује да су ови други потребни само у делу перцепције такозваног „ланца аутономије“ (*autonomy pipeline*):

повод → перцепција → дефинисање → предвиђање → избор начина контроле → активирање

Аутори анализирају да ли се тако заснован систем нивоа GoA 4 може сертифициовати. Конвенционални подсистеми могу бити сертифициовани на основу данашњих CENELEC стандарда. Међутим, за део дизајна заснованог на вештачкој интелигенцији ови стандарди се не могу применити. У овом раду делови система заснованог на вештачкој интелигенцији су стриктно ограничени на област перцепције. За њихову сертификацију је примењен ANSI/UL 4600 Стандард за оцену безбедности аутономних возила на јавним путевима у САД. Иако се он односи на друмска возила сматра се да се истоветни поступак може применити и на железничка возила. Применом овог стандарда оцењена је безбедност описаног система аутономне контроле возова. Процедура је спроведена у три корака:

- 1) идентификација свих опасности везаних за аутономну вожњу и навођење мера за којима је могуће њихово смањивање;

- 2) навођење могућих последица;

- 3) навођење како свака област „ланца аутономије“ утиче на идентификоване опасности и мера које се примењују да би повезани ризици смањили на прихватљив ниво. У раду је закључено да предложени систем за аутономну контролу возова може бити сертифициован за теретне возове као и возове у систему јавног градског превоза. Према процени аутора аутономни возови за велике брзине, према ауторима данас не могу бити сертифициовани без обзира на основни АТР/АТО дизајн јер постојећа детекција препрека функционише са довољном поузданошћу само за возове са брзином до 120 км/х.

Аутор рада [14] наводи искуства из развоја аутоматског управљања железничким возилима на Руским железницама. Закључује да је аутономна технологија за возове изводљива али да су питања која је потребно решити безбедносни случајеви и законодавство. Главни проблем је што актуелни стандарди, као што су EN 50126, EN 50128 и EN 50129 немају никакве информације о томе како доказати сигурност дигиталне визије у различитим условима. Предлажу нови приступ на бази SOTIF-a (безбедност предвиђене функционалности, стандард (ISO/PAS 21448:2019) који се примењује у аутомобилској индустрији. На основу њега планирају развију железнички стандард који ће омогућити сертификацију таквих уређаја на аутономним железничким возилима.

У раду [15] се анализирају проблеми у вези дефинисања критеријума прихватљивости ризика у процесу сертификације и ауторизације нових система на железници. Аутори истичу недостатке уобичајеног начина дефинисања овог

критеријума заснованог на историјским евиденцијама и предлажу употребу такозваног „Safety II“ концепта за одређивање критеријума прихватљивости ризика у процесу сертификације система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима.

Рад [16] разматра проблем дефинисања безбедносних захтева које систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима мора да испуни. Аутори истичу да поред чисто техничких питања развоја уређаја за детекцију препрека, дефинисање неопходних захтева у погледу безбедности, поузданости и ефикасности има пресудан значај за примену аутономних возила. Ниво безбедности које треба да оствари систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима мора бити бар једнак нивоу безбедности који достигнут од стране машиновођа у односу на појаву препрека на прузи.

У раду [17] аутори дају преглед радова у области детекције препрека у железничком систему. Наводе да је у већини литературе главни фокус на системима за детекцију препрека у критичним областима као што су зоне близу мостова, путним прелазима и у станицама. Међутим, инциденти на железници нису ограничени само на такве области и могу се десити на било ком месту дуж пруге. Наводе две могућности за решавање овог проблема: а) сензорни системи који су стационарни и постављени на лицу места, и б) мобилни сензорни системи постављени на железничка возила. Постоје три стратегије избора сензора за пројектовање и имплементација система детекције на возилу, посебно за аутономна железничка возила:

- активна: уређаји за емитовање и повезани сензори стављају се на чело воза за скенирање блиских области. Ова стратегија има недостатке кратког домета и ниске прецизности у зонама кривина;

- пасивна: користите се јефтиније видео камере које снимају зону испред воза и ослањају се на алгоритме за обраду слике који имају високе рачунарске захтеве пошто треба да обрађују добијене слике у реалном времену или близу реалног времена, али пружају важне информације за идентификацију објекта;

- мешовита: Интегрисање више извора информација које треба да надокнади недостатке појединачних метода и поделу радног опсега ради употребе и пасивне и активне стратегије.

Према ауторима рада [18], главни циљ је откривање пешака или малих возила (попут инвалидских колица) и избегавање колизије железничких возила са њима. Аутори разматрају употребу два комплета стерео камера (четири камере) инсталираних на пружном прелазу. Наводе предности у коришћењу стерео камера, попут њихове

способности да испоручују информације по дубини или ширем подручју око сензора као и то што не захтевају механичко скенирање. У поређењу са методама као што су ултразвучне или методе оптичког снопа захтевају мањи број сензора. За откривање препрека могу се применити технике обраде слике. Пошто су камере стационарне корелација са позадином се може успешно применити за откривање препрека. Аутори наводе да промена осветљења може утицати на перформансе предложеног система и да неповољни временски услови могу да погоршају његово функционисање.

У раду [19] фокус је на безбедносним питањима повезаним са особама на станичним перонима. Аутори разматрају групу различитих типова сензора који обезбеђују улазне податке за централну јединицу обраде података. Ови сензори обухватају стерео камере, инфрацрвене сензоре и термалне камере, уграђене на различитим локацијама на подручју железничке станице. Оне служе за откривање две главне врсте опасних ситуација: објекте који су пали на колосек и интензивне промене осветљења што може указати на појаву пламена. За описани систем су у кораку обраде података дефинисана четири задатка: детекција воза, детекција објеката, препознавање објеката и праћење објеката. Аутори наводе да су у пракси постигнуте савршене перформансе детекције возова. Међутим, као и у претходно наведеном раду, промена осветљења се помиње као фактор који утиче на ефикасност стерео камера.

У раду [20], аутори описују коришћење комбинације инфрацрвених (IR), ултразвучних (US) и видео сензора са циљем превазилажења недостатке сваког појединачног сензора. Са овом конфигурацијом се контролише подручје у близини мостова ради безбедности железничког саобраћаја и избегавања препрека. Сензори су постављени тако што је сет инфрацрвених и ултразвучних емитера и пријемника постављен са обе стране пруге и ствара виртуелну IR-US баријеру у контролисаном подручју. Поред тога видео сензор (камера) је постављена изнад те баријере. Главна анализа компоненти (PCA) која се користи у овом систему има два задатка: да спречи лажне аларме преко IR-US баријере и да преко видео сензора детектује покретне објекте.

Рад [21] се заснива на сличном моделу и у њему се описује коришћење баријере IR-US сензора на обе стране пруге која треба да покрије правоугаону област и да компензује недостатке сваког појединачног сензора. Аутори овог рада чине један корак напред применом фази контролера и Демпстер-Шаферовом теорије доказа за интеграцију информација. Ова побољшања имају за циљ постизање мањег броја лажних аларма у практичној примени.

Коришћење нагибног 2Д ласерског скенера за обезбеђивање 3Д облака тачака и испитивање његове примене на пружним прелазима су предмет рада [22]. Према ауторима главни изазов је откривање малих препрека које могу остати скривене од постојећих система за детекцију. Пошто је сензорни систем стационаран, и у овом раду се за откривање покретних објеката примењује корелација са позадином. Хардвер који се користи за скенирање је ЛИДАР сензор који је у стању да детектује објекте величине 10x10x10 cm. Аутори наводе висок квалитет детекције објеката и одсуство лажних аларма у евалуацији.

У раду [23] аутори предлажу коришћење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима заснованом на 3-D визији. Применом такозваног стерео подударана и укошеним маскама корелације овај систем је значајно унапредио стопу успешности детекције препрека и смањио број лажно позитивних детектовања.

Друга група радова је истраживала употребу сензора на железничком возилу. Свеобухватан преглед сензора и метода који се користе за детектовање возила и препрека даје рад [24]. Разматране методе имају два основна корака:

1) HG где је локација могућег објекта на слици хипотеза која се дефинише:

а) методом заснованом на знању које користе априорно знање за хипотезу локације објеката на слици;

б) методом заснованом на стерео приступу која користе предност Инверзног перспективног мапирања (ИПМ) за процену локације возила и препреке у сликама;

в) методом заснованом на покрету, откривањем возила и препрека помоћу оптичког тока.

2) HV где се врше испитивања ради верификације присуства објекта на слици.

У „Boss“ систему представљеном у раду [25] користе се активни сензори за детекцију препрека у урбаном подручју. У описаном систему директно мерење удаљености и циљна брзина су важнији од података добијених путем видео камера. Ти подаци су обимнији али и компликованији за обраду и интерпретацију. Описано је коришћење комбинације више радарских и ласерских сензора за скенирање, са различитим дometима до 300 m. У систему је за сваки тип сензора примењен специјализовани сензорски ниво што омогућава додавање нових типова сензора у систем са минималним променама нивоа интеграције. ЛИДАР скенирања се обрађују за прављење 3Д тачке у облаку.

Аутори рада [26] користе термалну FLIR SC655 камеру за откривање препрека на или близу шина на одређеном домету испред воза. Систем прикупља термалне слике,

израчунава геометрију простора (хомографија од пиксела до координата земљишта коришћењем инверзног перспективног мапирања), детектује железничку пругу, детектује објекте у првом плану као и друге аномалије, прати могуће препреке и даје аларм машиновођи према одређеним критеријума.

У студији [27] аутори тврде да не постоји јединствен систем сензора који има способност да испуни све дефинисане захтеве, и зато предлажу мултисензорски систем који се састоји од теле-камере, даљинског 24 GHz радарског сензора, надзорне камере и радарске мреже. Две видео камере се налазе иза предњег ветробранског стакла на вучном возилу заштићене од временских утицаја. Добијени подаци од сензора се комбинују помоћу Калман-филтера заснованог на методи интелигентне интеграције. Сlike на камери одређују закривљење колосека и његове границе. Користећи интеграцију података постиже се прецизна процена стања (положаја и брзине) откривених објекта испред воза. Ако је откривени објекат у правцу војње, активира се праћење циља. На основу информација о профилу пруге систем дефинише да ли се један или више откривених објеката налазе у колосеку. У том случају систем шаље информацију контролној јединици вучног возила и која иницира одговарајућу реакцију попут активирања сирене или кочења. Резултати истраживања показују високи потенцијал разматраног мултисензорског система.

Аутори у раду [28] разматрају примену стерео камера за детекцију возила. Како наводе углавном се користе методе засноване на детекцији покрета иако постоје и примери коришћења базирани на изгледу. Један такав пример је описан у раду [29] где се карактеристике изгледа користе за сегментацију сцене и разумевање слободног простора. Други пример је описан у раду [30] где се карактеристике као што су величина, висина и ширина служе за детекцију возила. Аутори радова [31] [32] примењују мерење еуклидског растојања са циљем да се направе одговарајући кластери облака тачака у објектима.

Коришћење стерео камера и питање њиховог домета се разматра у раду [33]. Аутори наводе да постоје недостаци коришћења две камере за стерео визију и предлажу коришћење треће камере. Међутим, према ауторима радова [34] и [35] систем од само две камере се преферира за будућу примену због високих рачунарских трошкова система заснованог на тринокулару.

На основу прегледа релевантне литературе може се закључити следеће:

- од свих почетних изазова за увођење аутономних возила у железничком систему једино је проблем детекције и реаговања на препреке остао још увек нерешен у отвореним системима;

- већина аутора се бавила техничким питањима развоја уређаја који омогућавају коришћење возила без машиновође и конструкцијом таквих уређаја. У складу са тим су се проблеми дефинисања захтева и сертификације возила за аутономну вожњу разматрали углавном према потребним перформансама уређаја (performanse based approach) и њиховој техничкој поузданости. Предложени начини сертификације се углавном базирају на поступцима дефинисаним за структурни подсистем контрола, управљање, сигнализација (CCS);

- у отвореним железничким системима за аутономну вожњу је неопходно коришћење вештачке интелигенције и машинског учења. Међутим њих је немогуће сертифицикати за ниво безбедности СИЛ -4 предвиђен за виталне управљачке уређаје на возу. Зато је неопходно изменити постојећу регулативу и додати нове стандарде за аутономна возила. Неколико аутора сматра да се то мора урадити на основу процене ризика (risk based approach);

- појам препрека је у већини радова дефинисан веома уопштено и ограничен је само на препреке у слободном профилу без разматрања потенцијалних сметњи за саобраћај воза. Исто важи и за начин реаговања на препреке који је у доста радова посматран искључиво као активирање кочница а у другим је комбинован са претходним смањењем брзине;

- неколико аутора сматра да је успешна замена машиновођа аутономним возилима у отвореним железничким системима могућа само ако се детаљно проуче њихови задаци, одговорности и начин реаговања током вожње и да су то далеко сложеније активности него само осматрање колосека и прилагођавање брзине или кочење. Систем са аутономним возилима мора да адекватно извршава све активности машиновођа;

- успешна детекција препрека у отвореним железничким системима захтева велики домет и поузданост. То није могуће постићи употребом само једне врсте сензора већ је неопходно њихово комбиновање. Ово подразумева постојање модула за интеграцију података и њихову обраду ради добијања једнозначне информације.

3. Актуелно стање (state of the art) у области аутоматизације железничког саобраћаја и развоја система за детекцију препрека

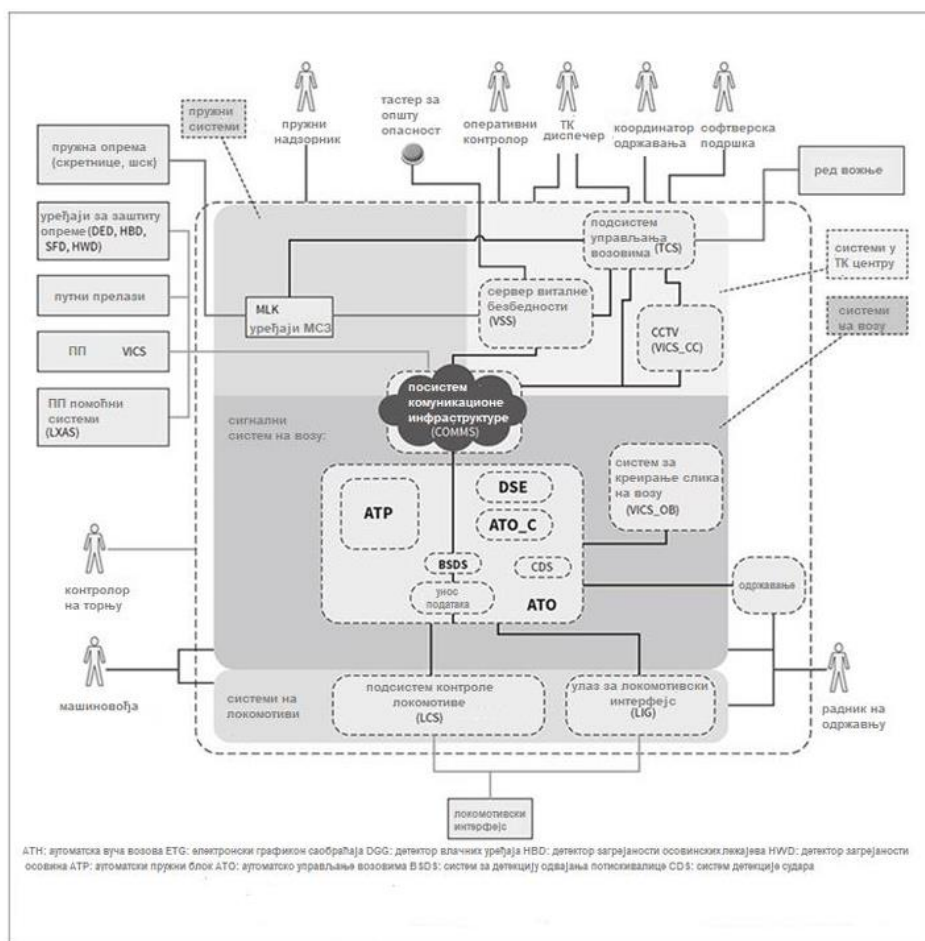
Прве пробне вожње са шинским возилима без машиновође су спроведене 1928. године у Берлину, на метро линији U 3 код станице Krumme Lanke [36]. Те пробе су имале само експериментални карактер али су показале да железнички систем има велики потенцијал за аутоматизацију.

До практичне примене аутоматског управљања возовима дошло је тек 40-так година касније на метро линији Викторија у Лондону. На њој је 1967. године уведен АТО систем али са возачем присутним у кабини за надзор и реаговање при ванредним догађајима. Интензивна испитивања потпуно аутоматских система тј. система на којима саобраћају аутономна возила без возача почињу средином седамдесетих у Јапану, Канади, САД, Уједињеном Краљевству, Немачкој и Француској [37]. Први потпуно аутоматски систем јавног превоза са возилима без возача је пуштен у саобраћај 1981 године на Port Island линији у Јапанском граду Кобеу. Други такав систем у свету, а први у Европи је био метро у Француском граду Лилу који је отворен 1983. године [38]. Оба ова система немају класичан железнички колосек, већ посебне водеће стазе, потпуно су затворени, тј. пруга се налази искључиво на засебним мостовским конструкцијама или у тунелима, потпуно су ограђене и на њима је појава страних објеката на прузи, сем у зони стајалишта готово немогућа.

И поред тога што су ови системи успешно функционисали увођење потпуно аутоматизованих шинских система је у почетку било врло споро. До 2000. године свега око 200 km линија јавног превоза у свету је било опремљено за саобраћај шинских возила без возача. Тек у 21. веку је почело њихово масовније увођење, пре свега у метро системима. Број потпуно аутоматизованих метро линија нивоа GoA4 је до 2020. године порастао на 80 линија у 48 градова, што значи да сваки четврти метро систем у свету има бар једну линију на којој саобраћају возила без возача. Укупна дужина мреже потпуно аутоматизованих метро линија је порастао на више од 1350 km. То је око 8% посто од укупне дужине метро инфраструктуре у свету. Очекује се да ће и даља експанзија ове технологије бити веома брза. Ако се сви тренутно одобрени или планирани пројекти ове врсте реализују у складу са предвиђеним роковима, у свету би

2030. године било преко 4000 km метро линија на којима саобраћају возила без возача [39].

За разлику од система јавног превоза примена аутономних возила у класичним железничким системима је тек у почетној фази. Први железнички систем у свету који користи потпуно аутономна возила је мрежа рударских пруга компаније „Рио Тинто“ у региону Пилбара у Западној Аустралији. Ова железничка мрежа која повезује 17 рудника руде гвожђа са 4 лучка терминала има дужину од око 2000 km и на њој се користи око 200 дизел локомотива. Типична дужина воза је 2,5 km и он се састоји од више дизел локомотива и 240 вагона за превоз руде укупне тежине 28.000 t а максимални дневни обим саобраћаја износи око милион тона руде [40]. Саобраћај возова се даљински надгледа из оперативног центра у граду Перту удаљеном више од 1500 km. Један број машиновођа и даље дежура на стратешким локацијама широм мреже у случају проблема са аутономним возовима. Мануелно управљање локомотивама се примењује и случају одржавања и поправки на АТО систему.



Слика 3.1 Структура система AutoHaul на мрежи пруга „Рио Тинто“ [41]

Од 2022. године и локомотиве које потискују возове на великим успонима су укључене у систем аутономне возње.

На прузи и локомотивама је уграђен АТО систем AutoHaul који је развила компанија Hitachi Rail и који је еквивалентан Европском систему контроле возова (ERTMS) нивоа 2. AutoHaul систем се може поделити на четири главна сегмента: сегмент комуникационе инфраструктуре, сегмент оперативног центра, сегмент возова и сегмент сигнализација и заштита (слика 3.1) [41].

Мрежа пруга „Рио Тинта“ се налази у пустињском региону, где је вероватноћа појаве препрека веома мала, посебно оних који би могле да угрозе безбедност самог воза. Главна бригаа у том погледу су путни прелазни на укрштањима са јавним путевима. Зато је систем за детекцију препрека фокусиран за откривање препрека на путним прелазима. На пругама „Рио Тинта“ постоје 42 активна прелазна која су осигурани активним системом заштите са браницима и светлосним сигналимa (слика 3.2).



Слика 3.2 Аутономни воз пролази путни прелаз на железничкој мрежи „Рио Тинта“ у Аустралији. Плаво светло изнад кабине означава да се ради о возу без машиновође.

Систем за детекцију препрека на путним прелазима се састоји од три пружне компоненте које су постављене у зони прелазна:

а) Детекција препрека

Ласерски базиран систем детектује објекте унутар граница путног прелазна.

б) Видео надзор (CCTV)

Омогућује надзор над пружним прелазом и чува снимке путем дигиталног видео рекордера. Ручно и аутоматизовано преузимање/преглед ових снимака се врши од стране особља оперативног центра. 4К ХД камере пружају јасан поглед на прелаз, далеко супериорнији у односу на возачеву перспективу.

в) Расвета

Обезбеђује адекватно осветљење у зони пружног прелаза. Укључује се сваки пут када су активирани уређаји путног прелаза, када је путни прелаз у квару или када особље оперативног центра гледа уживо снимке са CCTV -а.

Поред пружних уређаја за детекцију препрека у зони путних прелаза локомотиве су опремљене видео камерама преко којих особље у оперативном центру прати кретање воза и евентуалну појаву препрека на његовом путу. У случају да уочи препреку особље оперативног центра предузима одговарајуће мере које су по правилу идентичне реакцији машиновође у кабини воза. Поред тога возило је опремљено и одговарајућим сензорима који региструју аномалије у току вожње укључујући и евентуални удар у неки објекат. AutoHaul систем је дизајниран да у том случају аутоматски заустави воз.

Прве пробе са потпуно аутоматизованим управљањем возовима на мрежи пруга „Рио Тинта“ су почеле 2017. године да би од јула 2019. почео редовни саобраћај са локомотивама без машиновођа. Овај систем је добио званичну дозволу за употребу у мају 2018. од Аустралијског регулаторног тела за безбедност (Office of the National Rail Safety Regulator ONRCR) након успешног завршетка обимног тестирања [41].

Према наводима компаније „Рио Тинто“ потпуна аутоматизација саобраћаја на њиховим пругама побољшава безбедност смањењем ризика на пружним прелазима и аутоматизованим реаговањем на ограничења брзине и кварове. Поред тога она елиминише потребу за око 1,5 милион километара колико би било потребно остварити друмским возилима при превозу машиновођа на смену. Представници компаније сматрају да је комерцијална брзина аутономних возова скоро 20% већа од брзине коју остварују возови са машиновођом [42].

Увођење AutoHaul система на пругама „Рио Тинта“ је било подељено у четири фазе, од којих је свака представљала један начина рада. Прва је била увођење АТП система на целој мрежи као оквира за имплементацију АТО-а. У другој фази машиновођа је остао задужен за вожњу, убрзање, кочење и кретање возом а АТО систем је само сугерисао оптимални профил вожње према унапред одређеној стратегији. У трећој и четвртој фази, АТО је преузео управљање локомотивом са разликом да је у

трећој фази машиновођа остао у кабини у функцији надзора док је у последњој реализован потпуно аутономни режим, без особља на возу. Интересантно је напоменути да је трећа фаза која одговара GoA 3 режиму трајала дуже него што се очекивало али је то било од суштинског значаја за јачање поверења у систем међу свим укљученим странама. Према речима једног од пројектаната „у ствари, имали смо некога ко је седео тамо спреман да интервенише, али то никада није урадио јер је систем радио оно што је требало да ради, до тачке у којој су сви имали довољно самопоуздања да уклоне особу из кабине локомотиве“ [40].

У Европи се већ дуже време активно ради на увођењу аутономних железничких возила. С обзиром на комплексну регулаторну и организациону структуру железничког сектора на карактеристике инфраструктуре и њеног окружења, на велики обим саобраћаја различитих врста возова и на високе безбедносне, социјалне и етичке стандарде то свакако представља велики изазов. Институције ЕУ већ дуже време спроводе бројне истраживачке пројекте који треба да омогуће увођење аутономних возова на европској железничкој мрежи. У оквиру програма Хоризонт 2020 и његовог продужетка до 2027. године су спроведени бројни пројекти и студије са циљем унапређења железничког сектора у ЕУ а посебно његове дигитализације и аутоматизације. Програм Хоризонт је кључни програм ЕУ за финансирање истраживања и иновација. Пројекти у оквиру овог програма који су се бавили развојем аутономних возила и система за детекцију препрека су:

- Пројекат “SMART - Smart Automation of Rail Transport”, који је реализован у оквиру Shift2Rail иницијативе [43]. Основни циљ тог пројекта је аутоматизација железничког саобраћаја” која ће повећати ефективност и капацитет робног транспорта на железници. У оквиру пројекта је развије нови интегрисани мулти-сензорски систем за детекцију препрека (OD) на возилу. Овај систем комбинује различите технологије визије: термалну камеру, сензор за ноћни вид (камера допуњена појачивачем слике), вишеструки стерео-визијски систем и ласерски скенер како би се направио систем фузије сензора за аутономно откривање препрека, на средњем (до 200 м) и великом растојању (до 1000 м) који је независно од светлосних и временских услова. Сви сензори су интегрисани у посебно кућиште како би се омогућило лако монтирање и демонтирање на/са различитих пробних возила у током евалуације. Прототип SMART OD система је морао да задовољи следеће захтева:

- Детекција фронталне препреке: откривање објеката, потенцијалних препрека на колосеку и близу њега у правцу кретања локомотиве. Циљана потенцијална препрека је

сваки објекат који се нађе на или у близини колосека а која није део железничке инфраструктуре;

- Систем за детекцију препрека на возилу: интегрисати OD систем у кућиште, који се може лако монтирати/демонтирати на/са предњег профила локомотиве;

- Робустан систем отпоран на услове околине: кућиште OD система штити сензоре од околних услова као што су прашина, блато, киша;

- Детекција препрека на великом растојању: за откривање препрека до 1000м испред воза.

- Детекција шина: за препознавање шина испред воза (испред OD система постављеног на возило), за дефинисање подручја од интереса за детекцију препрека.

- Фузија сензора: OD систем има флексибилност да бира и интегрише различите сензоре тако да добијене информације имају мање несигурности него када се користе појединачни сензори.

- Комуникација и НМИ: да обезбеди податке сензора који се визуализују на интерфејсу човек-машина (НМИ).

- Подаци за приказ: слика уживо са изабраног видео сензора са означавањем детектованих објеката на слици, и навођењем растојања до откривених објеката.

- Имплементација софтвера: OD систем има инсталиран софтвер који омогућава *off-line* рад са сензорским подацима снимљеним током проба у реалним условима, поред *online* обраде сензорских података.

- Класификација објеката: Систем детекције препрека је способан да класификује објекте који припадају различитим класама, као што су људи, бицикли, возила и неке врсте животиња.

Прототип интегрисаног OD система је испитан током статичких и динамичких теренских тестова (слика 3.3). Евалуација овог прототипа извршена је у два тестирања у реалним условима на теретном возовима у редовном саобраћају, у јулу 2018. и мају 2019. (слика 3.4.)

Резултати евалуације су показали да OD систем испуњава све предвиђене функционалне захтеве. Резултати евалуације су указали на неопходност допуне уграђеног OD система. Наиме, због прилаза железничкој прузи и безбедности особља укљученог у тестове приликом евалуације било је могуће имитирати само препреке на обезбеђеним прелазима. Због конфигурације пруге на којима су вршења испитивања (није било дужих од 600 м) нису довољно доказане перформансе у односу на препреку

које се налазе на великом растојању. Овакве препреку су успешно детектоване само на статичким тестовима.



Слика 3.3. Испитивање прототипа OD система на теретном возу на прузи Ниш-Скопље^[43]



Слика 3.4. Тестирање прототипа OD система у реалном саобраћају: детектоване су особе и животиња који прелазе путни прелаз док се воз приближава, особа на мотору која чека на левој страни прелаза и аутомобил паркиран лево од колосека^[43]

То указује на потребу допуне OD система на возилу са другим елементима као што је OD систем заснован на беспилотним летелицама (дроновима), који би покривао делове железничке пруге који нису у одговарајућем видокругу система на возилу. Пројекат SMART је реализован у периоду 2016. – 2019. година.

- Пројекат „SMART 2 - Advanced integrated obstacle and track intrusion detection system for smart automation of rail transport“ представља наставак претходног пројекта [44] и реализован је у периоду 2019. – 2022. година. Има за циљ развој прототипа OD система на холистичком приступу и његово тестирање у различитим реалним сценаријима железничког саобраћаја. Поред система за детекцију препрека на возилу у оквиру пројекта су развијени инфраструктурни и ваздушни (UAV) системи који су интегрисани преко интерфејса у централни систем за подршку у одлучивању (DSS – Decision support system).



Слика 3.5 SMART 2 Холистички OD систем који интегрише три OD подсистема^[44]

DSS систем интегрише информације које долазе из три OD подсистема (слика 3.5.) и доноси коначну одлуку о препреци и предлаже могуће активности за даље управљање возом у циљу избегавања препреке или минимизације штетних последица.

У оквиру овог пројекта дефинисани су захтеви и спецификације за OD систем дугог домета до 2 km на возилу у свим временским условима, као и за његове интерфејсе са другим могућим OD системима као што су системи базирани у ваздуху (дрон) и пружни системи, у складу са предвиђеним захтевима за GoA 3/4 систем. У складу са тако

дефинисаним захтевима и спецификацијама развијени су и испитани прототипови OD подсистема и интегрисаног холистичког OD система укључујући и подсистем за подршку у одлучивању и само-дијагностику. Евалуација система је извршена у реалним условима на локомотиви међународног теретног воза између станице Ниш Ранжирна и станице Ристовац (слика 3.6). Анализа резултата спроведене евалуације у релевантном железничком окружењу је показала да SMART 2 OD систем детектује објекте и потенцијалне препреке користећи на комплементаран начин све подсистеме – на возилу, у ваздуху (дрон) и поред пруге, повећавајући тако значајно даљину детекције. Све препреке предвиђене сценаријем евалуације су детектоване са најмање једним од интегрисаних сензора што доказује поузданост система. У већини случајева грешка процене удаљености је испод 10%, што је добар резултат с обзиром на ефективни домет система.



