

Unaprijeđenje signalno-sigurnosnog sustava željeznice primjenom kibernetско-fizikalnog modela

Nišandžić, Ranko

Postgraduate specialist thesis / Završni specijalistički

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:519788>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-29**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science
and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA
OSIJEK**

Ranko Nišandžić

**UNAPRIJEĐENJE SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNICE PRIMJENOM
KIBERNETSKO-FIZIKALNOG MODELA**

SPECIJALISTIČKI POSLIJEDIPLOMSKI RAD

Osijek, 2023.

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA
OSIJEK**

Ranko Nišandžić

**UNAPRIJEĐENJE SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNICE PRIMJENOM
KIBERNETSKO-FIZIKALNOG MODELA**

SPECIJALISTIČKI POSLIJEDIPLOMSKI RAD

Osijek, 2023.

**JOSIP JURAJ STROSSMAYER UNIVERSITY OF OSIJEK
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION
TECHNOLOGY OSIJEK**

Ranko Nišandžić

**IMPROVEMENT OF INTERLOCKING RAILWAY SYSTEM BY USING CYBER-PHYSICAL
MODEL**

SPECIALIST POSTGRADUATE THESIS

Osijek, 2023.

Mentor rada: prof.dr.sc. Goran Martinović

Rad ima 105 stranica.

Specijalistički rad obranjen je dana 17.07.2023. godine na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku pred povjerenstvom u sastavu:

1. prof.dr.sc. Željko Hocenski
2. prof.dr.sc. Goran Martinović
3. prof.dr.sc. Vlado Struk

Zahvala

Zahvaljujem cijenjenom prof.dr.sc. Goranu Martinoviću na mentorstvu, stručnom vodstvu, strpljenju i savjetima koje je davao tijekom izrade specijalističkog rada.

Svojoj obitelji dugujem zahvalnost za stalnu potporu koju su mi pružali tijekom mogega cjelokupnog školovanja.

Posebnu zahvalnost odajem svojoj dragoj supruzi koja je bila glavni motivator za rad na istraživanju i za završetak specijalističkog rada.

Želja mi je da ovaj rad, našoj djeci, posluži kao primjer kako su učenje i istraživanje važne ljudske osobine koje trebaju razvijati u sebi.

Ranko Nišandžić

Sadržaj

Zahvala	ii
Sadržaj	iii
1. UVOD	1
2. SIGNALNO-SIGURNOSNI SUSTAVI U ŽELJEZNICI	4
2.1. Specifičnosti željezničkog prometa	4
2.2. Osnovni elementi signalno-sigurnosnih sustava željeznice	4
2.2.1. Kolosijeci	5
2.2.2. Skretnice	5
2.2.3. Signali	5
2.2.4. Kolodvori	5
2.2.5. Cestovni prijelazi u razini pruge	5
2.2.6. Automatski pružni blok	6
2.2.7. Sustav autostop	6
2.3. Aktualni sustavi upravljanja željezničkim prometom zasnovani na principima zatvorenih industrijskih mreža	6
2.3.1. Željeznički promet i centralizirano daljinsko upravljanje	6
2.3.2. Nekompatibilnost europskih signalno-sigurnosnih sustava	8
2.3.3. Projekt European Rail Traffic Management System (ERTMS)	8
2.3.4. Europski sustav kontrole vlakova (ETCS)	9
2.4. Analiza postojećih signalno-sigurnosnih sustava u željeznici	10
3. KIBERNETSKO-FIZIKALNI MODEL SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNICE	13
3.1. Prikaz kibernetско fizikalnog modela putem slojeva	13
3.2. Izmjene postojećeg signalno-sigurnosnog sustava u fizičkom sloju	14
3.2.1. Nadogradnja sustava za napajanje	14
3.2.2. Nadogradnja signalnog uređaja	16
3.2.3. Elektronički pružni blok	18
3.2.4. Tehničko rješenje središnje kontrole odsjeka	20
3.2.6. Integriranje vlaka u kibernetско-fizikalni model	23
3.3. Prijenosni sloj razmatranog modela	24
3.4. Opis 5G komunikacijskog standarada	25
3.5. Kibernetски sloj razmatranog modela	27
3.5.1. Kibernetски sloj i tehnologije računarstva u oblaku	27
3.5.2. Model podataka u računalnom oblaku	29
3.5.3. Definiranje pripadnosti izlaznih varijabli za svaki oblak računala	30

3.5.4. Komunikacijski protokol za razmjenu poruka između poslužitelja i naprava	32
4. SIMULACIJA KIBERNETSKO-FIZIKALNOG MODELA SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNICE	35
4.1. Opis kibernetско-fizikalnog modela	35
4.2. Definiranje voznog reda u modelu	37
4.3. Programsko ostvarenje cestovnog prijelaza u razini pruge	40
4.4. Smetnje i kvarovi na elementima željezničke infrastrukture	40
4.5. Simulacija prometa prema predloženom modelu	40
4.6. Arhitektura datoteka programskog rješenja modela	41
4.7. Simulacija nastanka smetnje ili kvara tijekom odvijanja prometa na pruzi	44
5. VIZUALIZACIJA KIBERNETSKO-FIZIKALNOG MODELA SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNICE	49
5.1. Vizualizacija rada jednokolosječne otvorene pruge.....	49
5.2. Gradnja sučelja za vizualizaciju	50
5.3. Vizualizacija nastanka kvarova i smetnji na elementima pruge	53
5.4. Vizualizacija prometa u simuliranom modelu pruge	54
6. TEHNIČKA I EKONOMSKA ANALIZA PROMIJENJENIH PARAMETARA SUSTAVA USLIJED PRIMJENE PREDLOŽENOG MODELA.....	57
6.1. Sigurnosni pokazatelji u europskim željeznicama	57
6.2. Podjela željezničkih nezgoda.....	59
6.3. Unaprjeđenje sigurnosti koje donosi kibernetско-fizikalni model.....	60
6.4. Određivanje statističke značajnosti djelovanja kibernetско-fizikalnog modela na smanjenje broja željezničkih nezgoda	62
6.5. Analiza izvedivosti kibernetско-fizikalnog modela na stvarnu dionicu pruge	66
6.5.1. Opis postojećeg stanja dionice pruge Vrpolje – Granica Hr/BiH - Sarajevo.....	66
6.5.2. Tehnička svojstva dionice pruge Vrpolje - Sarajevo	66
6.5.3. Tipizacija cestovnih prijelaza	67
6.5.4. Strateška važnost projekta pruge Vrpolje - Sarajevo.....	67
6.5.5. Ekonomski parametri normalnog remonta pruge Vrpolje - Sarajevo	68
6.5.6. Ekonomsko-tehnička analiza i rezultati implementacije kibernetско - fizikalnog signalno-sigurnosnog sustava na pruzi Vrpolje - Sarajevo.....	70
6.6. Povećanje prosječne brzine kretanja vlaka	72
6.7. Unaprijeđenje održavanja signalno-sigurnosnog sustava željeznice	74
Zaključak	77
Literatura	79
Sažetak	82
Abstract	83

Životopis.....	84
Popis tablica.....	85
Popis slika.....	86
Popis korištenih kratica.....	88
Prilozi (na CD-u).....	89
Prilog 1 - Broj željezničkih nezgoda, po tipu nezgode, 2016. [27]	90
Prilog 2 - Broj poginulih osoba u željezničkim nezgodama, po tipu nezgode, 2016. [27].	91
Prilog 3 - Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje – Sarajevo [31]	92

1. UVOD

U trenutku kada većina željezničkih korporacija nije ni započela implementaciju sustava prema ERTMS (*eng. European Rail Traffic Management System*) standardima a informacijsko-komunikacijske tehnologije najavljuju velike konceptualne promjene Industrijom 4.0, pojavio se značajan prostor za istraživanja i analize kako bi se pronašla nova dugoročna tehnička rješenja za željezničke sustave. S obzirom da zemljama u razvoju u predstojećem duljem periodu slijedi modernizacija željezničke infrastrukture pri čemu je priprema tehničke i financijske dokumentacije prva faza procesa, sa sigurnošću se može kazati da će iskustva i analize provedene u ovom radu biti od koristi tehničkom osoblju nacionalnih željezničkih kompanija i timovima koji će raditi na izradi studija i projekata za implementaciju suvremenih sustava za upravljanje vlakovima.

Glavni motivi za stvaranje kibernetско-fizikalnog modela željeznice su značajke i mogućnosti platformi temeljenih na suvremenim informacijsko-komunikacijskim tehnologijama (Internet stvari, veliki skupovi podataka, oblak računala, analiza podataka). Kroz standarde Industrije 4.0 i uz potporu širokopojsnih komunikacijskih mreža ove tehnologije pružaju novi pogled na željezničke transportne sustave, eliminirajući postojeća ograničenja u pogledu veličine podataka, brzine prijenosa i pouzdanosti sustava.

Cilj specijalističkog rada je prikazati metodologiju za razvoj kibernetско-fizikalnog modela željezničkog signalno-sigurnosnog sustava koji je primjenjiv na postojeće željezničke pruge. Razvoj ovakvog modela dokazuje da je moguće otvoriti ulaganja u području signalizacije, sigurnosti prometa i komunikacijske opreme bez većih građevinskih radova na željeznici, što bi rezultiralo značajnim povećanjem sigurnosti prometa, modernim upravljanjem vlakovima, bržim i učinkovitijim prometom kao i kvalitetnijim održavanjem sustava. Također, otvaraju se brojne mogućnosti za implementaciju novih rješenja, pristupa i sustava u željeznici, kao što su komunikacija sustava upravljanja sa svim sudionicima u prometu, osiguranje manje frekventnih cestovnih prijelaza, komunikacijska sučelja stroj-stroj i slično. Kibernetско-fizikalni model, između ostalog, ima za cilj unaprijediti procese upravljanja i održavanja, jer donosi konceptualnu promjenu u prikupljanju, korištenju i raspodjeli podatka, što otklanja probleme u prometnoj sigurnosti i pouzdanosti.

Velika ekonomska važnost željeznica u svijetu privlačila je kroz povijest snažna djelovanja nacionalnih i međunarodnih investicija koje su primjenjujući različite tehnološke pristupe rezultirale prilično raznolikom opremljenošću i funkcionalnošću sustava. Globalno gledajući, postoji velika tehnološka i kvalitativna razlika u između sustava koji funkcioniraju u različitim nacionalnim korporacijama, kao i unutar njih. Glavni uzrok za takvo stanje je dugoročna priroda investicija kao i sporiji razvoj željeznica od razvoja novih tehnologija.

Prvo pitanje na koje treba odgovoriti u ovom radu je može li se novim kibernetško-fizikalnim pristupom prema zatvorenim signalno-sigurnosnim sustavima promijeniti način investiranja u željeznice od načela rijetkih i skupih zamjena kompletne signalno-sigurnosne opreme u učestalije parcijalne investicije koje bi fazno podizale funkcionalnost i sigurnost prometa te time učinile tehnološki razvoj željeznica slojevitim.

Drugo pitanje na koje istraživanje treba dati odgovor je koje su prednosti u segmentu održavanja koje donosi kibernetško-fizikalni model signalno-sigurnosnog sustava i u kojoj mjeri se podižu funkcionalnost i sigurnost sustava.

Poglavlja u radu formirana su slijedom od istraživanja postojećih sustava, preko modifikacije i nadogradnji suvremenim tehnologijama, do razvoja svojstvenog modela i prijedloga rješenja.

U drugom poglavlju prikazana je opsežna analiza postojećih signalno-sigurnosnih sustava u željeznici. Istaknute su tehnologije korištene u prethodnih trideset godina od starijih do suvremenih kada je uvedena standardizacija sustava na europskoj razini. Istaknuti su problemi nekompatibilnosti sustava i opisana načela na kojima se zasnivaju zatvoreni sustavi upravljanja. Na osnovi podataka i svojstava širokog spektra postojećih sustava na kraju ovog poglavlja su istaknuta ograničenja do sada primijenjenih načela.

Treće poglavlje bavi se gradnjom kibernetško-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava željeznice. Prvo su na temelju funkcionalnih shema i principa rada izrađene nove sheme uređaja koji se zadržavaju na željezničkoj infrastrukturi. Nova rješenja zasnovana su na ugradnji računalnih sustava koji mijenjaju relejnu logiku i dodatnih upravljačkih modula koji omogućuju kontrolu stanja u kritičnim točkama sklopova. To je omogućilo gradnju prvog, temeljnog, sloja kibernetško-fizikalnog modela koji se naziva fizikalni sloj i predstavlja intervencije na opremi u polju kako bi se omogućila izrada sučelja i definiranje varijabli za kibernetški dio modela. Kao poveznica između fizikalnog i kibernetškog sloja modela opisan je prijenosni sloj koji se temelji na načelima komunikacijskih mreža pete generacije. Treći, kibernetški sloj upravljanja signalno-sigurnosnim sustavom željeznice zasnovan je na tehnologijama i uslugama koje omogućuje oblak računala. Na kraju trećeg poglavlja prikazan je općeniti podatkovni model signalno-sigurnosnog sustava pruge u kojem su definirane pripadnosti varijabli odgovarajućim skupinama podataka i određen komunikacijski protokol za razmjenu poruka između poslužitelja i naprava.

U četvrtom poglavlju definira se stvarni tip željeznice na kojem će biti razvijena simulacija modela. Određeni su parametri za tip pruge, duljinu dionice, broj kontroliranih odsjeka, cestovnih prijelaza, broja vlakova kao i vozni red. Također, opisani su algoritmi za pojedine procese koji će biti programski implementirani. Definirani su tipovi i strukture datoteka. Opisani su i načini izvršavanja simulacije prometa kao i nastanka kvarova i smetnji.

Peto poglavlje prikazuje način na koji je izvedena vizualizacija simulacije rada kibernetско-fizikalnog modela. Prvo su prikazane tehnologije korištene za izradu grafičkog prikaza podataka generiranih i pohranjenih simulacijom prometa izrađenog modela. Izrađeno je vizualno programsko sučelje koje predstavlja digitalnu presliku modela signalno-sigurnosnog sustava željeznice.

U šestom poglavlju prikazano je nekoliko različitih analiza podataka i svojstava željezničkih prometnih sustava kako bi se istaknule prednosti predloženog modela i pokazala unaprjeđenja koja donosi istovremena primjena suvremenih tehnologija na industrijske sustave kao što je signalno-sigurnosni sustav željeznice. Prvo je analizirana prometna sigurnost na željeznicama prema statističkim podacima o broju nezgoda, te je određena statistička značajnost djelovanja kibernetско-fizikalnog modela na smanjenje broja nezgoda. Nakon toga je na temelju odgovarajućih investicijskih podataka izrađena studija izvedivosti implementacije kibernetско-fizikalnog modela za stvarnu dionicu pruge. Također, simulacijom vožnje vlaka stvarnom dionicom pruge, preko dijagrama brzina za klasični signalno-sigurnosni sustav i sustav na kojem je primijenjen kibernetско-fizikalni model, pokazane su prednosti predloženog modela koje se očituju povećanjem prosječne brzine prometa i povećanjem kapaciteta pruge. Istovremeno su analizirana i istaknuta unaprjeđenja koja predloženi model donosi u održavanju sustava.

2. SIGNALNO-SIGURNOSNI SUSTAVI U ŽELJEZNICI

2.1. Specifičnosti željezničkog prometa

Željeznički promet se razlikuje od svih drugih vrsta prometa po tomu što su vozila vezana za kolosijeku i nemaju punu slobodu kretanja. Kao i u svim drugim vrstama prometa zbog maksimalne iskorištenosti kapaciteta pruge mora se osigurati višestruko korištenje infrastrukture, pri čemu se pojavljuju različiti oblici ugrožavanja. Postoje tri osnovna tipa ugrožavanja u željezničkom prometu: frontalni sudar vlakova, sustizanje vlakova i bočni sudar koji može nastati na skretnici ili križanju kolosijeka. Ugrožavanja u željezničkom prometu mogu nastati i kao posljedica iskliznuća vlaka s kolosijeka i kao takva se smatraju drugom skupinom ugrožavanja. Za sigurno odvijanje prometa vlakova neophodno je sve oblike ugrožavanja svesti na najmanju moguću mjeru ali istovremeno zbog prirode prometa potrebno je omogućiti mimoilaženja, obilaženja i križanja vlakova. Na jednokolosječnim prugama ove operacije je moguće izvoditi jedino u kolodvorima. Dvokolosječne pruge omogućuju mimoilaženje vlakova na cijeloj duljini trase. Željeznički transport zbog metalnih kontakata kotača i tračnice na maloj površini ima nizak otpor kretanju pa je zbog toga moguće prevoziti mnogo veće terete na većim brzinama nego kod cestovnog transporta za iste pogonske snage. Iz ovog svojstva željezničkog prometa proizlazi i problem koji se odnosi na duge zaustavne putove vlakova. Zaustavni put vlaka za brzinu 160 km/h iznosi 1300 – 1400 m, za brzinu 200 km/h iznosi 2500 - 3000 m a za brzinu 320 km/h zaustavni put je 7500 – 9000 m [1]. Maksimalna brzina vlakova na prugama u Republici Hrvatskoj i Bosni i Hercegovini je 160 km/h [2], ali je ipak stvarna brzina na velikom broju dionica je veoma niska, zbog loših geometrijskih svojstava pruga, cestovnih prijelaza u razini i dotrajalosti signalno-sigurnosne opreme.