Слика 3.6 Евалуација SMART 2 прототипа OD система^[44]

Укупна дужина колосека покривеног системом је досегла скоро 5 км, што доказује да SMART 2 прототип OD система може да детектује препреке на домету већем од 2 км а што је био један од основних захтева у пројекту.

У оквиру Shift2Rail иницијативе у периоду 2016-2019. реализована је и студија ASTRail [45]. У њој је извршена компаративна анализа о АТО-у за различите услове рада са циљем да се идентификује подобност различитих технологија за стратегије аутоматизоване вожње на различитим нивоима GoA. Анализа је разматрала ограничене параметре као што су статичка препрека, покретна препрека, димензије препреке и тип

препреке. Ова студија разматра изводљивост и прикладност примене одређених приступа откривању препрека како на железници тако и у другим областима али искључиво на теоретском нивоу. У њој је препоручена даљи развој система за детекцију који би био способан да детектује препреке које се налазе у близини пруге, што би помогло у пружању информација неопходних за одређивање удаљености објекта од воза што је пре могуће. Ово би било релевантно заједно са подацима о зауставним путевима воза, за примену било каквих акција избегавања препрека или ублажавања последица судара. У ASTRail студији се идентификују пасивни и активни сензори који се могу користити за аутоматизовање вожње. Завршни извештај наводи главне могуће технологије: РАДАР, инфрацрвена камера, стерео камера, омнидирекциона камера, ЛИДАР и монокуларна камера. Ова студија идентификује фузију података са више сензора као приступ за побољшање тачности, доступности и поузданости сензорског система за детекцију препрека у поређењу са коришћењем само једног типа сензора. Препорука је да систем за спајање података са више сензора, који се заснива на неколико технологија, може представљати најефикасније решење за постизање захтеваних перформанси специфичних за железнички систем.

Аутоматизација управљања возовима је била и тема неколико X2Rail студија које су такође спроведене у оквиру пројеката Shift2Rail иницијативе. Ове студије су се углавном бавиле израдом спецификација за надградњу АТО на ERTMS систем. У оквиру студије X2Rail-1 урађен је документ D4.3 „ATO over ETCS – GoA3/4 Preliminary Specification“. Овај документ је дефинисао прелиминарне спецификације потребне за аутоматизацију железничких возила компатибилну са спецификацијама ERTMS система. Ове спецификације су подељене на спецификација према оперативним захтевима и на спецификације према системским захтевима. Прве су уређене у складу са приступом одозго на доле према моделу Немачких железница (DB). Друге се заснивају функционалној анализи Француских националних железница (SNCF) за прототип аутономног воза. Ове прелиминарне спецификације за ниво аутоматизације GoA3/4 представљају улаз за истраживање и коначно дефинисање спецификација у оквиру X2Rail-4 студије [46]. У оквиру те студије ради се документ D3.2 “GoA3/4 specification”. Предвиђено је да овај документ уз касније допуне на основу резултата проба и тестова постане део техничких спецификација интероперабилности (ТСИ) које ће регулисати примену аутоматизације нивоа GoA3/4 на европским железницама. Овај документ је још увек у радној верзији. У односу на већ усвојене спецификације за ниво GoA2 (TSI 2022), у спецификацијама за ниво GoA3/4 су уведене две нове компоненте

„Перцепција“ (PER) и „Управљање инцидентима и превенцијом“ (IPM) које преузимају улогу машиновође у случају неправилности и опасних догађаја током вожње. Документ D3.2 “GoA34 specification” још увек не дефинише све елементе ових компоненти и тачне границе између њих. У њему је дефинисано 10 категорија могућих препрека, као и могући начини реакције на њих (кочење у случају опасности, брзо кочење, смањење брзине, давање звучних и светлосних сигнала, нереаговање). Међутим у дефинисаним случајевима употребе (Use case) за различите оперативне контексте дефинисан је само један случај: реаговање на препреке, са истим поступком, без разлике о којој се категорији препреке ради. Поступак подразумева искључиво кочење за случај опасности и активирање сирене у случају присуства људи. Треба напоменути да према ауторима овог документа при увођењу GoA3/4 нивоа аутоматизације на железници треба очекивати међу корак са применом ових функција као подршке машиновођи током фазе валидације, слично као код процеса аутоматизације друмских возила [47].

Док се на нивоу ЕУ ради на системским и регулаторним проблемима и дефинисању спецификација, техничка решења и имплементација се раде на нивоу појединачних земаља. Прва европска земља која је пустила у редован саобраћај аутономне возове је Немачка. DB је на 23 километра дугој деоници линије S-2 приградске железнице у Хамбургу септембра 2022. увео у употребу возове без машиновође са Siemens-Mobility АТО опремом (слика 3.7). Ови су возови опремљени за потпуно аутономни рад али машиновођа је и даље присутан у кабини и преузима управљање у случају неких непредвиђених ситуација. Потпуно аутономно управљање, без присуства машиновође се врши само приликом маневрисања и вожња у депоу [48].

Иако се у тој земљи већ дуго ради на развоју технике за потпуну аутоматизацију железничког саобраћаја, употреба возова без машиновође у кабини је због ставова синдиката али и перцепције корисника до сада била готово табу тема а званичан став DB је био „да у њиховој безбедносној филозофији машиновођа остаје снажан ослонац“ [49].

Али проблеми са акутним недостатком довољног броја машиновођа за који се предвиђа да ће у будућности бити још већи доводе у питање ове ставове.



Слика 3.7 Аутономни воз на приградској железници у Хамбургу ^[48]

У Француској је 2018. године национални железнички превозник SNCF формирао два конзорцијума за развој система за аутономне возове, један за теретне операције са компанијама Alstom, Altran, Hitachi и Apsys и други за регионалне путничке возове са компанијама Bombardier, Bosch, SpirOps и Thales. Циљ ових конзорцијума је развој прототипова до краја 2023. године и оперативна употреба од 2025. године. Специфичност Француског приступа је да комбинује аутономну вожњу са даљинским управљањем возовима. Даљинско управљање би се вршило у случају кварова на АТО систему, у случају озбиљнијих ванредних ситуација и за такозвани Last-mile саобраћај на колосецима који нису опремљени за аутоматско управљање. У априлу 2019. први пробни воз на са даљинским управљањем је саобраћао на деоници дугој 4 км између париских предграђа Villeneuve-Saint-Georges и Juvisy, а оператери су њиме управљали из експерименталног центра за даљинску вожњу у оближњем граду Vigneux-sur-Seine (слика 3.8) [50]. У оквиру ових програма испитана је и АТО компонента Перцепција (препреке, сигнализација, окружење). Тестирани су сензори и софтверски алгоритми који припадају овој компоненти. Званично се наводи да су тестови били успешни јер је постигнуто откривање препрека на преко 700 m а са високом поузданошћу на 300 m [51]. Ове вредности се могу сматрати задовољавајућим само за возове умерених брзина.



Слика 3.8 Центар за даљинско управљање пробним возовима у Француској

Поред земаља ЕУ и Русија од 2015. године реализује пројекат увођења аутономних возова за приградски саобраћај. Руске државне железнице (РЖД) су почеле тестирање возова опремљених за ниво аутоматизације GoA3 2019. године. И приступ РЖД-а подразумева комбиновање аутоматског и даљинског управљања железничким возилима. Даљинско управљање се уводи у случају потребе комуникације са путницима, као контрола приликом детектовања препреке, у случају екстремних ситуација (пожар на возу и сл.), отказивања кочења у случају лажног детектовања препреке и у случају квара на АТО систему [52].

Кина која има богато искуство у потпуно аутоматизованим метро системима спроводи и програм аутоматизације својих пруга за велике брзине. На прузи за велике брзине Пекинг-Zhangjiakou 31. децембра 2019. пуштени су у саобраћај возови опремљени опремом CTC3+АТО чија је максимална брзина 350km/h. Иако су у медијима они представљени као најбржа железничка возила без машиновође, који реагује само у случају непредвиђених ситуација овај систем не представља аутоматизацију нивоа GoA3 јер нема систем за детекцију већ машиновођа активно учествује у вожњи и реагује на препреку. Аутоматизовани су само поступци поласка и заустављања воза, регулисање брзине током вожње, отварање и затварање врата и контрола позиције врата у односу на перон што практично представља ниво аутоматизације GoA2. Кинеске железнице планирају даље унапређење овог система и прелазак на више нивое аутоматизације али за сада немају неке конкретне планове у вези тога [52].

Једини велики железнички систем у свету који не планира увођење потпуно аутономних железничких возила је у САД. У оквиру њихових планова развоја АТО ће искључиво бити систем за подршку машиновођама. У оквиру тог система планирана је функција детекције свих опасности укључујући препреке и интерфејс између АТО и система управљања возом али ће главну контролу и даље имати машиновођа. С обзиром на карактеристике железничког саобраћаја у САД (веома тешки возови на дугачким релацијама кроз слабо настањена подручја) елиминисање машиновођа са воза не би позитивно деловало на поузданост и ефикасност железничког система [52].

С обзиром да је увођење аутономних возила у класичним железничким системима тек у почетној фази још увек не постоје посебна регулатива и стандарди за ту област. Као што је напоменуто у прегледу пројеката ЕУ тек припрема спецификације за АТО системе који ће постати део одговарајућих Техничких спецификација интероперабилности (ТСИ). Међутим и за АТО системе ће важити основни захтеви за железнички систем у целини. За Европски железнички систем ти захтеви су дефинисани у Анексу III Директиве (ЕУ) 2016/797 о интероперабилности железничког система. Захтеви се односе цео железнички систем (генерални захтеви) и на поједине подсистеме (специфични захтеви) [53].

Једини стандард чији део се од почетка користи у развоју аутономних возила је ИЕС 62290-1 „Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 1: System principles and fundamental concepts“. У тачки 4.2 овај стандард дефинише нивое аутоматизације, њихову примену и њихову везу са системом управљања саобраћајем [54]. Нивои аутоматизације дефинисани у овом стандарду за вођене системе јавног градског превоза су опште прихваћени и за железнички саобраћај. Међутим дефиниција нивоа аутоматизације GoA3 може изазвати забуну. Стандард дефинише овај ниво као аутономно управљање возилом при чему у случају непредвиђених ситуација управљање преузима такозвани пратилац воза. На нивоу аутоматизације GoA2 ово је задужење машиновође. Ова терминологија је коректна у области јавног градског превоза али не одговара класичном железничком систему. Термин пратилац се у њему односи на раднике задужене за транспортно-комерцијалне активности са веома ограниченом обуком у погледу безбедности саобраћаја и који ни у ком случају не могу руковати вучним возилом. Руковање вучним возилом па макар и у крајње ограниченом обиму може вршити само машиновођа тј. радник који има положен одговарајући испит. Зато разликовање нивоа аутоматизације у

класичном железничком систему не треба везати за формални назив занимања које преузима управљање у неочекиваним ситуацијама већ за његова задужења.

Као што је у прегледу релевантне литературе наведено у неким пројектима су коришћени стандарди из аутомобилске индустрије као што су Амерички стандард ANSI/UL 4600 „Standard for Safety for the Evaluation of Autonomous Products“ који дефинише поступак за процену безбедносног случаја за аутономно возило и стандард ISO/PAS 21448:2019 „Road vehicles — Safety of the intended functionality“ који дефинише мере применљиве за пројектовање, верификацију и валидацију система на аутономним возилима потребне за постизање SOTIF -а (Безбедност предвиђених функционалности).

Преглед актуелног стања у примени аутономних железничких возила показује да је ова технологија успешно примењена у затвореним системима јавног градског превоза као и одређеним сегментима класичног железничког система. Ипак њена примена у потпуно отвореном железничком систему са различитим категоријама возова још увек није остварена. Главни проблем који је још увек у фази решавања је питање реаговања аутономних возила на неуобичајене ситуације а посебно појаву препрека. Такође још увек је отворено и питање регулаторних норми и стандарда за верификацију и сертификацију аутономних железничких возила.

При увођењу аутоматизације железничког саобраћаја као општеприхваћен став наводи се да она повећава ниво безбедности. Међутим не постоје званични подаци који би егзактно поткрепили те тврдње сем за систем „Rio Tinta“. Од увођења система у редовну употребу нису забележене несреће повезане са налетима на препреке а за три исклизнућа која су се у том периоду догодила закључено је да немају повезаност са системом аутоматског управљања. Представници компаније истичу да је тај систем повећао безбедност у таквим акцидентима јер сада нису могуће повреде возног особља што се раније дешавало при исклизнућима [55]. Међутим пошто је овај систем веома специфичан због окружења и малих брзина возова његов постигнути безбедносни ниво није довољно релевантан за општу оцену безбедности аутономних система. Ово важи и за други железнички систем са аутономним возилима у Хамбургу који је мале дужине и сувише кратко у употреби и још увек је у пробној фази.

Технологија аутономних железничких возила је у дужој и масовнијој употреби само у метро системима. Међутим пошто су системи јавног превоза углавном регулисани на локалном нивоу, начин објављивања статистичких података о експлоатацији и класификација података је веома различита и онемогућава њихово лако поређење. Тако се на пример за неке системе и отказивање возова статистички води као

инцидент у саобраћају. Поред тога праве несреће у саобраћају су веома ретке у метро системима па су извештаји о безбедности пре свега фокусирани на проблеме кретања путника, вандализам, криминал и сл. Тако на пример статистике УИТП (Међународне асоцијације предузећа јавног градског превоза) уопште немају сударе као посебну категорију безбедносно релевантних догађаја. Из тих разлога неки истраживачи претраживањем новинске и стручне литературе коришћењем одговарајућих кључних речи прикупљају одговарајуће информације о инцидентима у метро системима. На тај начин је формирана база података о инцидентима на метро системима у Кини која обухвата период од 1972. до 2019, године [56]. Према тој бази у наведеном периоду на свим метро системима у Кини било је укупно 12 судара возова са особама или другим возовима. Од ових догађаја два судара су се десила на аутоматизованим системима без машиновођа. Оба догађаја су судари са возовима и спадају у теже инциденте тог типа са већим бројем повређених особа [57][58]. С обзиром на дужину употребе и обим саобраћаја класичних и аутоматизованих метро система у Кини број судара на аутоматизованим метро системима уопште није мали и сугерише да остварени ниво безбедности на њима у најмању руку није већи од класичних система. Свакако да би за релевантно дефинисање остварених нивоа безбедности била потребна детаљна анализа сваког од ових дванаест догађаја. У сваком случају ови подаци указују да је увођење аутономних система велики безбедносни изазов и да не мора нужно одмах да доведе до смањења нивоа ризика.

У прилог овом закључку говоре и искуства из увођења аутономних аутомобила. Од јуна 2018. забележена је више смртних случајева са аутономним возилима у САД. Посебно је важан случај када је марта 2018. године Убер-ово пробно возило у Фениксу ударило и убило пешака који је пролазио испред њега. Истрага Америчког тела за безбедност саобраћаја (NTSB) је утврдила да је возило тј. његов АДС (аутоматизовани систем вожње) открио пешака 5,6 секунди пре несреће, али га није тачно класификовао као пешака нити је правилно предвидео његов пут па није адекватно реаговао. Такође узрок је и пропуст оператера пробног возила који није адекватно пратио окружење за вожњу и рад АДС-а јер је све време био визуелно ометен коришћењем личног мобилног телефона [59].

Осим непосредног узрока ове несреће, NTSB је закључио да постоји „неадекватна безбедносна култура“ у Уберу и да су недостаци у државним и савезним прописима допринели да дође до фаталног судара [60]. Међу налазима су били следећи:

- Убер-ове интерне процедуре за процену безбедносног ризика и надзор оператера су биле неадекватне;

- Министарство саобраћаја Аризоне није обезбедило довољан надзор над тестирањем аутономних возила у држави;

- NHTSA (Национална управа за безбедност саобраћаја на аутопутевима) пружа недовољна упутства произвођачима о томе како треба да постигну циљеве безбедности, није успоставио процес за само оцењивање безбедности и не захтева да такви извештаји буду поднети, већ остављају њихово подношење као добровољно.

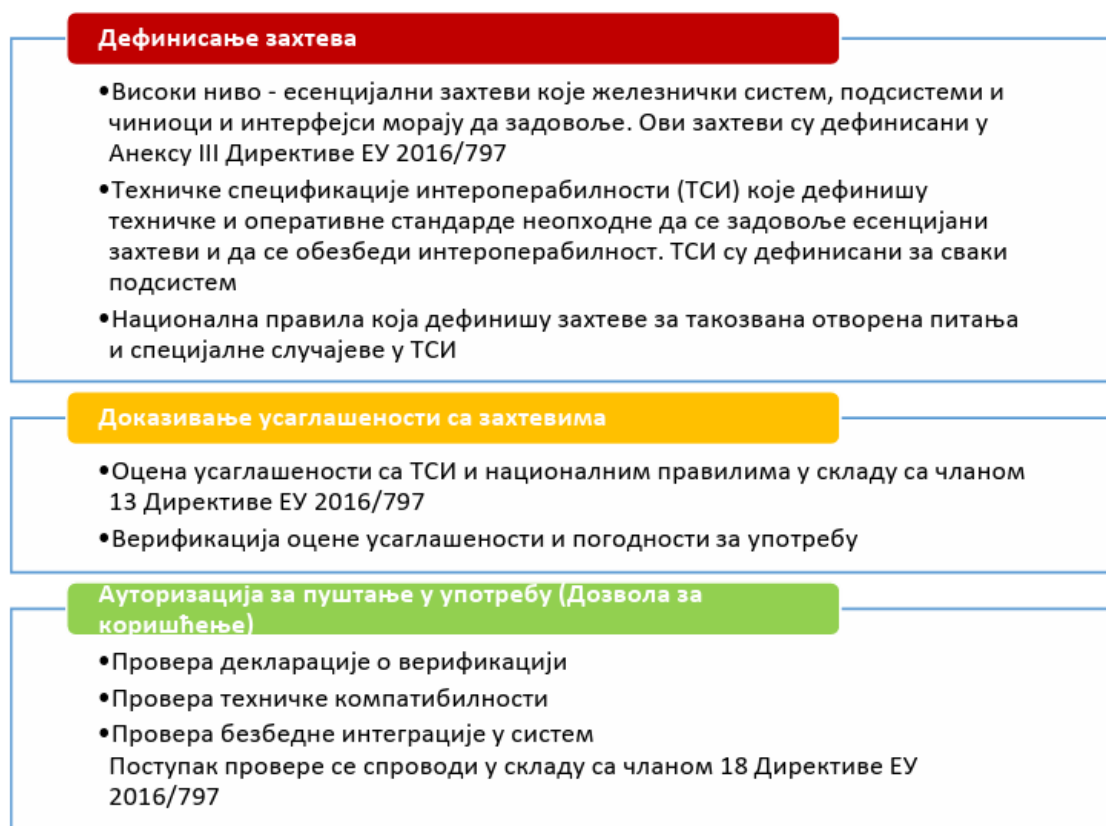
4. Анализа постојећег регулаторног оквира у области железничких возила и безбедности железничког саобраћаја

Систем безбедности железничког саобраћаја почива на техничким нормама. Овако комплексан технички систем мора да има дефинисана бројна правила, поступке, стандарде и спецификације да би успешно функционисао. Поред регулисања безбедности, оне су неопходне и да би се обезбедио поуздан и ефикасан рад система, очување здравља људи и човекове околине као и међусобна усклађеност различитих делова железничког система. Све то чини регулаторни оквир железничког система. Због потребне интероперабилности између бројних националних система и отвореног тржишта железничких услуга далеко најкомплекснији регулаторни оквир за железнички систем имају европске земље. Он покрива како најмодерније пруге и возила за велике брзине тако и класичне железничке системе и прикључну инфраструктуру (такозване сервисне објекте) [61]. Зато може да се сматра да је европски регулаторни оквир најрелевантнији за дефинисање захтева за развој и увођење нових техничких система на железницама.

Европски регулаторни оквир за железницу је с обзиром на потребну интероперабилност и отворено тржиште железничких услуга веома комплексан. Према њему железнички систем је подељен на структурне и функционалне подсистеме и подразумева учешће великог броја актера на нивоу железничких компанија, независних тела, националних државних органа и европских институција. Област сертификације највећим делом дефинише Директива 2016/797 о интероперабилности железничког система у ЕУ [53]. Ова директива прописује захтеве које сви делови железничког система у ЕУ морају да испуне и начин како се доказује њихова испуњеност. Основни елементи процеса сертификације према том документу су приказани на слици 4.1.

Регулаторни захтеви у погледу сертификације се дефинишу у три нивоа. Примарни захтеви су дефинисани у Анексу III Директиве ЕУ 2016/797 о интероперабилности железничког система у ЕУ, у коме су наведени есенцијални захтеви у погледу безбедности за цео железнички систем (такозвани генерални захтеви) као и за поједине подсистеме (такозвани специфични захтеви). Други ниво захтева је дефинисан у техничким спецификацијама интероперабилности (ТСИ) чија је сврха обезбеђење интероперабилности европских железница. За области које нису покривене ТСИ

(такозвана отворена питања и посебни случајеви) безбедносни захтеви су дефинисани у националним прописима.



Слика 4.1. Основни елементи процеса сертификације у складу са регулативом ЕУ^[16]

Анализа европског регулаторног оквира на примарном нивоу и нивоу ТСИ и националних прописа се заснива на резултатима истраживања објављеним у раду [16].

4.1 Анализа регулаторног оквира за примарне захтеве у погледу безбедности за систем за детекцију препрека

Генерални и специфични захтеви које железнички систем и његови делови морају да испуне у погледу безбедности су дефинисани у Директиви о интероперабилности. Као релевантне за развој система за детекцију препрека могу да се издвоје следећи захтеви:

1) Генерални захтеви

а) Систем за откривање препрека мора бити пројектован и конструисан тако да се гарантује безбедност на нивоу који одговара циљевима постављеним за мрежу.

б) Компоненте система за откривање препрека морају да издрже сва нормална или гранична оптерећења током њихове употребе. Случајни кварови који утичу на безбедност морају да се одрже у одређеним границама;

в) Конструкција система за откривање препрека мора да омогући ограничавање негативних последица пожара;

г) Праћење и одржавање компоненти система за детекцију препрека мора бити организовано, изведено и квантификовано тако да одрже његов рад у предвиђеним условима.

2) Специфични захтеви

Систем за детекцију препрека и интерфејс са опремом и процедурама контролно-командног система (CCS) мора омогућити возовима да саобраћају са нивоом безбедности који одговара циљевима постављеним за мрежу. Овај систем мора да настави да осигурава безбедан саобраћај возова и у деградираним условима (кварови контролно-командног система).

Прво наведени генерални услов и специфични захтев за CCS систем су практично идентични и значе да увођење система за детекцију препрека мора да осигура ниво безбедности који одговара циљевима предвиђеним за железничку мрежу. Основни циљ за железничку мрежу ЕУ према Директиви о безбедности ЕУ 2016/798 је очување постојећег нивоа безбедности. Како у преамбули ове директиве тако и у члану 4 експлицитно се наводи да је ниво безбедности у железничком систему ЕУ генерално висок и да се тај висок ниво безбедности мора одржавати а тамо где је то практично изводљиво и стално унапређује, имајући у виду технички и научни прогрес [62].

У члану 7 наведене директиве дефинисани су Заједнички безбедносни циљеви (CST). Они представљају минималне нивое безбедности које систем у целини и његови разни делови треба да достигну. Ови циљеви су одређени за сваку појединачну државу као и за ЕУ у целини. CST-ови могу бити изражени у критеријумима прихватљивости ризика или циљним нивоима безбедности. CST релевантни за систем откривања препрека су циљеви везани за судар возова са возовима и препрекама унутар слободног профила, за несреће на путним прелазима, за несреће особа које укључује железничко возило у покрету и за пролазак поред сигнала који забрањује даљу вожњу. Иако постоје доста недоумица у вези коришћења CST у процесу сертификације, у студији која је за потребе Европске комисије анализирала управљање безбедношћу и интероперабилност на европским железницама [63] наводи се да је за развој нових елемената подсистема на железници потребно дефинисати појединачне, специфичне циљеве на основу

вредности CST. Заједнички безбедносни циљеви се одређују на основу временске серије податак о несрећама и незгодама из претходног вишегодишњег периода [64]. С обзиром на то захтев за остваривање ових циљева практично је такође захтев за достизање најмање постојећег нивоа безбедности у одговарајућим областима.

Поред ових циљева одређених на нивоу ЕУ безбедносни циљеви могу постојати и на нивоу неке мреже или појединих актера у железничком систему (УИ и ЖП). С обзиром да ти циљеви морају бити усклађени са CST и они се готово без изузетка свде на захтев за одржавање достигнутог нивоа безбедности.

Дефинисање строжих захтева у погледу нивоа безбедности од његове остварене вредности у претходном периоду би било неопходно само ако би се за неку област установило да постојећи ниво безбедности није задовољавајући. Последњих година се на нивоу ЕУ перманентно побољшава ниво безбедности железничког саобраћаја [65] и за сада се не чини да би било оправдано утврдити повећани нивоа безбедности као захтев за развој и увођење у употребу система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима.

У складу са тим примарни безбедносни циљеви у вези система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима захтевају да ниво безбедности који овај систем мора да достигне буду најмање једнаки нивоу безбедности који је остварен од стране машиновођа у погледу појаве препрека на прузи. То се може сматрати и основним захтевом високог нивоа у погледу функционалног аспекта безбедности система.

Сви остали наведени генерални и специфични захтеви релевантни за систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима се односе на поузданост, променљивост, одржавање и технички аспект безбедности (RAMS). Ти захтеви се заснивају на стандарду EN 50126 „Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)“ [53].

4.2 Анализа регулаторног оквира за захтеве у погледу безбедности на нивоу техничких спецификација и националних прописа за систем за детекцију препрека

Други ниво захтева у погледу безбедности се дефинише у TSI. У складу са поделом железничког система наведеном у Директиви о интероперабилности систем за

детекцију препрека на аутономним железничким возилима би требао да буде обухваћен TSI CCS. Међутим како овакав систем до сада није постојао у железничком систему тренутно ни не постоје захтеви који би се односили на њега. Ова област тренутно припада TSI OPE (техничка спецификација за систем управљања и регулисања саобраћајем). Ова спецификација дефинише безбедносне захтеве у вези појаве свих опасности током вожње воза што обухвата и појаву препрека на прузи. Међутим захтеви у том погледу су у TSI OPE дефинисани на општем нивоу, без дефинисања конкретних захтева и углавном упућују на национална правила и интерне прописе железничких превозника и управљача инфраструктуре. Као експлицитни захтев за овај систем могао би да се сматра безбедносни захтев за бележење и чување свих релевантних података о управљању и раду возила пре и након несреће и незгоде.

Развој и увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима очигледно подразумева да се постојеће TSI прошире одредбама које се односе на овај систем. У складу са одредбама Директиве о интероперабилности ЕУ сви предлози за допуне постојећих или уношење нових спецификација у оквиру TSI морају доказано да задовољавају постојеће есенцијалне захтеве тј. генералне и специфичне захтеве у погледу безбедности.

Идентично као и TSI ни национални прописи тренутно не дефинишу захтеве за систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима, с обзиром да до сада такав систем не постоји у употреби ни у једној европској земљи на јавној железничкој мрежи. Захтеви за овај систем могу да се утврде на основу постојећих оперативних правила за машиновође. Ови захтеви су веома слични у свим европским земљама али постоје и неке разлике. У Великој Британији је прописано да машиновођа у случају уочавања лишћа на прузи мора да прилагоди начин вожње и кочења погоршаним условима адхезије и да то пријави контроли саобраћаја [66]. У многим другим земљама не постоји ова врста оперативних правила. Између европских земљама постоје значајне разлике у погледу поступања и процедура у случају појаве животиња на прузи. У неким је обавезна употреба сирена кад се оне уоче на или око колосека [67] док се у другима сматра да при употреби сирена постоји опасност да се животиња укочи на колосеку па је то забрањено [68].

Поред наведених захтева у погледу безбедности европска регулатива прописује да се приликом сертификације подсистема и њихових елемената проверава и безбедна интеграција у постојећи железнички систем [53]. Провера безбедне интеграције у систем превасходно подразумева оцену свих ризика повезаних са увођењем новог система у

употребу. Несумњиво је да је увођење аутономних железничких возилима са системом за детекцију препрека уместо возила којима управља машиновођа промена од великог значаја за безбедност саобраћаја. То значи да испуњење захтева у погледу безбедне интеграције у постојећи систем подразумева примену CSM RA тј. Заједничке безбедносне методе за процену ризика при променама у систему. Спровођењем овог поступка треба да се идентификују све опасности тј. ризици повезани са детекцијом препрека, провери да ли овај систем може да их контролише на прихватљив начин и дефинишу додатне мере контроле ризика за оне опасности које премашују прихватљив ниво. Примена ове методе подразумева одређивање принципа прихватљивости ризика који ће се користити у поступку.

4.3 Дефинисање регулаторних захтева за систем за детекцију препрека

На основу свих наведених регулаторних захтева за сертификацију система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима могу се дефинисати следећи захтеви које овај систем мора да задовољи у поступку сертификације:

1. Ниво безбедности овог система у функционалном погледу мора да одговара постављеним циљевима за мрежу што практично значи да систем мора да обезбеди најмање достигнути општи ниво безбедности, и достигнути ниво безбедности дефинисан појединим CST. Овај захтев представља есенцијални захтев за развој овог система.

2. Захтеви у погледу поузданости, примењљивости, одржавања и техничког аспекта безбедности (RAMS) за систем за детекцију препрека морају одговарати стандарду EN 50126. За технички аспект безбедности захтеви би требало да буду на нивоу дефинисаном ЗБМ за процену и оцену ризика тј. у складу са критеријумом прихватљивости ризика дефинисаним за техничке системе [69].

3. Достижност постојећег нивоа безбедности као и прихватљивост ризика повезаних са увођењем система за детекцију препрека у постојећи железнички систем треба утврдити применом ZBM RA. Од оствареног нивоа безбедности, као критеријума прихватљивости ризика, се може одступити само ако се експлицитно захтева повећање безбедности у неком подручју.

4. Систем мора да на истом безбедносном нивоу као и машиновође испуњава захтеве националних прописа у погледу појава препрека на прузи а ако то није могуће морају бити дефинисани и уведени други начини и мере контроле ризика.

Подела безбедносних захтева на функционални и технички аспект је условљена специфичностима сертификације уређаја који су по тренутној регулативи део и функционалних и структурних подсистема и чије увођење представља и техничку и оперативну значајну промену у систему. Иако то није уобичајено у железничком систему, ова подела одговара пракси у развоју функција аутоматске вожње и возила без возача у друмском саобраћају. Стандард ISO 26262 који се примењује у аутомобилској индустрији предвиђа поделу безбедносног концепта на два дела: функционални безбедносни концепт и технички безбедносни концепт [70].

5. Анализа и класификација препрека у железничком саобраћају и начина реаговања на њихову појаву

Да би се адекватно дефинисали захтеви за систем за детекцију препрека и утврдила прихватљивост ризика повезан са увођењем овог система неопходно је прецизно дефинисати шта се сматра препреком у железничком саобраћају и које врсте препрека се у њему појављују као и висину ризика повезану са њима. Такође потребно је дефинисати и мере за њихову контролу тј. начин реаговања када се оне појаве у путу вожње.

Препреке у железничком саобраћају до сада нису биле системски третиране у прописима и стандардима из области железничког саобраћаја. Одредбе које се тичу појаве и реаговања на препреке су углавном општег карактера и своде се на прописивање обавезе машиновођи да у случају појаве опасности по безбедност воза предузме све мере да се она избегне. У неким земљама прописи детаљно не регулишу чак ни нека важна питања као што је потреба смањења брзине ако се у путу вожње уочи особа. У таквим случајевима прописи обавезују машиновођу само на давање сигнала упозорења. Други општи прописи обавезују машиновођу да се придржава прописане брзине сем у случају да постоји опасност по сам воз, а што особа на колосеку не представља [67]. Само поступци код појединих врста препрека су детаљније регулисани у појединачним нормама као што су препреке на путним прелазима или у зависности од географских карактеристика појединих железничких мрежа, препрека типа лавина, поплава и сл. Сходно томе само за одређене врсте препрека постоје детаљни подаци и одговарајуће анализе и студије док за друге то није случај.

С обзиром да ова област није системски третирана у регулативи, као и у стручној и научној литератури, појам препреке се веома различито интерпретира. Често се појам препрека односи само на објекте који се налазе у слободном профилу пруге, дакле само на оне објекте који могу непосредно да угрозе безбедност саобраћаја. У том случају се објекти поред слободног профила који потенцијално могу да угрозе безбедност саобраћаја не сматрају препреком. Често се и друга железничка возила на путу вожње не сматрају препреком јер се њихово присуство на колосеку и реаговање на њихову појаву одвија у оквиру инфраструктурног командо-контролног (CCS) подсистема а понекад се то односи и на друмска возила на активним пружним прелазима. Појава

одређених материја на колосеку (лишће, уља и сл.) које погоршавају услове адхезије се такође често не класификују као препрека у путу вожње.

Европска регулатива посебно третира само препреке које се налазе у слободном профилу колосека. Према њој се под препрекама подразумевају сви фиксни или привремено присутни објекти на колосеку или поред њега, укључујући и делове контактне вода. Животиње се такође третирају као препрека ако се налазе у слободном профилу колосека. Људи, друмска возила и друга железничка возила у путу вожње нису категорисани као препрека већ као посебна врста опасности [71]. Треба имати у виду да европска регулатива, посебно она на националном нивоу третира и неке појаве у окружењу колосека ван слободног профила као опасне догађаје и прописује поступке у случају њиховог уочавања иако их формално не класификује као препреке. Тако на пример у Великој Британији је прописано поступање машиновођа у случају уочавања особа или животиња у пружном појасу које је по предвиђеним мерама слично поступању у случају њихове појаве у слободном профилу [72].

Слична шароликост у дефинисању појма препреке постоји и у радовима и студијама анализираним у поглављима 1 и 2. Док неки аутори сматрају да је пружни појас према прописима забрањена зона у коју људи, животиње или друмска возила не смеју да имају приступ сем на стриктно дефинисаним местима и да сходно томе систем за детекцију препрека на железничком возилу не мора да контролише ту врсту ризика, други у својим радовима обухватају и те врсте препрека. Иако је тачан став да пруга није јавно доступна површина и да она треба да буде слободна, искуство показује да забране кретања и ограде не умањују значајно тај ризик. Посебно је значајно искуство из Велике Британије која је из одређених историјских разлога једина европска земља која још од средине XIX века има потпуно ограђене железничке пруге. Без обзира на то ризик повезан са упадом у слободни профил пруге у овој земљи није значајно мањи него у другим земљама у Европи [65]. Управо у овој земљи се десила најтежа железничка несрећа у Европи проузрокована налетом воза на животиње у којој је погинуло 17 особа [73]. Код већине система аутономних железничких возила које су тренутно у испитивању и имплементацији детекција препрека се односи и на објекте у окружењу који представљају потенцијалну опасност за безбедан саобраћај.

Европска уредба о Заједничкој безбедносној методи за оцену и процену ризика наводи следеће дефиниције [69]:

- опасност је стање (околност) која може да доведе до несреће;

- ризик је стопа учесталости несрећа и незгода са штетним исходом (насталих услед опасности) и степен озбиљности те штете;
- управљање ризицима подразумева управљање свим идентификованим опасностима и одговарајућим безбедносним мерама.

Сходно томе као одговарајућа дефиниција препреке у железничком саобраћају може да се сматра следеће:

Препрека на путу вожње воза је сваки физички објекат или живо биће који се налази или се може наћи на путу вожње воза и који може да утиче на његово нормално кретање.

Овако дефинисани појам препреке подразумева да се поред објекта у слободном профилу пруге и сваки објекат у подручју поред пруге који се налази у зони зауставног пута воза и реално може угрозити слободни профил пруге такође мора сматрати препреком. Ова околност чини детекцију препрека и контролу ризика повезаних са њима знатно комплекснијом. За разлику од друмских, железничка возила имају веома дугачке зауставе путеве и то знатно повећава број могућих опасних ситуација. Практично свако живо биће или возило које се на даљини од километар или два (зависно од врсте воза) налази у пружном појасу представља потенцијалну опасност која мора бити детектована и процењена.

Подаци о конкретним врстама препрека које се појављују у железничком саобраћају на железничкој мрежи Републике Србије су прикупљени путем анкете машиновођа која је спроведена у оквиру пројекта СМАРТ2 у 2020. години [16].

Добијени подаци су допуњени подацима из Евиденција несрећа и незгода (образац С-80) Инфраструктуре Железнице Србије за период 2017–2021 који обухватају само пријављене догађаје одређених категорија. Анализа ових података показује да се на железничкој мрежи може очекивати веома велики број различитих врста препрека. Преко 30 различитих назива препрека је наведено у одговорима машиновођа и евиденцији управљача инфраструктуре. Као куриозитет могу да се наведу фигура од снега („снешко белић“) направљена на колосеку између Прокупља и Ниша или премаз од уља на прузи Београд – Врбница. С обзиром на то класификација препрека према конкретној врсти не би била практична за потребе система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима.

Јасно је да класификација препрека у железничком саобраћају може да се изврши на различите начине. За потребе развоја система за детекцију препрека битна је категоризација препрека према врсти (непосредан или потенцијални) ризика које оне представљају по безбедност саобраћаја и озбиљности могућих последица. Такође битна карактеристика је и начин реаговања на појаву одређене врсте препреке тј. мере контроле ризика које предузимају јер је то повезано са озбиљношћу штетних последица а самим тим и са укупном висином ризика. Класификација препрека у овом раду се заснива на резултатима истраживања објављеним у раду [16] и наведена је у табели 5.1.

Табела 5.1. Класификација препрека према врсти и висини ризика^[16]

Категорија/врста препреке	Мере контроле ризика које се предузимају у случају њене појаве	Озбиљност могућих штетних последица
1 . Непокретни објекти у слободном профилу пруге		
камење /земља, снежни нанос железничка возила, делови железничке опреме или инфраструктуре, дрвеће, течност на колосеку, уље на шинама, грађевински материјал, амбалажа, делови електроенергетске или телекомуникационе опреме и сл. случајно или намерно присутни на колосеку. Као ова категорија препрека може сматрати и сигнал који забрањује даљу вожњу.		
1.1 непокретни објекти који због својих димензија и физичких карактеристика не угрожавају безбедно кретање воза и не могу да изазову штетне последице у возу амбалажа, ситни предмети, мањи делови вегетације, снежни нанос нижи од прописане референтне вредности, и сл.	није неопходно предузети мере контроле ризика, уобичајени начин вожње воза се не мења..	нема последица
1.2 непокретни објекти који не угрожавају безбедно кретање воза али могу	смањење брзине воза, ако је потребно до заустављања али без завођења кочења у	материјална штета, поремећај саобраћаја

<p>изазвати мању штету на возилима или поремећаје у саобраћају</p> <p>дебље гране, опало лишће, уље на шинама мирна течност испод ГИШ, делови железничке опреме</p>	<p>случају опасности, активирање противклизне заштите, обавештавање контролног центра о препреци на колосеку</p>	<p>Могуће су само индиректне последице по безбедност (у случају да истовремено дође до још неке неправилности у систему)</p>
<p>1.3 непокретни објекти који угрожавају безбедно кретање воза</p> <p>железничка возила, веће наслаге земљишта/стена, грађевинског материјала, оборено дрво. Већи делови железничке опреме, делови инфраструктуре, енергетске или телекомуникационе мреже, мирна течност изнад ГИШ или текућа течност, снежни нанос изнад референтне вредности сл.</p>	<p>императив заустављања воза испред препреке, ако удаљеност до препреке то захтева и уз завођење кочења у случају опасности, обавештавање контролног центра о препреци на колосеку</p>	<p>катастрофалне последице у железничком систему и околини (усмрћена лица, велика материјална штете, штета по човекову околину, већи поремећаји у саобраћају)</p>
<p>2. Покретни објекти у слободном профилу пруге</p> <p>животиње, људи, возила</p>		
<p>2.1 покретни објекти који не угрожавају безбедно кретање воза али последице по њих могу бити фаталне</p> <p>мале и средње велике животиње, људи, лака возила</p>	<p>активирање сигнала упозорења (звучни и светлосни) и смањење брзине воза; у случају да објект није у могућности да безбедно напусти слободан профил кочење али без активирања кочнице у случају опасности</p>	<p>материјална штета, жртве ван железничког система (трећа лица, човекова околина)</p>

<p>2.2 покретни објекти који угрожавају безбедно кретање воза</p> <p>велике животиње, друмска возила</p>	<p>активирање сигнала упозорења (звучни и светлосни) и смањење брзине воза; у случају да објект није у могућности да безбедно напусти слободан профил кочење али без активирања кочнице у случају опасности, у случају тешких возила са завођењем кочења у случају опасности</p>	<p>значајне последице у железничком систему; (усмрћена лица, велика материјална штете, штета по човекову околину, већи поремећаји у саобраћају) жртве ван железничког система (трећа лица)</p>
<p>3. Непокретни објекти у непосредном окружењу пруге који могу да угрозе слободан профил и угрозе безбедност воза</p> <p>оштећена опрема контактнoг вода или енергетских и телекомуникационих мрежа, оштећени објекти и вегетација, неконтролисана текућа вода поред трупа пруге, нестабилна земљана и камена маса и сл.</p>	<p>обавештавање контролног центра и поступање по њиховом налогу</p>	<p>индиректне последице по безбедност железничког саобраћаја. Ове последице могу бити значајне у случају да изостану мере контроле ризика</p>
<p>4. Покретни објекти у непосредном окружењу пруге који могу да уђу у слободан профил током вожње воза</p> <p>животиње , људи, друмска возила</p>		
<p>4.1 покретни објекти у непосредној близини који не могу да угрозе безбедно кретање воза али последице по њих могу бити фаталне</p>	<p>активирање сигнала упозорења (звучни и светлосни); у случају да објекат настави да се креће ка слободном профилу, смањење брзине и, ако је</p>	<p>мања материјална штета; жртве ван железничког система (трећа лица, човекова околина)</p>

мале и средње животиње, људи, лака возила	потребно кочење воза без активирања кочница у случају опасности	
4.2 покретни објекти у непосредном окружењу који угрожавају безбедно кретање воза велике животиње, друмска возила	активирање сигнала упозорења (звучни и светлосни); у случају да објекат настави да се креће ка слободном профилу, смањење брзине и, ако је потребно кочење воза, у случају тешких возила и са завођењем кочења у случају опасности	значајне последице у железничком систему; (усмрћена лица, велика материјална штете, штета по човекову околину, већи поремећаји у саобраћају) жртве ван железничког система (трећа лица)

Према овој класификацији све препреке су категорисане према врсти и висини штетних последице које могу изазвати:

- препреке које могу угрозити безбедан саобраћај воза и изазвати катастрофалне последице;
- препреке које могу угрозити безбедност изван железничког система и изазвати смртне случајеви и теже повреде;
- препреке које могу изазвати материјалну штету;
- препреке које не могу изазвати штетне последице.

Поред тога препреке су категорисане према локацији и начину појављивања:

- непокретне препреке које су у слободном профилу пруге на путу вожње воза;
- покретне препреке које су у слободном профилу пруге на путу вожње воза;
- непокретне препреке у окружењу које могу угрозити слободни профил пруге;
- покретне препреке у окружењу које могу ући у слободни профил пруге.

Овај начин класификације препрека омогућава одговарајући избор најбољег начина реаговања на појаву препреке (упозоравање, смањење брзине, кочење у складу са висином ризика који препрека представља, прослеђивање информације другим деловима система управљања и регулисања саобраћајем) што је и главни циљ који систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима треба да испуни.

6. Анализа ризика повезаних са различитим категоријама препрека и њиховог утицаја на безбедност железничког саобраћаја

Према могућим последицама по безбедност железничког саобраћаја свакако су најзначајније препреке које могу изазвати судар са катастрофалним последицама (категорија 2.2. у табели 5.1) Међутим такви догађаји су веома ретки. Према извештајима о безбедности Агенције Европске уније за железницу и извештајима националних тела за безбедност појединачних земаља чланица ЕУ који се налазе у ERADIS бази података, судари чине тек око 0.6 % од укупног броја несрећа а број настрадалих у њима је око 1 % од укупног броја настрадалих у свим железничким несрећама [74]. У периоду 2010-2020 у Европи најгори судар са препреком из те категорије је био судар два путничка воза у Белгији када је 19 људи погинуло а 171 особа је била тешко повређена. У истом периоду најгори судар са непокретним објектом који није био железничко возило је био налет путничког воза на нанос земље у Мерану у Италији када је 9 људи погинуло а 7 тешко повређено. Огромна већина несрећа повезаних са препрекама отпада на несреће на путним прелазима и неауторизованим особама које прелазе колосек. У посматраном периоду је на железницама ЕУ годишње између 250 и 300 људи страдало на путним прелазима а око 600 људи је страдало од железничких возила у покрету (не рачунајући самоубице).

Анализа ризика повезана са препрекама и њиховог утицаја на безбедност железничког саобраћаја у овом раду се заснива на резултатима истраживања објављеним у раду [16].

Уобичајено је да се оцена о висини ризика и нивоу безбедности доноси на основу података о несрећама и незгодама које су се догодиле у претходном периоду. Међутим правилна оцена ризика повезаним са појавом препрека у путу вожње не може се донети само на основу историјских података о сударима и налетима возова. Ти подаци не обухватају оне догађаје повезане са препрекама код којих су избегнуте штетне последице. Поред тога један број несрећа повезаних са појавом препреке у путу вожње, без обзира на висину штетних последица, не може да се класификује као неуспешан догађај са аспекта правилног реаговања машиновођа. То су догађаји код којих због одређених околности налет воза није никако било могуће избећи али је правовременом реакцијом машиновође дошло до максимално могућег умањења штетних последица.

Околности при којима су могући овакви догађаји могу бити лоша видљивост, мало растојање од места појаве препреке до чела воза и сл. С друге стране велики број инцидентних ситуација повезаних са препрекама се стицајем околности заврши без штетних последица па се оне формално не класификују као несреће и сходно томе се ни не појављују у сету података о ванредним догађајима.

6.1 Анализа учесталости појаве различитих категорија препрека

Учесталост појава свих препрека у путу вожње није лако одредити јер се о већини таквих догађаја не воде одговарајући статистички подаци. За потребе дефинисања регулаторних захтева за сертификавање система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима неопходно је детаљно истраживање и анализа таквих догађаја. Ипак и из постојећих података за појединачне земље могуће је сагледати учесталост појављивања одређених категорија догађаја и њихов утицај на ниво безбедности. На подручју ЕУ најдетаљније податке о опасним догађајима повезаним са препрекама имају извештаји о безбедности Данског националног тела за безбедност у железничком саобраћају.

Опасни догађаји на Данским железницама се деле према одређеним критеријумима на значајне несреће, минорне несреће и прекурсоре инцидента (табела 6.1) [75].

Табела 6.1 Категоризација железничких несрећа и незгода у Данској ^[75]

<p>Категоризација инцидента Инциденти на железници подељени су на несреће и прекурсоре несрећа. У циљу разликовања несрећа које имају и које немају веће последице, несреће се деле у две групе: значајне несреће и минорне несреће</p>
<p>Значајне несреће: Значајну несрећу треба схватити као појам који означава сваку несрећу која резултира бар једном од следећих ствари:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Најмање једна особа погинула или тешко повређена • Штета на железничким возилима, колосеку, другим деловима инфраструктуре и/или животне средине у износу од најмање 1,2 милиона Данских круна (око 150.000 EUR). • Поремећај у саобраћају такав да је проузроковао застој од 6 сати или више на главној прузи
<p>Лакше несреће: Несрећа се сматра минорном ако није резултирала смрћу, тешким повредама, значајном материјалном штетом или великим кашњењима која не премашују 1,2 милиона Данских круна (око 150.000 EUR.) или нису дужа од 6 сати.</p>
<p>Прекурсори несрећа: Прекурсори несрећа су догађаји у сектору железнице који нису резултирали несрећом али који су могли да буде значајни за безбедност железнице.</p>

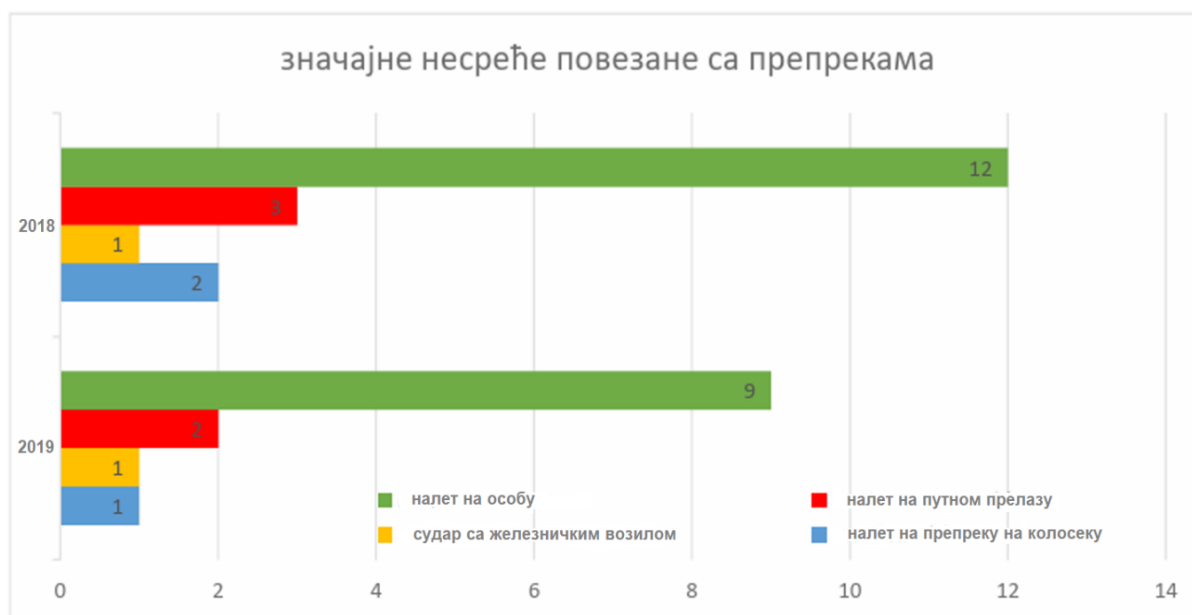
Извршна наредба Министра саобраћаја за пријављивање несрећа број 1340/2015 разврстава несреће (и значајне и минорне) у 14 врста несрећа и прекурсоре несрећа у 19 врста незгода.

Самоубиства на железници нису укључена у ове категорије, јер се не сматрају железничким несрећама.

Ова категоризација је у основи слична као и у другим европским земљама али нешто детаљније разврстава несреће и незгоде и обухвата већи број опасних догађаја него што је то случај у другим земљама.

Ови подаци су коришћени као основни извор податка за одређивање учесталост опасних догађаја повезаних са препрекама а подаци из анкете машиновођа спроведене у Србији у оквиру пројекта SMART су се користили као њихова допуна. Иако постоје одређене разлике у броју појединих категорија опасних догађаја између Данске и Србије, однос између укупног броја значајних и осталих/минорних несрећа и прекурсора опасних догађаја је сличан.

На основу извештаја о безбедности железничког саобраћаја за 2019. годину у Данској је било укупно 13 значајних несрећа повезаних са препрекама на прузи, 5 мање него претходне године [75]. Њихова расподела је приказана на слици 6.1.

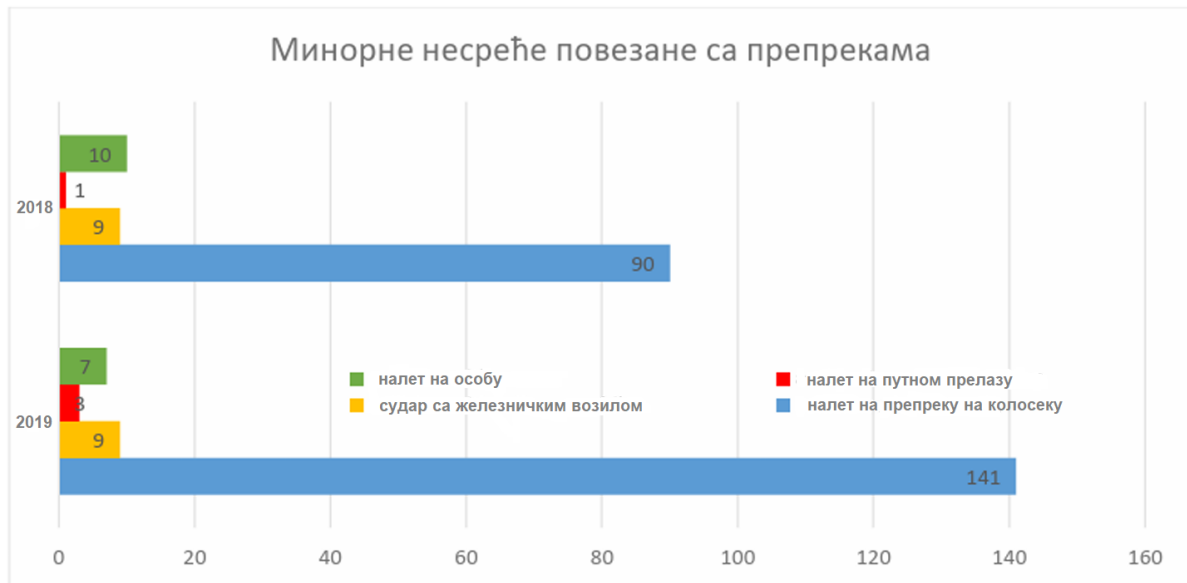


Слика 6.1. Број значајних несрећа повезаних са препрекама на данским железницама 2019. године^[75]

Иако подела догађаја у овим извештајима не одговара потпуно категоријама препрека наведеним у табели 5.1. можемо сматрати да су подаци о озбиљним сударима са железничким возилима и препрекама релевантни за категорију препрека 1.3. (Непокретни објекти који угрожавају безбедно кретање воза). Подаци о несрећама на

путном прелазу су релевантни за категорију 2.2 (Покретни објекти који угрожавају безбедно кретање воза) а подаци о налету на особе за категорију 2.1 (Покретни објекти који не угрожавају безбедно кретање воза и не могу изазвати штетне последице на возилима али последице по њих могу бити фаталне).

У 2019. години број несрећа везаних за препреке категорисане као минорне био је 186 у Данској, 28 више него претходне године. Њихова дистрибуција је приказана на слици 6.2.



Слика 6.2. Број минорних несрећа повезаних са препрекама на данским железницама 2019. године^[75]

Подаци о налетима на особе, несреће на путним прелазима и сударима са железничким возилима су релевантне за исте категорије препрека као и у случају озбиљних несрећа. Код налета на препреке који су према наведеном извештају о безбедности категорисани као минорне несреће, ради се углавном о налету на веће животиње (коњи, краве, јелени), оборено дрвеће, мање предмете и делове железничке опреме. Детаљнија подела ових догађаја не постоји али се процењује да око половине ових догађаја отпада на мање објекте и да је то релевантни параметар за категорију препрека 1.2 (Непокретни објекти који не угрожавају безбедно кретање воза али могу изазвати мања оштећење на возилима или сметње у саобраћају). Друга половина ових догађаја се сматра да отпада на налете на веће животиње и тај број је релевантан за категорију 2.2 (Покретни објекти који угрожавају безбедно кретање воза).

Највећи број опасних догађаја отпада на прекурсоре инцидената. У Данској је 2019. године забележено преко 1200 таквих догађаја повезаних са препрекама, око 200 таквих догађаја више него 2018. године. Њихова расподела је приказана на слици 6.3.

Ризични догађаји представљају догађаје код којих је могло да дође до налета воза на особу или возила али је он избегнут, такозвани near-miss. Ризични догађаји са особама су релевантни за категорију 4.1 Покретни објекти у непосредном окружењу који не могу угрозити безбедно кретање воза али последице по њих могу бити фаталне а ризични догађаји на путним прелазима за категорију 4.2 Покретни објекти у непосредном окружењу који угрожавају безбедно кретање воза.



Слика 6.3. Број прекурсора инцидената везаних за препреке на данским железницама 2019. године^[75]

Подаци из Данске су упоређени са одговарајућим подацима из Србије добијеним у поменутој анкети машиновођа.

Анкета је обухватила укупно 68 машиновођа запослена код три железничка превозника у Србији (један државни и два приватна превозника у теретном саобраћају) [16]. Просечан радни стаж анкетираних машиновођа је износио 21,7 година. Машиновође су давале одговоре на 3 категорије питања:

1. питања о радном искуству: име компаније, врста саобраћаја коју обавља (међународни/домаћи, теретни путнички, маневра, опасне материје), године стажа;

2. питања о опасним ситуацијама: врсте опасних ситуација које је доживео (судар са железничким возилом, судар са објектом уз опис врсте објекта, налет на путном прелазу, налет на особу, налет на животињу, избегнути догађаји (near-miss) по истим

категоријама, остале опасне ситуације са препрекама по сопственом опису, број ових догађаја или учесталост (у свакој смени, месечно, годишње, у неколико година) и процена опасности по безбедност воза или људи и околине коју одређена врста догађаја представља;

3. питања о мерама контроле ризика које предузимају у појединачним случајевима и о ефектима тих мера (најчешће последице појединачних врста догађаја);

У анкети је од машиновођа тражено да наведу тачан број различитих врста опасних догађаја у којима су учествовали а ако то не могу да наведу приближну учесталост тих догађаја у одређеним временским интервалима. Велика већина анкетираних машиновођа (92,65 %) је наводила конкретне бројеве догађаја само за сударе са железничким возилом, сударе са одроном земље и налете на особе. За остале категорије су углавном навођене приближне учесталости. Најважнији резултати анкете машиновођа су приказане у табели 6.2.