2.2. Osnovni elementi signalno-sigurnosnih sustava željeznice

Istovremeno s razvojem željeznica, razvijali su se i signalno-sigurnosni sustavi koji su prema stupnju tehnološkog razvoja služili željezničkom osoblju u cilju sigurnog odvijanja prometa. Osnovni elementi signalno-sigurnosnih sustava su: kolosijeci, skretnice i signali. Kolodvori i cestovni prijelazi u razini pruge su kompleksni objekti u željeznicama kojima se posebno pristupa s aspekta prometa i sigurnosti. Na dijelovima otvorene pruge uobičajeno je instaliranje signalno-sigurnosnog sustava nazvanog automatski pružni blok [3] kao i sustava autostop.

2.2.1. Kolosijeci

Kolosijeci su glavni dio željezničke infrastrukture. S aspekta signalno-sigurnosne tehnike korištena su fizička i električna svojstva kolosijeka za nadzor stanja zauzetosti odnosno određivanje pozicije vlaka.

2.2.2. Skretnice

Skretnice su naprave kojima se vrši promjena pravca kretanja. Skretnice koje su instalirane na lokalnim željeznicama imaju električnu postavnu napravu u kojoj je elektromotorni pogon i omogućuje signalizaciju o položaju, ispravnosti i osiguranju položaja u danom trenutku.

2.2.3. Signali

Signali su dio signalno-sigurnosnog sustava koji vizualno obavještavaju učesnika u prometu o dozvolama, zabranama ili ograničenjima u kretanju infrastrukturom. Oni zajedno sa sklopovima za upravljanje skretnicama i sklopovima za nadzor slobodnosti kolosijeka predstavljaju osnovne elemente izvršne razine željezničkog prometa.

2.2.4. Kolodvori

Kolodvori kao mjesta na kojima se vrši zaustavljanje, mimoilaženje i pretjecanje vlakova predstavljaju najzahtjevnije objekte za opremanje signalno-sigurnosnim sustavima u željezničkoj infrastrukturi. Središnje procesne jedinice implementiraju se kao redundantni računalni sustavi i predstavljaju ključne elemente kolodvorskog signalno-sigurnosnog sustava.

2.2.5. Cestovni prijelazi u razini pruge

Križanja cestovnog i željezničkog prometa su mjesta na kojima dolazi do ugrožavanja prometa. Kako se ove dvije vrste prometa odvijaju neovisno, neophodno je u mjestima njihovog križanja instalirati sustav upravljanja koji treba da regulira odvijanje prometa. Prednost se uvijek daje željezničkom prometu jer predstavlja kretanje velikih masa, stoga se u mjestu križanja uvijek izvršava zaustavljanje cestovnog prometa.

2.2.6. Automatski pružni blok

Automatski pružni blok je signalno-sigurnosni sustav koji se instalira na otvorenoj pruži. Otvorenom prugom smatra se pruga između ulaznih signala dvaju kolodvora. Osnovno pravilo za prometovanje vlakova je da se ne smije dogoditi slučaj kada dva vlaka prometuju između kolodvora u suprotnim smjerovima. Zbog povećanja kapaciteta pruga uveden je princip podjele pruge na blok odsjeka između kolodvora koji se osiguravaju signalima, tako se omogućuje istovremeno prometovanje više vlakova dionicom bez sustizanja i kolizija. Duljina blok odsjeka ne može biti manja od najduljeg zaustavnog puta vlaka. S druge strane zbog tehničkih ograničenja kod rješavanja nadzora zauzetosti izoliranim odsjecima [4] duljina nije mogla biti veća od 1500 m, veće duljine blok odsjeka nisu prakticirane i zbog povećanja mogućnosti ljudske pogreške jer se moglo dogoditi da strojovođa nakon nekog vremena zaboravi znak s posljednjeg signala prema kojem je trebao postupiti. Zbog toga se javila potreba za sustavom koji bi omogućio prijenos signala s pruge do lokomotive i automatska sigurnosna djelovanja na kretanje u slučaju propusta strojovođe, tako je razvijen sustav autostop.

2.2.7. Sustav autostop

Sustav autostop [5] je razvijen da u upravljanju vlakom djeluje paralelno sa strojovođom kao sigurnosna potpora u slučaju ljudskog propusta. Sustav autostop ima svoj pružni uređaj i lokomotivski uređaj. Prijenos signala vrši se elektromagnetskim putem preko paralelnog titrajnog kruga podešenog na točnu rezonantnu frekvenciju. Element sustava koji se ugrađuje na prugu je pasivni element sastavljen od jedne zavojnice i dva kondenzatora koji se putem bespotencijalnih kontakata iz signala na koji su spojeni povezuju u odgovarajući titrajni krug. Informacija signala se u ovom slučaju prenosi iz jedne točke na lokomotivu stoga se sustav autostop naziva točkastim. U lokomotivi se ugrađuje aktivni dio sustava koji djeluje svjetlosnim i zvučnim upozorenjem za strojovođu ili na sustav kočenja vlaka u slučaju prolaza pored aktivnog crvenog signala.

2.3. Aktualni sustavi upravljanja željezničkim prometom zasnovani na principima zatvorenih industrijskih mreža

2.3.1. Željeznički promet i centralizirano daljinsko upravljanje

Elementi željezničke infrastrukture i tehnologije trenutno instalirane na regionalnim prugama su prilično različite. Lokalno su prema planovima željezničkih korporacija parcijalno instalirani i sustavi upravljanja s raspodijeljenim ugrađenim računalima dok je veći dio

infrastrukture opremljen relejnim postrojenjima ili potpuno zastarjelim mehaničkim konceptima upravljanja koji uglavnom i nisu u funkciji. U cilju povećanja ekonomičnosti i sigurnosti na prugama, oduvijek su se nastojala razviti daljinska upravljanja željezničkim prometom, kako bi se postigla centralizacija odlučivanja u radu jedne pruge i pripadajućih službenih mjesta. Tu se prepoznaju dva osnovna sustava. Prvi u kojem se centralizirano upravlja postrojenjima na infrastrukturi bez prijenosa signala na vlak i drugi napredniji sustav u kojem se signali prijenose s infrastrukture na vlak i na taj način ostvaruje upravljanje vlakovima tijekom vožnje. Projektiranje ovakvih sustava ovisi o duljini dionice, kao i o broju i veličini kolodvora kojima se može upravljati s jednog mjesta. Preduvjet za ostvarenje centraliziranog upravljanja željezničkog prometa je opremanje svih službenih mjesta na pruzi sustavima koji omogućuju integraciju u višu razinu upravljanja. Dosadašnji sustavi upravljanja željezničkim prometom kao komunikacijski medij koristili su bakrene pružne telekomunikacijske kabele. Pružni telekomunikacijski kabele služe za prijenos telefonskih signala između kolodvora i pružnih pozivnih jedinica, digitalnih signala naprava međukolodvorske zavisnosti i automatskog pružnog bloka kao i za prijenos signala sustava središnjeg daljinskog upravljanja ukoliko su bili instalirani. Ovakav komunikacijski kanal u potpunosti zadovoljava potrebe željezničkog prometa koji se zasniva na odlučivanju u prometu koje izvršava čovjek. Sve vitalne funkcije u odvijanju prometa oslonjene su na čovjeka, strojovođa u potpunosti kontrolira ubrzavanje i kočenje vlaka na osnovi vizualnog opažanja znakova sa signala, reda vožnje i komunikacije s otpravnicima u kolodvorima. Sustav autostop je samo prateći nadzorni sustav koji služi za upozorenja strojovođi o eventualnim propustima i prisilno kočenje u slučaju prolaza kroz crveni signal. Kolodvori su pod stalnim nadzorom otpravnika i uključuju se u automatski daljinski promet samo ukoliko su svi sustavi na dionici potpuno ispravni, u suprotnom otpravnici kolodvora komuniciraju telefonom i lokalno postavljaju putove vožnji u kolodvorima i međukolodvorske zavisnosti. Nove tehnologije industrijskih komunikacijskih mreža i ugrađenih računala zahvaljujući visokoj pouzdanosti mijenjaju dosadašnju filozofiju upravljanja željezničkim prometom tako što omogućuju eliminiranje čovjeka kao slabe karike u procesu odlučivanja u mnogim točkama sustava. Modernizacija željezničke infrastrukture u smislu upravljanja prometom treba podrazumijevati korake koji će kao konačni cilj imati koncept u kojem je čovjek upravljački element sustava a ugrađena računala izvode vitalne sigurnosne operacije. Prva faza u implementaciji treba biti stvaranje visoko pouzdane komunikacijske mreže jer ona predstavlja kralježnicu sustava za upravljanje željezničkim prometom.

2.3.2. Nekompatibilnost europskih signalno-sigurnosnih sustava

Proizvođači željezničke opreme u europskim zemljama razvili su različite signalne sustave tako da je devedesetih godina prošlog stoljeća u Europi postojalo dvadesetak. Razlike su prvenstveno u nosećim frekvencijama signala i prirodi signala koji se prenose. Na primjer, linija 'Thalys' koja spaja Pariz, Brisel, Köln i Amsterdam morala je biti opremljena sa sedam različitih sustava, uključujući specijalne senzore i upravljačke zaslone [6].

2.3.3. Projekt European Rail Traffic Management System (ERTMS)

Brojnost i blizina željezničkih fragmenata u Europi dovela je do potrebe udruživanja snaga zbog iznalaženja zajedničkog rješenja na jedinstvenoj razini. Presudan čimbenik bio je ograničavanje troškova na razvoju, testiranju i validaciji nekompatibilnih sustava koji služe istoj svrsi u zemljama članicama.

Prvi istraživački projekti vezani za novu generaciju signalno-sigurnosnih sustava, u pojedinim zemljama članicama Europske unije, započeti su 90-tih godina. Osnovni cilj istraživanja bio je razviti sustav na platformi digitalnih telekomunikacija koji će omogućiti sigurniji, pouzdaniji i jeftiniji željeznički promet. Pod utjecajem Europske Komisije sva ova istraživanja su koncentrirana u zajednički projekt koji je nazvan ERTMS. ERTMS projekt sastoji se od dvije osnovne komponente [7]:

- GSM-R (*eng. Global System for Mobile Communications - Rail*) je specijalni radio-komunikacijski sustav razvijen za potrebe željeznica. Zasnovan je na standardima GSM mobilne telefonske mreže, ali se koriste druge noseće frekvencije specijalno određene za željeznički promet. Postoji još nekoliko dodatnih funkcija prilagođenih željezničkom prometu, one pružaju mogućnost govorne komunikacije između operatera u vlaku i upravljačko-nadzornih središta željezničkog prometa kao i prijenos maksimalnih dozvoljenih brzina na pojedinim sekcijama do upravljačke kabine vlaka.
- ETCS (*eng. European Train Control System*) je jedinstveni Europski sustav upravljanja i nadzora željezničkog prometa. Ovaj sustav zasniva se na prijenosu podataka o maksimalnim dozvoljenim brzinama do upravljačke kabine vlaka i omogućuje stalan nadzor odziva strojovođe na proslijeđene informacije. Istovremeno, *on-board* računalo stalno vrši usporedbu trenutne brzine vlaka s maksimalnom dozvoljenom brzinom te u slučaju njenog prekoračenja automatski koči vlak.

2.3.4. Europski sustav kontrole vlakova (ETCS)

ETCS sustav jednostavno se može se opisati kao sučelje između fiksne željezničke signalno-sigurnosne opreme i vlakova. Ovim je omogućeno da automatski upravljački sustavi u vlaku stalno imaju podatak o maksimalnoj dozvoljenoj brzini. Za prijenos podataka standardizirani su predajnici koji se nazivaju "Eurobalise". Predajnici Eurobalise postavljaju se na prugama između tračnica i spajaju s postojećim signalno-sigurnosnim uređajima u željeznici.

Zbog održanja pune kompatibilnosti sa svim željezničkim sustavima i zbog toga što je implementacija ovog projekta postupna ETCS sustav je podijeljen u tri osnovne razine. Treba napomenuti i to da je ostavljena mogućnost da vlak koji ima ugrađen ETCS sustav može normalno prometovati željeznicom koja nema implementiran ovaj sustav što se kategorizira kao razina 0.

ETCS - Razina 1

Razina 1 ETCS sustava je kabinski signalni sustav i omogućuje integraciju ETCS uređaja na već postojeći nacionalni signalno-sigurnosni sustav koji ostaje u funkciji. Na ovoj razini na kolosijek se ugrađuju predajnici "Eurobalise" koji uzimaju signale s postojećih kolosiječnih signalnih uređaja preko signalnih adaptera i telegram kodera (LEU - Lineside Electronics Unit) i prenose ih u vlak kao podatke za ovlaštenja kretanja u kojima su sadržane informacije o ruti i fiksnim točkama. Na temelju tih podataka *on-board* računalo stalno prati i preračunava maksimalnu brzinu i krivulju kočenja (funkciju kočenja). Zbog pogrešaka koje se događaju u prijenosu podataka vlak mora prelaziti preko Eurobalise predajnika po redoslijedu kako bi dobio ovlaštenje za daljnje kretanje. S ugradnjom dodatnih predajnika Eurobalise ili s sustavom Euroloop između predsignala i glavnog signala postiže se stalni prijenos.

Sustav Euroloop predstavlja nadogradnju sustava s predajnicima Eurobalise. Fizička razlika je u tome što predajnici Eurobalise pokrivaju kolosijek točkastom strukturom, od točke do točke, tako da ne postoji stalna komunikacija s vlakom koji se kreće tim kolosijekom. Sustav Euroloop podrazumijeva ugradnju vodova koji emitiraju signale duž tračnica tako da se time postiže stalna pokrivenost voznog puta, što povećava sigurnost i pouzdanost prometa.

ETCS - Razina 2

ETCS - Razina 2 je sustav orijentiran na digitalni radio prijenos signala i sustav zaštite vlakova. Ovlaštenja za kretanje i indikacija drugih signala se prikazuju u kabini. Izuzev nekoliko indikatora signala moguće je u kabini potpuno izuzeti indikaciju pružne signalizacije. Točna pozicija svakog vlaka i smjer kretanja se redovno izvještava Radio Blok Centru (RBC) u

pravovremenim intervalima. Kretanje vlaka se redovito nadzire u RBC-u. Ovlaštenja kretanja prenose se stalno do vlaka putem GSM-R-a zajedno s informacijama o brzini i podacima o ruti. Predajnici Eurobalise koriste se na ovoj razini samo kao pasivni pozicijski elementi i imaju ulogu elektroničkih miljokaza. Između dva pozicijska elementa vlak definira svoju poziciju sensorima (osovinskim pretvaračima, mjerачima ubrzanja i radarima). Pozicijski elementi na ovoj razini koriste se kao referentne točke za korekciju udaljenosti koja odstupa od stvarne zbog pogrešaka mjerenja. *On-board* računalo neprestano nadzire prenesene podatke i maksimalnu dozvoljenu brzinu.

ETCS – Razina 3

Koncept razine 3 ETCS sustava bio je zamišljen kao koncept znatno iznad prostog signalno-sigurnosnog upravljanja i navigacije. Fiksni željeznički signalni uređaji više nisu potrebni. Vlakovi svoju poziciju definiraju isto kao u Razini 2 putem senzora. Ovdje se vlaku kao učesniku u prometu daje velika autonomija odlučivanja, zato se posebna pažnja mora posvetiti održanju visoke razine pouzdanosti. Stalnim prijenosom pozicijskih signala vlaka radio blok centru uvijek je moguće odlučiti koja je točka na ruti sigurno čista, tako da se vlaku koji slijedi sigurno može dati ovlaštenje za prolaz tom točkom. Ovakvim načinom upravljanja čiste rute više nisu fiksne željezničke sekcije. Razina 3 je u proteklom periodu bila u fazi razvoja napravljeno je nekoliko eksperimentalnih i testnih projekata na više željezničkih dionica.

2.4. Analiza postojećih signalno-sigurnosnih sustava u željeznici

U proteklim desetljećima relejna tehnika automatskog upravljanja u kombinaciji s ugrađenim računalima je dostigla visok stupanj razvoja u željezničkim sustavima. Razvijeni su specijalni uređaji za napajanja elemenata raspodijeljenih duž pruga, dok se u shemama djelovanja mogu sresti različiti istosmjerni i naizmjenični naponi. Ako se promatra oprema u polju tu nalazimo relejne skupine i njihove provodnike koji se kao slojevi preklapaju ovisno o njihovoj funkcionalnosti i sustavu kojem pripadaju. Cijele logičke strukture ostvarene u relejnoj tehnici i njihove kompleksne sheme djelovanja činile su željezničke sustave automatskog upravljanja veoma zahtjevnim za održavanje i detekciju kvarova.

Logičke strukture oslonjene na relejnu tehnologiju imale su brojna ograničenja prvenstveno u smislu kapaciteta za prijenos i obradu informacija. Zbog toga se kod sustava analiziranih u prethodnim poglavljima može primijetiti da su prioriteti bili ostvarivanje visoke pouzdanosti opreme u polju koja se razvijala za autonomni rad, a da je nadzor stanja opreme i daljinsko upravljanje bilo na minimalnoj razini. Takvi sustavi teško su mogli razlikovati smetnje i kvarove što je za posljedicu imalo prekide automatskog odvijanja procesa i oslanjanje na

telefonsku komunikaciju strojovođe i otpravnika i zastoje koji bi zbog održanja prometne sigurnosti trajali mnogo dulje nego je to zaista bilo potrebno.