Табела 6.2 Подаци о броју судара са препрекама из анкете машиновођа урађеној у оквиру пројекта SMART⁽¹⁶⁾

1. Радно искуство машиновође	Број анкетираних машиновођа са тим искуством	Процент анкетираних машиновођа са тим искуством
све врсте саобраћаја	51	75 %
само путнички	3	4,5 %
само теретни	13	19 %
маневрисање	1	1,5 %
2 . Врсте опасних догађаја које је доживео	Број машиновођа који су имали те догађаје	Укупан број ових догађаја
2.1 Судар		
са возом	7	7
са објектом који угрожава безбедност воза	42	47
на путном прелазу	49	69
са особом	51	53*
са великом животињом	14	18

2.2 Избегнут судар		
са возом	5	6
са објектом који угрожава безбедност воза	61	74
на путном прелазу	67	69
са особом	66	175*
са великом животињом	21	37

* овај број укључује и самоубиства која се у извештајима о безбедности не наводе

Иако постоје одређене разлике у броју појединих категорија опасних догађаја, однос између укупног броја значајних и минорних (у Србији се оне називају несреће које нису значајне) несрећа и прекурсора опасних догађаја (укључујући near-miss догађаје) је сличан. У Србији супротно Данској је укупан број несрећа на путним прелазима већи него број налета на особе. Такође број налета на животиње је у Србији знатно мањи него у Данској али је број налета на стене и наносе земље доста већи. Све ове разлике су доста логичне имајући у виду географске и природне различитости ове две земље и разлике у инфраструктурној опремљености њихових железничких мрежа. Имајући те разлике у виду може се закључити да су нивои ризика повезани са појединачним категоријама препрекама у железничком систему и односи учесталости појединих категорија ризика у ове две земље слични.

Из расположивих података из извештаја Данског националног тела за безбедност се не могу извући подаци за категорију 1.1 (Непокретни објекти који не могу да угрозе безбедност воза). За ову категорију препрека коришћени су подаци добијени у анкети машиновођа. Из ове анкете може се закључити да се ради о свакодневной појави. Најчешћи објекти из те категорије су мањи комади вегетације, празне кутије и мањи комади камења али забележени су и необични објекти као нпр. фигура направљена од снега [16]. Ова категорија препрека нема директан утицаја на безбедност па није неопходно да се за спровођење поступка процене ризика изврши њихова квантификација. У поступку оцене ризика везаном за безбедну интеграцију система за детекцију препрека у постојећи железнички систем неопходно је утврдити могућности система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима у погледу детекције ове врста препрека и креирање и прослеђивање одговарајуће информације о томе другим релевантним деловима система управљања и регулисања саобраћаја. У

случају да се то није могуће остварити у обиму и на начин како то раде машиновође (што је за очекивати) неопходно је размотрити друге начине контроле тих ризика. На пример ако систем за детекцију препрека није у стању да успешно детектује слој влажног лишћа на прузи као мера за контролу ризика може да служи информација добијена од сензора противклизне заштите на вучном возилу. Процена ризика у овим случајевима може да се ради на основу квалитативних показатеља.

Слично важи и за препреке из категорије 3 (Непокретни објекти у непосредном окружењу пруге који могу угрозити слободни профил и угрозити безбедност кретања воза). Ни за њихову квантификацију се у наведеном извештају Данског тела за безбедност не наводе одговарајући подаци али пошто ни ова категорија препрека нема директни утицај на безбедност воза ни њена квантификација није неопходна за поступак дефинисања захтева у погледу безбедности.

Подаци из Данског извештаја о безбедности су непотпуни и за категорију 4.2 (Покретни објекти у непосредном окружењу који угрожавају безбедно кретање воза) јер не обухватају ризичне догађаје са великим животињама тј. избегнуте налете (near-miss) на њих. Ову врсту инцидената не обухватају извештаји о безбедности ни у једној европској држави. Број ових догађаја је зато процењен на основу анкете машиновођа према којој је број избегнутих налета на велике животиње отприлике дупло већи од броја налета на њих.

6.2 Анализа утицаја различитих категорија препрека на безбедност железничког саобраћаја

На основу анализе учесталости и могућих последица појединих категорија препрека на безбедност железничког саобраћаја може се закључити следеће:

- Судари са непокретним препрекама из категорије 1.3 који по могућим последицама представљају највећу опасност су веома ретки догађаји (само 2 таква догађаја на Данским железницама 2019. године). Традиционалне мере контроле ризика у оквиру осталих делова железничког система (CCS подсистем, оперативна правила) очигледно контролишу ове ризике на веома високом нивоу. Ипак систем за детекцију препрека мора бити способан да правовремено детектује такве објекте да би се они избегли или бар умањиле штетне последице налета на њих. Систем мора бити способан да правилно класификује објекте из ове категорије догађаја јер неправилна

класификација може проузроковати непотребне безбедносне ризике (непотребно завођење кочења у случају опасности које може проузроковати исклизнућа воза [76]) или смањење ефикасности железничког система (заустављање пред препреком када то није било неопходно).

- Највећи број догађаја односи се на покретне препреке (1469 таквих догађаја на Данским железницама 2019. године) а преко 93 % тих догађаја се односи на избегнуте колизије са њима. Са аспекта индивидуалног и друштвеног ризика ове препреке представљају убедљиво највећи ризик у железничком систему. Услов да систем за детекцију препрека не сме премашити ниво ризика који постоји са машиновођама у случају покретних препрека је примарни безбедносни захтев. У категорији покретних препрека највећи број ових догађаја је из категорије 4.1 и они појединачно представљају највећи ризик. Систем мора бити способан да детектује ове препреке, иницира активирање сигнала за упозоравање и након тога прати кретање препреке тј. да ли она прелази у категорију 2.1 или престаје да буде препрека. Систем мора бити способан да правилно класификује објекте из ове категорије догађаја јер неправилна класификација може проузроковати додатно угрожавање безбедности (појаву много већег броја препрека у категорији 2) или смањење ефикасности железничког система (заустављање пред препреком када то није било неопходно).

- У случају препрека које немају директни утицај на безбедност железничког саобраћаја и не изазивају штетне последице ван железничког система (категирија 3 и делимично 1.2) систем за детекцију препрека не мора у потпуности да их детектује. Али у поступку оцене ризика неопходно је установити друге мере контроле ризика које ће заменити мере које спроводи машиновођа у таквим случајевима.

Потреба за правилним класификовањем препрека, и праћења кретања покретних препрека поставља високе захтеве пред систем за детекцију препрека. Примена на железници традиционалног safe-sade принципа (третирати све као најгори случај, иако то можда неће бити неопходно) за систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима има одређења ограничења. Третирање свих препрека као најгори случај подразумевао би употребу кочнице за случају опасности а то може бити узрок искакање воза из шина. Такав начин реаговања свакако не би било најбоље решење у случају да воз покушава да избегне налет на човека или животињу јер би могуће штетне последице од искања воза са нпр. опасном робом у свом саставу далеко превазишла штетне последице налета на ту врсту препреке. Поред тога апсолутна примена safe-sade принципа би подразумевала да воз треба да се заустави у случају

сваке детектоване препреке, што би с обзиром на број велики број догађаја који не представљају опасност или представљају само потенцијалну опасност по безбедност (категорије препрека 1.1, 3, 4.1 и 4.2) знатно угрозило ефикасност и економичност железничког саобраћаја у случају аутономних железничких возила код којих нема особља на возу. Спровођење процедура након заустављања воза до његовог поновног покретања би у таквим случајевима захтевало далеко више времена него што је то случај када је машиновођа присутан у управљачници и имало би велики негативан утицај на редовитост саобраћаја.

Ово значи да је неопходно да систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима поред саме детекције, може да и прати кретање препрека и врши њихову класификацију, бар на нивоу како то раде машиновође. Ово није једноставан задатак, нарочито у случају покретних препрека. За успешну класификацију препрека неопходно је утврдити више параметара од којих неке није лако детерминисати. Дугачки зауставни путеви у железничком саобраћају веома увећавају број потенцијалних ризичних ситуација. Практично свако живо биће или возило које се на даљини од километар или два (зависно од врсте воза) налази у близини пруге представља могућу опасну ситуацију која мора бити детектована и процењена. На основу анкете са машиновођама спроведеној у Србији може се закључити да они процењују ризик од покретних препрека на основу удаљености, положаја препреке у односу на слободни профил, њеног кретања али и неких карактеристика саме препреке. Код људи и животиња та процена може да се заснива чак и по такозваном говору тела. Као карактеристичан може да се наведе детаљан опис догађаја наведен у анкети:

„ ...возио сам редовном брзином од 80 km/h када сам у даљини, одмах иза прве кривине после Стублина спазио жену средњих година. Стајала је тик до банке гвозденог моста па сам се одмах огласио сиреном и моментално завео кочење. Осетио сам да се спрема некакво зло. На неких 300 метра од дивљег прелаза преко пруге било ми је потпуно јасно да ће жена изаћи на колосек“

Ни један од параметара нема једнозначан утицај на процену ризика. У неким случајевима удаљенија препрека може бити ризичнија од ближе. Нпр. машиновође железничког радника у слободном профилу чак и на доста малој удаљености неће проценити као велику опасност јер знају да се ради о професионалцима, обученим и тренираним за такве ситуације и здравствено способним. Сем знака упозорења неће предузимати друге мере. С друге стране неке категорије особа (мала деца, особе са посебним потребама) ће и на великој удаљености сматрати великим ризиком и почеће

да коче. Такође у неким случајевима ће покретну препреку ван слободног профила на већој удаљености сматрати као већи ризик него ону која се налази у слободном профилу на мањој удаљености. Возило које се на путном прелазу налази у слободном профилу али га напушта неће сматрати великим ризиком (сем на јако малој удаљености), док се с друге стране возило које се креће ка путном прелазу великом брзином ће сматрати као велики ризик чак и на већој удаљености. На процену ризика у вези покретних препрека утиче и њихова локација. Особе на платформи или на путу поред колосека машиновође неће сматрати великим ризиком али особе које се налазе поред пруге на местима која нису лако приступачна ће изазвати реакцију машиновође.

Поред покретних и непокретне препреке захтевају класификацију на основу ризика који представљају по безбедност. Колики ризик објект у слободном профилу пруге представља по саобраћај воза зависи од његове величине, положаја у слободном профилу, физичких карактеристика а у случају амбалаже и од његовог садржаја. На величину ризика утиче и врста железничког возила јер је ниво ризика повезан са непокретним препрекама у путу вожње веома различит за нпр. тешку локомотиву за теретне возове и лаки моторни воз.

Потреба за класификацијом и праћењем препрека очигледно захтева примену неке врсту вештачке интелигенције и машинског учења што знатно утиче на поступак сертификације у складу са регулаторним захтевима.

7. Разматрање методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима

У складу са Заједничком безбедносном методом за процену и оцену ризика (ЗБМ РА) [69] процена прихватљивости ризика у железничком систему се врши коришћењем једног или више следећих начела прихватања ризика:

- 1) применом правила праксе;
- 2) поређењем са сличним системима;
- 3) експлицитним утврђивањем ризика.

Начело примене правила праксе подразумева да постоје опште прихваћена правила (међународно усвојене норме, национални прописи, признати стандарди и сл.) у области у којој се врши процена ризика. Према ЗБМ РА да би правила праксе могла да се користе за процену прихватљивости ризика морају да испуњавају између осталих и следеће захтеве:

- 1) да су широко призната у области железнице или да их је одобрило тело за оцену ризика;
- 2) да су од значаја за контролу разматраних опасности и да су успешно примењена за управљање променама и ефикасну контролу идентификованих опасности у области у којој се врши процена ризика;

С обзиром да су системи за детекцију препрека на аутономним железничким возилима у класичним железничким системима тек у развоју за њих још увек не постоје опште прихваћена правила праксе која се могу употребити за процену ризика. У прегледу актуелног стања у овој области (поглавље 3.) је наведено да се у неколико земаља ради на доношењу прописа и стандарда у вези сертификације аутономних возила на железници али и након њиховог доношења биће потребно да се у пракси докаже њихова успешна примена за управљање променама и контролу ризика.

Начело поређења са сличним системима је могуће применити ако постоји сличан референтни систем. Референтни систем мора да испуњава најмање следеће захтеве да би могао да се користи за процену прихватљивости ризика:

- 1) да има прихватљив ниво безбедности доказан у експлоатацији;
- 2) да има сличне функције и интерфејсе као и систем који се оцењује;

3) да се користи под сличним оперативним условима као и систем који се оцењује;

4) да се користи у сличним условима окружења као и систем који се оцењује.

С обзиром на наведене захтеве јасно је да се постојећи аутономни системи возила у друмском, јавном градском саобраћају и на индустријским железницама не могу сматрати као референтни за систем за детекцију препрека на аутономним возилима у класичном железничком систему.

Према томе процена прихватљивости ризика за разматрани систем мора да се врши применом начела експлицитног утврђивања ризика тј. приступом базираним на анализи и процени ризика. У складу са ЗБМ РА анализа ризика се врши квантитативно или квалитативно, или, по потреби и квантитативно и квалитативно, узимајући у обзир могуће мере безбедности.

ЗБМ РА наводи да се прихватљивост утврђених ризика процењује коришћењем критеријума прихватљивости ризика који су дефинисани у законским прописима или се заснивају на њима. Зависно од критеријума прихватања ризика, прихватљивост ризика може се проценити било појединачно за сваку повезану опасност, било као комбинација свих опасности узетих у обзир приликом експлицитног утврђивања ризика. Уколико се анализирани ризик процени као неприхватљив неопходно је идентификовати додатне мере контроле ризика како би се он свео на прихватљив ниво.

Анализа и процена ризика се уобичајено спроводи у складу са ISO стандардима 31000 Управљање ризицима – принципи и смернице [77] и 31010 Управљање ризицима – технике процене ризика [78]. У наведеним стандардима појам ризика је широко дефинисан као ефекат неизвесности на остварење циљева. Међутим у ЗБМ РА се ризик дефинише у нешто ужем смислу као стопа учесталости несрећа и незгода са штетним последицама (последицама које су узроковане опасним ситуацијама) и степен озбиљности те штете. Сличну дефиницију ризика наводе и други документи и радови који се баве управљањем ризицима [79]. У случају квантитативне анализе ризика, он може математички да се изрази као:

$$R = V_o \times P_o$$

Где је R ризик, V_o вероватноћа (стопа учесталости) настанка опасног догађаја а P_o величина штетних последица опасног догађаја.

За систем за детекцију препрека на аутономним возилима опасан догађај је појава препреке у путу вожње воза тако да сваку категорију препрека дефинисану у поглављу 5. можемо сматрати и као појединачну врсту опасности. С обзиром да су могућности

појаве различитих категорија препрека и могуће штетне последице битно различите у различитим условима или деловима железничке мреже, прихватљивост ризика треба процењивати појединачно за сваку опасност тј. категорију препреке. С обзиром на то ризик повезан са системом за детекцију препрека можемо математички изразити као:

$$R_i = V_{oi} \times P_{oi}$$

Где је R_i ризик повезан са категоријом препреке i а V_{oi} и P_{oi} одговарајуће вероватноће и величене штетних последица повезане са том категоријом препреке.

Укупан ризик повезан са препрекама R_u би био:

$$R_u = \sum R_i$$

Свака експлицитна процена ризика подразумева утврђивање критеријума прихватљивости ризика. Утврђивање овог критеријума је посебно важно у случају увођења аутономних возила у саобраћај јер је то кључни елемент поступка сертификације, који поред осталог има и значајне последице у погледу законске одговорности. Сходно европској регулативи коначно одобрење сваког елемента железничког система од стране тела надлежних за безбедност је засновано на валидности анализе ризика тако да анализа ризика спроведена у складу са свим регулаторним захтевима и стандардима струке може заштитити актере (железничка предузећа, произвођаче и тела за безбедност) од одговорности у случају несреће са аутономним железничким возилима.

Према стандарду 31010 Управљање ризицима – технике процене ризика [78] критеријуми прихватљивости ризика се одређују у фази успостављања контекста тј. представљају улазни податак за поступак процене ризика. Стога овај стандард не дефинише начине и захтеве за утврђивање ових критеријума.

	маргиналне	умерене	велике	катастрофалне	
вероватноћа >					<p>црвена зона – неприхваљиви ризици жута зона – велики ризици зелена зона – мали ризици</p>
веома мала	зелена	жута	црвена	црвена	
мала	зелена	жута	жута	црвена	
средња	зелена	зелена	жута	жута	
велика	зелена	зелена	зелена	жута	
	последнице >				

Слика 7.1 Матрица ризика последице/вероватноћа

Стандард наводи неколико техника за одређивање прихватљивости ризика. Као најшире коришћену наводи примену матрица последица/вероватноћа код којих се одређивање да ли је дати ризик широко прихватљив или неприхватљив врши према зони у којој се ризик налази на матрици (слика 7.1). Међутим овај стандард не дефинише како се та зона одређује а у пракси се то најчешће врши неком од експертских метода.

ЗБМ РА за утврђивање критеријума прихватљивости ризика упућује на законске прописе. Међутим постојећа европска и национална регулатива у железничком сектору, не прописује прецизно начин његовог утврђивања. Ако и постоје, правни захтеви најчешће нису квантитавни, већ се односе на квалитативне (немерљиве) параметре и неопходно их је трансформисати у егзактан критеријум прихватљивости ризика.

Зато се у пракси најчешће примењују општи принципи из области процене ризика што оставља простор за различите интерпретације појма прихватљивости ризика и регулаторних захтева у том погледу. То се посебно односи на конкретан начин његове квантификације. Сви познати принципи прихватљивости ризика (GAME/GAMAB, ALARP, MEM, NMAU) имају своје недостатке и ограничења за примену у области железнице [80]. Ово се сматра значајним недостатком за примену ЗБМ РА и доста радова из периода настанка ове методе је указивало на потребу да се у регулативи прецизније дефинише појам критеријум прихватљивости ризика [81],[82]. Међутим то и даље није случај сем за оцену ризика у вези одређених техничких система. У самој ЗБМ РА је дефинисано да, ако не постоје национални законски дефинисани критеријуми прихватљивости ризика, за пројектовање електричних, електронских и програмабилних

електронских техничких система треба да се примене следећи критеријуми прихватљивости ризика[64]:

1) када квар има вероватни потенцијал да директно изазове катастрофалну несрећу (погађа велики број особа и чија је последица велики број смртних случајева), повезани ризик се додатно не смањује уколико је доказано да је фреквенција квара функције/неуспеха врло невероватна ($\leq 10^{-9}$ по сату рада);

2) када квар има вероватни потенцијал да директно изазове критичну несрећу (погађа врло мали број особа и чија је последица најмање један смртни случај), повезани ризик се додатно не смањује уколико је доказано да је фреквенција квара функције/неуспеха невероватна ($\leq 10^{-7}$ по сату рада).

Овако дефинисани критеријуми прихватљивости ризика су у ствари преузети од такозваног SIL (Safety Integrity Level) индекса квантификовања ризика који су дефинисани у стандарду CEI 61508 „Сигурност функционисања електричних/електронских/програмабилних електронских система. Европска верзија EN 61508 је дефинисана 2002. године и примењује се у железничком систему за сигнално-сигурносне уређаје. Свим функцијама таквих система који директно својим радом утичу на границу безбедности саобраћаја додељује се такозвани ниво интегритета безбедности (Security Integrity Level - SIL) одређен са процентом прихватљиве опасности (Tolerable Hazard Rate - THR) према табели 7.1 [81].

Табела 7.1 THR и нивои SIL према стандарду EN 61508^[81]

Процент прихватљиве опасности (THR) за граничне опасности	Ниво интегритета безбедности (SIL)
$10^{-9} \leq \text{THR} < 10^{-8}$	4
$10^{-8} \leq \text{THR} < 10^{-7}$	3
$10^{-7} \leq \text{THR} < 10^{-6}$	2
$10^{-6} \leq \text{THR} < 10^{-5}$	1
$10^{-5} \leq \text{THR}$	0

У складу са овим стандардом се ниво SIL-0 користи за функције које немају безбедносне захтеве док се ниво SIL-4 захтева за контролно-командне и сигналне системе на главним пругама. Границе за THR које одређују сигурносне нивое интегритета су одређене према вероватноћи квара или неуспеха у функционисању система.

Као што је у прегледу релевантне литературе наведено (поглавље 2.), до сада разматрани начини сертификације уређаја за аутоматску детекцију препрека се базирају на поступцима дефинисаним за структурни подсистем Контрола, управљање, сигнализација (CCS) за које је обавезна примена SIL стандарда. С обзиром да се овај стандард већ дуже време користи за контролно-командне и телекомуникационе уређаје на железници, његова примена би могла да се сматра и доказом да нови систем омогућава одржавање достигнутог нивоа безбедности али само на нивоу техничке поузданости рада уређаја. Примена SIL нивоа интегритета безбедности као јединог критеријума прихватљивости ризика за систем за детекцију препрека (и за технички и за функционални аспект система) је проблематична из следећих разлога:

1) SIL стандарди се према дефиницији ЗБМ РА и самог стандарда CEI/ EN 61508 користе искључиво за електричне, електронске и програмабилне електронске техничке системе. Имајући у виду дефиницију ризика у ЗБМ РА јасно је да на величину ризика повезаних са препрекама на путу вожње воза утичу и фактори који нису искључиво везани са кваром или неуспехом у погледу техничког функционисања система. На пример на величину последица у погледу застоја у саобраћају или последица на човекову околину велики утицај има реакција железничких радника (на возу и/или у диспечерском центру);

2) Велики проблем са применом SIL-а као јединог критеријума прихватљивости ризика би било дефинисање појма неуспеха у функционисању система за детекцију препрека. Да би могао да се примењује SIL стандард, као и све сличне методе за дефинисање безбедносних нивоа, мора постојати прецизна дефиниција шта је неуспех у функционисању система јер без тога није могуће одредити одговарајуће вероватноће опасног догађаја. У случају појаве препрека у путу вожње воза би налет на препреку био најочигледнији догађај који би представљао неуспех у функционисању система. Међутим могуће је да систем ради потпуно исправно али да ипак дође до налета на препреку јер то физички није било могуће избећи (чест случај код покретних препрека). Могући су и обрнути случајеви код којих и поред грешке у функционисању система неће доћи до налета воза на препреку. Веома би било тешко једнозначно одредити догађај или групу догађаја чија би фреквенција или вероватноћа била мера успешности функционисања система за детекцију препрека и служила за дефинисање његовог нивоа интегритета безбедности;

3) из прегледа литературе и анализе и класификације препрека и ризика повезаних са њима јасно је да је за успешно функционисање система за детекцију

препрека код аутономних железничких возила неопходна примена вештачке интелигенције. Међутим сертификација система који у себи садрже вештачку интелигенцију за SIL 4 ниво који се захтева за командно-контролне системе је према постојећој регулативи и стандардима тешко могућа [82] [83].

Дакле у постојећем регулаторном оквиру не постоје прецизно дефинисани критеријуми прихватљивости ризика за функционални аспект система за детекцију препрека на аутономним возилима већ се он мора одредити према постојећем нивоу безбедности који је остварен у железничком систему у складу са анализом регулаторног оквира наведеног у поглављу 4. Овај захтев за одређивање критеријума прихватљивости ризика практично одговара принципу дефинисања критеријума прихватљивости ризика GAME (Globalement au moins équivalent): “Свака промена у постојећем систему и пројектовање и израда новог система морају бити спроведени на такав начин да је резултујући глобални ниво безбедности најмање еквивалентан постојећем систему који је већ у експлоатацији”. Принцип дефинисања критеријума прихватљивости ризика GAME је правно обавезујући у железничком сектору Француске а често се користи и у другим областима. Веома је сличан принцип MGS (mindestens gleiche Sicherheit/at least the same level of safety) који се користи у за железницу Немачкој, с том разликом да се он примењује искључиво када се одступа од постојећих правила и стандарда [80]. У случају система за детекцију препрека као ниво безбедности постојећег система који је већ у експлоатацији морамо да посматрамо ниво безбедности у вези ризика од препрека који је остварен од стране машиновођа.

Анализа постојеће праксе код дефинисања критеријума прихватљивости ризика се заснива на резултатима истраживања објављеним у раду [15].

У пракси постоје два приступа за дефинисање критеријума прихватљивости ризика:

- критеријум прихватљивости ризика базиран на историјским статистичким подацима о безбедносним перформансама и њиховој анализи;
- критеријум прихватљивости ризика према унапред дефинисаним циљевима у погледу безбедности система, такозвани пројектно базирани критеријум прихватљивости ризика.

У случају примене принципа прихватљивости ризика GAME први приступ је уобичајен. Може се применити и други принцип ако је могуће доказати да дефинисани циљеви у погледу безбедности одговарају нивоу безбедности оствареном до тада. Међутим у случају система за детекцију препрека пројектно базирани приступ је могуће

непосредно применити само за поједине елементе система за које постоје прописане норме, правила или стандарди. На пример дефинисање минималне даљине на којој систем мора поуздано да детектује препреку може да се заснива на постојећим прописаним дужинама зауставног пута и даљинама видљивости сигнала. Захтевана тачност процене даљине до препреке може, на основу података из анкете машиновођа да се дефинише као $\pm 10\%$ јер је установљено да су они приликом процене опасности повезане са раздаљином до препреке ту раздаљину изражавали у интервалима од 100 m (100 m, 200 m, ..., 900 m, 1 km). Међутим доста поступака машиновођа при појави препрека није нормативована нити постоје прецизне процедуре за такве случајеве па зато није увек могуће лако доказати да пројектно дефинисани циљеви одговарају достигнутом нивоу безбедности. То би у већини случајева подразумевало анализу историјских података о раду машиновођа тј. примену првог принципа.

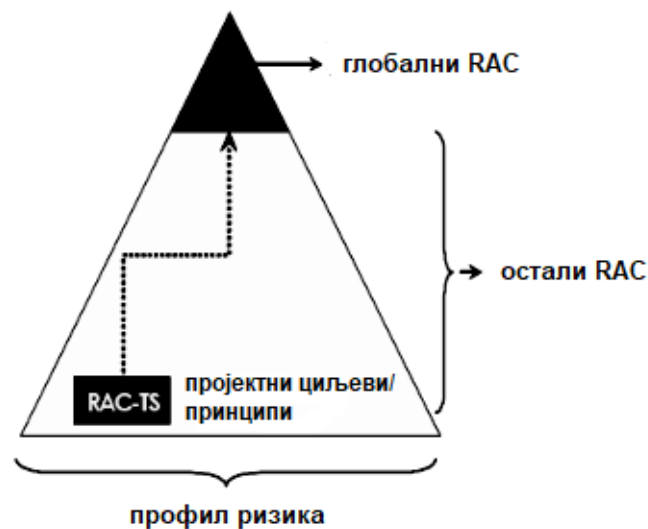
Приступ базиран на историјским статистичким подацима о безбедносним перформансама и њиховој анализи се стандардно користи код примене принципа прихватљивости ризика GAME. За примену овог приступа је најважније егзактно дефинисање достигнутог (оствареног) нивоа безбедности. Али без обзира на велики значај које тај појам има, нарочито у погледу усаглашености са прописима и законском одговорношћу, за начин његовог одређивања и квантификовања не постоје опште утврђена правила нити обавезујуће норме. Изузетак су Националне референтне вредности за Заједничке циљеве безбедности. Заједнички циљеви безбедности представљају „нивое безбедности који најмање морају бити достигнути од стране појединих делова система и система у целини, изражени преко критеријума прихватљивости ризика“ [64]. Иако по дефиницији они представљају преферирани ниво безбедности по начину њиховог одређивања они представљају остварени ниво безбедности у претходном периоду. Достицање ових циљева се оцењује преко Националних референтних вредности (НРВ). НРВ су референтне мере преко којих су квантификовани постојећи (достигнути) нивои безбедности у земљама чланицама ЕУ [64]. Оне се утврђују као пондерисана просечна вредност показатеља у укупном и релативном броју за период од 6 година према формули:

$$NRV_Y = \frac{\sum_{i=x}^N W_i \times OBS_i}{\sum_{i=x}^N W_i}$$

где је W_i пондер који представља инверзну апсолутну вредност разлике између годишњих вредности показатеља OBS_i и њихове средње вредности за период од N

година ($N = 6$). Показатељи за које се рачуна НРВ су број несрећа, број незгода, број настрадалих лица и висина штете од несрећа и незгода. Поред Заједничких циљева безбедности достигнути ниво безбедности се често користи за дефинисање корпоративних циљева безбедности у оквиру система управљања безбедношћу или одржавања управљача инфраструктуре, железничких превозника или лица задужених за одржавање. Анализом ових докумената може се закључити да се достигнути ниво безбедности у оквиру ових система готово увек квантификује на основу просечних вредности статистичких података о ванредним догађајима (несрећама и незгодама) у одређеном периоду. Просечна вредност се најчешће одређује као проста аритметичка средина која се исказује у релативном броју тих догађаја у односу на возне или бруто-тонске километре. Период за који се рачунају ове вредности се најчешће креће између 5 и 10 година.

Овакав начин одређивања и квантификовања достигнутог нивоа безбедности може бити адекватан за циљеве безбедности које Агенција ЕУ за железнице (ЕРА) сматра глобалним или критеријумима прихватљивости ризика на високом нивоу [84] (слика 7.2).