Zbog bolje preglednosti u tablici 2.1 usporedno su navedena glavna svojstva postojećih signalno-sigurnosnih sustava. Tablica je načinjena koristeći izvore [3], [4], [5], [6] i [7].

Tablica 2.1. – Komparativni pregled signalno-sigurnosnih sustava.

Sustav	Infrastruktura	Vlak	Komunikacija	Središnji nadzor	Održavanje
Relejni i računalni	Relejni signalni uređaji, skretnice, nadzor odsjeka	Sustav autostop	Bakreni i svjetlovodni kabeli	Stanje signala, zauzetost odsjeka	Ograničen broj smetnji i kvarova
ETCS 1	Elektronički signalni uređaji, skretnice, Eurobalise	Eurobalise, točkasti nadzor brzine, pozicija vlaka	Eurobalise infrastruktura-vlak, bakreni i svjetlovodni kabeli	Stanje signala, zauzetost odsjeka	Ograničen broj smetnji i kvarova
ETCS 2	Radio blok centar, elektronički signalni uređaji, skretnice, Eurobalise	GSM-R	GSM-R	Periodni signali o brzini i poziciji vlaka, stanje signala, zauzetost odsjeka	Signalizacija većeg broja smetnji i kvarova
ETCS 3	Radio blok centar, skretnice, središnje upravljanje prometom.	GSM-R	GSM-R	Kontinuirani nadzor kretanja vlakova	Signalizacija većeg broja smetnji i kvarova

Usporedbom lokalnih signalno-sigurnosnih pravilnika [2,8] i ETCS [7] pravilnika dolazi se do zaključka da je za postojeće željezničke linije isključivo primjenjiva implementacija sustava ETCS 1, jer su postojeće pruge građene za maksimalne brzine do 160 km/h, pri čemu su stvarne brzine mnogo niže. Implementacija sustava ETCS 2 i ETCS 3 je primjenjiva na nove željezničke linije za velike brzine, gdje ne mogu prometovati pružna vozila s ljudskim upravljanjem i gdje su projektirane brzine preko 250 km/h pri čemu se potpuno eliminira čovjek kao element za odlučivanje u sustavu upravljanja. Preduvjet za implementaciju tih sustava je izgradnja nove građevinske infrastrukture za velike brzine bez križanja s cestovnim prometom u razini.

Prema tomu, najveći dio postojećih pruga ostao bi u tehnološkom procjepu, jer je nemoguće izvršiti građevinske rekonstrukcije koje bi svojstva pruga prilagodile brzinama preko 160 km/h a isto tako nije moguće ukinuti sve cestovne prijelaze u razini. S druge strane standard ETCS 1 u smislu komunikacije infrastruktura-vlak, središnjeg nadzora i održavanja je prilično ograničeno rješenje koje ne nudi veliki iskorak na polju povećanja sigurnosti, upravljanja i komfora. Ideja ovoga rada je razvoj kibernetičko-fizikalnog modela koji je uz potporu suvremenih bežičnih mreža primjenljiv upravo na postojeće pruge. To bi značilo da je

moгуće otvaranje investicija u sferi signalno-sigurnosne i komunikacijske opreme bez većih građevinskih zahvata na prugama a koje bi za rezultat imale osjetno povećanje sigurnosti prometa, suvremeno upravljanje vlakovima, brži promet te učinkovito i brzo održavanje sustava. Isto tako otvaraju se brojne mogućnosti za implementaciju novih patenata i sustava u željeznicama kao što su: komunikacija sustava upravljanja sa svim učesnicima u prometu, osiguranje i manje frekventnih cestovnih prijelaza, komunikacijska sučelja stroj-stroj i sl. Kibernetско-fizikalni model općenito predstavlja integraciju povezanih računalnih i fizičkih procesa.

Kibernetско-fizikalni pogled na željezničku signalno-sigurnosnu infrastrukturu omogućuje stvaranje sklopovske neovisnosti za elemente sustava i korištenje univerzalnih sklopovskih rješenja. Ovo je značajna promjena u odnosu na prethodne sustave zbog veće fleksibilnosti sustava. Također, naprave sustava postaju dostupne u oblaku računala, što omogućuje sveobuhvatniju integraciju elemenata, smanjenje postojećih složenih sustava i centralizaciju prema jedinstvenom upravljačkom središtu. Siemens Mobility i ÖBB-Infrastruktur AG u studenom 2020. pustili su u rad prvi sklopovski neovisan signalno-sigurnosni sustav jednog kolodvora centraliziran u oblaku računala. Navedeni signalno-sigurnosni sustav testiran je za sigurnosnu razinu SIL4 (Safety Integrity Level 4) koja se temelji na standardu IEC 61508 i povezan je na COTS (*eng. Commercial Off The Shelf*) sklopovlje. Stoga se smatra međunarodnim pilot, referentnim projektom. Glavne prednosti ove implementacije su bolja isplativost i fleksibilno održavanje sustava. Osim toga, sustav doprinosi održivosti, osiguravajući uštede u smislu prostora i energije u usporedbi s postojećim sustavima [9]. Prema istom pristupu implementiranom u spomenutom projektu za jedan željeznički kolodvor, u ovom radu je simuliran kibernetско-fizikalni model za širu željezničku signalno-sigurnosnu infrastrukturu. Isti pristup prepoznat je u smislu opreme za signalizaciju koja je prilagođena pohrani u računalnom oblaku kao i stvaranju jedinstvenog, nadogradivog središnjeg programa. Uspješna provedba projekta za jedan kolodvor i postizanje razine sigurnosti sustava SIL4 argument je više za izvedivost transformacije signalno-sigurnosnog sustava šire željezničke mreže u jedinstveni kibernetско-fizikalni sustav.

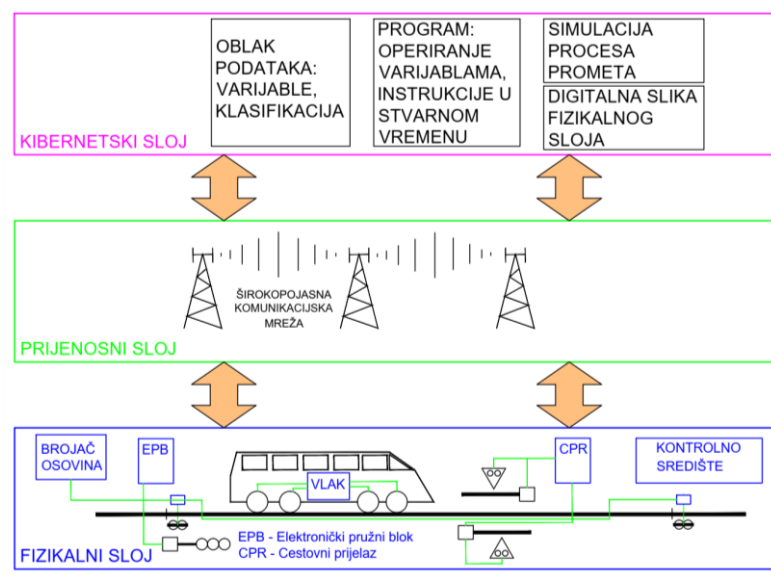
3. KIBERNETSKO-FIZIKALNI MODEL SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNICE

Kibernetско-fizikalni model [10] željeznice predstavlja novi globalni pogled na sve njene pripadajuće sustave i elemente. Zbog potrebe funkcionalne integracije različitih lokalnih signalno-sigurnosnih podsustava u jedinstven model u ovom poglavlju će prvo biti analizirani i tehnički unaprijeđeni elementarni signalno-sigurnosni podsustavi. Takav pristup će prvo poboljšati funkcionalnost i pouzdanost na najnižoj razini, a potom omogućiti gradnju jedinstvenog modela koji treba da promijeni dosadašnje principe prometovanja na prugama u smislu centralizacije prikupljanja i obrade podataka.

3.1. Prikaz kibernetско-fizikalnog modela putem slojeva

Slojeviti prikaz kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava željeznice vidljiv je na slici 3.1. Tri sloja grade model željezničkog signalno-sigurnosnog sustava: fizikalni, prijenosni i kibernetско.

U nastavku su slojevi prikazani na slici 3.1 opisani u tri koraka izgradnje kibernetско-fizikalnog modela. Na temelju iskustva stvarnih sustava i zbog potrebe funkcionalne integracije različitih lokalnih podsustava u jedinstven model, prvi korak je nadogradnja elementarnih signalnih podsustava (napojni blokovi, signali, skretnice, središnje upravljanje prometom, cestovni prijelazi u razini, vlakovi) [3,4]. Takav pristup će najprije poboljšati funkcionalnost i pouzdanost na opremi u polju, a potom omogućiti izgradnju fizičkog sloja modela koji bi trebao promijeniti dosadašnje principe željezničkog prometa u smislu centraliziranog prikupljanja i obrade podataka.



Slika 3.1. – Slojevi kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava željeznice

Drugi korak je stvaranje visoko pouzdane komunikacijske mreže s visokom razinom pouzdanosti, jer ona kao prijenosni sloj predstavlja kralježnicu modela. Razina prijenosa oslanja se na suvremene principe bežičnih komunikacijskih mreža temeljenih na 5G standardu [11], bez ograničenja u korištenju bežičnih mreža temeljenih na nekim drugim konceptualno sličnim mrežnim standardima. Nova generacija komunikacijskih mreža mora omogućiti vrlo velike brzine prijenosa i značajno povećanje propusnosti kako bi se postigao pouzdan prijenos signala. Druga važna značajka novih mreža je osiguravanje neprekinutog povezivanja uređaja na bilo kojem mjestu i za bilo koju koncentraciju uređaja. Treći korak je stvaranje kibernetskog sloja koji se sastoji od odgovarajućih računalnih resursa i programskih rješenja. Kibernetški sloj omogućuje pouzdanu i točnu obradu ulaznih podataka u stvarnom vremenu tako da svi elementi sustava i korisnici imaju pristup ispravnim izlaznim podacima prema kojima se poduzimaju ispravne radnje u procesima sustava. Stoga je iznimno važno kreirati kvalitetna programska rješenja kroz koja će se poboljšanja u fizičkom, komunikacijskom i prijenosnom sloju iskoristiti na najbolji mogući način. Samo kvalitetnim projektiranjem i izradom sva tri sloja (fizički, prijenosni, kibernetški) moguće je promatrati signalno-sigurnosni sustav željeznice kao jedinstven kibernetško-fizikalni model.

3.2. Izmjene postojećeg signalno-sigurnosnog sustava u fizičkom sloju

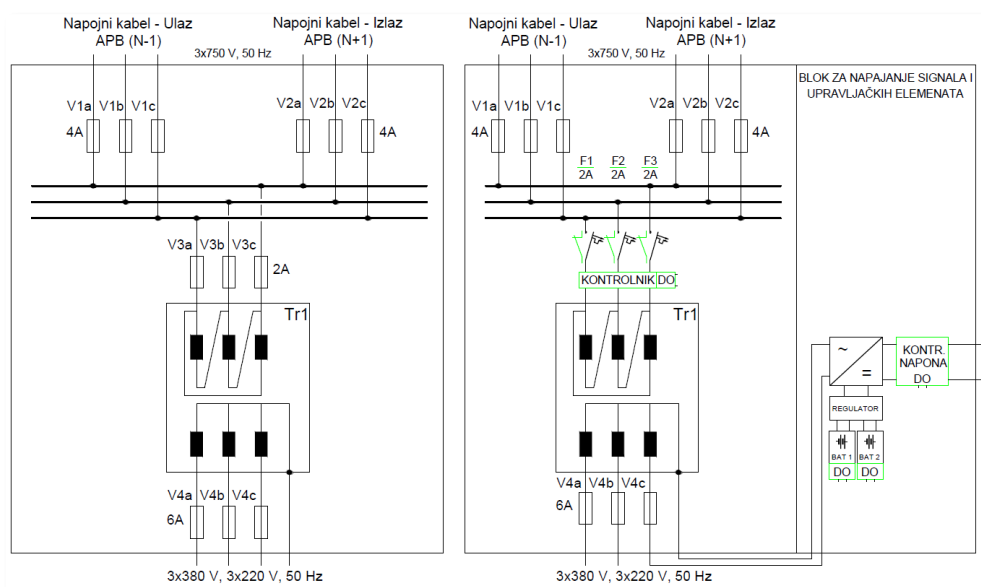
Kvaliteta novog modela i prednosti koje treba ostvariti u najvećoj mjeri ovise o mogućnostima koje pružaju elementi u polju, odnosno u fizičkom sloju. Funkcionalna svojstva postojećih temeljnih sustava željeznice (napajanja, signalizacije, pogona, kočionih sustava i sl.) su provjerene i takvi sustavi važe za visoko pouzdane. Ipak, suvremene tehnologije nude mogućnost njihove nadogradnje u cilju boljeg nadzora stanja pri čemu se vrijeme za otklanjanje kvarova (*Mean Time to Repair* - MTTR) može značajno smanjiti. U ovom poglavlju su dani prijedlozi za unaprjeđenje željezničkih sustava koji se zadržavaju na temelju njihovih funkcionalnih shema i principa rada. Nova rješenja zasnovana su na ugradnji mikroracunala koji mijenjaju relejnu logiku i dodatnih naprava koje omogućuju nadzor stanja u kritičnim točkama sklopova. Tako je omogućena izrada sučelja i definiranje varijabli za djelovanje u kibernetskom dijelu željezničkog signalno-sigurnosnog modela.

3.2.1. Nadogradnja sustava za napajanje

Glavni sustav za napajanje duž pruge može se zadržati od relejnih sustava bez obzira na ranije primijenjenu prijenosnu naponsku razinu [3]. Međutim, za napajanje novih podsustava bit će potrebno mnogo manje naponskih izlaza transformatora jer se naponska

razina za potrebe elektroničke opreme može standardizirati na 24 V DC. Izlaz za napajanje klasičnih žarulja od 48 V 50 Hz ili 24/18 V 50 Hz više neće biti potreban jer se LED žarulje napajaju istosmjernim naponom. Primjena računalnih tehnologija u velikoj mjeri će pojednostaviti napojne uređaje APB sustava. Veliki udio u povećanju ukupne pouzdanosti sustava donose mogućnosti za nadzor nad napojnim uređajem. Stoga se u dijelu sučelja za kontrolu stanja napojnog bloka predviđa kontrola napona u više točaka kako bi se iz centra za daljinsku kontrolu mogli preciznije detektirati kvarovi ili smetnje.

Kvalitativna svojstva modificiranog napojnog uređaja APB-a mogu se prikazati kao na slici 3.2 [3] gdje je su usporedno postavljene sheme standardnog i modificiranog napojnog uređaja. Na lijevom dijelu slike prikazana je shema standardnog napojnog uređaja u koji su ugrađeni samo elementi električne zaštite dok kontrola stanja sklopa nije uopće razmatrana. Obzirom da je napojni uređaj od vitalne važnosti za funkcioniranje sustava veoma je važno nadograditi napojni uređaj elementima koji će omogućiti njegovu integraciju u sustav daljinske kontrole. Modifikacija napojnog uređaja predviđa se i na primarnoj i na sekundarnoj strani kako bi se ostvarila visoka razina kontrole njegovog stanja. Na primarnoj strani topljivi osigurači mijenjaju se automatskim s elementom za signalizaciju okidanja. Predlaže se ugradnja jednopolnih osigurača za svaku fazu umjesto trojnih jer će se tako detektirati kvar na svakoj fazi dok druge dvije mogu ostati u normalnom radu. Poslije osigurača ugrađuje se kontrolnik ulaznog napona koji daje signal neispravnog napona na ulazu. Blok za napajanje signala i upravljačkih elemenata napaja se s jedne faze na sekundaru ostale dvije faze koriste se za opća trošila u kućici APB-a i njihova kontrola se ne tretira jer nije značajna za rad sigurnosnog sustava. Ispravljač transformira napon 230 V AC na 24 V DC.



Slika 3.2. – Lijevo – standardni napojni uređaj SEL-Iskra SbL5, desno – modificirani napojni uređaj

Rezervno napajanje i stabilizacija napona se osigurava iz akumulatorskih baterija 1 i 2. Regulator baterijskog napajanja tretira baterije kao redundantne izvore tj. u normalnom radu koristi energiju iz jedne a u slučaju kvara te grane uključuje drugu granu kao rezervno napajanje. Unaprijeđenje sustava rezervnog napajanja ostvaruje se ugradnjom akumulatorskih baterija koje imaju signalizaciju stanja što je veoma koristan signal za proces održavanja jer se mogu poduzeti preventivne akcije zamjene dotrajalih baterija. Na izlazu iz ispravljača ugrađuje se kontrolnik istosmjernog napona koji sustavu javlja pogrešku u slučaju odstupanja od nominalne naponske razine. Signali za sučelje modificiranog napojnog bloka sa sustavom daljinske kontrole prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. – Signali modificiranog napojnog uređaja za računalno sučelje

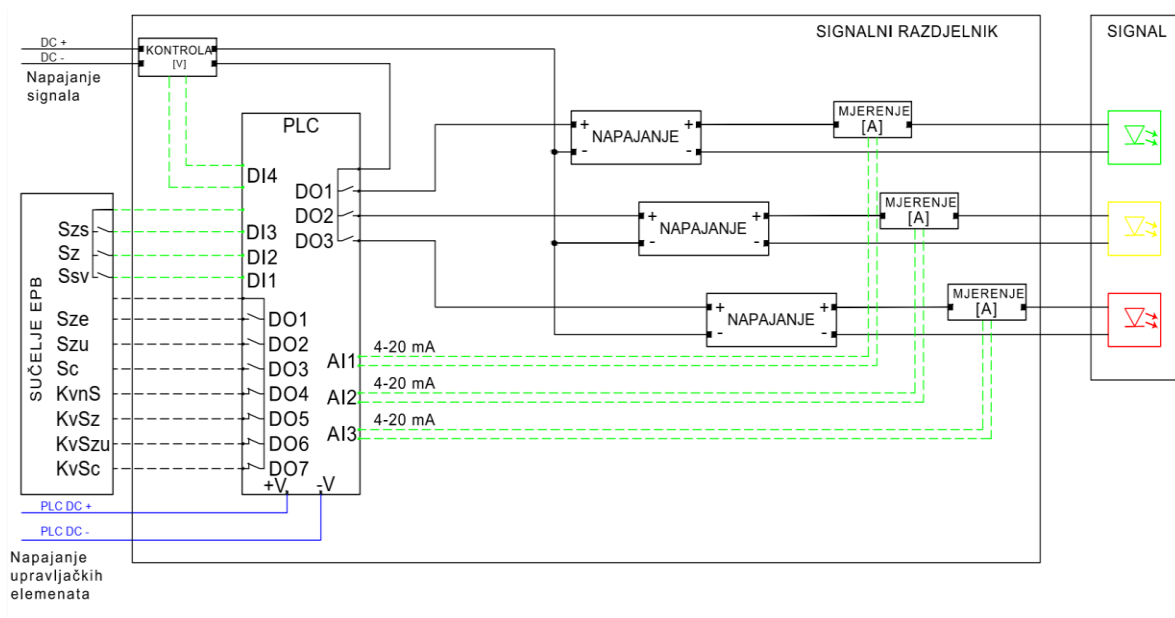
Redni broj	Opis	Oznaka	Vrsta signala
1	Prorada strujne zaštite na fazi L1 – strana primara 750 V AC	KvIL1	DO
2	Prorada strujne zaštite na fazi L2 – strana primara 750 V AC	KvIL2	DO
3	Prorada strujne zaštite na fazi L3 – strana primara 750 V AC	KvIL3	DO
4	Neispravan napon na primaru	KvNP	DO
5	Baterija 1 u kvaru	KvB1	DO
6	Baterija 2 u kvaru	KvB2	DO
7	Neispravan napon izlaza 24 V DC	KvNI	DO

3.2.2. Nadogradnja signalnog uređaja

U željezničkim signalima kao izvori svjetla koriste se specijalno izrađene žarulje i optički sustavi kojima se postiže usmjerenje svjetlosnog snopa i bolja učinkovitost svjetlosnog izvora [4]. Svjetlosni signali u željeznicama su u trajnom radu stoga je važno minimizirati njihovu potrošnju energije. U klasičnim sustavima principi detekcije kvara žarulje u signalu su realizirani neizravnim principima prema kojima se kao posljedica pregaranja zelene ili žute žarulje aktiviraju signali zabrane kretanja ili se u suvremenijim relejnim rješenjima prosljeđuje neizravni signal kvara do kolodvorske postavnice. Posljednjih godina dogodila se ekspanzija u razvoju LED izvora svjetlosti koji nezaustavljivo mijenjaju klasične izvore svjetlosti u svim oblastima od signalizacije do općih sustava za osvjetljenje. Dok je kod postojećih signalizacijskih sustava osnovni problem bio razviti optičke sustave koji će koncentrirati raspršenu svjetlost u uski usmjereni snop kod LED izvora svjetlost je usmjerena i različite karakteristike osvjetljenja se postižu različitim rasporedom mnogobrojnih LED izvora i njihovih optičkih leća. Ovo svojstvo donosi značajnu prednost za implementaciju LED izvora u sustavima signalizacije. Kod LED izvora svjetlosti potrebna boja se postiže izravno u izvoru, nije potreban filter. Utrošak energije je značajno niži nego kod klasičnih

žarulja. Za implementaciju LED izvora u signalima potrebno je promijeniti koncept upravljanja i napajanja što može biti iskorišteno za tehničko unaprjeđenje signala kao krajnjeg elementa sustava. Iz opisa postojećih APB sustava vidljivo je da signali izvedeni u relejnoj tehnici su dio sustava koji predstavlja ograničenje u smislu upravljanja i kontrole jer se informacije o stanju signala dobivaju neizravno što može dovesti do otežane detekcije kvara i povećanja vremena otklanjanja kvara (MTTR).

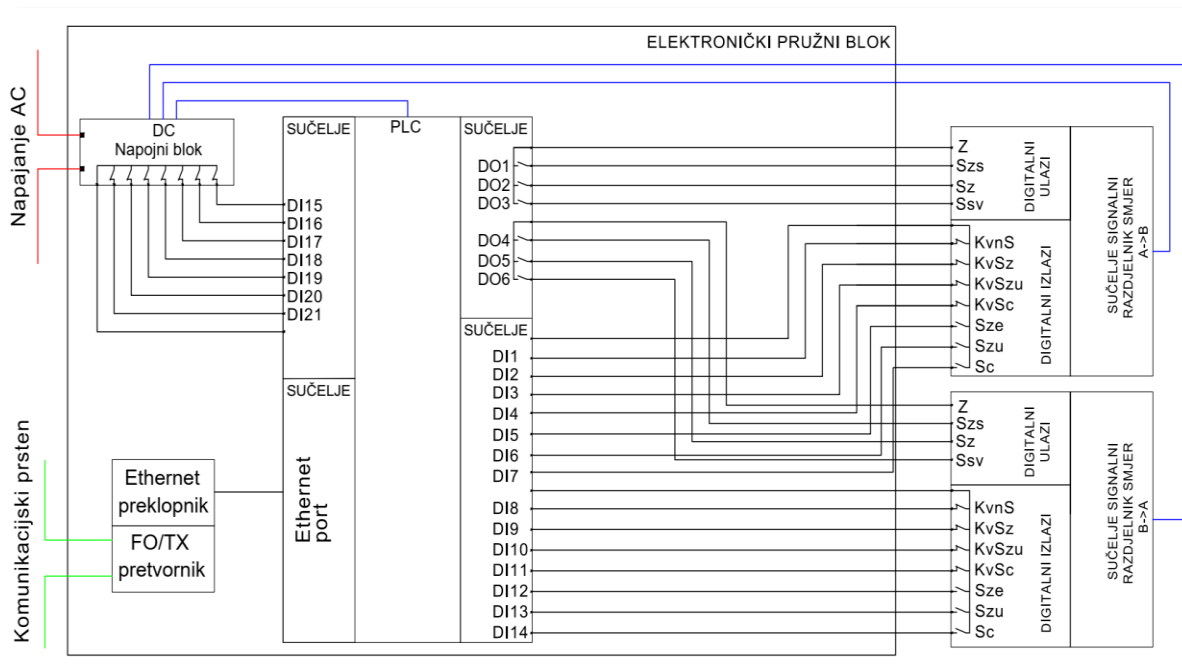
Na slici 3.3 prikazana je shema signalnog razdjelnika s ugrađenim računalom. Signalni razdjelnik povezan je sa sučeljem elektroničkog pružnog bloka. Ulazni signali za izvršenje algoritma aktivacije zelenog, žutog i crvenog znaka su: signal smjera vožnje (Ssv), signal zauzetosti odsjeka (Sz) i signal zauzetosti sljedećeg odsjeka (Szs). Napajanje signalnih znakova izvedeno je kao poseban strujni krug čiji se napon kontrolira elektroničkim sklopom spojenim na četvrti digitalni ulaz računala. Stalna kontrola ispravnosti znakova vrši se mjerenjima struje na izlazu napojnih uređaja za svaki znak pojedinačno. Analogni signali mjerenja struje znaka povezani su na analogne ulaze računala. Za ove ulaze algoritmom se postavlja prag za signalizaciju kvara LED znaka koji se prelazi u slučaju kada je struja manja za 50 % od nominalne vrijednosti. Usporedbom signala ispravnosti ulaznog napona i signala razine izlazne struje LED znakova postiže se potpuni nadzor stanja signala kao i preventivna signalizacija dotrajalosti LED svjetlosne skupine.



Slika 3.3. – Shema signalnog razdjelnika s ugrađenim računalom

3.2.3. Elektronički pružni blok

Iz prethodne analize jasno je da jedan pružni odsjek grade tri računalna podsustava: napojni uređaj, sklop signala za smjer A->B i sklop signala za smjer B->A. Integracija ovih sustava bit će izvedena u elektroničkom pružnom bloku. Arhitektura elektroničkog pružnog bloka prikazana je na slici 3.4.



Slika 3.4. – Shema elektroničkog pružnog bloka s ugrađenim računalom

Dvije su osnovne skupine signala koje procesira EPB: digitalni I/O signali podsustava u polju i I/O signali višeg hijerarhijskog sloja sustava koji se prijenose komunikacijskom ethernet mrežom kao varijable.

Za izgradnju kvalitetnog sustava upravljanja važno je već u ranoj fazi razvoja projekta definirati semantiku varijabli. Označavanje varijabli bi zbog jednostavnije reprezentacije trebalo biti kratko ali s druge strane gledano zbog lakšeg snalaženja u programskom kodu kao i kod vizualizacije na sučeljima varijabla bi trebala sadržavati minimum simbola koji je jasno određuju. Kod željezničkog sustava APB-a projektom se definiraju oznake signala, EPB jedinica, kolodvora i smjera vožnje stoga će se semantika varijabli, pored oznake svoje osnovne namjene, uvijek vezati i za lokalnu oznaku elementa ili podsustava u polju. Tako će se u programskom kodu iz naziva varijable moći odrediti njeno svojstvo i fizička pozicija u sustavu. U nastavku su navedene neke svojstvene varijable:

- Varijabla KvZu_S2.B prema definiranom označavanju određuje kvar žutog znaka na signalu 2 za smjer vožnje prema kolodvoru B.

- Varijabla C_S1.A je signal stanja crvenog znaka na signalu 1 za smjer vožnje prema kolodvoru A.
- Varijabla KvIL2_NB2 određuje kvar prorade strujne zaštite na fazi L2 napojnog bloka broj 2.

Veze između ulaza i izlaza ugrađenih računala i programskih varijabli prikazane su u tablicama 3.2, 3.3 i 3.4.

Tablica 3.2. – Ulazi elektroničkog pružnog bloka broj 2 (EPB 2)

Ulazni signali – Iz podsustava polja		
Ulaz	Opis	Oznaka
DI 1	Kvar napajanje signala 2.B	Kvn_S2.B
DI 2	Kvar zeleni znak signala 2.B	KvZ_S2.B
DI 3	Kvar žuti znak signala 2.B	KvZu_S2.B
DI 4	Kvar crveni znak signala 2.B	KvC_S2.B
DI 5	Zeleni znak na signalu 2.B	Z_S2.B
DI 6	Žuti znak na signalu 2.B	Zu_S2.B
DI 7	Crveni znak na signalu 2.B	C_S2.B
DI 8	Kvar napajanje signala 1.A	Kvn_S1.A
DI 9	Kvar zeleni znak signala 1.A	KvZ_S1.A
DI 10	Kvar žuti znak signala 1.A	KvZu_S1.A
DI 11	Kvar crveni znak signala 1.A	KvC_S1.A
DI 12	Zeleni znak na signalu 1.A	Z_S1.A
DI 13	Žuti znak na signalu 1.A	Zu_S1.A
DI 14	Crveni znak na signalu 1.A	C_S1.A
DI 15	Kvar faza L1 – primar transformatora	KvIL1_NB2
DI 16	Kvar faza L2 – primar transformatora	KvIL2_NB2
DI 17	Kvar faza L3 – primar transformatora	KvIL3_NB2
DI 18	Kvar napon na primaru	KvNP_NB2
DI 19	Kvar Baterija 1	KvB1_NB2
DI 20	Kvar Baterija 2	KvB2_NB2
DI 21	Kvar napon izlaza 24 V DC	KvNI_NB2

Tablica 3.3 – Izlazi elektroničkog pružnog bloka broj 2 (EPB 2)

Izlazni signali – Upravljanje podsustavima polja		
Izlaz	Opis	Oznaka
DO 1	Signal – zauzet sljedeći odsjek	Szs1
DO 2	Signal – zauzet odsjek	Sz1
DO 3	Signal smjera vožnje A->B	Ss1
DO 4	Signal – zauzet sljedeći odsjek	Szs2
DO 5	Signal – zauzet odsjek	Sz2
DO 6	Signal smjera vožnje B->A	Ss2

Tablica 3.4. – Ulazne varijable za EPB-ove iz brojača osovina i kolodvorskih uređaja i izlazne varijable EPB 2

Broj	Opis	Oznaka
Ulazne varijable za upravljanje BO-A -> EPB		
UV 01	Varijabla – Zauzet odsjek 1	v_zauzet_1
UV 02	Varijabla – Zauzet odsjek 2	v_zauzet_2
UV 03	Varijabla – Zauzet odsjek 3	v_zauzet_3
Ulazne varijable za upravljanje BO-B -> EPB		
UV 04	Varijabla – Zauzet odsjek 4	v_zauzet_4
UV 05	Varijabla – Zauzet odsjek 5	v_zauzet_5
UV 06	Varijabla – Zauzet odsjek 6	v_zauzet_6
Ulazne varijable za upravljanje – Kolodvorski uređaji -> EPB		
UV 07	Varijabla smjera A->B	v_smjer_A-B
IV 08	Varijabla smjera B->A	v_smjer_B-A
IV 09	Varijabla - Zauzet odsjek kolosijek A	v_zauzet_KA
IV 10	Varijabla - Zauzet odsjek kolosijek B	v_zauzet_KB

Varijable za kontrolu zauzetosti odsjeka iz brojača osovina koji su ugrađeni u kolodvorima A i B kao i varijable za kontrolu smjera vožnje i kontrolu zauzetosti kolodvorskih kolosijeka su raspodijeljene na cijeli sustav upravljanja. U svakom EPB-u je programski definirano koje od zajedničkih varijabli su dio njegovog algoritma. Izlazne varijable EPB-a su jedinstvene za svaki EPB i u svom nazivu nose lokalnu oznaku. Na taj način središnje sučelje za nadzor ima signale stanja za lokalne elemente u polju čime je stvoren preduvjet za izgradnju kvalitetne vizualizacije sustava APB-a. U ovom primjeru prikazane su varijable za EPB-2 koji upravlja radom signala S1.A i S2.B. Analogno su definirane i varijable za ostale EPB-ove predstavljene na blok shemi sa slike 3.4.

3.2.4. Tehničko rješenje središnje kontrole odsjeka

Brojači osovina izrađeni kao raspodijeljeni računalni sustavi u kombinaciji s modernim induktivnim sensorima kotača su superiorno tehničko rješenje za kontrolu zauzetosti odsjeka u odnosu na rješenja s izoliranim tračnicama. Induktivni senzori kotača su galvanski neovisni o pružnoj infrastrukturi tako da ne postoje problemi promjena vodljivosti uslijed atmosferskih utjecaja ili različitih uvjeta okruženja (čelični mostovi, vlažni tuneli i slično) koji su nastajali kod izoliranih odsjeka. Induktivni senzori kotača pouzdano rade i kada su montirani udaljenostima do nekoliko desetina kilometara od brojača osovina tako da nije potreban poseban sustav za napajanje senzora duž pruge. Prema prosječnim udaljenostima između kolodvora na regionalnim prugama moguće je pokriti sve međukolodvorske dionice ugradnjom središnjih jedinica brojila osovina u kolodvorima.

Sustav za kontrolu odsjeka s brojačima osovina sastoji se iz tri dijela unutarnjeg uređaja, vanjskih uređaja i prijenosne instalacije.

Unutarnji uređaj brojača osovina sadrži procesorski modul koji se izvodi u konfiguraciji tri operativna mikroracunala i jedan dijagnostički za obradu signala smjera, smetnji i kvarova. Na svakom od tri operativna mikroracunala izvršava se sigurnosni program i paralelno se obrađuju informacije iz senzora, vrši se brojanje osovina i kao rezultat na izlazima se daje signal o zauzetosti odsjeka. Izlazne informacije o zauzetosti daju se na relejnim izlazima načelom većinskog odlučivanja 2 od 3. Komunikacija procesorske jedinice s vanjskim računalima (računalo održavanja ili modem za daljinski prijenos) ostvaruje se preko serijskog sučelja RS232. U unutarnji uređaj ugrađuju se i elektroničke jedinice za napajanje i konverziju signala s induktivnih senzora. Za svaki induktivni senzor instalira se po jedna elektronička jedinica koja napaja jednu brojačku točku i prilagođava signal s brojačke točke središnjem procesorskom modulu. Napojne kartice uređaja služe za glavno napajanje, stabilizaciju i zaštite.