Слика 7.2 Хијерархија критеријума прихватљивости ризика (RAC)^[84]

Међутим у случајевима сертификације појединих делова железничких подсистема или специфичним подручјима као што је систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима релевантни су такозвани остали или критеријуми на техничком нивоу (на функционалном нивоу, нивоу опасности, процедуралном нивоу, нивоу опреме). У том случају начин одређивања достигнутог нивоа безбедности на начин како је то уобичајено за циљеве безбедности (према просечној вредности

реализованог броја ванредних догађаја или њихових последица у периоду од 5 до 10 година) није адекватно

Постоје три главна проблема за одређивање критеријума прихватљивости ризика на основу историјских података:

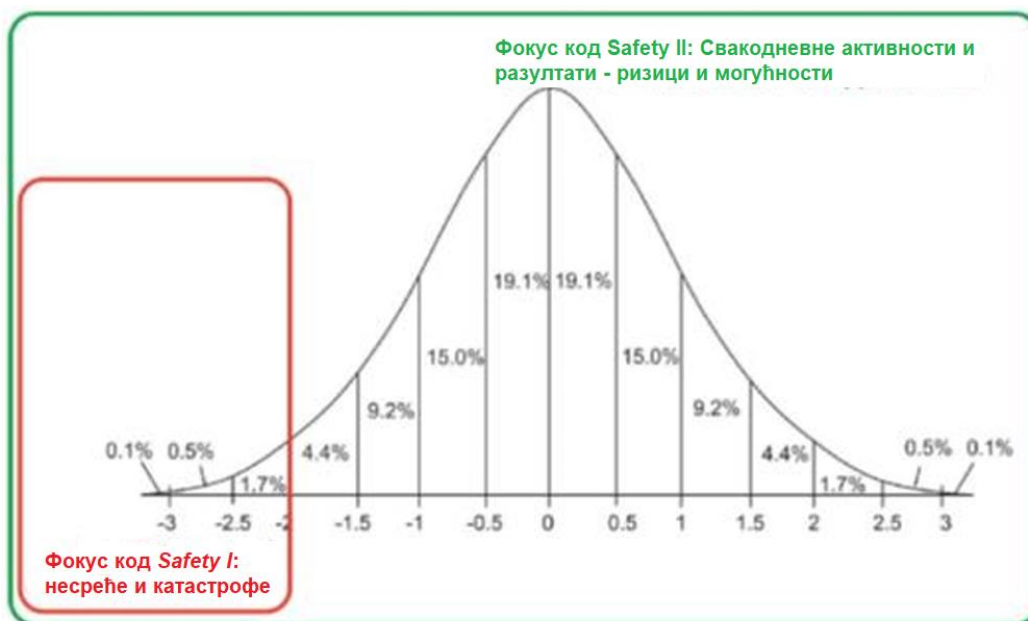
1) Железнички систем је веома комплексан па и поред великог броја статистичких података који се уобичајено прикупљају на њему често не располажемо са показатељима који се директно односе на део система који сертифицијемо тј. имамо податке чија корелација са оствареним нивоом безбедности специфичним за посматрани део није велика.

2) За железнички систем су карактеристични веома ретки догађаји са великим штетним последицама (катастрофални судари и исклизнућа) и чести догађаји без великих последица. Такође због великог утицаја безбедносне културе на ниво несрећа иста врста инцидената може да се појављује у серији у врло кратком периоду. У таквим случајевима и релативно мала одступања у избору периоду из кога ћемо прикупљати податке или избору врсте показатеља могу знатно утицати на квантификацију оствареног нивоа безбедности односно на вредност критеријума прихватљивости ризика. Статистички подаци о фреквенцији несрећа и тежини њихових последица као искључиви извор података за одређивање критеријума прихватљивости безбедности могу да дају погрешну слику.

3) С обзиром на велику неравномерност података статистички узорак би по правилу био коректнији ако му је већи обухват тј. ако је дужи период који се укључује у анализу. Међутим, с обзиром на сталне промене у железничком систему на тај начин би могли да укључимо превазиђене податке из периода када су технологија и безбедносне норме били на нижем нивоу.

Први проблем је посебно изражен у случају одређивања достигнутог нивоа безбедности у случају појаве препрека у путу вожње. На први поглед би било логично да се користе статистички подаци о сударима и налетима возова на препреке и штетним последицама таквих догађаја. Међутим ти подаци не морају бити потпуно релевантни за оцену успешности реаговања на препреке јер сви такви догађаји не представљају неуспешне догађаје са аспекта система за детекцију препрека. У већем броју случајева се ради о догађајима код којих налет није никако било могуће избећи због околности (кратак временски интервал од тренутка настанка догађаја до тренутка наилаaska воза, намеран догађај и сл.) али је правовременим реаговањем дошло до максимално могуће смањења штетних последица. Зато нпр, налет воза на препреку који није било могуће

избећи са штетним последицама по људе, али максимално умањеним, представља успешан догађај са аспекта функционисања система за детекцију препрека а избегнут налет без жртава а који није морао да се деси представља неуспешан догађај. У таквим случајевима коришћење само статистичких података о броју налета и штетним последицама дало би потпуно другачију слику. Могуће решење овог проблема би била примена принципа такозваног Safety II концепта. Овај концепт је развијен и нашао примену у све комплекснијим системима као што су безбедност у здравственом систему и контрола летења. Док се традиционални приступ, такозвани Safety I концепт заснива на анализи искључиво неуспешних догађаја (несреће, незгоде) и њихових последица, Safety II концепт се заснива на анализи свих догађаја и успешних и неуспешних [85]. Први концепт дефинише безбедност као стање где је број неуспешних догађаја (несреће, незгоде, избегнуте несреће) најмањи могући. Безбедност по првом концепту се постиже тежњом да ствари не крену погрешно. Други концепт дефинише безбедност као стање у коме је број прихватљивих исхода што већи. Безбедност по Safety II концепту се постиже тежњом да ствари иду како треба, а не спречавањем да крену погрешно. У погледу анализе података главна разлика између ова два концепта је што се први фокусира само на малобројне ванредне догађаје док други узима у обзир све догађаја, дакле има далеко ширу базу [86] (слика 7.3.)



Слика 7.3. Област анализе података код Safety I и Safety II концепата [85]

Поред тога ова два концепта се разликују и у погледу приступа процени ризика. Док се Safety I концепт фокусира на опасности и инциденте, Safety II посматра ризик као стање у коме је управљање и контрола процеса отежана. Главни проблем за примену

Safety II концепта је што се традиционално детаљна евиденција води углавном о неуспешним догађајима који су изазвали последице, док за велики број активности које се несметано реализују обично не постоје посебне статистичке евиденције. Зато се потребни подаци морају прикупити на други начин који обично подразумевају посебна истраживања, анкете и сл.

Други проблем се такође може смањити применом Safety II концепта. У том случају ће база разматраних података бити далеко шира па може боље одражавати стварни ниво сигурности постигнут на претходном нивоу. Код коришћења искључиво података о несрећама и незгодама разлика у вредности показатеља оствареног нивоа безбедности може знатно да варира у зависности од изабраног узорка. Анализа релативног броја налета возова у десетогодишњем периоду (2010. – 2019. година) на железничкој мрежи Србије (табела 7.2) показује да је распон између максималне и минималне вредности око 8,7 пута. У зависности од тога који временски период узмемо за одређивање достигнутог нивоа безбедност и како рачунамо просечну вредност добили би да се прихватљиви ниво ризика креће у опсегу од 0,41 до 0,71 налета воза на препреку на милион возних километара.

Табела 7.2. Број налета воза на препреке на мрежи ИЖС у периоду 2010-2019^[15]

Година	Број налета на мил. воз. km
2019	0,52
2018	0,33
2017	1,82
2016	0,62
2015	0,70
2014	0,27
2013	0,21
2012	0,78
2011	0,40
2010	0,44

Ако применимо концепт Safety II и анализирамо све догађаје код којих се појавила непокретна препрека на колосеку без обзира да ли је дошло да налета воза на њу или је

налет избегнут а анализу ризика базирамо на околностима под којима је до ових догађаја дошло добили би податке приказане у табели 7.3.

Табела 7.3 Укупан број појава препрека на мрежи ИЖС и број неуспешног реаговања машиновођа у периоду 2010 - 2019^[15]

Година	Укупан број појава препрека на колосеку	Број случајева неуспешног реаговања машиновођа	Процент успешних случајева
2019	14	1	92,9
2018	6	0	100
2017	32	3	90,6
2016	18	1	94,4
2015	25	1	96,0
2014	29	2	93,1
2013	18	1	94,4
2012	28	0	100
2011	13	1	92,3
2010	33	2	93,9

У овом случају различити временски интервали и начини одређивања просечне вредности процента успешног реаговања машиновођа нема битну улогу јер се она креће у веома малим границама, од 94,5 до 94,95 процената. Средња вредност овог показатеља за цео десетогодишњи период од 94,76 % успешности би зато могла да се узме као добра оцена достигнутог нивоа безбедности у случају појаве непокретних препрека на пруги и да се усвоји као минимални критеријум за сертификацију система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима. Анализа ових података показује да је главни разлог за неуспешно реаговање при појави препрека ометеност машиновође другим активностима због којих је касно уочио препреку и реаговао на њу. Таквих случајева је било 11 тј. 91,7 %, а само у 1 случају је дошло до погрешне процене ризика повезаног са препреком тј. начина реаговања.

Трећи проблем тј. релевантност безбедносних података из дужег временског периода у систему који се константно технолошки унапређује, чије се окружење мења

(нпр. климатске промене) и у којем су врсте и обим активности веома променљиве је веома присутан у области сертификације у железничком систему и због тога нека тела за безбедност доводе у питање примену принципа GAME или MGS без додатних анализа [80]. Као пример може да послужи питање одређивање величине штетних последица у случају судара. Максимални број смртно страдалих лица на мрежи пруга у Републици Србији у оваквим догађајима у периоду 2000. – 2020. је био 2, деведесетих година прошлог века је био 1 а претходних деценија је био се кретао између 10 и 60. Међутим релевантност података из тих ранијих периода за оцену данашњег стања је веома упитна јер су деведесетих година прошлог века обим и врста саобраћаја због посебних околности у земљи били знатно другачији а тада и у периоду пре тога је систем био технолошки различити него данас. Промениле су се и карактеристике понашања машиновођа. Док су у 20. веку доминантни узроци најтежих судара у железничком саобраћају у Србији били лични пропусти машиновођа због умора и употребе алкохола данас су то јако ретки узроци њихових грешака. На основу анализе извештаја о истрагама несрећа и незгода на мрежи ИЖС а.д. сада је то најчешће непажња (мобилни телефон, разговор са другим особљем, обавезе у вези попуњавања образаца и сл.) што је раније био врло ретко узрок несрећа. Примена Safety II концепта може због шире базе података делимично да ублажи овај проблем али и у том случају остаје питање релевантности безбедносних података на основу којих се одређује достигнути ниво безбедности тј. критеријум прихватљивости ризика

Рекапитулација предности и недостатака наведених начина одређивања критеријума прихватљивости ризика и могућности њихове примене за сертификацију система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима је наведена у табели 7.4.

Табела 7.4 Предности и недостаци могућих начина одређивања критеријума прихватљивости ризика и могућност њихове примене за систем за детекцију препрека на аутономним железничким возилима

Начин одређивања критеријума прихватљивости ризика	Предности	Недостаци	Могућност примене
Примена SIL стандарда	Постоји признати стандард са дефинисаним критеријумима и процедуром за примену; Широко искуство у примени за CCS системе на железници	Стандард се примењује на техничке системе, његова примена за функционални аспект уређаја није адекватна; Неадекватан за сертификацију елемената који примењују вештачку интелигенцију	Само за технички аспект уређаја (поузданост функционисања)
Пројектно дефинисани циљеви	Једноставна процедуре примене; Пројектни циљеви се уобичајено дефинишу током развоја	Могу да служе као критеријум прихватљивости ризика само за елементе за које постоје дефинисане норме	Само за припремну фазу сертификације* или одређене елементе система
На основу статистичких података о ванредним догађајима	Расположивост статистичких података; Једноставна процедура примена	Недовољна корелација показатеља са ризицима;	Само у оквиру других начина (за дефинисање одређених пројектних

Safety I концепт	коришћењем математичких метода	Релевантност узорка на основу кога се одређује прихватљивост ризика	циљева или у оквиру анализе релевантних догађаја)
Анализом свих релевантних догађаја Safety II концепт	Веома широк узорак на основу кога се одређује прихватљивост ризика; Велика корелација показатеља са ризицима	Непостојање свих потребних података; Веома захтевна у погледу обима података и њихове обраде	За функционални аспект

* Поступак оцене ризика по ЗБМ РА подразумева разматрање ризика од фазе пројектовања

На основу извршене анализе јасно је да сваки од разматраних начина одређивања критеријума прихватљивости ризика има своја ограничења и да у пракси треба применити њихову комбинацију. При томе треба имати у виду и специфичности које су карактеристичне за систем детекције препрека који обухвата и примену вештачке интелигенције. Досадашња искуства из других области (друмски транспорт, метро, одржавање и сл.) говоре да је за обуку, тестирање и сертификацију система са вештачком интелигенцијом неопходна дуготрајна пробна примена. Уосталом дуготрајна пробна примена је била неопходна и за сертификацију аутономних возова компаније Rio Tinto (поглавље 2.) који су далеко једноставнији и не укључују вештачку интелигенцију. Јасно је да ће сертификација уређаја за детекцију препрека за ниво аутоматизације GoA 4 подразумевати дуготрајни пробни рад ових уређаја у нижим режимима аутоматизације (GoA 2 и 3). Ова околност омогућава да се превазиђу главни недостаци одређивања критеријума прихватљивости ризика у погледу релевантности историјских података јер период пробног рада омогућава паралелну проверу испуњености критеријума прихватљивости и ажурирање његове вредности у складу са последњим реално достигнутом нивоом безбедности у железничком систему.

У складу са овим методологијама за процену и дефинисање прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима би се састојала од следећих елемената (корака):

- 1) Процена прихватљивости ризика техничког аспекта система (поузданост функционисања уређаја). Критеријум прихватљивости ризика би био у складу са пројектно одређеним техничким захтевима и захтеваним SIL нивоом.
- 2) Дефинисање критеријума прихватљивости ризика функционалног аспекта система (укључујући примену вештачке интелигенције). Критеријуми прихватљивости ризика и њихове вредности би били за одређене елементе одређени према пројектним циљевима а остале анализом релевантних историјских података. У складу са тим функционисање система би било подељено у три основне фазе:
 - a) детекција препреке
 - b) категоризација препреке по врсти и висини ризика
 - c) реаговање на препреку (избор начина и спровођење реакције)

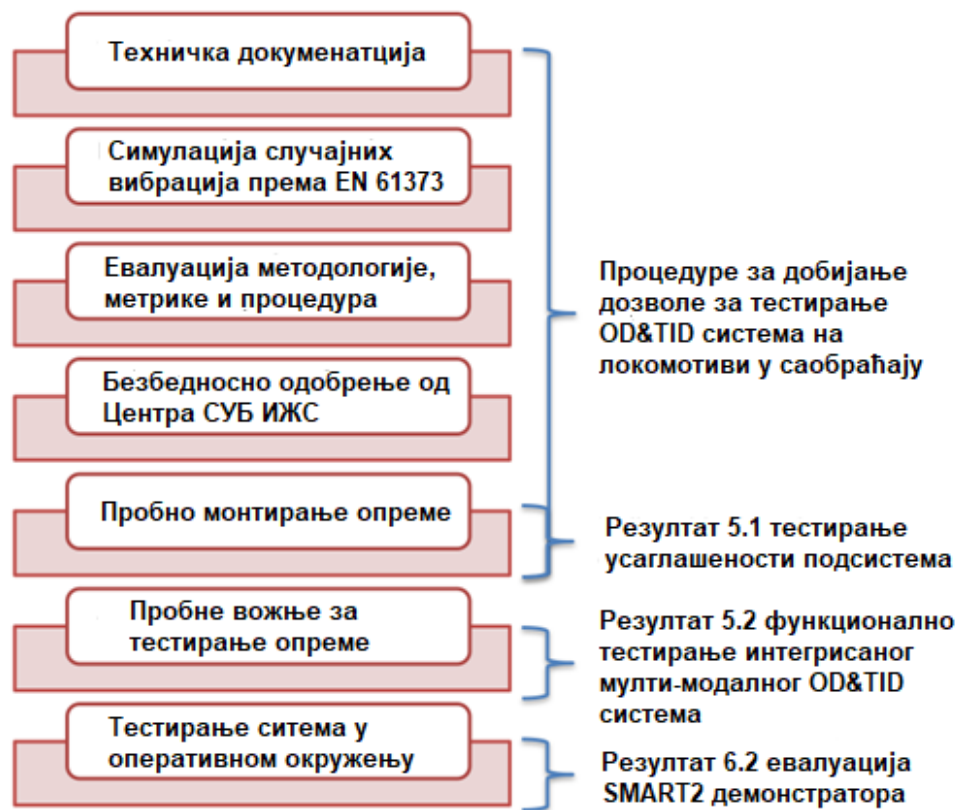
За сваку функционалну фазу би били одређени захтеви у вези процене прихватљивости ризика повезане са том фазом и за њих би били одређени посебни критеријуми прихватљивости ризика;

- 3) Утврђивање достизања прихватљивог нивоа ризика у погледу захтева за сваку функционалну фазу. Током тестирања уређаја вршило би се провера оствареног нивоа безбедности преко праћења испуњености наведених захтева у односу на критеријуме прихватљивости ризика.
- 4) Утврђивање укупне прихватљивости ризика за употребу система за детекцију препрека. Током пробних вожњи вршило би се праћење рада система. На тај начин би се вршило праћење појаве опасности повезаних са препрекама и вршило вредновање ризика повезаних са њиховом појавом у случају када би детектовање и реаговање на препреке аутономно спроводио систем за детекцију препрека и у случају када би то радио машиновођа. На овај начин би се утврдила укупна прихватљивост ризика за употребу система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима. Критеријум прихватљивости ризика би био да укупан ризик по железнички саобраћај у случају употребе уређаја за детекцију препрека на аутономним железничким возилима не буде већи од ризика која би постојао у случају управљања возом од стране машиновође. Током спровођења пробног

рада у дужем периоду пратила би се и актуелност вредности дефинисаних критеријума прихватљивости ризика и по потреби вршило њихово ажурирање.

8. Експериментална верификација методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за систем за детекцију препрека код аутономног управљања железничким возилом

Експериментална верификација методологије је спроведена у оквиру тестирања прототипа интегрисаног уређаја за детекцију препрека (OD&TID систем) у оквиру пројекта SMART 2 [87]. Ово тестирање је спроведено у неколико корака (слика 8.1).



Слика 8.1: Блок дијаграм спровођења тестирања OD&TID уређаја у оквиру пројекта SMART2^[87]

Прва четири корака представљају припрему за тестирање и чине их припрема техничке документације, доказивање усаглашености са захтевима стандарда и прописа, дефинисање методологије и процедура за евалуацију резултата тестирања и добијање дозволе за спровођење тестирања на јавној железничкој инфраструктури. Пети корак је тестирање усаглашености подсистема и компоненти у оквиру уређаја за детекцију препрека са дефинисаним техничким захтевима. Шести корак је тестирање

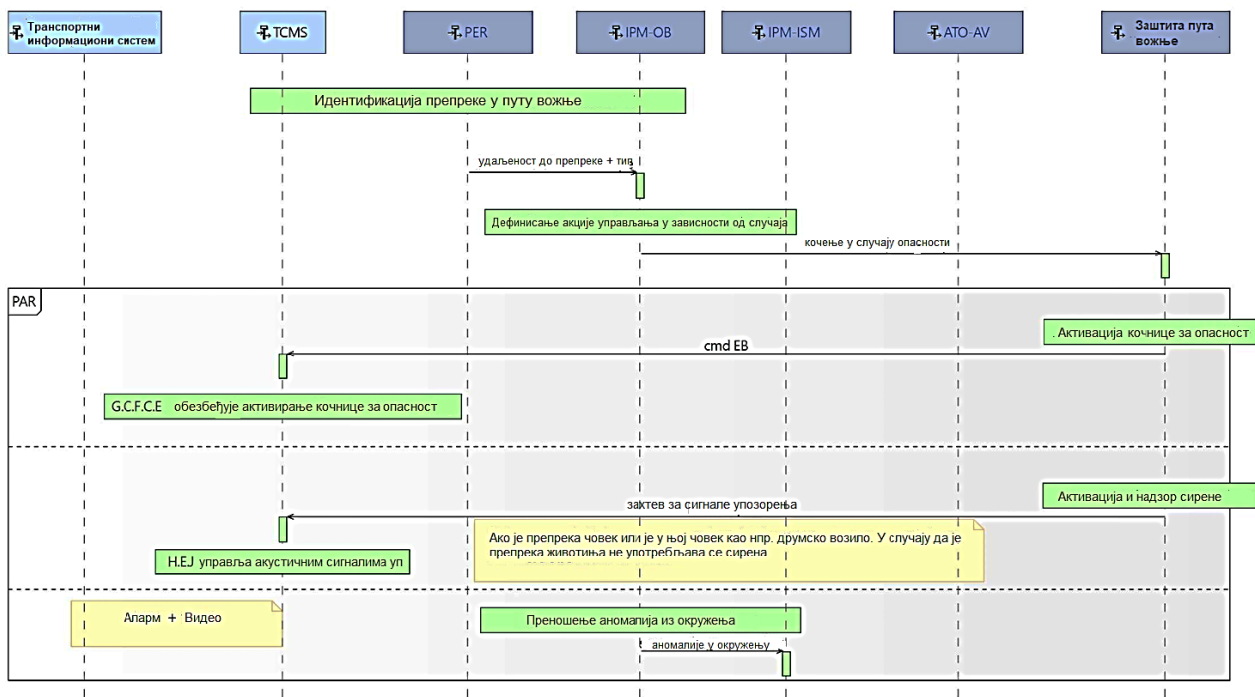
усаглашености са техничким захтевима интегрисаног OD&TID система у реалним условима. Седми, завршни корак је евалуација функционисања OD&TID система у реалним условима.

Пројекат SMART2 је имао за циљ развој радног прототипа холистичког OD&TID система и његову евалуацију у различитим реалним сценаријима коришћења на железничкој инфраструктури. С обзиром на тему и садржај пројекта функције тестираног система за детекцију препрека су биле ограничене на детекцију и класификацију препрека. Такође обим тестирања у реалним условима тј. у саобраћају на јавној железничкој инфраструктури је био ограничен. У складу са тим сама методологија за процену и дефинисање прихватљивог нивоа ризика и њена верификација је прилагођена предвиђеним обиму тестирања прототипа и његовим функцијама и карактеристикама.

С обзиром да се ради о прототипу уређаја који тек треба да се развија за редовну употребу и серијску производњу и ограничени обим тестирања први корак методологије тј. процена ризика у вези техничког аспекта система је извршена само тестирањем усаглашености са пројектно дефинисаним техничким захтевима појединачних елемената OD&TID система и тестирање интегрисаног система у погледу усаглашености са тим захтевима. Провера усаглашености према критеријумима стандарда CEI/ EN 61508 (SIL стандард) није била могућа у оквиру овог пројекта.

Тестирани OD&TID систем у овом пројекту је био ограничен на функције детекције и категоризације препреке. За избор начина реаговања на препреку аутономног возила зато је коришћен начин реаговања утврђен у дефинисаним случајевима употребе (Use case) у документу D3.2 „ATO over ETCS – GoA3/4 Specification“. Овај документ је урађен у оквиру пројекта X2Rail-4 [68]. Начин реаговања у случају појаве препрека на путу вожње у режиму без машиновође у управљачници је дефинисан у оквиру случаја 12.9.2 „React on obstacle“ и приказан на слици 8.2.

Током тестирања OD&TID система праћено је реаговање машиновође ради поређења са начином реаговања уређаја.



Слика 8.2 Начин реаговања на препреке предвиђен „ATO over ETCS – GoA3/4“ спецификацијом [68]

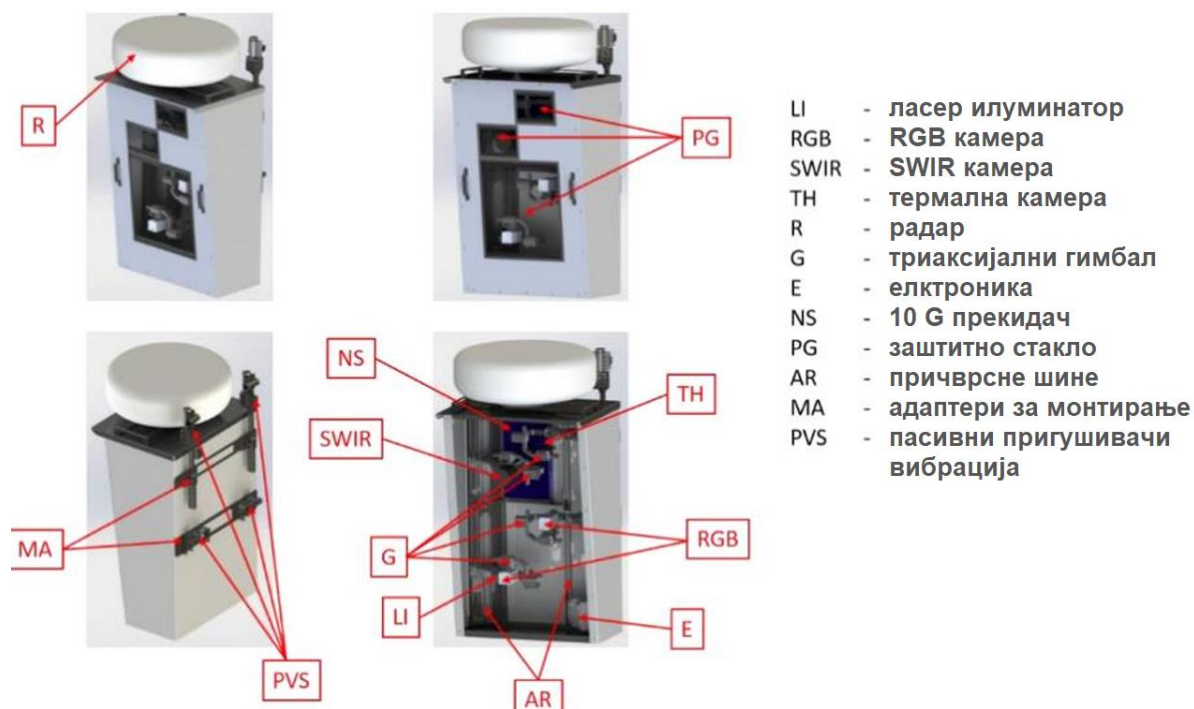
8.1 Процена прихватљивости ризика техничког аспекта система

Основни циљ пројекта SMART2 био је да се развије прототип интегрисаног система OD&TID за детекцију са којим може да се изврши детекција препрека на прузи великог домета (до 2000 m), која је независна од светлости и временских услова.

OD&TID on-board систем је конципиран као комбинација различитих метода/технолозија детекција, који укључује компактни систем камера постављен на чело локомотиве испод ветробранског стакла, и састоји се од мулти RGB камере, SVIR камере, термалне камере и радара (RADAR). На слици 8.3 приказан је CAD модел овог интегрисаног система.

За посебно важне локације на прузи, као што су уске кривине, клисуре или локације склоне одронима коришћен је ваздушни подсистем, тј. беспилотна летелица – дрон (слика 8.4), која се позиционира на стуб поред железничке пруге, са кога полеће када наилази воз.

Поред тога, у систем OD&TID укључен је и напредни ласерски подсистем намењен за детекцију препрека на пружним прелазима.



Слика 8.3 CAD модел интегрисаног система OD&TID на челу локомотиве^[88]

Димензије кућишта су 600x500x1200 mm и конструкција је пројектована да може да се угради на различите типове локомотива. Унутар кућишта монтиран је триаксијални кардан који држи сензоре (камере) како би се омогућило брзо позиционирање сензора и реконфигурација положаја сензора по потреби.



Слика 8.4 Беспилотна летелица позиционирана на станици за пуњење поред пруге^[89]

Процена прихватљивости ризика техничког аспекта система обухвата тестирање усаглашености подсистема и компоненти и тестирање усаглашености интегрисаног система са дефинисаним техничким захтевима.