Vanjski uređaji su elementi koji se montiraju na svakoj brojačkoj točki. Svaka brojačka točka ima induktivni dvokanalni senzor kotača koji se montira uz unutarnji rub tračnice i kontrolni elektronički sklop koji se montira u kutiji uz kolosijek, slika 3.5.



Slika 3.5. – a. Induktivni senzor kotača b. Montirana kutija elektroničkog kontrolnog sklopa c. Komponente elektroničkog kontrolnog sklopa [12]

Senzor kotača ZK24-2 sastoji se od dva neovisna senzorska sustava. Senzor je povezan s elektroničkim kontrolnim sklopom četvorožično pri čemu svaki kanal koristi dvije žile. Izlazni signal svakog detekcijskog kruga je istosmjerna struja koja može biti u dva diskretna stanja: 16 mA ili 10 mA. Prespojna kutija u kojoj se nalazi elektronički kontrolni sklop mora biti opremljena modulom za zaštitu od prenapona zbog utjecaja grmljavine ili drugih neizravnih izvora. Neovisni integrirani senzorski sustavi omogućuju detekciju smjera kretanja jer se zbog različite uzdužne pozicije senzora javlja vremensko kašnjenje između impulsa koje stvara nailazak kotača.

Najveći problemi kod relejnih raspodijeljenih sustava bili su: slabljenje pri prijenosu analognih signala na daljinu, pojava fantomskih signala uslijed kvarova na instalacijama, trajnost baterija i pouzdanost raspodijeljenih sustava za napajanje te visoka investiciona vrijednost pri instaliranju odvojene komunikacijske i napojne instalacije duž pruge. Razvojem računalnih sustava brojača osovina s pojačavačkim elektroničkim karticama koje putem postojećeg pružnog bakrenog kabela preko samo jedne parice omogućuju istovremeno napajanje, prijenos signala i kontrolu ispravnosti senzora, otklonjeni su svi tehnički nedostaci ranije primjenjivanih sustava za detekciju vlaka. Važna prednost sustava s računalnim brojačem osovina je jednostavna primjena na postojeće pruge jer nije potrebna nova prijenosna i napojna instalacija. Svojstva uređaja omogućuju izradu sustava za detekciju vlaka koji je višestruko pouzdaniji od sustava s izoliranim odsjecima, ekonomičniji za održavanje pri čemu je i mogućnost sabotaze na sustavu smanjena jer postoji kontrola ispravnosti svake brojačke točke. Veze između ulaza i izlaza brojača osovina i programskih varijabli su prikazane u tablicama 3.5 i 3.6.

Tablica 3.5. - Ulazne i izlazne varijable brojača osovina BO1

Izlaz	Opis	Oznaka
Izlazne varijable stanja BO 1 -> Oblak stanja opreme u polju		
1	BO1 Zauzet odsjek 1	Z_Odsjek.1
2	BO1 Zauzet odsjek 2	Z_Odsjek.2
3	BO1 Zauzet odsjek 3	Z_Odsjek.3
Izlazne varijable kvara BO 1 -> Oblak ispravnost opreme u polju		
4	BO1 Kvar	Kv_BO.1
5	BO1 Smetnja	Sm_BO.1

Tablica 3.6. - Ulazne i izlazne varijable brojača osovina BO2

Izlaz	Opis	Oznaka
Izlazne varijable stanja BO 2 -> Oblak stanja opreme u polju		
1	BO2 Zauzet odsjek 4	Z_Odsjek.4
2	BO2 Zauzet odsjek 5	Z_Odsjek.5
3	BO2 Zauzet odsjek 6	Z_Odsjek.6
Izlazne varijable kvara BO 2 -> Oblak ispravnost opreme u polju		
4	BO2 Kvar	Kv_BO.2
5	BO2 Smetnja	Sm_BO.2

3.2.5. Unaprjeđenje cestovnih prijelaza u razini pruge

Cestovni prijelazi u razini pruge su kritična mjesta u prometu na kojima se često događaju nesreće. Osiguranje cestovnih prijelaza temelji se na mehaničkoj zaštiti u obliku rampi i svjetlosnim i zvučnim upozorenjima za učesnike u cestovnom prometu. Osiguranje

cestovnog prijelaza aktivira se nailaskom vlaka na specijalne kontakte postavljene na tračnicama na projektiranoj udaljenosti. Ipak, prepoznaju se dva osnovna nedostatka ovih sustava. Prvi je nepostojanje pouzdane informacije u lokomotivi o stanju prijelaza i nemogućnost detektiranja prepreke u zoni prijelaza. Novi model sustava omogućuje prijenos informacije o stanju aktivnosti prijelaza (uključen/isključen) kao i o stanju kvara i smetnje u stvarnom vremenu i u lokomotivu i u središte za upravljanje. Sigurnost prometa se povećava uvođenjem suvremenog sustava za detekciju prepreke u zoni prijelaza čime se omogućuje pravovremeno zaustavljanje vlaka ukoliko dođe do zaobilaženja mehaničkih prepreka u aktivnom stanju prijelaza.

U tablici 3.7 prikazane su varijable suvremenog modela cestovnog prijelaza u razini.

Tablica 3.7. – Ulazne i izlazne varijable uređaja cestovnog prijelaza

Izlaz	Opis	Oznaka
Izlazne varijable stanja CPR 1 -> Oblak stanja opreme u polju		
1	CPR 1 Uključen	CPR_ON.1
2	CPR 1 Isključen	CPR_OFF.1
3	CPR 1 Detekcija prepreke u zoni	Prepreka_CPR.1
Izlazne varijable kvara CPR 1 -> Oblak ispravnost opreme u polju		
4	CPR 1 Kvar	Kv_CPR.1
5	CPR 1 Smetnja	Sm_CPR.1

3.2.6. Integriranje vlaka u kibernetско-fizikalni model

U dosadašnjim sustavima upravljanja vlak je tretiran kao pasivni element koji aktivira određene senzore na kolosijecima. Sve akcije na kretanje vlaka ovisile su isključivo o strojovođi i njegovoj vizualnoj percepciji. Izuzetak je samo automatsko djelovanje sustava autostop koji nije djelovao u uvjetima normalne vožnje nego samo u kritičnoj situaciji prolaza pored crvenog signala. Ovakvi sustavi su razvijani prvenstveno zbog toga što se do sada tehnološki nije moglo osloniti na pouzdan prijenos signala između vlaka i infrastrukture. Novi komunikacijski standardi neće imati ograničenja u brzini i pouzdanosti bežičnog prijenosa signala, stoga se predloženim modelom otvara novi potpuno novi pogled na vlak kao najvažniji element prometa. Prema analizama postojećih sustava i iskustvima u upravljanju vlakova u tablici 3.8. bit će definirane varijable koje će omogućiti kvalitetna sučelja za upravljanje vožnjama i preventivne detekcije smetnji i kvarova na kritičnim mjestima vlaka.

Tablica 3.8. – Ulazne i izlazne varijable vlaka kao aktivnog elementa u procesu

Izlaz	Opis	Oznaka
Izlazne varijable stanja Vlaka -> Oblak Vlaka		
1	Broj vlaka	Broj_Vlaka
2	Oznaka vožnje	Oznaka_Voznje
3	Brzina vlaka	Brzina_Vlaka
4	GPS pozicija vlaka	Pozicija_Vlaka
5	Kvar na pogonu vlaka	Kv_Pogon_Vlaka
6	Smetnja na pogonu vlaka	Sm_Pogon_Vlaka
7	Kvar na kočionom sustavu vlaka	Kv_Kocnice_Vlaka
8	Smetnja na kočionom vlaka	Sm_Kocnice_Vlaka
9	Kvar na kotačima vlaka	Kv_Kotaci_Vlaka
10	Smetnja na kotačima vlaka	Sm_Kotaci_Vlaka

3.3. Prijenosni sloj razmatranog modela

Industrija 4.0 [13,14] predstavlja koncept koji će u mnogome biti ovisan od kvaliteta komunikacijske mreže. Iz tog razloga stvaranje visoko pouzdane komunikacijske mreže treba biti prioritet jer ona predstavlja kralježnicu djelovanja Industrije 4.0. Jedan od komunikacijskih standarda koji se razvija paralelno s Industrijom 4.0 koji treba omogućiti pouzdanu bežičnu komunikaciju naziva se 5G standard [15,16]. 5G standard nije samo modifikacija postojećeg 4G standarda nego donosi značajnije promjene u odnosu na dosadašnje komunikacijske koncepte. Nagli porast uređaja koji su povezani na internet mrežu doveo je do brojke od oko 7 milijardi povezanih uređaja. Povećanje broja korisnika i njihovih zahtjeva za brzinom i kapacitetom kanala rezultira zaključkom da postojeća komunikacijska infrastruktura neće moći zadovoljiti nadolazeće potrebe. Stoga je Međunarodna komunikacijska unija ITU (eng. *International Telecommunication Union*) postavila minimalne zahtjeve za 5G tehnologiju koja prema procjenama treba omogućiti povezivanje 100 milijardi uređaja do 2025. godine.

Nova generacija komunikacijskih mreža mora omogućiti veoma velike brzine prijenosa i znatno povećanje propusnih opsega kako bi se postigli pouzdani prijenosi signala tipa holograma, 3D slike i signala proširene stvarnosti. Dosadašnje tehnologije pokazuju ograničenja zbog spektralnog zasićenja, ograničenog spektralnog nagomilavanja, sklopovlje gubi funkcionalnost na visokim frekvencijama a problematična postaje i sama topologija mreže kao i održavanje velikog broja baznih stanica. Tehnologija 5G mreža ide u smjeru proširenja spektra i prelaska na milimetarske valne duljine, mreža stanica će biti gušća ali uvođenjem D2D (eng. *device to device*) [17] komunikacije, uređaji će preuzimati funkciju baznih stanica koje više neće morati biti fiksne.

Drugo važno svojstvo novih mreža je osiguranje besprekidne konekcije uređaja na svakom mjestu i za bilo koju koncentraciju uređaja. Također, postavljen je zahtjev za smanjenje latencije ispod 1 ms što je deset puta manje od latencije kod 4G mreža. Za 5G mreže razvijaju se nove vrste modulacije jer OFDM modulacija ima ograničenja u smislu povećanja brzine pri čemu se i potrošnja energije mnogo povećava. Energijska ušteda je važan cilj pri razvoju novog koncepta komunikacijskog standarda, zbog toga se predviđaju inteligentni energetske sustavi koji će optimalno koristiti prijenosne kanale i eliminirati rasipanje energije baznih stanica u praznom hodu.

3.4. Opis 5G komunikacijskog standarda

Tehnologija 5G za razliku od dosadašnjih 2G, 3G i 4G tehnologija zasniva se na potpuno novim temeljnim pristupima, tako da se ne može tretirati kao nadogradnja postojećih standarda. Glavni cilj 5G standarda je sigurna i pouzdana kontrola i regulacija komunikacija na internetu u stvarnom vremenu. Dok se standardi 2G, 3G i 4G zasnivaju na komunikaciji putem fiksnih točaka, pri čemu terminali uvijek komuniciraju samo s baznom stanicom. 5G formira snažnu transparentnu infrastrukturu u kojem svaki uređaj može biti označen kao mrežni čvor. Ovaj princip pruža veliku uštedu energije jer korisnički uređaj ne mora, kao do sada, ostvariti konekciju putem fiksne bazne stanice u čijem se području se nalazi, koja može biti i preopterećena i prilično udaljena. Kod 5G mreže korisnički uređaj će pronaći optimalni put preko najbližih uređaja koje će iskoristiti kao mrežne čvorove.

Temeljni ciljevi 5G standarda su prema [16]:

1. Prijenos podataka - Zbog velikog broja uređaja u novom sustavu (IoT) i osiguranja propusnog opsega za prijenos video signala u oba smjera. Cilj je postići brzinu prijenosa podataka višu od 10 Gbps. Latencija - Kombinacija kontrolnog sustava i komunikacijskih sustava stvara vremensko kašnjenje (latenciju) u prijenosu. Na primjer, kod 4G mreža stvarna latencija je od 30-50 ms, ali za 5G mreže, prvenstveno zbog zahtjeva za integracijom procesne automatizacije, zahtjev za latencijom je postavljen na 1 ms, što predstavlja veliki izazov za razvojne centre.
2. Dostupnost i sigurnost mreže - Obzirom da se nova generacija mreža razvija za prijenos misijski kritičnih podataka za upravljanje automobilima i vlakovima bez ljudske kontrole neophodno je osigurati stalnu dostupnost mreže, bez pristupa neovlaštenim korisnicima. Za tehničko ostvarenje navedenih zahtjeva potrebno je osigurati holistički pristup pored postojeće radio tehnologije. To podrazumijeva postizanje višestruke komunikacije, odnosno postojanje više dostupnih kanala. Ukoliko se omogući učinkovito istovremeno korištenje više kanala povećala bi se propusnost podataka. Ovakvim konceptom prijenosa podataka povećava se i sigurnost jer je potencijalnom napadaču gotovo nemoguće

istovremeno pratiti sve slučajno odabrane kanale. Ovo naravno zahtijeva veliki posao na razvoju novih sustava za šifriranje podataka. Fokus istraživanja su principi mrežnog kodiranja. Još jedan poseban istraživački izazov je oblast mobilnih oblaka. Zbog kretanja objekata kao što su vlakovi, automobili ili zrakoplovi potrebno je razviti mogućnost da se i podatci pohranjeni u oblaku pomjeraju. To otvara nove mrežne koncepte u kojima se oblak računala i komunikacijska mreža integriraju.

Za 5G mreže razvija se nova modulacijska tehnologija GFDM (*eng. Generalized Frequency Division Multiplexing*) [18]. Za postizanje pomenutih ciljeva potrebno je razviti nove sklopovske elemente koji će omogućiti brzu obradu povećanog broja digitalnih podataka. Posebna pažnja posvećena je razvoju novih tipova brzih procesora i aritmetičkih jedinica s više jezgri [19].

Projekti razvoja digitalnih sustava Industrije 4.0 i komunikacijskih 5G sustava za razvijeni svijet predstavljaju jedini mogući pravac za održanje ekonomije i tehnologije. Digitalizacija željezničke industrije kao važnog segmenta svjetske ekonomije u okviru Industrije 4.0 naziva se Željeznice 4.0, zbog toga su vlade razvijenih zemalja su izradile strategije i izdvojile velika sredstva za istraživanja i projekte. Tako je britanski odjel za transport (DfT) objavio poziv za izražavanje interesa za unaprjeđenje željezničkih komunikacijskih mreža, kao dio vladinih nastojanja za provedbu istraživanja u 5G mrežama u transportnoj oblasti [20]. Njemačko ministarstvo transporta i digitalne infrastrukture je već u 2017. godini objavilo 5G strategiju za Njemačku u kojoj se prikazuju planovi s ciljem promoviranja razvoja Njemačke kako bi postala vodeća zemlja na tržištu 5G mreža i aplikacija [9], završetak testiranja i istraživanja bio je planiran u 2020. godini. U protekle tri godine željezničke korporacije u različitim zemljama su izradile svoje programe za digitalizaciju. Rješenja koja su predložena u okviru takvih inicijativa promiču digitalnu transformaciju željeznice u europskim razmjerima. Nova inicijativa digitalne željeznice predložena od strane UIC-a ima namjeru da osigura platformu čiji će entiteti biti u mogućnosti da: dijele informacije, povezuju ljude, povezuju objekte putem izravne veze s posebnim osvrtom na sigurnost podataka. Stručna analiza ekonomsko-tehničkih studija iz domene digitalizacije željeznica prikazuje oblasti za provedbu digitalizacije:

- Putničke usluge
- Usluge za teretni transport
- Upravljanje infrastrukturom i vlakovima
- Industrija (proizvodnja)
- Signalizacija i interoperabilnost

Kao ključne tehnologije koje će omogućiti digitalno razdoblje željeznica navode se: širokopolasne mreže, mobilni Internet, analize skupova velikih podataka, računarstvo u oblaku, Internet stvari i robotika [21].

3.5. Kibernetški sloj razmatranog modela

Uvođenje promjene u način funkcioniranja, rada i prometovanja željeznicom preko kibernetško-fizikalnog modela temelji se na novim tehnologijama i modernijim pristupima upravljanja željezničkom infrastrukturom. Nova tehnološka revolucija, koja uvelike zahvata sve više industrijskih okruženja kroz projekt Industrije 4.0, također je usmjerena na željeznice i može napraviti značajne promjene u segmentima odvijanja prometa, upravljanja, te održavanja željezničke infrastrukture. Promjene koje zahvaćaju fizikalni sloj su fokusirane na promjenu senzorskih sučelja i modifikaciju upravljačkih jedinica u polju, čime se njihovo funkcioniranje unaprjeđuje, postaje autonomnije te se omogućuje ostvarivanje bolje komunikacije u stvarnom vremenu s ostalim podsustavima. Preko 5G standarda očekuje se povećanje brzine komunikacije, povećanje pouzdanosti prijenosa te povećanje kapaciteta prijenosa podataka između naprava. Na podlozi unaprjeđenja u prijenosnom sloju s primjenom 5G standarda otvara se mogućnost uspostavljanja visoko pouzdane bežične komunikacije među senzorskim, aktorskim i svim ostalim jedinicama koje sačinjavaju jednu željezničku infrastrukturu. Na taj način se osigurava pouzdana razmjena misijsko-kritičnih podataka tijekom operiranja željeznice. Glavni sloj koji povezuje uređaje u fizikalnom sloju u jedinstvenu cjelinu je kibernetški sloj. Kibernetški sloj sastoji se od odgovarajućih računalnih resursa i programskih rješenja i omogućuje pouzdanu i točnu obradu ulaznih podataka u stvarnom vremenu kako bi svim elementima sustava i korisnicima bili dostupni ispravni izlazni podatci prema kojima se poduzimaju ispravne akcije u procesima sustava. Stoga je iznimno važno izraditi kvalitetna IT rješenja putem kojih će se unaprjeđenja u fizikalnom i komunikacijskom/prijenosnom sloju iskoristiti na najbolji mogući način. Samo uz kvalitetno projektiranje i izradu sva tri sloja (fizikalni, prijenosni, kibernetški) moguće je željeznicu promatrati kao jedinstven kibernetško-fizikalni model.

3.5.1. Kibernetški sloj i tehnologije računarstva u oblaku

Kibernetški sloj je odgovoran za pohranu nastalih podataka iz unaprjeđenih senzora, njihovo raspodjeljivanje svim sudionicima infrastrukture, obavještanje, obradu i sl. Zbog toga će se IT sustavi promatrati kroz višu razinu funkcioniranja pomoću tehnologije računarstva u oblaku (*eng. cloud computing*) [22]. Tehnologije računarstva u oblaku omogućuju decentraliziranu pohranu podataka koji se prikupljaju iz uređaja u polju. Dalje, pohranjeni podatci su sveprisutni što znači da je moguća dostupnost iz bilo kojega uređaja sustava na bilo kojem mjestu i u bilo kojem trenutku. Na primjer, tako je strojovođi omogućen pristup podatcima iz svih uređaja na željeznici kao i svih ostalih podataka sustava koji bi mogli pomoći pri njegovom odlučivanju. To je revolucionarno unaprjeđenje s gledišta upravljanja vlakom, jer je

strojovođa do sada imao ograničene podatke o sustavu u vožnji i dosta toga je ovisilo o njegovoj percepciji i pamćenju. Kibernetско-fizikalni model može prenijeti kompletnu digitalnu sliku pruge i vlaka u lokomotivu i registrirati u stvarnom vremenu alarme (stanja cestovnih prijelaza, stanja signala, stanja vlaka) koji će omogućiti preventivne akcije u upravljanju kako bi se izbjegle nezgode. U slučaju kvara nekog signala ili kvara vlaka koji se nalazi ispred strojovođa bi bio obaviješten odmah te na taj način bi brzo vožnju mogao prilagoditi novonastaloj situaciji.

Uvođenje tehnologija računarstva u oblaku za potrebe kibernetско-fizikalnog modela upravljanja željeznicom bi također pridonijela bržem adaptiranju zahtjeva koje donosi Industrija 4.0. Temeljna načela Industrije 4.0 su prema [23]:

1. Interoperabilnost: sposobnost strojeva, uređaja, senzora i ljudi da se međusobno povezuju i komuniciraju putem interneta stvari (IoT) ili Interneta ljudi (IoP),
2. Transparentnost: Sposobnost informacijskih sustava za stvaranje virtualne kopije mrežnog svijeta obogaćivanjem digitalnih modela s podacima iz senzora,
3. Tehnička pomoć: Prvo, sposobnost sustava za pružanje pomoći korisnicima prikupljanjem i vizualizacijom informacija potrebnih za donošenje odluka i rješavanje hitnih problema u kratkom roku. Drugo, sposobnost kibernetско-fizikalnih sustava da fizički pomažu korisnicima provodeći niz zadataka koji su neugodni, previše iscrpljujući ili nesigurni za čovjeka,
4. Decentralizirane odluke: Sposobnost kibernetско-fizikalnih sustava da samostalno donose odluke i obavljaju svoje zadatke što je više moguće autonomno. Samo u slučaju iznimaka, smetnji ili sukobljenih ciljeva, zadatci su upućeni na višu razinu.

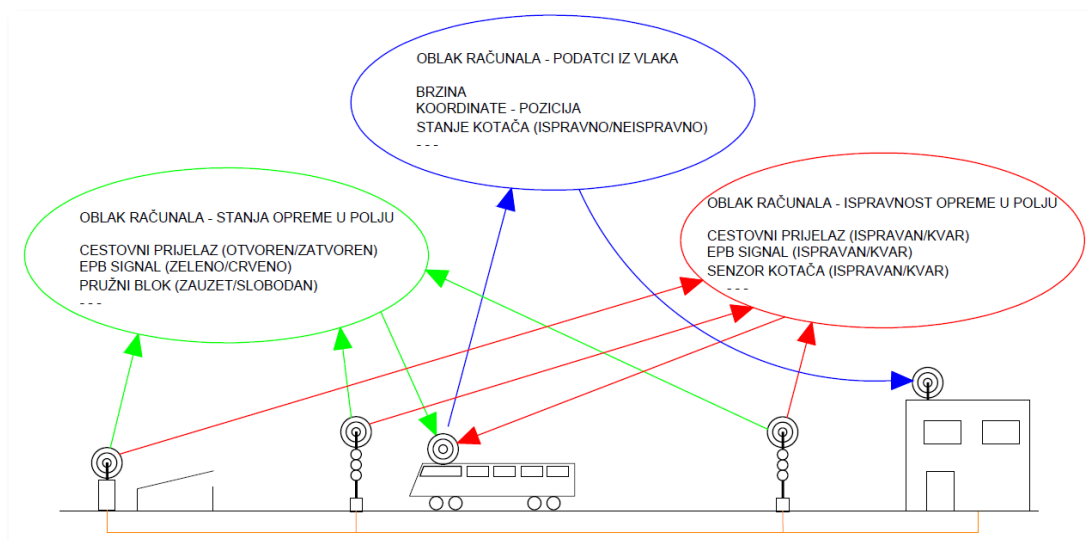
Uvođenjem tehnologija računarstva u oblaku u kibernetском sloju upravljanja željezničkom infrastrukturom omogućuju se osnovna načela Industrije 4.0, (interoperabilnost, transparentnost te decentraliziranost) i njihova uključenost u sustav postaje jasno vidljiva. Signalno-sigurnosni sustavi na željeznicama unaprijeđeni raspodijeljenim računalnim sustavima i vlakovi opremljeni suvremenim sklopovskim rješenjima omogućuju pohranu velikog broja podataka. Koristeći računalne sustave u oblaku putem odgovarajućih programskih rješenja iz velikog broja centraliziranih podataka iz polja moguće je imati potpuno novi pogled na željezničke sustave. Pretraživanjem i utvrđivanjem svojstava prikupljenih podataka dolazi se do novih značajnih zakonitosti u procesima na temelju čega se mogu poduzeti preventivne mjere na sprječavanju neželjenih događaja. Računarstvo u oblaku za željezničke sustave integrira podatke o vozilima (održavanje vozila, podatci s infrastrukture na vlaku, podatci o stanju i radu vlaka), podatke o pruži (odražavanje pruga, stanja signalne opreme) te vremenske i prometne uvjete. Signalno-sigurnosni sustavi u željeznici omogućuju kontrolu, nadzor i zaštitu željezničkog prometa. Osnovni cilj ovih sustava je održavanje

željezničke mreže uvijek u radnom stanju, stoga su alati koji omogućuju lakši i brži nadzor i analizu podataka od velike važnosti za unaprjeđenje prometnih procesa.

3.5.2. Model podataka u računalnom oblaku

Prvi korak ka unaprjeđenju IT sustava predstavlja ostvarivanje arhitekture preko koje bi se pohranjivali podatci prikupljeni iz unaprijeđenih uređaja u polju. Svaki uređaj u polju generira niz podataka za proces koji kontrolira. Na primjer unaprijeđeni elektronički pružni blokovi služe za kontrolu signalizacije zauzetosti pružnog odsjeka. Tako vizualno upozoravaju strojovođu je li sljedeći pružni blok zauzet ili slobodan. Preko niza definiranih komunikacijskih sučelja je moguće taj podatak pohraniti na poslužitelj te pomoću tog podatka obavijestiti i ostale sudionike o zauzetosti tog odsjeka na podlozi programiranog sučelja koji se nalazi također na tom poslužitelju. Svi pohranjeni podatci moraju činiti koherentnu strukturu kako bi se lakše pristupalo te kako bi se s njima moglo lakše manipulirati.

Princip pohrane podataka može se objasniti preko pojma oblak računala. Naime, svaki oblak računala predstavlja skup programiranih sučelja, relacijskih baza podataka u kojoj se nalaze svi podatci vezani za taj oblak te skup sučelja preko kojih se vrši obavještanje ostalih sudionika rada željeznice. Kao što je opisano u poglavlju 3.2 u kojem su predstavljene promjene u fizikalnom sloju novog modela, podatci koje generiraju unaprijeđeni uređaji se mogu raspodijeliti prema pripadnosti različitim misijsko-kritičnim procesima u željeznici. Na slici 3.6 prikazana je podjela podataka u tri tipa oblaka računala na temelju čega će biti izgrađen podatkovni model signalno-sigurnosnog sustava željeznice.



Slika 3.6. – Shematski prikaz arhitekture modela podataka

Podatci koji su bitni za stanje ispravnosti opreme u polju spremaju se u oblak računala koji se naziva *Ispravnost opreme u polju*. Dalje, podatci koji su vezani za trenutno stanje opreme u polju spremaju se u oblak računala *Stanje opreme u polju*. Treći oblak naziva se *Podatci iz vlaka* i u njega se spremaju svi podatci važni za sklopove i uređaje koji se nalaze na vlaku.

3.5.3. Definiranje pripadnosti izlaznih varijabli za svaki oblak računala

U poglavlju 3.1 predstavljene su izmjene željezničke infrastrukture u fizikalnom sloju. Zamjena starih relejnih sustava s ugrađenim mikroračunalima ne samo da donosi prednosti u smislu modularnosti uređaja, lakšeg održavanja i zamjene već omogućuje i nadgradnju logike koju izvršavaju uređaji na podlozi različitih programskih rješenja. Također, varijable i stanja sustava nisu više samo interne informacije u podsustavu nego je moguća uspostava komunikacije s drugim uređajima i glavnim poslužiteljem. Prethodno su definirane sve izlazne varijable novih unaprijeđenih uređaja koji bi se implementirali u cilju poboljšanja funkcionalnosti željeznice. U ovom dijelu će biti definirana pripadnost svake izlazne varijable iz određenog uređaja odgovarajućem oblaku računala. Svaki elektronički pružni blok upravlja radom dva signala za svaki smjer vožnje. Dalje, na svakom signalu nalaze se tri signalizacijska znaka [7], koja služe za signalizaciju zauzetosti odsjeka. U tablici 3.9 definirane su sve varijable i njihova pripadnost oblaku računala.

Tablica 3.9. – Varijable automatskog pružnog bloka

Ime varijable	Opis varijable	Oblak računala
Z_S1.A	Aktivan zeleni znak na signalu 1.A	Oblak stanja opreme u polju
Zu_S1.A	Aktivan žuti znak na signalu 1.A	Oblak stanja opreme u polju
C_S1.A	Aktivan crveni znak na signalu 1.A	Oblak stanja opreme u polju
Z_S2.B	Aktivan zeleni znak na signalu 2.B	Oblak stanja opreme u polju
Zu_S2.B	Aktivan žuti znak na signalu 2.B	Oblak stanja opreme u polju
C_S2.B	Aktivan crveni znak na signalu 2.B	Oblak stanja opreme u polju
Kvn_S1.A	Kvar napajanja signala 1.A	Oblak ispravnosti opreme u polju
Kvn_S2.B	Kvar napajanja signala 2.B	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvZ_S1.A	Kvar zeleni znak signala 1.A	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvZu_S1.A	Kvar žuti znak signala 1.A	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvC_S1.A	Kvar crveni znak signala 1.A	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvZ_S2.B	Kvar zeleni znak signala 2.B	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvZu_S2.B	Kvar žuti znak signala 2.B	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvC_S2.B	Kvar crveni znak signala 2.B	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvIL1_NB2	Kvar faza L1 – primar transformatora	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvIL2_NB2	Kvar faza L2 – primar transformatora	Oblak ispravnosti opreme u polju

KvIL2_NB2	Kvar faza L3 – primar transformatora	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvNP_NB2	Kvar napona na primaru	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvB1_NB2	Kvar - baterije 1	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvB2_NB2	Kvar - baterije 2	Oblak ispravnosti opreme u polju
KvNi_NB2	Kvar napon izlaza 24 V DC	Oblak ispravnosti opreme u polju

Drugi unaprijeđeni uređaj koji je izrađen kao sklop ugrađenih mikroracunala je brojač osovina. Brojač osovina, kao što je već navedeno, je uređaj preko koje se detektiraju kotači na različitom pružnom odsjeku. Svaki od instaliranih brojača osovina u ovom slučaju ima mogućnost detekcije stanja za tri pružna odsjeka.

U tablici 3.10 su prikazane su izlazne varijable brojača osovina i njihova pripadnost podatkovnim oblacima.

Tablica 3.10. – Varijable brojača osovina

Ime varijable	Opis varijable	Oblak računala
Z_Odsjek.1	Zauzet odsjek 1	Oblak stanja opreme u polju
Z_Odsjek.2	Zauzetost odsjek 2	Oblak stanja opreme u polju
Z_Odsjek.3	Zauzetost odsjek 3	Oblak stanja opreme u polju
Kv_BO	Kvar brojača osovina	Oblak ispravnosti opreme u polju
Sm_BO	Smetnja na brojaču osovina	Oblak ispravnosti opreme u polju

Sljedeći podsustav koji bi bio unaprijeđen u fizikalnom sloju je cestovni prijelaz u razini. U tablici 3.11 prikazane su izlazne varijable cestovnog prijelaza u razini pruge i njihova pripadnost podatkovnim oblacima.

Tablica 3.11. – Varijable uređaja za osiguranje cestovnog prijelaza

Ime varijable	Opis varijable	Oblak računala
CPR_ON	CPR uključen	Oblak stanja opreme u polju
CPR_OFF	CPR isključen	Oblak stanja opreme u polju
PREPREKA_CPR	CPR detekcija prepreke	Oblak stanja opreme u polju
Kv_CPR	Kvar na napravi	Oblak ispravnosti opreme u polju
Sm_CPR	Smetnja na napravi	Oblak ispravnosti opreme u polju

Zadnji element koji je tretiran kao aktivni element modela je vlak. U tablici 3.12 predstavljene su izlazne varijable vlaka i pripadnost oblaku računala.

Tablica 3.12. – Varijable vlaka

Ime varijable	Opis varijable	Oblak računala
Broj_Vlaka	Identifikacijski broj vlaka	Oblak stanja i ispravnosti vlaka
Oznaka_Voznje	Identifikacijska oznaka vožnje	Oblak stanja i ispravnosti vlaka
Brzina_Vlaka	Brzina vožnje trenutnog vlaka	Oblak stanja i ispravnosti vlaka

Pozicija_Vlaka	GPS pozicija vlaka	Oblak stanja i ispravnosti vlaka
Kv_Pogon_Vlaka	Kvar na pogonu vlaka	Oblak stanja i ispravnosti vlaka
Sm_Pogon_Vlaka	Smetnja na pogonu vlaka	Oblak stanja i ispravnosti vlaka
Kv_Kocnice_Vlak	Kvar na kočionom sustavu vlaka	Oblak stanja i ispravnosti vlaka
Sm_Kocnice_Vlaka	Smetnja na koč. sustavu vlaka	Oblak stanja i ispravnosti vlaka
Kv_Kotaci_Vlaka	Kvar na kotačima vlaka	Oblak stanja i ispravnosti vlaka
Sm_Kotaci_Vlaka	Smetnja na kotačima vlaka	Oblak stanja i ispravnosti vlaka

3.5.4. Komunikacijski protokol za razmjenu poruka između poslužitelja i naprava

Za programsko ostvarenje navedene arhitekture potrebno je implementirati komunikacijski protokol na podlozi kojeg se podatci raspodjeljuju u točno određen oblak računala. Također na podlozi definiranog protokola izvršava se pristup podacima koji su već pohranjeni na poslužitelju. Komunikacijski protokol je po definiciji skup jednoznačno određenih pravila za razmjenu informacija između dva umrežena entiteta koji uključuje sintaksu informacije, semantiku informacije te pravila za razmjenu informacije. Entitet može biti računalo, program, sigurnosna kamera, senzor i slično. Protokol definira standard na podlozi kojeg se grade poruke koje se razmjenjuju između klijenata i poslužitelja. Najjednostavnija implementacija protokola sadrži specifikaciju za zaglavlje i tijelo poruke. Na primjer internet protokol HTTP protokol definira metodu GET koja predstavlja pravilo preko kojeg klijent šalje zahtjev za pristup do specificiranog resursa koji se nalazi na poslužitelju. Poslužitelj šalje nazad odgovor koji sadrži zaglavlje u kojem se nalaze definirana polja za taj protokol kao datum, tip sadržaja koji se nalazi u tijelu poruke te tijelo odgovora u kojem se nalaze konkretni traženi podatci. Druga bitna metoda za razumijevanje HTTP protokola je PUT/POST metoda. Obje metode se koriste kada klijent želi pohraniti određen dio resursa na poslužitelj. Primjer GET metode HTTP protokola [24] preko koje klijent zahtijeva resurse je GET/index.html HTTP/1.1.