У оквиру пројекта SMART 2, у документу D1.2 „Analysis of requirements and definition of specifications for obstacle detection and track intrusion systems“ [90] дефинисани су технички захтеви које OD&TID систем мора да испуни. Ови захтеви су наведени у табели 8.1

Табела 8.1 Технички захтеви за подсистеме и компоненте OD&TID система^[90]

1. Захтеви за SMART2 OD&TID локомотивски део – сензори
<p>SMART2 FR-T-01:</p> <p><i>Детекција објеката, потенцијалних препрека, у железничком окружењу и путу возње возова који нису део железничке инфраструктуре</i></p>
<p>SMART2 FR-T-04:</p> <p><i>Функционалност детекције OD&TID система отпорна на услове околине</i></p>
<p>SMART2 FR-T-05:</p> <p><i>OD&TID систем ће бити у могућности за детекцију препрека дугог домета на растојању од 2 км од воза</i></p>
<p>SMART2 FR-T-07:</p> <p><i>OD&TID систем ће користити фузију података различитих сензора за побољшање ефикасности и тачности детекције и идентификација</i></p>
<p>SMART2 FR-T-08:</p> <p><i>OD&TID систем ће обезбедити визуелизацију података сензора на HMI</i></p>
<p>SMART2 FR-T-09:</p> <p><i>OD&TID систем ће омогућити имплементацију софтвера</i></p>
<p>SMART2 FR-T-10:</p> <p><i>OD&TID систем ће обезбедити класификацију детектованих објеката</i></p>
<p>SMART2 FR-T-018:</p> <p><i>OD&TID систем ће моћи да користи зумирање са одређених монтираних камера</i></p>
<p>SMART2 FR-T-21:</p> <p><i>Радарско откривање препрека и упада у колосек биће са високим нивоом поузданости и тачности</i></p>
<p>SMART2 FR-T-22:</p> <p><i>Радар ће функционисати у железничком окружењу. Сви делови радарског система требало би да могу да раде са пуним номиналним перформансама у односу на услове животне средине: температура, влажност ваздуха, прашина, дим, излагање сунцу, киша, снег, магла</i></p>
<p>SMART2 FR-T-23:</p> <p><i>Укупан здравствени и безбедносни ризик по особље, јавност, имовину и животну средину, од рада радарског система (радио таласа) биће на прихватљивом нивоу</i></p>
2. Захтеви за SMART2 OD&TID локомотивски део – кућиште опреме

SMART2 FR-T-02: <i>OD&TID систем је могуће монтирати и демонтирати на локомотиву</i>
SMART2 FR-T-03: <i>Физичке компоненте/подсистеми OD&TID система отпорне на услове окружења</i>
SMART2 ER-T-02: <i>Брзо монтирање (око 30 минута) локомотивског дела OD&TID прототипа без специјализоване радне снаге за одржавање (електро и инжењери одржавања) мора бити могуће како би се обезбедио пословни континуитет железничког превозника чији возови ће бити коришћени приликом тестирања</i>
SMART2 ER-T-01: <i>Монтирање локомотивског дела OD&TID прототипа на локомотиве које ће се користити на тестовима биће могуће</i>
SMART2 ER-T-03: <i>Локомотивски део OD&TID прототипа након монтирања неће угрозити поглед машиновође на колосек испред возила.</i>
SMART2 ER-T-04: <i>Монтирање локомотивског дела OD&TID прототипа мора да се уради без икаквих сметњи са структуром возила, уклањањем или сечењем материјала локомотивског сандука.</i>
SMART2 ER-T-05: <i>Локомотивски део OD&TID прототипа не сме да прелази прописане димензије возила и његово монтирање не би требало да проузрокује да возило прелази ограничења у погледу масе и оптерећења осовине.</i>
SMART2 ER-T-06: <i>Локомотивски део OD&TID прототипа мора да задовољи стандарде EN 61373:2010 и EN 50155:2007 да би се добила дозвола за монтажу на возило у реалним условима саобраћаја или тестове на отвореној прузи.</i>
3. Захтеви за SMART2 OD&TID пружни део - LiDAR сензори
SMART2 FR-T-03: <i>Физичке компоненте/подсистеми OD&TID система отпорне на услове окружења</i>
SMART2 FR-T-04: <i>Функционалност откривања OD&TID система отпорне на услове окружења</i>
SMART2 FR-T-07: <i>Етернет интерфејс ће омогућити брзу комуникацију између SALVIS X и OD&TID рачунарских/уграђених система за побољшање ефикасности и тачности детекције и идентификације.</i>
SMART2 FR-T-29: <i>Пружни подсистем моћи ће да детектује објекте који су веће величине од минималне величине за детектовање објеката.</i>
SMART2 FR-T-30: <i>OD&TID пружни подсистем ће моћи да покрије веће подручје детекције од прописаног минимума.</i>

4. Захтеви за SMART2 OD&TID подсистем UAV
SMART2 FR-T-24: <i>OD&TID UAV подсистем ће моћи да обезбеди потребне перформансе лета</i>
SMART2 FR-T-26: <i>OD&TID UAV подсистем ће моћи да обавља аутоматске мисије</i>
SMART2 ER-T-11: <i>SMART2 подсистем у ваздуху (UAV) мора бити лакши од 25 кг да би се омогућила његова употреба у урбаним срединама.</i>
SMART2 ER-T-12: <i>SMART2 подсистем у ваздуху (UAV) мора поседовати сопствени систем за избегавање препрека да би избегао колизије приликом летења.</i>
SMART2 ER-T-13: <i>Прототип SMART2 подсистема у ваздуху (UAV) мора бити у визуелном погледу оператера.</i>
SMART2 ER-T-14: <i>SMART2 подсистем у ваздуху (UAV) треба да користи само ваздушни простор изнад железничког подручја на висинама нижим од 100 метара.</i>
5. Захтеви за SMART2 DSS подсистем
SMART2 FR-T-14: <i>OD&TID систем ће имати одговарајућа аудио и визуелна упозорења за дијагностиковане кварове и губитак сигнала сензора.</i>
SMART2 FR-T-19: <i>OD&TID систем ће моћи да комуницира са ERTMS и да симулира ERTMS податке</i>
SMART2 OR-T-03: <i>Сви OD&TID подсистеми ће бити интегрисани у холистички SMART2 OD&TID демонстратор и повезани са DSS</i>
SMART2 FR-T-13: <i>OD&TID систем ће пружити информације у реалном времену потребне DSS</i>
SMART2 ER-T-09: <i>SMART2 OD&TID прототип мора да функционише као самостални систем, независан од локомотивских и пружних система заштите пута вожње и/или контролних модула, или командних и контролних система на возилу</i>

Тестирање усаглашености интегрисаног система са дефинисаним техничким захтевима обављено је током теренских испитивања. Статичка испитивања су обављена 30. маја и 1. јуна, а динамичко испитивање 2. јуна 2022. године. У динамичким тестовима сви подсистеми су испитивани у реалним ситуацијама и окружењу.

Резултати тестирања усаглашености подсистема и компоненти са наведеним техничким захтевима су наведени у документу [91] а приказани су у табели 8.2.

Табела 8.2 Резултати тестирања усаглашености подсистема и компоненти са техничким захтевима^[91]

1. Подсистем RGB камере	
Три зум RGB камере интегрисане у SMART2 локомотивски OD&TID систем	
Тестови усаглашености	
<p>Подешавање конфигурације:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Постављање параметара за моно камере; различите фокалне дужине (фактори зумирања). <p>Функционални тестови:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Тест повезивања између камера и рачунара; - Потврђивање података добијених са камера. 	 <p>Теренски тестови на железничкој прузи у Весерпорту (индустријска лука) Бремен</p>
Прихватљивост резултата тестирања	
<p>Функционални тест је принваћен.</p> <p>Примена SMART2 софтвера за откривање <i>објеката и процену удаљености</i> са три различито зумиране камере:</p> <p>а) фактор зумирања 31%. Процењене раздаљине: Особа 1-86,6 м, Особа 2-30,9 м, Особа 3-145 м;</p> <p>б) фактор зумирања 65%. Процењене раздаљине: Особа 1- 81,1 м, Особа 2-28,9 м, Особа 3-није у пољу камере;</p> <p>в) фактор зумирања 85%. Процењене раздаљине: Особа 1- 87,6 м, Особа 2- није у пољу камере, Особа 3 -144,1 м.</p>	 <p>а) фактор зумирања 31%.</p>

<p>Стварна удаљеност објеката на терену је била: Особа 1 -75 m; Особа 2 -27 m, Особа 3 -141 m.</p>	<p>б) фактор зумирања 65%.</p>
<p>Усаглашеност са техничким захтевима (табела 8.1)</p>	
<p>Откривање и класификација објеката, потенцијалних препрека, на колосеку и у близини колосека које нису део железничке инфраструктуре (захтеви: SMART2 FR-T-01; SMART2 FR-T-09, SMART2 FR-T-10).</p> <p>Различити фактори зумирања могу се подесити тако да омогућавају покривање различитих опсега растојања помоћу појединачних камера (захтеви: SMART2 FR-T-018, SMART2 FR-T-05).</p>	
<p>2. SWIR камера SWIR камера интегрисана у SMART2 локомотивски OD&TID систем</p>	
<p>Тестови усаглашености</p>	
<p>Тестирање подсистема SWIR камера састављеног од SWIR камере: WIDY SenS 640M-STPE (New Imaging technologies - NIT), SWIR сочиво: 300 mm SWIR Catadioptric Objective (Beck Optronic Solutions) и интерфејса за дигитализацију слике (Frame Grabber) iPOTR CL-U3 (Pleora Technologies).</p>	 <p>Подешавање система камера на коришћеном тест-постољу</p>
<p>Прихватљивост резултата тестирања</p>	
<p>Тестирана SWIR камера је дала задовољавајуће резултате у складу са дефинисаним (табела 8.1) у вези са постигнутим растојањем и квалитетом слике (горња слика).</p> <p>Тест са ласерским илуминатором са таласном дужином 1550nm је такође спроведен. Илуминатор је био SKLID-2-1550 (Techwin Industry Co.) са</p>	

максималном излазном снагом од 1W. Ухваћени објекат је био на удаљености од 150-200 метара у сумраку (без светла). Излазна моћ илуминатора је била отприлике 0.6 W. Сечена слика је била задовољавајућег квалитета (доња слика).



Усаглашеност са техничким захтевима (табела 8.1)

Подсистем SWIR камера обезбеђује видљивост објеката дугог домета по дневном светлу и у разним условима слабог светла (са додатим ласерским илуминатором безбедним за очи)

(захтеви: SMART2 FR-T-04; SMART2 FR-T-05)

3. КАМЕРЕ НА ВОЗИЛУ

Мулти-сензорски систем на возилу (on-board) који се састоји од три RGB камере, термалне и SWIR камере

Тестови усаглашености

Подешавање конфигурација:

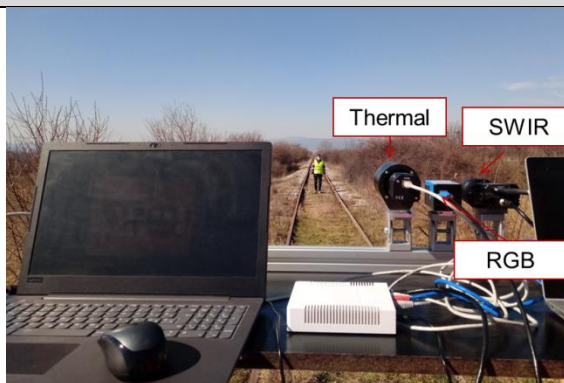
- Подешавање параметара за моно камеру.

Функционални тестови:

- Тест повезивања између камера и рачунара;

- Потврђивање података примљених са камера.

Теренски тест на железничкој прузи у Србији; локомотивске камере постављене на пробном постољу у правцу шина са предметима (препрекама) на колосеку (слика десно).



Прихватљивост резултата тестирања

Функционални тест прихваћен.

Примена SMART2 софтвера за откривање објеката и процену удаљености слика локомотивских камера забележених у различитим условима околине и осветљења (слике десно):

а) слика RGB камере забележена у лошим временским условима (облачан дан); Откривени и класификовани објекти (особе) на железничкој прузи.

б) Слика термалне камере забележена у лошем временском стању (кишни дан). Откривени и класификовани објекти (особа и аутомобил) на железничкој прузи (аутомобил прелази колосек на прелазу).

в) SWIR слика камере забележена у лошем осветљењу (сумрак).

Процењене раздаљине: Особа1- 247 m; Стварна удаљеност– 230 m.

*важно је напоменути да ће процењена удаљеност приказана на слици бити помножена фактором зумирања од 10.



а)



б)



в)

Усаглашеност са техничким захтевима (табела 8.1)

Откривање и класификација објеката на шинама и у близини шина које нису део железничке инфраструктуре у различитим условима животне средине и у различитим распонима удаљености, укључујући и велику удаљеност

(захтеви: SMART2 FR-T-01, SMART2 FR-T-04, SMART2 FR-T-05, SMART2 FR-T-09, SMART2 FR-T-10).

4. РАДАР

Коначна испорука Радарског модула (подсистема) који ће бити интегрисан у локомотивски (on-board) SMART2 OD&TID систем

Тестови усаглашености

Стандард за употребу радара NMEA 2000 који се заснива на SAE J1939 протоколу високог нивоа. То је „plug-and-play“ комуникациони стандард који се користи за повезивање морских сензора и дисплеј јединица унутар бродова и чамаца, као и за повезивање радарских јединица са аутопилотима.



SIMRAD HALO 20+

Прихватљивост резултата тестирања

Тестови на терену су успешно извршени

(слике десно):

а) позицију радара на стази током тестова на терену.

б), в), г) мултифункционални SIMRAD приказ.

Радар има приказ од 360 степени и за откривање препрека мора да се дефинише “зона чувања” која се алармира када се било шта појави у оквиру специфициране области.

б) дефиниција зоне чувања: 2 km право испред радара са ширином 1°



а)



ширине зоне. Уска зона фаворизује откривање препрека директно на колосеку, као и објекте који се приближавају колосеку до 18 m од колосека у оба смера на даљину 2 km.

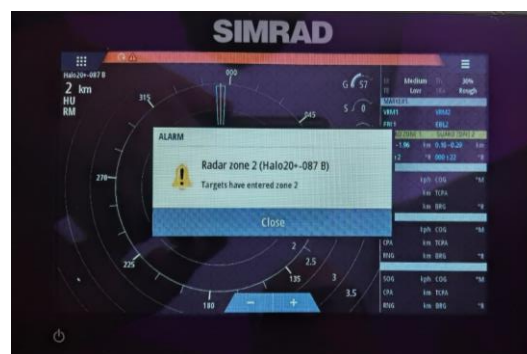
в) дефинисана зона чувања.

г) упозорење за откривање могуће препреке у зони чувања. Током тестирања радар је открио објекте који улазе у зону страже на фреквенцији 1 Hz.

б)



в)



г)

Усаглашеност са техничким захтевима (табела 8.1)

Радар је интегрисан у кућиште сензора на локомотиви. Омогућава откривање објеката и потенцијалних препрека у окружењу колосека и путу вожње возова који нису део железничке инфраструктуре и детекцију препрека од стране уређаја на возилу (захтев: SMART2 FR-T-01, SMART2 FR-T-02);

Радар се може користити за мерење стварног растојања на удаљености од 50 m до 2.778 km на фреквенцији од 1 Hz у дневним и ноћним условима.

(захтев: SMART2 FR-T-04, SMART2 FR-T-21)

Радар има IPX6 сертификацију и широк опсег радне температуре (-25° to + 55°C).

(захтев: SMART2 FR-T-22)

Како радар има ниску емисију енергије на високим фреквенцијама која га чини безбедним за људе који стоје поред радара на растојању, чак и директно поред њега, безбедно растојање за радно окружење је (100 W/m²) је 0 cm.

(захтев: SMART2 FR-T-23)

Радар има GigE интерфејс који омогућава брзу комуникацију између радара и OD&TI рачунарског система и он је усаглашен са NMEA 2000.

(захтев: SMART2 FR-T-07)

5. КУЋИШТЕ СИСТЕМА НА ЛОКОМОТИВИ

ODS кућиште

Тестови усаглашености

ODS кућиште

Хардвер:

- 2 темперирана ламинирана стаклена прозора
- прозор од германијумског стакла
- 142 сета вијака отпорних на корозију за монтажу и монтажу сензора
- 4 нагинућих основних плоча за напајање DJI Ronin S
- 4 DJI Ronin-S гимбал система стабилизације
- 3 специјална подсклопова за монтажу на локомотиву
- Посебан профил од лима за реконфигурацију положаја основне плоче за напајање DJI Ronin S
- Специјални метални носач и штит за радар
- прекидач за заштиту 10/0.03 А
- батерија и опрема за напајање ел. енергијом
- 2 гумена дела за заптивање (заштита од ингресије воде)

- Arduino MEGA табла микроконтролера

- RTK ровер Emlid REACH M2 са антеном

Функционални тестови:

- монтажа кућишта
- димензије кућишта



<ul style="list-style-type: none"> - маса кућишта - заптивеност кућишта - подешавање положаја кућишта на локомотиви - време монтаже кућишта - опсег кретања гимбала унутар кућишта - сензори који се монтирају на гимбале и њихово балансирање - интеграција свих сензора и повезаних HW елементи у кућиште 	
--	--

Прихватљивост резултата тестирања

Одобрен основни тест усаглашености
Тестови на терену су успешно извршени



Монтирано кућиште

Усаглашеност са техничким захтевима (табела 8.1)

Тест монтаже кућишта обављен након добијања дозвола за коришћење локомотиве и за монтирање SMART2 ODS на пробну локомотиву од власника СРБИЈА КАРГО (захтев: SMART2 EP-T-06);
SMART2 тим је успео да монтира кућиште сензора, са свим сензорима и сродним деловима интегрисаним унутар кућишта за око 15 мин (захтев: SMART2 EP-T-01, SMART2 ФР-T-02, SMART2 ФР-T-03. SMART2 EP-T-02);
Систем је монтиран на локомотиву без икакве модификације на локомотиви

(захтев: SMART2 ER-T-04, SMART2 ER-T-05).

Кућиште система не омета нити има интерференцију са област деловања сензора и пружа заштиту сензорима током тестирања од оштећења и утицаја околине. Током монтаже на возило демонстрирано је да систем не омета поглед машиновође (захтев: SMART2 ER-T-03);

6. ИНФРАСТРУКТУРА У ОБЛАКУ (CLOUD)

Инфраструктура у облаку система за подршку одлучивању DSS обезбеђује интерфејсе за подсистеме на локомотиви, праћење и UAV и спољне податке (нпр. метеоролошки подаци), складишне капацитете за релевантне податке из свих подсистема и историју сценарија одлучивања и праћење релевантних догађаја и интегрисаних компоненти.

Поред тога, контролише проток података истовремено испуњавајући високе безбедносне стандарде. Тренутно стање DSS-а садржи елементарне алгоритме доношења одлука

Тестови усаглашености

Извршене су две врсте тестова:

- Интерни периодични тестови помоћу прилагођено уграђеног локалног генераторског модула који симулира слање података од стране спољних подсистема (нпр. на броду, поред стазе и UAV),
- периодични тестови у сарадњи са осталим партнерима.

Коришћени су снимљени подаци за симулирање других подсистема за колаборативне тестове, који су успешно спроведени и покривају следеће аспекте:

- Слање метаподатака са локомотивског и UAV подсистема у DSS

```
Test of all integrated onboard related interfaces:
---
Onboard (apim): <Response [200]> | Send Metadata
Onboard (apim): <Response [200]> | Send Metadata with Image
Onboard (backend): <Response [200]> | Store Metadata
Onboard (backend): <Response [200]> | DSS algorithms
Onboard (backend): <Response [200]> | Store Decision
Onboard (backend): <Response [204]> | Forward to GUI clients
---
Onboard (apim): <Response [200]> | Send Status
Onboard (apim): <Response [200]> | Send GPS
---

Test of all integrated trackside related interfaces:
---
Trackside (apim): <Response [200]> | Send Metadata
Trackside (backend): <Response [200]> | Store Metadata
Trackside (backend): <Response [200]> | DSS algorithms
Trackside (backend): <Response [200]> | Store Decision
Trackside (backend): <Response [204]> | Forward to GUI clients
---
Trackside (apim): <Response [200]> | Send Status
---

Test of all integrated UAV related interfaces:
---
UAV (apim): <Response [200]> | Send Metadata
UAV (backend): <Response [200]> | Store Metadata
UAV (backend): <Response [200]> | DSS algorithms
UAV (backend): <Response [200]> | Store Decision
UAV (backend): <Response [204]> | Forward to GUI clients
---
UAV (apim): <Response [200]> | Send Status
---
```

Излаз конзоле из прилагођеног генератора модула, приликом тестирања сваког интерфејса инфраструктуре у облаку DSS-а симулирањем подсистемских корисника

- Слање GPS и других податке релевантних за воз у DSS
- Слање обрађених слика са камера на локомотиви
- Слање информација о статусу и обавештавање о случајевима отказа у локомотивском подсистему.

Извршена је интеграција подсистема на инфраструктури:

- слање метаподатака од подсистема на инфраструктури је било успешно;
- слање информација о статусу и обавештавање о неуспешним догађајима је близу завршетка, при чему је извршено подешавање укључене инфраструктуре.

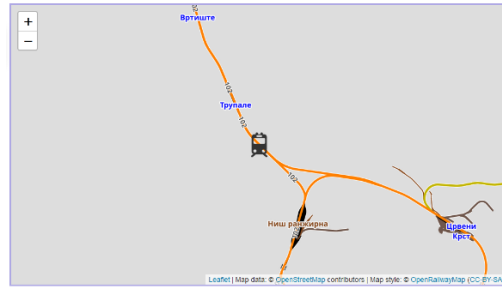
Метеоролошки подаци су интегрисани и ревидирани.

Модул прилагођеног генератора подржава развој инфраструктуре и симулира све подсистеме повезане са DSS. Коришћењем овог модула интерно тестирање је било успешно и обухватило је све примењене аспекте дуж тока података од примања података из подсистеме, складиштења података и прослеђивања на корисничке графичке интерфејсе. Доступне су симулиране информације о догађајима отказивања из свих подсистема и обезбеђена су обавештења, сваки пут када се неко од локомотивског, инфраструктурног

или UAV подсистема не шаље никакве податке у дефинисаном периоду.	
Прихватљивост резултата тестирања	
Одобрен основни тест усаглашености	
Усаглашеност са техничким захтевима (табела 8.1)	
<p>Тестови усаглашености показали су да су сви интерфејси у вези са протоком података и приступом били функционални, као и да су узети у обзир безбедносни и надзорни аспекти. Интерфејси за податке са локомотивског, инфраструктурног и UAV подсистема, релевантни подаци о возу и спољни подаци (нпр. подаци о времену) су имплементирани</p> <p>(захтев: SMART2 FR-T-07, SMART2 FR-T-19, SMART2 ER-T-08)</p> <p>Обављени тестови у вези са повезивањем су били успешни</p> <p>(захтев: SMART2 OR-T-03, SMART2 FR-T-13).</p> <p>Могућности за добијање информација о статусу софтвера и хардверских кварова из подсистема су примењене у облаку и тестиране са подсистемом на локомотиви, у коме је интеграција инфраструктурног и UAV подсистема у току. Штавише, инфраструктура у облаку генерише обавештења сваки пут када подсистем не шаље никакве податке за дефинисани период</p> <p>(захтев: SMART2 FR-T-08).</p> <p>Инфраструктура у облаку DSS-а ради као услуга у облаку унутар Microsoft Azure оквира и на тај начин се трошковно ефикасна скалабилност и потребне могућности рачунања обезбеђују помоћу дефинисаних правила скалирања</p> <p>(захтев: SMART2 ER-T-09, SMART2 FR-T-09).</p>	
7. ГРАФИЧКИ КОРИСНИЧКИ ИНТЕРФЕЈС (GUI)	
DSS инфраструктура садржи безбедни графички кориснички интерфејс (GUI), који подржава улоге администратора и машиновође	
Тестови усаглашености	
Интерни тестови за SMART2 GUI су спроведени коришћењем прилагођеног локалног генератор модула. Колаборативни тестови су спроведени за следеће аспекте:	

- мапе железничке инфраструктуре слањем симулираних GPS података (коришћењем ROS);
- информације о статусу локомотивског подсистема;
- приступ метаподацима, подацима о одлучивању и сликама;
- визуелна подршка сценаријима одлучивања локомотивског и UAV подсистема;
- функционалност визуелне подршке сценаријима одлука инфраструктурног подсистема;

Интерни тестови покривају додатно информације о статусу и приступу UAV подсистема, праћењу евидентирања информација интегрисаних компоненти GUI, могућности примене у складу са корисничким улогама и аспектима управљања корисника



Мапа железничке инфраструктуре са управљачке табле машиновође приказује се у зависности од GPS координата воза.

Live Decisions Scenarios

SensorId	Time	System	Object	Distance	ROI	Moving	Risk
ONBOARD_OHB	3/25/22, 4:37 PM	Thermal	human	3	true	true	Danger
ONBOARD_OHB	3/25/22, 4:37 PM	Thermal	trees	4	false	true	Danger
ONBOARD_OHB	3/25/22, 4:37 PM	Thermal	track	6	false	false	Danger
TRACKSIDE_OHB	3/25/22, 4:37 PM	trackside	Cow	100	true	true	Danger
UAV_OHB	3/25/22, 4:37 PM	drone	Cow	100	true	true	Danger

Излаз из алгоритама за доношење основних одлука заснованих на метаподацима подсистема са управљачке табле машиновође



Информације о статусу подсистема са управљачке табле машиновође

Прихватљивост резултата тестирања

Одобрен основни тест усаглашености

Усаглашеност са техничким захтевима (табела 8.1)

GUI подржава визуелизацију података сензора са локомотивског, инфраструктурног и UAV подсистема, као и GPS података (захтев: SMART2 FR-T-08).

Додатни релевантни подаци (нпр. метеоролошки подаци, додатне мета информације о возу, о UAV подсистему) ће уследити када се GUI потпуно интегрише у DSS. Тренутна верзија GUI подржава визуелна упозорења у случајевима отказивања и губитка сензорских сигнала (захтев: SMART2 FR-T-14).

Спроведени тестови су показали задовољавајућу усаглашеност система са дефинисаним техничким захтевима уз одређена побољшавања система. Тестови су указали на потребу уклањања стакла за заштиту камере да би се превазишао проблем замућених СВИР слика. Установљено је да се радар великог домета не могу успешно користити за детекцију препрека у железничком саобраћају због ниске поузданости детекције узроковане превеликим бројем лажно позитивних резултата. Иако овај радар може детектовати препреке на колосеку у правцу од минималне удаљености од 50 m до скоро 3 km на фреквенцији од 1 Hz у дневним и ноћним условима, он не испуњава захтеве детекције са високим нивоом поузданости и прецизности (захтев SMART2 FR-T-21 у табели 8.1).

8.2 Дефинисање критеријума прихватљивости ризика функционалног аспекта система

Други корак методологије подразумева дефинисање критеријума прихватљивости ризика за сваку функционалну фазу и за различите категорије препрека према могућим последицама у случају њихове појаве. За сваку функционалну фазу дефинисани су захтеви у вези ризика. Ови захтеви могу да се сматрају и опасностима повезаним са функционисањем уређаја за детекцију препрека. Захтеви и вредности критеријума прихватљивости ризика за прва два захтева су утврђени на основу анализе спроведене у тачки 7. према Safety II концепту. Захтев и вредност критеријума прихватљивости ризика за друга два захтева су утврђена као пројектно дефинисани циљ у складу са GAME принципом прихватљивости ризика.

Дефинисани захтеви за сваку функционалну фазу и критеријуми прихватљивости ризика су приказани у табели 8.3

Табела 8.3 Критеријуми прихватљивости ризика

Захтев	Критеријум прихватљивости ризика	начин дефинисања критеријума
Фаза детекције препреке		
1. Уређај детектује препреку непосредно након њеног	≥ 94.9 % успешног детектовања препреке	Према Safety II концепту (тачка 7)

појављивања у путу вожње		
Фаза категоризације препреке по врсти и висини ризика		
2. Уређај правилно категорише препреку (препрека је категорисана у исту или вишу категорију ризика)	≥ 99.5 % успешног категорисања препреке	Према Safety II концепту (тачка 7.)
3. Уређај тачно процењује удаљеност до препреке	≥ 90 % тачности процене удаљености	Пројектно према GAME принципу
Фаза реаговања на препреку		
4. Уређај правилно врши избор начина реаговања на појаву препреке	≥ 90 % изабраних начина реаговања није повезано са већим ризикум него што би био начин реаговања од стране машиновођа	Пројектно према GAME принципу

8.3 Утврђивање достизања прихватљивог нивоа ризика према захтевима за функционалне фазе

Тестирање достизања прихватљивог нивоа ризика према захтевима за функционалне фазе је спроведено приликом динамичких теренских тестова у реалном окружењу спроведених у јуну и августу 2022. Интегрисани OD&TID систем је постављан на локомотиве серије 441/444 превозника „Србија Карго“. Опис извршеног тестирања и резултати су наведени у документу SMART2 Deliverable D6.2 „Report on evaluation of SMART2 prototype“, 2022 [92].

Тестирање функционисања OD&TID система развијеног у оквиру пројекта SMART2 у реалном железничком окружењу изведена је на делу паневропског коридора X од Ниша од станице Црвени крст према Северној Македонији до станице Ристовац. (слика 8.5) Укупна дужина пруге на којој је вршено тестирање је 120 km са максимално

дозвољеном брзином за теретне возове до 80 km/h. За сва динамичка испитивања интегрисани OD&TID систем је постављен на локомотиву у депоу Црвени Крст и то је била полазна тачка за сва динамичка испитивања. Сама локомотива је као локомотивски воз саобраћала до станице Ниш Ранжирна, где су у састав воза додати теретни вагони и формиран међународни теретни воз који је саобраћао према Северној Македонији.



Слика 8.5 Приказ пруге Црвени Крст – Ниш и дела трасе на којој је извршено тестирање уређаја за детекцију препрека^[92]

Део трасе између станица Кочане и Печењевац изабран је за евалуацију уређаја. Изабрани део трасе карактерише дугачки праволинијски део између службених места Пуковац и Липовица са више обезбеђених и необезбеђених пружних прелаза као и део са кривинама и веома фреквентним пружним прелазом лоцираним у кривини пре станице Печењевац. Изабрани део трасе је дигитализован, у оквиру пројекта SMART2, како би се направила дигитална мапа која садржи прецизне глобалне координате колосека и инфраструктурних елемената. Дигитална мапа колосека направљена је снимањем координата колосека помоћу RTK GNSS ровера постављеног на средишњи део чеоног профила локомотиве (слика 8.6) и подацима из документације достављеним од стране управљача инфраструктуре „ИЖС“ ад. GPS координате колосека су снимљене маја 2022, заједно са 4К снимком пруге из кабине воза. Такав приступ је омогућио да се направи веома прецизна дигитална мапа, са тачном позицијом свих инфраструктурних елемената и тачним профилем колосека.



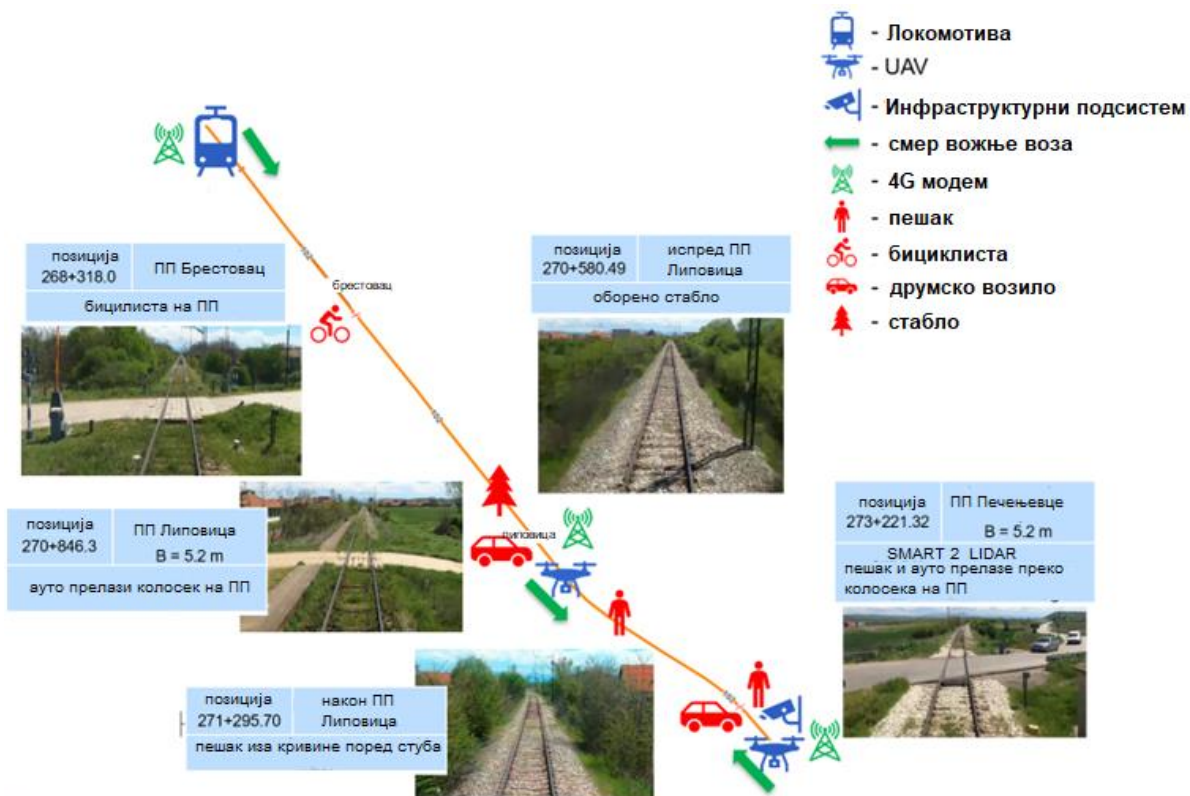
Слика 8.6 Дигитализација трасе на којој ће се вршити тестирање^[92]

Тестирање интегрисаног OD&TID система у реалном окружењу је обављено 24.08.2022 са локомотивом 444-017 која је вукла теретни воз бруто масе 917 t и дужине 483 m.

8.3.1 Дефинисани сценарио за тестирање OD&TID система у реалном саобраћају

Сценарио тестирања је подразумевао да се воз опремљен OD&TID системом креће од Пуковца ка Печењевцу док су изабране препреке постављене дуж трасе воза на стратешким локацијама. Поред тога на изабраним локацијама су коришћене беспилотне летелице и стабилни ласерски систем за детекцију препрека на пружним прелазима (слика 8.7).

На локомотиви се налазио 4G модем како би се омогућила комуникација са системом за подршку у одлучивању (DSS). Прва беспилотна летелица покривала је простор иза кривине после путног прелаза Липовица. Гнездо беспилотних летелица је позиционирано на путном прелазу Липовица. На основу сигнала DSS беспилотна летелица је почињала своју мисију, летећи од путног прелаза Липовица дуж пруге према Печењевцу. На крајњој тачки мисије, беспилотна летелица је лебдела док је воз пролазио, гледајући кривину после путног прелаз Липовица.



Слика 8.7 Сценарио за тестирање уређаја за детекцију препрека^[92]

Друга беспилотна летелица је покривала подручје пре путног прелаза Печењеvце. Гнездо беспилотних летелица постављено је на прелазу Печењеvце. На основу сигнала DSS беспилотна летелица је почињала своју мисију, летећи са прелаза Печењеvце, преко пута возне стазе, ка Липовици. Током лета беспилотна летелица је надзирала простор пре путног прелаза Печењеvце.

Стабилни ласерски систем за детекцију препрека на пружним прелазима као део SMART2 система је био постављен на путном прелазу Печењеvце (слика 8.8).

Поред 4G модема у возу, два додатна 4G модема су постављена на пружним прелазима Липовица и Печењеvце како би се омогућила комуникација беспилотних летелица и система са стране пруге са DSS.



Слика 8.8 Стабилни ласерски систем за детекцију препрека на путном прелазу Печењевце^[92]

За сценарио тестирања изабрани су различити типови препрека који су лоцирани на и око колосека. Омогућено је тачно мерење удаљености од воза у покрету пошто је положај инфраструктурних елемената био познат са SMART2 дигиталне карте. Положај препреке приказан на слици 8.5 означен је према уобичајеном формату km + m према подацима добијеним од управљача инфраструктуре. На прузи су биле постављене следеће групе препрека:

- 1) бициклиста и једна особа који се крећу преко пружног прелаза Брестовац (268 km + 318,00 m);
- 2) оборено дрво постављено директно на колосек, 265,81 m испред пружног прелаза Липовица (270 km + 580,49 m) и 2 особе поред колосека (чланови тима који померају препреку);
- 3) аутомобил и две особе које се креће преко пружног прелаза Липовица (270 km + 846,30 m);
- 4) две особе које се крећу поред колосека иза кривине 449,4 m после пружног прелаза Липовица (271 km + 295,70 m);
- 5) возила (аутомобил и камион) и три особе које се крећу преко пружног прелаза Печењевце (273 km + 221,32 m).

Укупна дужина трасе између прве и последње групе препрека износи 4903,32 m што је изнад удаљености од 2 km колико је предвиђено пројектним задатком. Дефинисани сценарио је омогућио свеобухватну процену интегрисаног OD&TID система развијеног у оквиру SMART2 пројекта јер је омогућио откривање препрека које нису у видокругу система на вучном возилу. Кривина после пружног прелаза Липовица је у урбаној зони са више пешачких прелаза, а веома фреквентни пружни прелаз Печењевце је само 50 m иза кривине.

Постављене препреке припадају различитим врстама препрека према класификацији наведеној у тачки 5. (табела 5.2.). Класификација ових препрека је дата у табели 8.4

Табела 8.4 Класификација постављених препрека за функционално тестирање OD&TID система

Постављена препрека	Класификација врсте препрека	Напомена
1) бициклиста и особа која се креће преко пружног прелаза Брестовац (268 km + 318,00 m)	2.1 Покретни објекти који не угрожавају безбедно кретање воза али последице по њих могу бити фаталне	
2) оборено дрво постављено директно на колосек, 265,81 m испред пружног прелаза Липовица (270 km + 580,49 m) и особе које се налазе поред колосека	1.3 Непокретни објекти који угрожавају безбедно кретање воза; 1.2 Неокретни објекти који не могу угрозити безбедно кретање воза али могу изазвати материјалну штету	Величина дрвета представља граничан случај између категорије 1.3 и 1.2. Величина ризика у пракси зависи од врсте воза и вучног возила и његове брзине
3) аутомобил и особе које се крећу преко пружног прелаза Липовица (270 km + 846,30 m)	2.2 Покретни објекти који угрожавају безбедно кретање воза 2.1 Покретни објекти који не угрожавају безбедно кретање воза али	

	последнице по њих могу бити фаталне	
4) особе које се крећу поред колосека иза кривине 449,4 m после пружног прелаза Липовица (271 km + 295,70 m)	4.1 Покретни објекти у непосредном окружењу који не могу угрозити безбедно кретање воза али последнице по њих могу бити фаталне	
5) возила и особе који се крећу преко пружног прелаза Печењевце (273 km + 221,32 m)	4.1 Покретни објекти у непосредном окружењу који не могу угрозити безбедно кретање воза али последнице по њих могу бити фаталне; 4.2 Покретни објекти у непосредном окружењу који угрожавају безбедно кретање воза	

Препрека су изабране тако да одговарају учесталостима појаве препрека утврђеним у тачки 6. Као што је наведено непокретне препреке су веома ретки догађаји а највећи број догађаја се односи на покретне препреке. Приликом тестирања нису биле разматране препрека из категорије 3. (Непокретни објекти у непосредном окружењу пруге који могу угрозити слободни профил и угрозити безбедност воза) јер оне немају директан утицај на безбедност саобраћаја. Као што је већ наведено у тачки 5. њихова детекција је само допунска улога коју OD&TID систем треба да има.

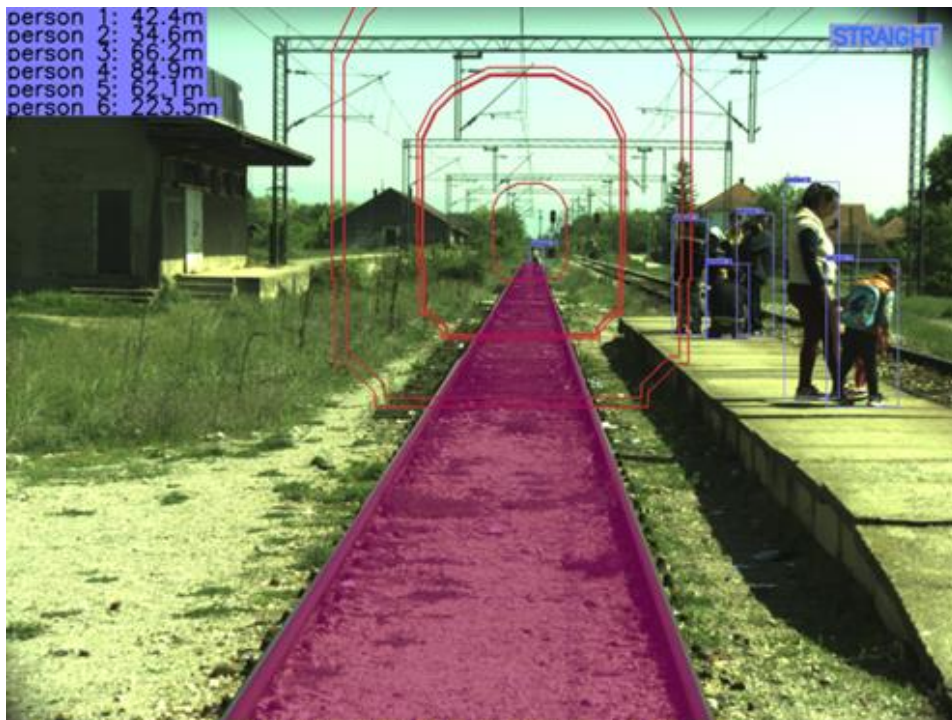
8.3.2 Тестирање функционисања OD&TID система

На тестовима је уз коришћење беспилотних летелица (UAV) успешно покривена удаљеност од 4903,32 m од чела воза. Уређаји OD&TID система на локомотиву су могли да детектују препреке на удаљености до 1,3 km.

Детекција објеката је вршена помоћу обученог CenterNet модела. Детекција шина која је централна компонента SMART2 приступа откривању препрека је такође

заснована на овом моделу. Стварно подручје од интереса у смислу детекције упада у пут вожње је веће од самог подручја између шина и слободног профила колосека. Да би се он испитао развијен је метод који за сваки детектовани објекат поуздано проверава да ли се овај објекат налази на подручју које је релевантно за воз и самим тим представља препреку.

Ако бар један детектовани објекат представља препреку, објекат унутар зоне слободног профила се визуализује црвеном бојом колосека до детектоване препреке (слика 8.9).





Слика 8.9 Прилаз објеката добијена коришћењем CenterNet модела^[92]

Овај модел користи методе засноване на конволуционим неуронским мрежама за анализу слика дела пруге испред воза снимљених интегрисаним видео сензорима. CenterNet модел одређује, као излаз детекције објеката, врсту објекта и оцену класификације објеката поред параметара оквира за ограничавање објекта. Које класе објеката могу бити откривене зависи од одговарајуће обуке овог модела а за тестирање у оквиру SMART2 омогућена је детекција следећих врста објеката: особа, аутомобил, камион, аутобус, мотор, бицикл, коњ, мачка, пас, стабло, стена.

SMART2 OD&TID систем омогућава праћење откривених објеката како се објекти детектују у узастопним кадровима коришћених камера.

Резултати детекције групе препрека 1) су приказани у табели 8.5.

Табела 8.5 Резултати детекције групе препрека 1) ^[92]


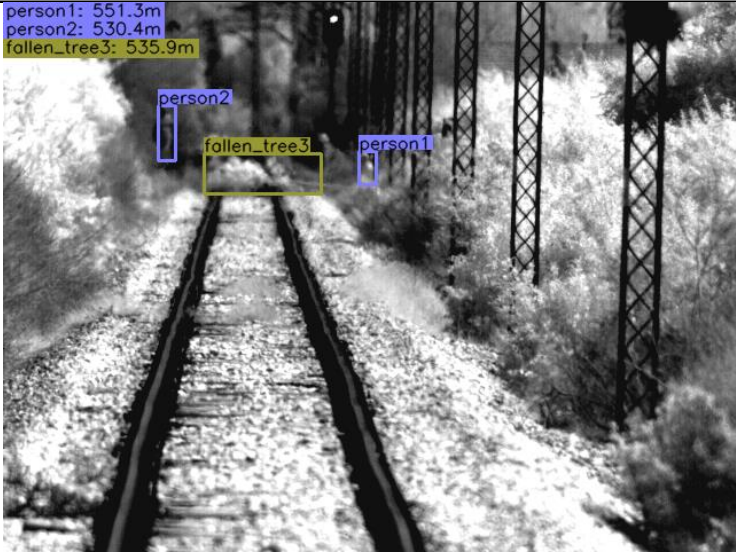
локација	сензор	детекција	коментар
<div data-bbox="193 669 373 819" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; font-size: 8px;"> Position 268+318.0 Level crossing Brestovac </div> <div style="text-align: center; font-size: 8px;">bicycle on level crossing</div>  </div>	SWIR	<div data-bbox="464 398 1171 927" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <div style="font-size: 8px; margin-bottom: 5px;"> person 1: 391.4m bicycle 2: 381.3m </div>  </div>	Бицикл и особа која је гурала бицикл су успешно откривени
		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Стварно растојање:</p> <p>Особа: 368 m</p> <p>Бицикл: 368 m</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Грешка:</p> <p>Особа: 6.4%</p> <p>Бицикл: 3.6%</p> </div> </div>	

Уређај је уочио препреку 1) непосредно након њене појаве у путу вожње на процењеној удаљености од 381,3 m (бицикл) а човека који је гура од 391 m Стварна удаљеност је била 368 m што значи да је грешка процењене удаљености препреке приликом уочавања 6.4% за особу а 3.6% за бицикл.

У складу са дефинисаним начином реаговања на препреке уређај би активирао сирену упозорења и с обзиром на удаљеност препреке активирао кочење за случај опасности које би трајало док се не установи да је препрека нестала из пута вожње, након чега би се кочење опозвало. Машиновођа је активирао сирену али није завео кочење.

Резултати детекције групе препрека 2) су приказани у табели 8.6.

Табела 8.6 Резултати детекције групе препрека 2) ^[92]



локација	сензор	детекција	коментар
	SWIR		<p>Дрво и SMART2 чланови тима који су чекали да правовремено уклоне стабло успешно су откривени.</p>
		<p>Стварно растојање: 579 m</p>	

Препреке под бројем 2) је уређај уочио непосредно након њеног појављивања у путу вожње, на процењеној удаљености од 535,9 m за стабло и 530, 4 и 551,3 m за особе. Стварна удаљеност је била 579 m што значи да је грешка процењене удаљености приликом уочавања стабла била 7,4 %.

У складу са дефинисаним начином реаговања на препреке уређај би активирао сирену упозорења и кочење за случај опасности. Машиновођа је активирао сирену и завео радно кочење.

Резултати детекције групе препрека 3) су приказани у табели 8.7.

Табела 8.7 Резултати детекције групе препрека 3)^[92]




локација	сензор	детекција		коментар
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;"> Position 270+846.3 Level crossing Lipovica, B = 5.2 m car crossing the rail tracks at the level crossing  </div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-weight: bold;">SWIR</div> </div>	SWIR			Аутомобил и чланови тима SMART 2 који су који су прелазили пругу као пешаци су успешно детектовани
		Ставарно растојање: 1180 m	Грешка: 12.9%	

Прву препреку под бројем 3) уређај је уочио непосредно након њеног појављивања на процењеној удаљености од 1332,8 m. Стварна удаљеност је била 1180 m што значи да је грешка процењене удаљености приликом уочавања била 12,9 %. Међутим током наставка кретања уређај је константно побољшавао процену удаљености од препреке па је на стварној удаљености од око 900 m грешка процене била само око 3 %. Пошто је ова удаљеност још увек доста већа од даљине заустављања воза, која је око 700 m, можемо сматрати да је и у овом случају уређај успешно детектовао препреку. Пешак је детектован на процењеној удаљености од 900,5 m док је стварна удаљеност била 896 m што значи да је грешка процене била само 0,5 %.

У складу са дефинисаним начином реаговања на препреке уређај би активирао сирену упозорења али без завођења кочења. Машиновођа је активирао сирену и није заводио кочење.

Резултати детекције групе препрека 4) су приказани у табели 8.8.

Табела 8.8 Резултати детекције групе препрека 4) ^[92]

локација	сензор	детекција	коментар
	UAV 1		UAV 1 детектује пешака који се не види из система на локомотиви док се приближава пружном прелазу Липовица.
		Растојање до воза: 1.2 km Растојање до UAV: 50.13 m	
	Термална маера		Термална камера детектује члана тима, SMART2 који делује као пешак са циљем да пређе пругу, у тренутку када се пешак удаљио од пруге због воза који је пролазио.
		Стварно растојање: 114 m	

Беспилотна летелица је пешака код препреке 4) уочила на удаљености од 1,2 km са грешком од 0.4 %. Уређај на локомотиви ову препреку није детектовао непосредно након њеног појављивања у подручју путу војње јер ју је делимично заклањао стуб контактне мреже већ тек након што се особа померила у страну. Уређај на локомотиви

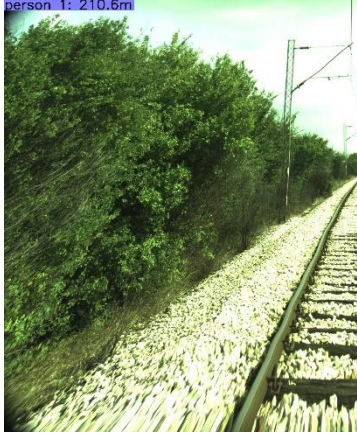
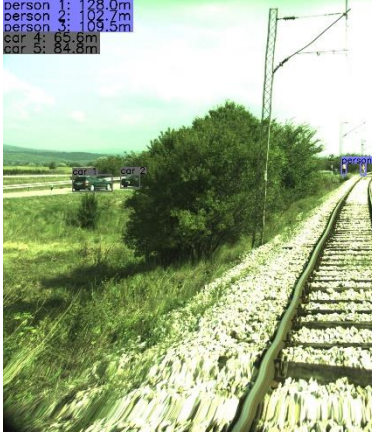
ју је уочио на процењеној удаљености од 103,3 m. Стварна удаљеност је била 114 m што значи да је грешка процењене удаљености приликом уочавања била 9.4 %.

У складу са дефинисаним начином реаговања на препреке уређај није предузео никакве мере. Машиновођа такође није реаговао на ову препреку иако ју је уочио јер је проценио да неће ући у слободни профил.

Резултати детекције групе препрека 5) су приказани на табели 8.9

Табела 8.9 Резултати детекције групе препрека 5)^[92]

локација	сензор	Детекција	коментар
<div data-bbox="188 1048 375 1234" data-label="Image"> </div>	UAV 2	<div data-bbox="475 728 1220 1272" data-label="Image"> </div>	<p>UAV 2 детектује чланове тима SMART2 који се понашају као пешаци и аутомобиле који пролазе преко пружног прелаза.</p>
		<p>Препрека: Ауто на колосеку Растојање до воза: 1.8 km Растојање до UAV: 70.83 m</p>	

	RGBI	 <p>Препрека особа поред пружног прелаза Стварно растојање: 225 m Грешка : 6.4%</p>	 <p>Стварно растојање: Особа 1: 110 Особа 2: 100 m Особа 3: 106 m Грешка: Особа 1: -16.4% Особа 2: -2.7% Особа 3: -3.3%</p>	<p>Аутомобили који чекају на прелазу и чланови тима SMART 2 који се понашају као пешаци успешно су откривени.</p>
--	------	--	---	---

Беспилотна летелица је возила у оквиру препреке 5) уочила непосредно након њиховог појављивања на удаљености од 1,8 km са грешком од 0.3 %

Сензори уређаја на локомотиви су особу у оквиру препреке 5) уочили непосредно након његове појаве у подручју пута вожње, на процењеној удаљености од 210,6 m. Стварна удаљеност је била 225 m што значи да је грешка процењене удаљености приликом уочавања била 6.4 %. Уређај је након изласка возила из кривине детектовао и остале пешаке на процењеним удаљеностима од 110, 100 и 106 m са грешком процене од 16,4 %, 2,7 % и 3,3 %. Уређај је успешно детектовао и возила у подручју прелаза али с обзиром да су се налазила у стању мировања иза спуштених браника путног прелаза она након детекције, у складу са правилима нису категорисана као препрека у путу вожње.

У складу са дефинисаним начином реаговања на препреке уређај не би активирао сирену упозорења јер се препреке налазе иза спуштених рампи а звучни и светлосни уређаји их упозоравају на долазак воза. Машиновођа такође није активирао сирену за случај опасности јер му је кретање особа око путног прелаза није било сумњиво.

8.3.3. Утврђивање прихватљивости ризика по дефинисаним захтевима за функционалне фазе

На основу резултата тестирања одређена је испуњеност захтева у погледу прихватљивости ризика. Уз употребу беспилотне летелице (UAV) интегрисани OD&TID систем је успешно идентификовао свих 14 појединачних препрека. Само са опремом на локомотиви уређај је успешно идентификовао 13 препрека док се једна идентификација може сматрати неуспешном. OD&TID систем је правилно класификовао све препреке. У погледу избора начина реаговања уређај је код три групе препрека изабрао исти начин реаговања као и машиновођа док је у остала два случаја завео кочење у случају опасности. Иако би се највиши степен кочења могао сматрати као безбеднији у погледу избегавања препрека он са собом носи опасност да изазове исклизнуће воза а може да има и друге опасне последице као што је блокирање осовина. У првом случају би опасност од исклизнућа била занемарљива с обзиром на брзину воза и кратко трајање овог режима кочења па може да се сматра да између начина реаговања нема битне разлике у погледу ризика. У другом случају активирање кочења у случају опасности би било неоправдано и представљало би већи ризик по безбедност у односу на начин како је реаговао машиновођа.

Резултати тестирања испуњености захтева у погледу прихватљивости ризика су приказани у табели 8.10

Табела 8.10 Испуњености захтева у погледу прихватљивости ризика

Захтев	Критеријум прихватљивости ризика	Остварена вредност	Прихватљивост ризика
Фаза детекције препреке			
1. Уређај детектује препреку непосредно након њеног појављивања у путу вожње	≥ 94.9 % успешног детектовања препреке	100 % уз употребу UAV 92,9 % са уређајем на возилу	Условно остварена
Фаза категоризације препреке по врсти и висини ризика			

2. Уређај правилно категорише препреку (препрека је категорисана у исту или вишу категорију ризика)	≥ 99.5 % успешног категорисања препрека	100 %	Остварена
3. Уређај тачно процењује удаљеност до препреке	≥ 90 % тачности просечне процене удаљености од препреке	95 % уз употребу UAV 94 % са уређајем на возилу	Остварена
Фаза реаговања на препреку			
4. Уређај правилно врши избор начина реаговања на појаву препреке	≥ 90 % изабраних начина реаговања није повезано са већим ризиком него што би био начин реаговања од стране машиновођа	80 %	Није остварена

8.4. Утврђивање укупне прихватљивости ризика везаног за употребу система за детекцију препрека

Утврђивање укупног ризика тј. вероватноће појаве и висине штетних последица повезаних са појавом препрека у случају када начин реаговања одређује уређај је предвиђено да се врши током пробног рада уређаја. С обзиром да у овој фази није могуће спровођење пробне употребе уређаја у реалном саобраћају, за потребе верификације предложеног модела су за овај корак искоришћени подаци прикупљени током тестирања уређаја. За све догађаје повезане са препрекама извршена је анализа и процена могућих штетних последица и вероватноће њиховог настанка и извршено вредновање ризика према матрици ризика приказаној у табели 8.11. Пошто се ради о релативно малом узорку података, употребљена матрица ризика је упрошћена а категоризација вероватноћа је извршена квалитативно.

Табела 8.11 Матрица ризика

P = П x B	Последице догађаја (П) P = max (П1,П2,П3)			Вероватноћа настанка штетних последица (B)			
	П1	П2	П3	1	2	3	4
	Утицај на саобраћај	Материјална штета	Настрада лица	Веома мала	Мала	Средња	Висока
1	Незнатан поремећај у саобраћају < 15 мин	Незнатна штета ≤ 10.000€	Нема опасности по здравље људи	1	2	3	4
2	Мали поремећај у саобраћају између 15 мин и 3 h	Мања штета 10.000- 100.000€	Могуће лакше повреде	2	4	6	8
3	Средњи поремећај у саобраћају између 3 h и 12 h	Умерена штета 100.000- 1.000.000€	Могуће теже повреде	3	6	9	12
4	Велики поремећај у саобраћају > 12 h	Огромна штета > 1.000.000€	Могућ смртни случај	5	10	15	20

На исти начин је извршена процена ризика у случају да је на препреке реаговао машиновођа.

Код прве групе препрека код које би уређај завео кочење у случају опасности реално не би постојала опасност од исклизнућа воза али би дошло до непотребног

хабања и трошења кочних уређаја. То није угрожавање безбедности али као последицу има незнатну материјалну штету. Треба имати у виду да би у дужем периоду експлоатације штета повезана са непотребним трошењем кочних уређаја могла да буде значајна. Вероватноћа да у овом случају дође до штетних последица зависи од дужине временског интервала у коме су кочнице активирани и брзине воза а процењена је као средња. У случају да је возом управљао машиновођа који није завео кочење постојао би ризик да особа не напусти на време слободан профил пруге нпр. због пада. Вероватноћа тога је веома мала а с обзиром на удаљеност воза у тренутку њихове појаве на путном прелазу и брзине воза машиновођа би имао времена да реагује. Ипак у екстремним условима би могло доћи до налета на особу и смртог случаја.

Код друге групе препрека постоји могућност штетних последица по безбедност саобраћаја јер би неоправдано кочење у случају опасности могло да доведе до исклизнућа воза. Вероватноћа да се ово деси при кочењу за случај опасности може да се оцени као мала [76]. Овај случај међутим има друге сигурне штетне последице. Воз без особља би се зауставио пре обореног стабла и могао би да настави вожњу само након што би интервенисало особље из најближег сервисног пункта. Процењени застој у саобраћају би износио минимум око 60 мин а утицао би не само на овај воз већ и на неколико других возова. Укупно кашњење које би ова препрека проузроковала може се проценити на минимум 200 минута. У случају да је воз са машиновођом наишао на овакву препреку машиновођа би након заустављања уклонио стабло са колосека (сам или гурајући га раоником вучног возила) и продужио вожњу са закашњењем мањим од 15 минута за које се у складу са важећом регулативом не сматра да утиче на саобраћај [67].

У случајевима препрека 3), 4) и 5) није било никаквих штетних последица ни према начину реаговања уређаја ни према начину реаговања машиновође.

Као резултат ове анализе може се закључити да би у случају саобраћаја воза у аутономном режиму са уређајем за детекцију препрека имали два догађаја са могућим штетним последицама чија би вредност ризика, у складу са наведеним вредновањем по матрици ризика била:

$R_1 = 3$ (незнатна штета са средњом вероватноћом)

$R_2 = 12$ (средњи поремећај у саобраћају са високом вероватноћом)

$R_3 = 0, R_4 = 0, R_5 = 0$

Други догађај има и другу могућу штетну последицу, исклизнуће са могућим смртним случајевима и са малом вероватноћом али за тај штетан догађај вредност ризика је 10 па је изабрана већа вредност

Укупни ризик повезан са препрекама у аутономном режиму вожње R_{ua} би био:

$$R_{ua} = \sum R_i = 15$$

Укупан ризик повезан са препрекама у случају да машиновођа управља возом R_{um} би био:

$R_{um} = 5$ (догађај са веома малом вероватноћом догађаја код којих су могући смртни исходи)

Дакле у овом случају не би био испуњен основни услов за сертификацију уређаја за детекцију препрека на аутономним возилима јер би то довело до смањења достигнутог нивоа безбедности.

8.5 Анализа добијених резултата у погледу прихватљивости ризика

Спроведени поступак утврђивања достизања прихватљивог нивоа ризика према захтевима за функционалне фазе је показао да OD&TID систем успешно врши класификацију препрека и процењује удаљеност од њих што омогућава уређају да одреди висину ризика који препрека представља. Детекција препрека се потпуно успешно врши уз коришћење UAV док само локомотивски део уређаја није достигао потребни ниво прихватљивости ризика. Препрека која није успешно детектована се налазила иза стуба контактне мреже. Иако ова врста препрека није лака за детекцију (особа тј. покретна препрека делимично заклоњена објектом железничке инфраструктуре, дакле објектом који уређај не препознаје као препреку) а није честа и не угрожава безбедност самих железничких возила не може се потпуно занемарити. Разлог томе је релативно велики број самоубица и деце настрадале током игре код којих је овај сценарио релевантан. Ово би захтевало да се у даљем развоју уређаја за детекцију препрека кроз поступак обуке вештачке интелигенције побољша ниво детектовања оваквих специфичних потенцијалних препрека. Најлошији резултат је постигнут код фазе избора начина реаговања на препреку. Тренутно коришћена правила за реаговање подразумевају само две врсте реаговања:

- активирање сирене у случају особа и возила која се крећу и

- кочење у случају опасности у случају свих осталих препрека.