Protokol za razmjenu podataka u programu bit će izrađen po uzoru na HTTP protokol i sadrži dvije esencijalne metode. Prva metoda prema HTTP GET metodi služi za uzimanje podataka koji se nalaze na poslužitelju. Zaglavlje metode mora jasno definirati iz kojeg oblaka se podatci potražuju, zatim podatak koji je vezan za uređaj i svakako ime tražene varijable.

Standard pohrane mora zbog jednostavnosti biti u jednoj liniji bez tzv. delimitera *newline*. Svaki atribut je odvojen znakom dvotočke ":". Kraj poruke označava znak ";". Generički primjer potraživanja podataka s poslužitelja je:

```
GET:IME_PODATKOVNOG_OBLAKA:IME_UREDAJA:IME_VARIJABLE;
```

Poslužitelj mora odgovoriti na zahtjev i u slučaju uspješnog potraživanja i u slučaju neuspješnog potraživanja (varijabla ili uređaj ne postoji ili nedefinirana metoda). Odgovor stoga

mora sadržavati status upita i vrijednosti potraživane varijable. Generički primjer odgovora na GET zahtjev je kako slijedi:

```
STATUS:VRIJEME_ZADNJE_PROMJENE_VRIJEDNOSTI_VARIJABLE:VRIJEDNOST_VARIJABLE;
```

Druga metoda koja bi služila za pohranu podataka bit će definirana po uzoru na HTTP POST metodu. Isto kao kod GET metode klijent šalje jednolinijsku poruku poslužitelju s poljima odvojenim znakom ":" a kao kraj poruke znak ";". Generički primjer pohrane podataka iz senzora je kako slijedi:

```
POST:IME_PODATKOVNOG_OBLAKA:IME_UREDAJA:IME_VARIJABLE:VRIJEME_UPISA:VRIJEDNOST_VARIJABLE;
```

Odgovor poslužitelja na taj zahtjev mora označavati uspješnu ili neuspješnu pohranu podataka. Za nazive oblaka računala koristit će se sljedeći nazivi:

- Oblak stanja opreme u polju: STANJE
- Oblak ispravnosti opreme u polju: ISPRAVNOST
- Oblak vlaka: VLAK

Princip rada protokola za komunikaciju prikazan je u primjerima koji slijede:

Primjer 1:

Potraživanje podatka za vrijednost zauzetosti pružnog odsjeka 1, brojača osovina 2.

Definiranje odsjeka pripada oblaku stanja opreme u polju. Uređaj zadužen za taj podatak je brojač osovina (generičko ime: BO). Identifikacija traženog brojača osovina je preko njegove numeričke oznake 2. Ime varijable je: Z_Odsjek.1.

Upit: GET:STANJE:BO2:Z_Odsjek.1;

Poslužitelj: OK:12/12/2018 10/45/21:0;

Primjer 2:

Pohranjivanje vrijednosti varijable zauzetosti pružnog odsjeka 1 brojača osovina 2.

Upit: POST:STANJE:BO2:Z_Odsjek.1:12/12/2018 10/45/21:0;

Poslužitelj: OK;

Primjer 3:

Pohranjivanje podatka za uređaj koja ne postoji.

Upit: POST:ISPRAVNOST:BO3:Kv_BO:12/12/2018 10/45/21:0;

Poslužitelj: FAIL;

Primjer 4:

Potraživanje nepostojećeg podatka:

Upit: GET:ISPRAVNOST:BO2:Kv_CPR;

Poslužitelj: FAIL;

U navedenim primjerima pokazano je kako funkcionira programsko sučelje i protokol za razmjenu podataka. U prvom primjeru putem funkcije GET iz oblaka računala STANJE, putem uređaja brojač osovina 2, za odsjek 1 dobiveno je stanje varijable zauzetosti 0, što znači da predmetni odsjek nije bio zauzet u trenutku provjere. Uz traženi podatak funkcija je ispisala i status upita OK i vrijeme zadnje promjene varijable. U drugom primjeru izvršena je promjena vrijednosti varijable zauzetosti istog odsjeka putem sučelja. Odgovor poslužitelja je OK što znači da je instrukcija uspješno izvršena. Treći i četvrti primjer prikazuju odgovor poslužitelja kao FAIL ukoliko se navedu pogrešni nazivi oblaka računala, uređaja ili varijable.

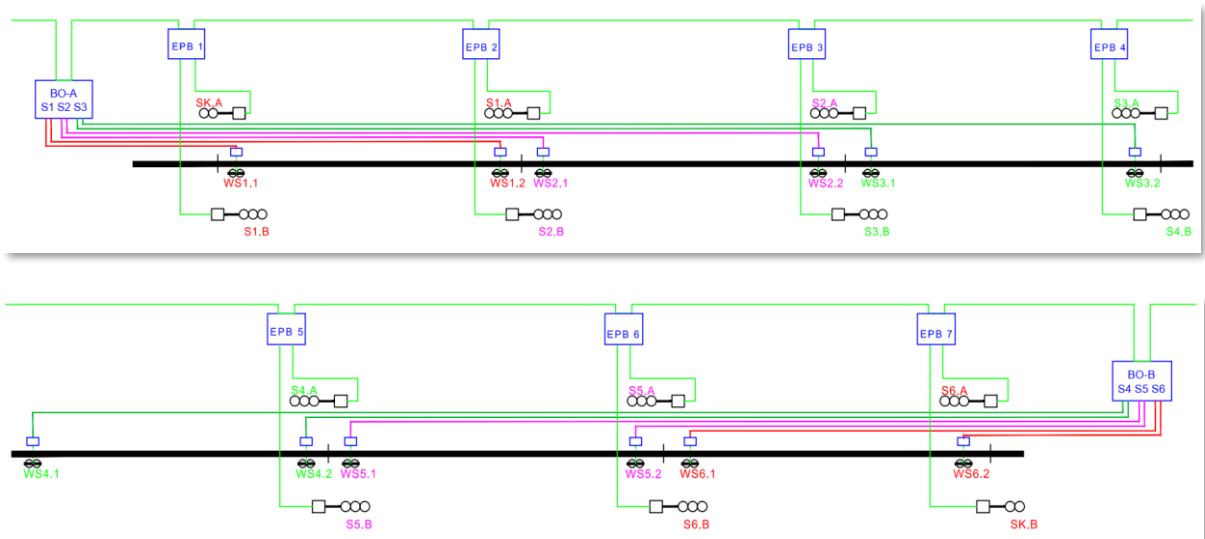
Na taj način je definiran protokol koji se može upotrebljavati za komunikaciju svih uređaja koji se nalaze u polju s poslužiteljem na kojem se pohranjuju podatci.

4. SIMULACIJA KIBERNETSKO-FIZIKALNOG MODELA SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNICE

Nakon što su u prethodnom poglavlju podsustavi željezničko signalno-sigurnosnog sustava modificirani na način da su im po njihovoj prirodi definirani važni podatci koje treba razmijeniti sa sustavom u stvarnom vremenu te izgrađena njihova sučelja za komunikaciju stvoreni su temeljni preduvjeti za programsku gradnju modela. Ideja za kibernetско-fizikalni model signalno-sigurnosnog sustava željeznice je primjenljiva na sve stvarne željezničke sustave. Kako bi se pokazale prednosti gradnje kibernetско-fizikalnog modela u odnosu na stvarni signalno-sigurnosni željeznički sustav u sljedećem koraku razvoja moraju biti postavljene fizičke granice modela u smislu tipa pruge, broja i tipa signalno-sigurnosnih naprava i objekata na sekciji, reda vožnji, brzine i vremena prometovanja. Tako će biti moguće izraditi algoritam i program čijom simulacijom će biti potvrđene pretpostavke o unaprijeđenju sustava i jasnije prikazane prednosti koje donosi kibernetско-fizikalni model signalno-sigurnosnog sustava željeznice.

4.1. Opis kibernetско-fizikalnog modela

Predmet modeliranja bit će međukolodvorsko rastojanje povezano jednokolosječnom prugom podijeljeno u šest kontroliranih odsjeka, na način kako je prikazano na slici 4.1.

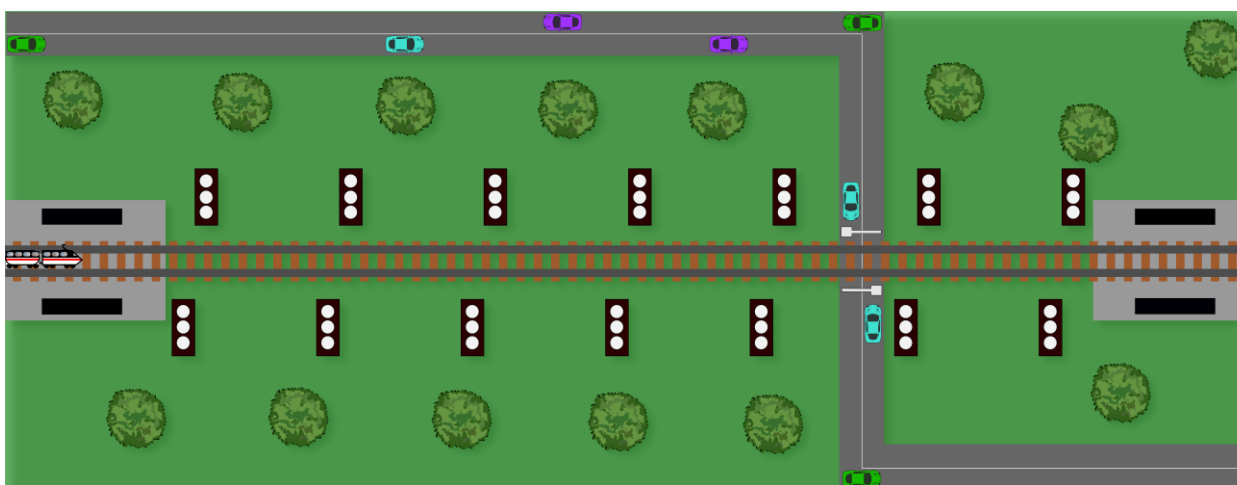


Slika 4.1. – Blok shema uređaja u polju za odabranu dionicu pruge

Lijevi kolodvor je obilježen kao kolodvor A, a desni kolodvor kao kolodvor B. Svaki odsjek štiti se troznačnim signalom. Signali za smjer vožnje prema kolodvoru A obilježeni su brojem odsjeka koji štite i oznakom smjera A (npr. Signal koji štiti odsjek 3 u smjeru vožnje

prema kolodvoru A označen je kao S3.A). Signali za smjer vožnje prema kolodvoru B obilježeni su također brojem odsjeka koji štite i oznakom smjera B (npr. signal koji štiti odsjek 5 za smjer vožnje prema kolodvoru B označen je kao S5.B). Kontrola zauzetosti odsjeka izvedena je računalnim brojačem osovina s induktivnim senzorima. Induktivni senzori montiraju se na početku i na kraju svakog odsjeka i povezuju se paricama postojećeg željezničkog signalnog kabela na središnji uređaj brojača osovina u bližem kolodvoru. Induktivni senzori za prva tri odsjeka (WS1.1, WS1.2, WS2.1, WS2.2, WS3.1 i WS3.2) povezani su na brojač osovina u kolodvoru A (BO-A[1]) a senzori za odsjeke 4, 5 i 6 (WS4.1, WS4.2, WS5.1, WS5.2, WS6.1 i WS6.2) povezani su na brojač osovina u kolodvoru B (BO-B[2]). Elektronički pružni blok predstavlja sučelje između pružnih signala i sustava za upravljanje prometom. Na svakoj granici odsjeka predviđa se ugradnja po jednog EPB-a koji je povezan na najbliže signale, tako da svaki EPB upravlja radom dva signala koji štite susjedne odsjeke ali za različite smjerove vožnje. Za programsko ostvarenje oznake APB-a i EPB-a su identične.

Kibernetско-fizikalni model signalno-sigurnosnog sustava pruge izrađen je na primjeru svakodnevnog rada na predmetnoj jednokolosječnoj dionici. U predmetni model uveden je i jedan cestovni prijelaz koji se nalazi na petom kontroliranom odsjeku. Svi elementi željezničke infrastrukture su povezani u mrežu. Zamišljeni model jednokolosječne pruge ima ukupnu duljinu 14.800,00 m. Duljina kolodvorskog opsega je 2.000,00 m a duljina svakog kontroliranog odsjeka je 1.800,00 m. Za potrebe simulacije prometovanja prugom određen je jednostavan dnevni vozni red pruge za naizmjenični promet vlakova u oba smjera. Prvo se odvija promet u smjeru od kolodvora A prema kolodvoru B a nakon isteka zadanog vremena odvija se povratni promet u smjeru od kolodvora B prema kolodvoru A. Vizualizacija modela pruge prikazana je na slici 4.2, putem programskog sučelja u pregledniku Chrome. Vizualizacija modela nastala je iz programskog ostvarenja modela opisanog na početku poglavlja 4.1.



Slika 4.2. – Vizualizacija modela jednokolosiječne pruge

4.2. Definiranje voznog reda u modelu

Zbog izrade simulacije rada dionice pruge prikazane na slici 4.1 potrebno je pretpostaviti neophodne parametre kako bi se simuliranim vožnjama mogao vizualizirati i testirati predmetni model željeznice. Parametri koje je potrebno unaprijed odrediti vezani su za označavanje vlakova i vožnji, broj vožnji tijekom dana, trajanje vožnje između kolodvora, vrijeme čekanja na kolodvorima i slično. Prema stvarnim iskustvima, brzinama vlakova i duljinama odsjeka pretpostavljeno je da se na pruzi tijekom dana izvrši 78 vožnji. Svaka vožnja ima svoju jedinstvenu sedmoznamenkastu oznaku počevši od 1111111 do 1111188. Trajanje vožnje između dva kolodvora iznosi 10 minuta, s uključenim pauzama za ulazak i izlazak putnika. Na svaka dva sata određena je promjena smjera vožnje. Prva vožnja je ujutro u 6:00 a posljednja vožnja je uvečer u 20:30. Tijekom noći pruga nije u radu. Dalje, na pruzi prometuje trinaest vlakova od kojih je svaki označen jedinstvenim sedmoznamenkastim brojem od 1111111 do 1111123. U tablici 4.1 prikazan je vozni red pruge.

Tablica 4.1. – Vozni red pruge predmetnog modela

Oznaka vožnje	Broj vlaka	Kolodvor polazak	Kolodvor dolazak	Vrijeme polaska	Vrijeme dolaska
1111111	1111111	A	B	06:00:00 AM	06:10:00 AM
1111112	1111112	A	B	06:10:00 AM	06:20:00 AM
1111113	1111113	A	B	06:20:00 AM	06:30:00 AM
1111114	1111114	A	B	06:30:00 AM	06:40:00 AM
1111115	1111115	A	B	06:40:00 AM	06:50:00 AM
1111116	1111116	A	B	06:50:00 AM	07:00:00 AM
1111117	1111117	A	B	07:00:00 AM	07:10:00 AM
1111118	1111118	A	B	07:10:00 AM	07:20:00 AM
1111119	1111119	A	B	07:20:00 AM	07:30:00 AM
1111120	1111120	A	B	07:30:00 AM	07:40:00 AM
1111121	1111121	A	B	07:40:00 AM	07:50:00 AM
1111122	1111122	A	B	07:50:00 AM	08:00:00 AM
1111123	1111123	A	B	08:00:00 AM	08:10:00 AM
1111124	1111111	B	A	08:30:00 AM	08:40:00 AM
1111125	1111112	B	A	08:40:00 AM	08:50:00 AM
1111126	1111113	B	A	08:50:00 AM	09:00:00 AM
1111127	1111114	B	A	09:00:00 AM	09:10:00 AM
1111128	1111115	B	A	09:10:00 AM	09:20:00 AM
1111129	1111116	B	A	09:20:00 AM	09:30:00 AM

SPECIJALISTIČKI RAD
UNAPRIJEĐENJE SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNICE PRIMJENOM KIBERNETSKO-FIZIKALNOG
MODELA