С обзиром на веома различите нивое ризика које различите врсте препрека и њихова позиција представљају за саобраћај железничких возила ови резултати указују да је потребно разрадити више сценарија за начин реаговања на препреке од само ова два. Сценарио реаговања би требао да буде развијен у зависности од категорије препреке по висини ризика и од њене позиције у односу на воз.

Спроведени поступак утврђивања укупне прихватљивости ризика везаног за употребу система за детекцију препрека је показао да употреба система за детекцију препрека није достигла постојећи ниво ризика повезан са препрекама у железничком саобраћају. Један разлог неадекватно дефинисано реаговање на препреке утврђено приликом тестирања уређаја. Међутим још већи разлог су штетне последице повезане са отклањањем препрека које се у неким случајевима битно разликују у случају аутономних железничких возила и када возом управља машиновођа. Резултати указују да овај аспект има веома велики утицај на утврђивање прихватљивости ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима. У неким случајевима може да има и одлучујући утицај на одлуку о коришћењу потпуно аутономних возила.

9. Закључци и даљи правци истраживања

Систем за детекцију препрека на железничким возилима је један од основних услова за аутономно управљање железничким возилима. Потпуна аутоматизација железничког саобраћаја на нивоу GoA4 подразумева да активности у вези препрека у железничком саобраћају које је до сада вршио човек/машиновођа преузме тај технички системи.

На основу анализе релевантне литературе спроведене у првом поглављу може се закључити да и поред значајних напредака у техничком развоју аутономних железничких возила још увек постоје отворена питања за њихово увођење у јавним железничким системима. У отворена питања спадају она везана за дефинисање захтева у погледу сертификације система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима, посебно имајући у виду неизбежно коришћење вештачке интелигенције за препознавање и класификацију препрека. Успешна детекција препрека у отвореним железничким системима захтева велики домет и поузданост а то је могуће постићи само комбиновањем различитих врста сензора уз постојање модула за интеграцију података и њихову обраду ради добијања једнозначне информације.

Анализа постојећег стања у области аутономних железничких возила извршена у другом поглављу показује да се тренутно аутономна железничка возила успешно користе само у специфичним железничким системима као што су метро и индустријске железнице. При томе главни разлог за увођење аутоматизације саобраћаја нивоа GoA 4 је било повећање ефикасности и економичности. Проблеми везани за безбедност саобраћаја нису били разлог за прелазак на аутономна железничка возила али су имали велики утицај на то. С једне стране аутономно управљани возови могу повећати постојећи ниво безбедности саобраћаја јер могу довести до елиминисања људских грешака или побољшати препознавање препрека у отежаним условима. С друге стране они могу и смањити тај ниво ако параметри детекције препрека и начин реаговања контролно-командних уређаја у неочекиваним и комплекснијим ситуацијама не буду на нивоу реаговања човека. Такође они могу значајно негативно утицати на ефикасност и економичност железничког саобраћаја, пре свега због значајних разлика у погледу начина отклањања последица везаних за препреке код аутономних возила у односу на возила којим управља машиновођа.

У анализи регулаторног оквира која је извршена у трећем поглављу закључено је да је основи захтев за увођење система за детекцију препрека на аутономним

железничким возилима обезбеђење очувања постојећег нивоа безбедности тј. да аутономна железничка возила не смеју да представљају већи ризик од оног који постоји код железничких возила којима управљају машиновође. Појам постојећег или достигнутог нивоа безбедности је у регулаторном оквиру ЕУ за железнички систем веома значајан и наводи се у већем броју правних докумената. На основу анализе регулаторног оквира може се закључити да он у неким случајевима представља границу шта је правно дозвољено а шта не у железничком систему. Овај правни аспект је посебно важан у случају аутономних железничких возила код којих се одговорност за несреће са људског фактора управљања возилом сели на подручје пројектовања и одобравања уређаја за аутоматско управљање. Ова анализа представља допринос за даље активности везане у овој области јер до сада у научним и стручним радовима није вршена детаљна анализа правног оквира за ситуацију када нека област прелази из оквира функционалног железничког подсистема у оквир структурног железничког подсистема.

У петом поглављу извршено је прецизно дефинисање појма препрека у железничком саобраћају и извршена њихова класификација према висини ризика и начину реаговања на њихову појаву. Ово представља научни допринос овог истраживања јер је то прва системска класификација ризика повезаног са препрекама у железничком саобраћају. С обзиром да главна сврха система за детекцију препрека није само препознавање препреке већ активација адекватног реаговања на њену појаву и избегавање или минимизација штетних последица, тако извршена системска класификација је неопходан услов за даљи успешан развој система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима. Без прецизне дефиниције појма препреке и њихове класификације према висини ризика које представљају по безбедност железничког саобраћаја није могуће поуздано идентификовати све опасности повезане са препрекама а самим тим ни све захтеве за систем за детекцију препрека. Као што је показала анализа релевантне литературе појам препреке је до сада дефинисан веома уопштено а ако је и постојала његова класификација она се заснивала на њеном појавном облику. Ово је и главни недостатак досадашњих радова или студија у овој области јер ниједан није обухватио све врсте препрека у железничком саобраћају и све аспекте ризика повезаних са њима.

У шестом поглављу извршена је анализа ризика у вези са препрекама и начина њихове контроле од стране машиновођа. Ова анализа показује да је највећи број случајева повезан са потенцијалним препрекама као и да различите класе препрека захтевају различите мере контроле ризика. Закључак је да је неопходно да систем за

детекцију препрека на аутономним железничким возилима мора бити у могућности да врши класификацију свих препрека као и праћење покретних препрека. То захтева примену система вештачке интелигенције које није лако сертификовати према постојећим стандардима у европском железничком систему.

На основу анализа и истраживања у претходним поглављима у седмом поглављу је дефинисана методологија за дефинисање прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима. Прихватљиви ниво ризика је кључни и најважнији параметар у процесу сертификације система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима. Начин његовог одређивања није прецизиран у постојећем регулаторном оквиру. Пошто је анализа уобичајених начина на који се прихватљиви ниво ризика одређује показала да ниједан од њих није потпуно погодан за овај случај у овој дисертацији је дефинисана нова методологија за његово одређивање. Ова методологија се заснива на приступу базираном на ризицима (такозвани *risk-based approach*) и подразумева поделу ризика на оне који припадају техничком аспекту и оне које припадају функционалном аспекту. Методологија се спроводи у више корака у којима се проверава испуњеност захтева у погледу техничких карактеристика система, у погледу испуњености критеријума прихватљивости ризика по функционалним фазама и у погледу укупне прихватљивости ризика за употребу система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима у саобраћају.

Основна предност нове методологије за дефинисање и процену прихватљивог нивоа ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима је увођење поделе на технички и функционални аспект ризика и разматрање функционалних ризика по фазама процеса детекције и реаговања на појаву препрека. За разлику од класичног приступа у коме се проверава остваривање унапред дефинисаних пројектних захтева у погледу техничког функционисања система, у овој дисертацији је дефинисана систематична процедура за дефинисање и проверу остваривања прихватљивости ризика с аспекта остваривања примарне функције система – избегавање или минимизација штетних последица.

Остале предности нове методологије огледају се у следећем:

- примена приступа базираног на ризицима (*risk-based approach*) који омогућава сагледавање захтева у погледу превентивног деловања тј. потенцијалних препрека што није случај у такозваном пројектном приступу;

- примена концепта Safety II који анализира све системски релевантне догађаје, како успешне тако и неуспешне. Он омогућава тачније и поузданије одређивање и квантификацију оствареног нивоа безбедности у односу на уобичајени начин преко показатеља несрећа и незгода. Ово је први рад у коме је овај концепт примењен за одређивање ризика у железничком саобраћају.
- увођење више корака у методологију омогућава да анализа резултата оствареног у сваком од корака прецизно укаже на врсту проблема, тј. да ли се ради о неусаглашености у техничком или функционалном аспекту или постоје системски проблеми везани за увођење таквог уређаја у експлоатацију.
- увођењу посебног корака за утврђивање укупне прихватљивости ризика током пробног рада која омогућава адекватну сертификацију делова система који користе вештачку интелигенцију и машинско учење.

Ова оригинална методологија је развијена за потребе сертификације уређаја за детекцију препрека али се може користити за безбедносне анализе и сертификацију и других система на аутономним железничким возилима као и при аутоматизацији других подсистема на железници.

У осмом поглављу су приказани резултати експерименталне верификације нове методологије која је извршена у оквиру тестирања SMART2 OD&TI холистичког система за детекцију препрека. Резултати тестирања су показали да методологија може успешно да се користи за одређивање прихватљивости ризика за увођење система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима. Анализа резултата по корацима је потврдила предности ове методологије јер је прецизно указала на разлоге зашто уређај није остварио потребан ниво безбедности и шта треба да буду правци даљег рада и развоја. У вези функционалног аспекта то су правила реаговања на препреке која су се показала неадекватним. Главни разлог за то је што документ у коме су дефинисане врсте реаговања нема прецизно одређен појам препреке у железничком саобраћају нити због тога има адекватно утврђене врсте и класе препрека. Овај резултат указује на важност класификације препрека према висини ризика урађене у оквиру петог поглавља овог истраживања и њену примену у даљем развоју ових уређаја. У погледу укупног ризика повезаног са применом система за детекцију препрека на аутономним железничким возилима у саобраћају главни проблем је у погледу отклањања последица. Ово је било очекивано. До сада се нико није бавио детаљније овим аспектом потпуне аутоматизације железничког саобраћаја и то треба да буде једно од главних правца

даљих истраживања. Извршене анализе у оквиру овог истраживања и резултати експерименталне верификације предложене методологије су потврдиле све три утврђене хипотезе тј. да у железничком саобраћају није могуће потпуно одсуство ризика па је дефинисање прихватљивог нивоа безбедности основни захтев у погледу безбедности саобраћаја, да тренутни регулаторни оквир није адекватан за развој система за детекцију препрека код аутономних железничких возила и да детектовање препреке у путу вожње мора да обухвати детектовање нивоа ризика повезаног са њом.

Литература

1. V. Vuchic, „Rapid transit automation and the last crewmember“, *Railway Gazette International*, London, Oct. 1973, pp383-385
2. V. Vuchic, R. Stanger, „New transit technologies: an objective analysis is overdue“, *Railway Gazette International*, London, Oct. 1974, pp384-387
3. V. Vuchic, „Urban Public Transportation: Systems and Technology“, Prentice-Hall, 1981 ISBN 0139394966, 9780139394966
4. P. Singh et al., „Deployment of Autonomous Trains in Rail Transportation“, *IEEE Access*, VOLUME 9, 2021, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2021.3091550
5. O. Gebauer, W. Pree, G. Hanis, and B. Stadlmann, Towards autonomously driving trains on tracks with open access, in *Proc. 19th Its World Congr.*, Vienna, Austria, Oct. 2012, pp. 120.
6. O. Gebauer, W. Pree, and B. Stadlmann, Towards autonomously driving trains on tracks—concept, system architecture, and implementation aspects, *Inf. Technol.*, vol. 54, no. 6, pp. 266278, Nov. 2012.
7. Y.Wang, M.Zhang, J.Ma, and X.Zhou, Survey on driverless train operation for urban rail transit systems, *UrbanRail Transit*, vol. 2, nos.34, pp.106113, Dec.2016.
8. H. Karvonen, I. Aaltonen, M. Wahlström, L. Salo, P. Savioja, and L. Norros, Hidden roles of the train driver: A challenge for metro automation, *Interacting Comput.*, vol. 23, no. 4, pp. 289298, Jul. 2011.
9. E. Janssona, N. Olssonb, O. Fröidh, „Challenges of replacing train drivers in driverless and unattended railway mainline systems—A Swedish case study on delay logs descriptions“, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 21 (2023) 100875
10. Ramirez, R.C., Adin, N., Goya, J., Alvarado, U., Brazalez, A., Mendizabal, J., 2022. Freight train in the age of self-driving vehicles. A taxonomy review. *IEEE Access* 10, 9750–9762. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144602>, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9684907/>.
11. F. Esser and C. Schindler, “Assisted, automated and autonomous driving (‘triple A’) for railway traffic,” in *Proc. Railcon*, Niš, Serbia, Oct. 2016, pp. 13–14.
12. Flammini, F., Donato, L.D., Fantechi, A., Vittorini, V.: A vision of intelligent train control. In: Dutilleul, S.C., Haxthausen, A.E., Lecomte, T. (eds.) *Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification- 4th*

International Conference, RSSRail 2022, Paris, France, 1–2 June 2022, Proceedings. LNCS, vol. 13294, pp. 192–208. Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-031-05814-1_14

13. J. Peleska, A. Haxthausen, T. Lecomte, „Standardisation Considerations for Autonomous Train Control“, T. Margaria and B. Steffen (Eds.): ISoLA 2022, LNCS 13704, pp. 286–307, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19762-8_22

14. P. Popov, „Developing and deploying Automatic Train Operation in Russia“, 2020, <https://www.globalrailwayreview.com/article/98087/automatic-train-operation-ato-russia/>

15. S. Rosić, D. Stamenković, M. Simonović, Definition of the operational requirements for an obstacle detection system using risk-based approach, Proceedings of XX Scientific-Expert Conference on Railways RAILCON '22, Niš, Serbia, 2022, pp.45 - 48.

16. S. Rosić, D. Stamenković, M. Banić, M. Simonović, D. Ristić-Durrant, C. Ulianov, Analysis of the Safety Level of Obstacle Detection in Autonomous Railway Vehicles, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 2022 19 (3):187-205, (ISSN 1785-8860), DOI: 10.12700/APH.19.3.2022.3.15

17. D. Ristić-Durrant et al, „ Towards autonomous obstacle detection in freight railway“, in Proc. Railcon, Niš, Serbia, Oct. 2016, pp. I–VII

18. Ohta, M 2005, `Level crossings obstacle detection system using stereo cameras`, Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, vol. 46, no. 2.

19. Oh, KL 2007, `A monitoring system with ubiquitous sensors for passenger safety in railway platform.

20. Garcia-Dominguez, JJ, Urena, JU, Hernandez-Alonso, A, Mazo-Quintas, M, Vazquez, JF & Diaz, MJ 2008, `Multi-sensory system for obstacle detection on railways`, In Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE (pp. 2091–2096).

21. Akpınar, B & Gülal, E 2012, `Multisensor railway track geometry surveying system`, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 61, no. 1, pp. 190–197.

22. Amaral, V, Marques, F, Lourenço, A, Barata, J & Santana, P 2016, `Laser-based obstacle detection at railway level crossings`, Journal of Sensors, pp. 1–11.

23. J. Weichselbaum, C. Zinner, O. Gebauer, and W. Pree, Accurate 3D vision-based obstacle detection for an autonomous train, Comput. Ind., vol. 64, no. 9, pp. 1209-1220, Dec. 2013.

24. Sun, Z, Bebis, G & Miller, R 2006, 'On-road vehicle detection: A review', Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 28, no. 5, pp. 694–711.
25. Urmson, C, Anhalt, J, Bagnell, D, Baker, C, Bittner, R, Clark, MN & others. 2008, 'Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge', Journal of Field Robotics, vol. 25, no. 8, pp. 425–466.
26. Berg, A, Öfjäll, K, Ahlberg, J & Felsberg, M 2015, 'Detecting rails and obstacles using a train-mounted thermal camera', In Image Analysis pp. 492–503.
27. Kruse, F, Milch, S & Rohling, H 2003, 'Multi sensor system for obstacle detection in train applications', Proc. of IEEE Tr., pp. 42–46.
28. Sivaraman, S & Mohan MT 2013, 'A review of recent developments in vision-based vehicle detection', Intelligent Vehicles Symposium.
29. Badino, H, Uwe F & Rudolf M 2007, Free space computation using stochastic occupancy grids and dynamic programming', Workshop on Dynamical Vision, ICCV, Rio de Janeiro, Brazil. vol. 20.
30. Chang, P, et al. 2005, 'Stereo-based object detection, classification, and quantitative evaluation with automotive applications, Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops, CVPR Workshops. IEEE Computer Society Conference on. IEEE.
31. Bak, A, Samia, B & Didier, A 2010, 'Detection of independently moving objects through stereo vision and ego-motion extraction', Intelligent Vehicles Symposium IEEE
32. Van der Mark, W, Johan, C, Heuvel, VD & Frans, CAG 2007, 'Stereo based obstacle detection with uncertainty in rough terrain', Intelligent Vehicles Symposium, IEEE
33. Okutomi, M & Takeo, K 1993, 'A multiple-baseline stereo', Pattern Analysis and Machine Intelligence, Transactions on 15.4, pp. 353-363
34. Sun, Z, Bebis, G & Miller, R 2006, 'On-road vehicle detection: A review', Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 28, no. 5, pp. 694–711.
35. Kovacic, K, Edouard, I & Hrvoje, G, 'Computer vision systems in road vehicles: a review', the Proceedings of the Croatian Computer Vision Workshop
36. Liu, Hui (2021). *Unmanned driving systems for smart trains*. Amsterdam. [ISBN 9780128228302](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7503-7).
37. UNITED STATES CONGRESS. Office of Technology Assessment. Automated Guideway Transit: An Assessment of PRT and Other New Systems U.S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE WASHINGTON : 1975
<https://www.princeton.edu/~ota/disk3/1975/7503/7503.PDF>
38. Hitachi Rail Limited „Driverless Trains: Past, Present and Future 2023

- <https://www.hitachirail.com/blog/2023/driverless-trains-past-present-and-future/>
39. UITP WORLD METRO FIGURES 2021, Brussels, 2022
<https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2022/05/Statistics-Brief-Metro-Figures-2021-web.pdf>
40. Kevin Smith Rise of the machines: Rio Tinto breaks new ground with AutoHaul, IRJ 2019
https://www.railjournal.com/in_depth/rise-machines-rio-tinto-autohaul/
41. **Hitachi Review** 2020 Vol.69 No.6
 Heavy Haul Freight Transportation System: AutoHaul
 Autonomous Heavy Haul Freight Train Achieved in Australia
https://www.hitachi.com/rev/archive/2020/r2020_06/06a05/index.html
42. Mediarail.be – Rail Europe News The railway online magazine
 Autonomous trains: a brief review
<https://mediarail.wordpress.com/2018/09/23/le-train-autonome-ou-en-est-on-reellement/>
43. SMART - SMart Automation of Rail Transport,
https://projects.shift2rail.org/s2r_ip5_n.aspx?p=SMART
44. SMART 2 - Advanced integrated obstacle and track intrusion detection system for smart automation of rail transport
https://projects.shift2rail.org/s2r_ip5_n.aspx?p=S2R_SMART2
45. ASTRail H2020-S2RJU-OC-2017
https://projects.shift2rail.org/s2r_ip2_n.aspx?p=S2R_ASTRAIL
46. X2Rail-1 S2R-CFM-IP2-01-2015 D4.3 „ATO over ETCS – GoA3/4 Preliminary Specification“
<https://projects.shift2rail.org/download.aspx?id=d57d4737-c7bf-4712-b2ae-291d17614985>
47. X2Rail-4 S2R-CFM-IP2-01-2019 D3.2 “GoA34 specification”
<https://projects.shift2rail.org/download.aspx?id=21195ac1-ce18-41e0-8b19-baa9c9f8a163>
48. <https://s-bahn.hamburg/magazin/s-bahn/digitale-s-bahn-hamburg-2-0.html>
49. Rail Europe News, Autonomous trains: a brief review, 2018
<https://mediarail.wordpress.com/2018/09/23/le-train-autonome-ou-en-est-on-reellement/>
50. SNCF Driverless trains: On track for a rail revolution

<https://www.sncf.com/en/innovation-development/innovation-research/driverless-trains-to-run-in-2023>

51. RailTEch Europe 2022 Remy-Lagay-SNCF-Autonomous-train-program-_-how-SNCF-and-its-partners-are-working-out-new-solutions-for-a-better-railway-marketshare

https://www.railtech-europe.com/wp-content/uploads/2022/06/25.-Remy-Lagay-SNCF-Autonomous-train-program-_-how-SNCF-and-its-partners-are-working-out-new-solutions-for-a-better-railway-marketshare.pptx.pdf

52. IRRB Webinar Autonomous Technologies in Rail – Anticipating Expectations, 2021, <https://uic.org/events/spip.php?action=telecharger&arg=2513>

53. Directive (EU) 2016/797 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on the interoperability of the rail system within the European Union (recast)

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L0797>

54. IEC 62290-1:2014 Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 1: System principles and fundamental concepts, International Electrotechnical Commission, 2014, ISBN 978-2-8322-1648-4

55. Australian mining, What-are-the-safety-values-of-autonomous-mining-vehicles, 2023,

<https://www.australianmining.com.au/what-are-the-safety-values-of-autonomous-mining-vehicles/>

56. Qi Suo Liyuan Wang Tianzi Yao Zihao Wang Promoting Metro Operation Safety by

Exploring Metro Operation Accident

Network, September 24, 2021, From the journal Journal of Systems Science and Information <https://doi.org/10.21078/JSSI-2021-455-14>

57. 271 injured in Shanghai's subway crash, https://www.chinadaily.com.cn/china/2011-09/28/content_13805834.htm

58. *"Investigation Report on Incident of the New Signalling System Testing on MTR Tsuen Wan Line"* (PDF). Electrical and Mechanical Services Department. 5 July 2019

[https://www.emsd.gov.hk/filemanager/en/content_1377/TWL_New_Signalling_System_Testing_Incident_Report_\(Eng\).pdf](https://www.emsd.gov.hk/filemanager/en/content_1377/TWL_New_Signalling_System_Testing_Incident_Report_(Eng).pdf)

59. National Transportation Safety Board, Collision Between Vehicle Controlled by Developmental Automated Driving System and Pedestrian, HWY18MH010, November 19, 2019,

<https://www.nts.gov/news/events/Documents/2019-HWY18MH010-BMG-abstract.pdf>

60. NTSB, “‘Inadequate Safety Culture’ Contributed to Uber Automated Test Vehicle Crash,” press release, November 19, 2019,

<https://www.nts.gov/news/press-releases/Pages/NR20191119c.aspx>

61. R. Đuričić, B. Bošković, S. Rosić, *Evropski koncept bezbjednosti željeznice*, Edicija Tehnička knjiga – Udžbenici, Saobraćajni fakultet Doboj, 2017, ISBN 978-99955-36-63-3

62. Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on railway safety (recast)

63. E.M.El Koursi, S.Fletcher, L.Tordai, J.Rodriguez, *SAMNET Synthesis Report Safety Management and Interoperability*, Brussels, 2006

64. 2009/460/EC: Commission Decision of 5 June 2009 on the adoption of a common safety method for assessment of achievement of safety targets, as referred to in Article 6 of Directive 2004/49/EC of the European Parliament and of the Council (notified under document number C(2009) 4246)

65. ERA, “Report on Railway Safety and Interoperability in the EU 2022”, 2023

66. Rail Delivery Group, “AWG Manual”, Sixth Edition, January 2018ж

67. Saobraćajni pravilnik („Службени гласник РС“, бр. 34/22 и 107/22)

68. X2Rail-4 „Advanced signaling and automation system – Completion of activities for enhanced automation systems, train integrity, traffic management evolution and smart object controllers“, D3.2 „ATO over ETCS – GoA3/4 Specification“

69. Commission Implementing Regulation (EU) No 402/2013 of 30 April 2013 on the common safety method for risk evaluation and assessment and repealing Regulation (EC) No 352/2009

70. International Standardization Organization, [*ISO 26262-1:2018\(en\) Road vehicles — Functional safety — Part 1: Vocabulary*](#).

71. ERA, Guidance for Common Safety Indicators in Appendix of the Annex I to the Directive (EU) 2016/798, <https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/Implementation%20guidance%20for%20CSIs.pdf?t=1709186200>

72. RSSB, GERT8000-TW1 Rule Book Preparation and movement of trains, 2022

73. Department of Transport; Major A.G.B. King (1985). [*Railway Accident: Report on the Derailment that occurred on 30th July 1984 near Polmont in the Scottish Region, British Railways*](#). HMSO. ISBN 0-11-550685-3.

74. ERADIS - European Railway Agency Database of Interoperability and Safety, <https://eradis.era.europa.eu/>
75. Sikkerhedsrapport for jernbanen 2019, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, København, September 2020, https://eradis.era.europa.eu/safety_docs/AnnualReport/GetAttachment.aspx?AttachmentID=48110
76. Assessment of freight train derailment risk reduction measures Part A final report for ERA, Det Norske Veritas, July 2011 https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/dnv_study_on_freight_train_derailments_en.pdf
77. [ISO 31000:2018](#) Risk management - Guidelines
78. IEC 31010:2019 Risk management - Risk assessment techniques
80. ISO/IEC Guide 73:2002 Risk management
80. Kron, H. H. „On the evaluation of risk acceptance principles“, 2004, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.455.4506&rep=rep1&type=pdf>
81. Jens Braband, Risk assessment in railroad signaling: Experience gained and lessons learned, Annual Reliability and Maintainability Symposium Proceedings, Seattle, 2002
82. Sonja-Lara Kurz, Birgit Milius, Was ist negligible/broadly acceptable risk, 10. Bieleeschweig-Workshop zum Systems Engineering, Braunschweig, 2007
83. Braband J, Schäbeisto H., “On Safety Assessment of Artificial Intelligence”, arXiv:2003.00260 [cs.AI], 2020
84. Kurd Z., Kelly T. (2003) Safety Lifecycle for Developing Safety Critical Artificial Neural Networks. In: Anderson S., Felici M., Littlewood B. (eds) Computer Safety, Reliability, and Security. SAFECOMP 2003. Lecture Notes in Computer Science, vol 2788. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39878-3_7
85. Final Report – Risk Acceptance Criteria for Technical Systems and Operational Procedures for European Railway Agency, Det Norske Veritas Ltd, 2010
86. Erik Hollnagel, Robert L Wears, Jeffrey Braithwaite, *From Safety-I to Safety-II: A White Paper*, Published simultaneously by the University of Southern Denmark, University of Florida, USA, and Macquarie University, Australia, 2015
87. Hollnagel, E., Leonhardt, J., Licu, T. & Shorrock, S., *Eurocontrol White Paper on Safety-I and Safety-II*, Eurocontrol, Bruxelles, 2013
88. Danijela Ristić-Durrant, Muhammad Abdul Haseeb, Milan Banić, Dušan Stamenković, Miloš Simonović, Dragan Nikolić, SMART on-board multi-sensor obstacle

detection system for improvement of rail transport safety, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART F-JOURNAL OF RAIL AND RAPID TRANSIT, 0954-4097, 10.1177/09544097211032738, 2021

89. SMART2 Deliverable D3.2 „Airborne-based obstacle and track intrusion detection system“, 2022

90. SMART 2 Deliverable D1.2 „Analysis of requirements and definition of specifications for obstacle detection and track intrusion systems“, 2021

91. SMART 2 Deliverable D5.2 Report on functional testing of fully integrated multi-modal obstacle and track intrusion detection system, 2022

92. SMART2 Deliverable D6.2 „Report on evaluation of SMART2 prototype“, 2022

Биографија

Слободан Росић је рођен 06. октобра 1964. године у Београду. Завршио је основну школу „Михаило Петровић Алас” у Београду и Прву београдску гимназију. Саобраћајни факултет у Београду је уписао 1983. године а дипломирао 1991. године на профилу Железнички саобраћај и транспорт са просечном оценом 8.77 у току студија и оценом 10 на дипломском раду. У току студија је учествовао у реализацији неколико студентских пројеката. Добитник је награде фонда „Миодраг Селић“ за изузетан успех током студирања на профилу за железнички саобраћај Саобраћајног факултета

Од 1993. године радио је као асистент на катедри за Управљање, вучу и возна средства на Одсеку за Железнички саобраћај Саобраћајног факултета у Београду. Као асистент је учествовао у извођењу наставно-образовног процеса на предметима Вуча возова, Железничка возила и Организација железничког саобраћаја.

Од 2000. године радио је на местима Помоћника Савезног министар за саобраћај СРЈ, Генералног директора „ЈЗТП Београд“, Директора Дирекције за железнице и Саветника за безбедност у „Железницама Србије“ ад. Тренутно ради као Менаџер за оцену управљања ризицима у „Инфраструктури Железнице Србије“ ад.

Током своје професионалне каријере био је аутор или коаутор у више десетина научних и стручних радова публикованих у часописима и објављених на научним скуповима. Коаутор је уџбеника "Европски концепт безбједности жељезнице" који је издао Саобраћајни факултет у Добоју.

Био је учесник у изради или руководилац пројекта у више десетина студија и пројеката у области саобраћаја у земљи и иностранству.

Ожењен је и има двоје деце.

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

„Развој методологије за дефинисање прихватљивог нивоа ризика за систем детекције препрека код аутономног управљања железничким возилима“

која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Росић Слободан

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И
ШТАМПАНОГ ОБЛИКА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

**„Развој методологије за дефинисање прихватљивог нивоа ризика за систем
детекције препрека код аутономног управљања железничким возилима“**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Росић Слободан

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Развој методологије за дефинисање прихватљивог нивоа ризика за систем детекције препрека код аутономног управљања железничким возилима“

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити 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 прераде **(CC BY-NC-ND)**

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима **(CC BY-NC-SA)**

5. Ауторство – без прераде **(CC BY-ND)**

6. Ауторство – делити под истим условима **(CC BY-SA)¹**

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Росић Слободан

¹ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

ТИПОВИ ЛИЦЕНЦИ КРЕАТИВНЕ ЗАЈЕДНИЦЕ²

1. Ауторство (CC BY)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

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 аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. Уодносу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од 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 (CC BY-ND)

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 аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од 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.

² Више о лиценцама Креативне заједнице на адреси:

http://creativecommons.org.rs/?page_id=74CC. Овај текст НИЈЕ саставни део изјава аутора!