Oznaka vožnje	Broj vlaka	Kolodvor polazak	Kolodvor dolazak	Vrijeme polaska	Vrijeme dolaska
1111130	1111117	B	A	09:30:00 AM	09:40:00 AM
1111131	1111118	B	A	09:40:00 AM	09:50:00 AM
1111132	1111119	B	A	09:50:00 AM	10:00:00 AM
1111133	1111120	B	A	10:00:00 AM	10:10:00 AM
1111134	1111121	B	A	10:10:00 AM	10:20:00 AM
1111135	1111122	B	A	10:20:00 AM	10:30:00 AM
1111136	1111123	B	A	10:30:00 AM	10:40:00 AM
1111137	1111111	A	B	11:00:00 AM	11:10:00 AM
1111138	1111112	A	B	11:10:00 AM	11:20:00 AM
1111139	1111113	A	B	11:20:00 AM	11:30:00 AM
1111140	1111114	A	B	11:30:00 AM	11:40:00 AM
1111141	1111115	A	B	11:40:00 AM	11:50:00 AM
1111142	1111116	A	B	11:50:00 AM	12:00:00 PM
1111143	1111117	A	B	12:00:00 PM	12:10:00 PM
1111144	1111118	A	B	12:10:00 PM	12:20:00 PM
1111145	1111119	A	B	12:20:00 PM	12:30:00 PM
1111146	1111120	A	B	12:30:00 PM	12:40:00 PM
1111147	1111121	A	B	12:40:00 PM	12:50:00 PM
1111148	1111122	A	B	12:50:00 PM	01:00:00 PM
1111149	1111123	A	B	01:00:00 PM	01:10:00 PM
1111150	1111111	B	A	01:30:00 PM	01:40:00 PM
1111151	1111112	B	A	01:40:00 PM	01:50:00 PM
1111152	1111113	B	A	01:50:00 PM	02:00:00 PM
1111153	1111114	B	A	02:00:00 PM	02:10:00 PM
1111154	1111115	B	A	02:10:00 PM	02:20:00 PM
1111155	1111116	B	A	02:20:00 PM	02:30:00 PM
1111156	1111117	B	A	02:30:00 PM	02:40:00 PM
1111157	1111118	B	A	02:40:00 PM	02:50:00 PM
1111158	1111119	B	A	02:50:00 PM	03:00:00 PM
1111159	1111120	B	A	03:00:00 PM	03:10:00 PM
1111160	1111121	B	A	03:10:00 PM	03:20:00 PM
1111161	1111122	B	A	03:20:00 PM	03:30:00 PM
1111162	1111123	B	A	03:30:00 PM	03:40:00 PM
1111163	1111111	A	B	04:00:00 PM	04:10:00 PM

SPECIJALISTIČKI RAD
UNAPRIJEĐENJE SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNIČKE PRIMJENOM KIBERNETSKO-FIZIKALNOG
MODELA

Oznaka vožnje	Broj vlaka	Kolodvor polazak	Kolodvor dolazak	Vrijeme polaska	Vrijeme dolaska
1111164	1111112	A	B	04:10:00 PM	04:20:00 PM
1111165	1111113	A	B	04:20:00 PM	04:30:00 PM
1111166	1111114	A	B	04:30:00 PM	04:40:00 PM
1111167	1111115	A	B	04:40:00 PM	04:50:00 PM
1111168	1111116	A	B	04:50:00 PM	05:00:00 PM
1111169	1111117	A	B	05:00:00 PM	05:10:00 PM
1111170	1111118	A	B	05:10:00 PM	05:20:00 PM
1111171	1111119	A	B	05:20:00 PM	05:30:00 PM
1111172	1111120	A	B	05:30:00 PM	05:40:00 PM
-1111173	1111121	A	B	05:40:00 PM	05:50:00 PM
1111174	1111122	A	B	05:50:00 PM	06:00:00 PM
1111175	1111123	A	B	06:00:00 PM	06:10:00 PM
1111176	1111111	B	A	06:30:00 PM	06:40:00 PM
1111177	1111112	B	A	06:40:00 PM	06:50:00 PM
1111178	1111113	B	A	06:50:00 PM	07:00:00 PM
1111179	1111114	B	A	07:00:00 PM	07:10:00 PM
1111180	1111115	B	A	07:10:00 PM	07:20:00 PM
1111181	1111116	B	A	07:20:00 PM	07:30:00 PM
1111182	1111117	B	A	07:30:00 PM	07:40:00 PM
1111183	1111118	B	A	07:40:00 PM	07:50:00 PM
1111184	1111119	B	A	07:50:00 PM	08:00:00 PM
1111185	1111120	B	A	08:00:00 PM	08:10:00 PM
1111186	1111121	B	A	08:10:00 PM	08:20:00 PM
1111187	1111122	B	A	08:20:00 PM	08:30:00 PM
1111188	1111123	B	A	08:30:00 PM	08:40:00 PM

Ukupno vrijeme putovanja vlaka podijeljeno je na vrijeme prolaza preko svih šest odsjeka i vrijeme provedeno u kolodvoru. Vrijeme prolaza preko pružnih odsjeka iznosi 4 min dok vrijeme čekanja u svakom od kolodvora iznosi po 3 min. Vrijeme ukrcavanja i iskrcavanja putnika iznosi 140 s i tada vlak miruje na poziciji. Ostalih 40 s je vrijeme dolaska do mjesta ukrcavanja / iskrcavanja putnika (20 s) i vrijeme izlaza iz kolodvora (20 s).

4.3. Programsko ostvarenje cestovnog prijelaza u razini pruge

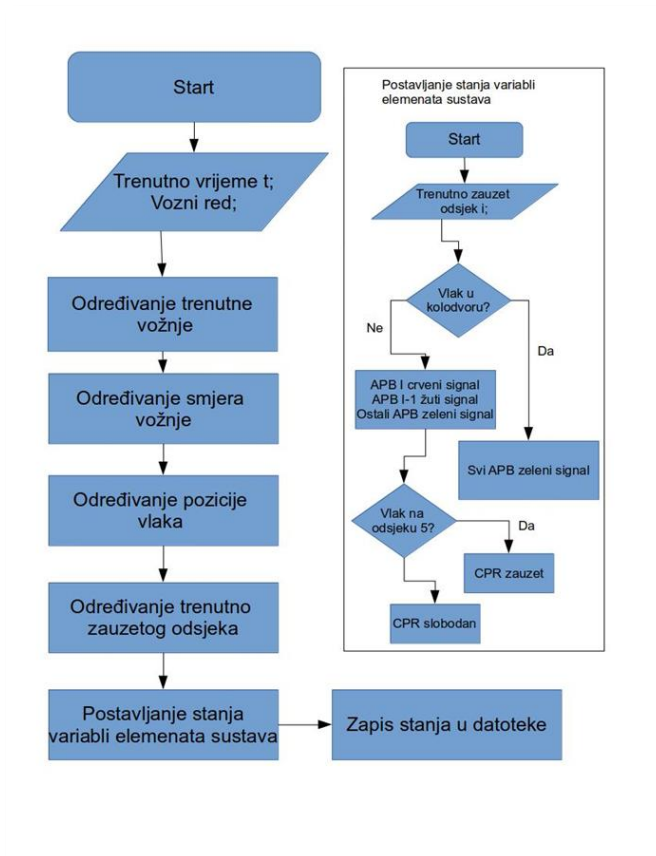
Cestovni prijelaz u razini pruge, kao što je već navedeno, predstavlja mjesto križanja pruge i ceste. Takvi objekti predstavljaju visoko rizična mjesta na kojima se najčešće događaju nezgode. Cestovni promet se mora odvijati neovisno od željezničkog prometa. Simulacija cestovnog prometa odvija se na način da cestovna vozila imaju određenu konstantnu brzinu kretanja. Na cestovnom prijelazu se u slučaju zauzetosti odsjeka moraju zaustaviti te sačekati na slobodno prometovanje preko pruge. Nakon uspješnog prolaska vlaka, cestovna vozila nastavljaju svoje kretanje istom brzinom.

4.4. Smetnje i kvarovi na elementima željezničke infrastrukture

Posebna pažnja pri izradi modela posvećena je kontroli kvarova i smetnji koji se mogu dogoditi na elementima željezničke infrastrukture. Smetnje i kvarovi na elementima željezničke infrastrukture su neizbježna pojava u tehničkim sustavima i događaju se zbog različitih razloga, uvijek je cilj svesti vjerojatnost pojave neželjenog događaja na najmanju moguć vrijednost. Smetnja se definira kao promjena u funkcioniranju elementa koja ne utječe izravno na funkcionalnost sustava dok kvar predstavlja otkazivanje funkcije elementa. Kibernetско-fizikalni model otvara mogućnost informiranja o takvim promjenama stanja neograničenog broja elemenata u željeznici. To donosi brojne prednosti u smislu povećanja pouzdanosti sustava i jednostavnijeg održavanja sustava. U modelu je generator smetnji i kvarova osmišljen kao manualni program kojim se izravno mijenjaju varijable određenog elementa željezničke infrastrukture.

4.5. Simulacija prometa prema predloženom modelu

Simulacija prometa na pruzi izvedena je kao kontinuirani proces. Svaku sekundu proces skenira trenutno vrijeme i na podlozi tog ulaznog parametra i dnevnog voznog reda odlučuje se koja je vožnja aktivna i utvrđuje se trenutni položaj vlaka. Na podlozi definirane pozicije vlaka koji prometuje određuje se odsjek na kojem se nalazi vlak, poslije toga se postavljaju vrijednosti varijabli povezanih sa stanjem određenih elemenata signalno-sigurnosnog sustava. U slučaju da se vlak nalazi na petom kontroliranom odsjeku postavlja se signal zauzeća cestovnog prijelaza kako bi se onemogućio prijelaz cestovnih vozila preko pruge. Ciklički se stanja varijabli modela spremaju u unutarnje datoteke. Njihova stanja je moguće mijenjati i izvana. Implementacija algoritma izvedena je u programskom jeziku Python, a njegov dijagram tijeka prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. – Dijagram tijeka unutarnje pohrane podataka u sustavu

Za potrebe pohrane vrijednosti stanja elemenata željezničke infrastrukture korišteni su *json* tipovi datoteka. Takav zapis omogućuje zapisivanje u obliku koji je najbliži semantičkoj strukturi varijabli, odnosno ključeva koji su vezani za određene vrijednosti. Ključ predstavlja ime određene varijable s kojom je povezana određena vrijednost. Primjer zapisa u *json* obliku je $\{IME_PARAMETRA: VRIJEDNOST_PARAMETRA\}$. Pripadajuća vrijednost za svaki ključ je odvojena znakom ":" te je svaki različiti ključ je odvojen znakom ",".

4.6. Arhitektura datoteka programskog rješenja modela

Stanja na željezničkim elementima se pohranjuju u četiri različite datoteke. Stanja signala na APB-ovima pohranjuju se u datoteku *APB.json*. Datoteka *APB.json* ima sedam glavnih ključeva koji predstavljaju stanje signalizacije svakog signalnog uređaja. Svaki od signala je označen vrijednošću od 1 do 7. Stanje signalizacije za svaki signal je opisano sa šest različitih varijabli koje označavaju smjer vožnje te zauzetost odnosno slobodnost tog odsjeka.

Primjeri struktura *APB.json* datoteka prikazani su kako slijedi:

<pre>"1": {"AGSU": 0, "AGSD": 0, "ARSU": 1, "ARSD": 0, "AYSU": 0, "AYSD": 0},</pre>	<pre>"2": {"AGSU": 1, "AGSD": 0, "ARSU": 0, "ARSD": 0, "AYSU": 0, "AYSD": 0},</pre>	<pre>"3": {"AGSU": 1, "AGSD": 0, "ARSU": 0, "ARSD": 0, "AYSU": 0, "AYSD": 0},</pre>	<pre>"4": {"AGSU": 1, "AGSD": 0, "ARSU": 0, "ARSD": 0, "AYSU": 0, "AYSD": 0},</pre>
<pre>"5": {"AGSU": 1, "AGSD": 0, "ARSU": 0, "ARSD": 0, "AYSU": 0, "AYSD": 0},</pre>	<pre>"6": {"AGSU": 1, "AGSD": 0, "ARSU": 0, "ARSD": 0, "AYSU": 0, "AYSD": 0},</pre>	<pre>"7": {"AGSU": 1, "AGSD": 0, "ARSU": 0, "ARSD": 0, "AYSU": 0, "AYSD": 0},</pre>	

Slika 4.4. - Varijable stanja signala zapisane u *APB.json* datoteku

Označavanje varijabli stanja izvedeno je na sljedeći način: *A_BOJA_S_SMJER-VOŽNJE*, gdje *BOJA* ima tri moguće oznake R, G, Y (red, green, yellow), *SMJER-VOŽNJE* koji može biti U ili D (up smjer A prema B, down smjer B prema A). Stanje varijabli je binarno što znači da njihova vrijednost može biti 0 za neaktivno ili 1 za aktivno. Iz gornjeg primjera može se zaključiti da su varijable sa znakom U aktivne što znači da je trenutno postavljeni smjer vožnje od kolodvora A do kolodvora B. Dalje, vidi se da je aktivna varijabla *ARSU* koja predstavlja upaljen signal crvenog svjetla na prvom odsjeku što znači da je zauzet prvi odsjek. Ostali signali imaju aktivan znak zelenog svjetla. Stanje brojača osovina se pohranjuje u datoteci *BO.json*. Na pruži su implementirana 2 brojača osovina koji upravljaju radom svih šest odsjeka. Prvi brojač osovina je povezan na prva tri odsjeka gledano iz kolodvora A dok je drugi povezan na preostala tri odsjeka. Odsjeci su označeni vrijednostima 1, 2 i 3 gledano s lijeva na desno. To znači da je 1 odsjek prvog brojača prvi odsjek od kolodvora A, dok je odsjek 1 drugog brojača osovina 6 odsjek od kolodvora A odnosno prvi odsjek gledano od kolodvora B. Struktura datoteka *BO.json* prikazana je na slici 4.5.

<pre>"1": { "BP1": 1, "BP2": 0, "BP3": 0 },</pre>	<pre>"2": { "BP1": 0, "BP2": 0, "BP3": 0 }.</pre>
---	---

Slika 4.5. – Varijable stanja odsjeka zapisane u datoteke brojača osovina *BO.json*

Označavanje varijabli brojača osovina izvedeno je kao: BP_BROJ-ODSJEKA, gdje BROJ-ODSJEKA predstavlja odsjek pruge. Stanje varijable je također binarno 1 ili 0 u zavisnosti od zauzetosti odsjeka.

Datoteka *CPR_STATUS.json* zadužena je za pohranu podataka stanja cestovnog prijelaza u razini pruge. Datoteka se sastoji od tri varijable ON, OFF i LOAD. Varijable ON i OFF predstavljaju stanje rampe cestovnog prijelaza u razini dok varijabla LOAD predstavlja prisustvo prepreke u zoni cestovnog prijelaza. Struktura datoteke cestovnog prijelaza dana je na slici 4.6.

```
{  
  "ON": 0,  
  "OFF": 1,  
  "LOAD": 1  
}
```

Slika 4.6. – Varijable stanja cestovnog prijelaza zapisane u datoteci CPR_STATUS.json

Varijabla OFF je aktivna što omogućuje prijelaz cestovnog prometa preko pruge. Varijabla LOAD predstavlja prisustvo vozila u danom trenutku.

Na kraju, bilo je neophodno izraditi i datoteku vlaka *TRAIN.json*. Datoteka obuhvata varijable koje se stalno pohranjuju a vezane su za vožnju vlaka. Primjer strukture datoteke vlaka prikazan je na slici 4.7.

```
1111122:{                               1111123:{  
  "RIDE": "1111174",                       "RIDE": "1111175",  
  "VEL": 25,                                "VEL": 25,  
  "POSITION": "4.25,15",                    "POSITION": "50,15",  
  "DIRECTION": B},                          "DIRECTION": B}
```

Slika 4.7. – Varijable stanja vlaka zapisane u datoteci TRAIN.json

Glavni ključ predstavlja oznaku vlaka. U stvarnosti moguć je scenarij u kojem se nalazi više vlakova na pruzi istovremeno. Pod svakom oznakom vlaka nalazi se nova varijabla u koju su pohranjene vrijednosti svakog vlaka koji se trenutno nalazi na tračnicama. Varijabla RIDE predstavlja oznaku trenutne vožnje. Varijabla VEL predstavlja trenutnu brzinu vlaka a varijabla POSITION poziciju promatranog vlaka. Pomoću definirane četiri datoteke u potpunosti je opisano trenutno stanje na predmetnoj dionici i model kontinuirano prati stanja tijekom cijelog dana. Svaka datoteka se ažurira kontinuirano tako da se može dobiti svaka promjena nastala tijekom vožnji na pruzi.

4.7. Simulacija nastanka smetnje ili kvara tijekom odvijanja prometa na pruži

Za potrebe simuliranja nastanka kvarova ili smetnji na određenim elementima zbog konzistentnosti upotrebljavat će se ista struktura datoteka. Stanje ispravnosti elemenata se ne pregleda kontinuirano. Promjenom stanja ispravnosti određenog elementa posljedično se ažurira datoteka koja pripada tom elementu. Svaki element ima svoju pripadajuću .json datoteku u kojoj su definirane varijable kojima se manualno mijenja stanje pomoću programa.

Na taj način definirane su sljedeće datoteke: *APB1.json*, *APB2.json*, *APB3.json*, *APB4.json*, *APB5.json*, *APB6.json* te *APB7.json* sa sljedećim varijablama:

- *FSA* – kvar na signalu A
- *FSB* – kvar na signalu B
- *FGSU* – kvar na zelenom signalnom svjetlu za smjer A prema B
- *FGSD* – kvar na zelenom signalnom svjetlu za smjer B prema A
- *FRSU* – kvar na crvenom signalnom svjetlu za smjer B prema A
- *FRSD* – kvar na crvenom signalnom svjetlu za smjer B prema A
- *FYSU* – kvar na žutom signalnom svjetlu za smjer B prema A
- *FYSD* – kvar na žutom signalnom svjetlu za smjer B prema A
- *FL1* – kvar faza L1 na primaru transformatora
- *FL2* – kvar faza L2 na primaru transformatora
- *FL3* – kvar faza L3 na primaru transformatora
- *FVI* – kvar na naponu primara
- *FB1* – kvar na bateriji 1
- *FB2* – kvar na bateriji 2
- *FVO* – kvar napona izlaza

Zbog jednake strukture datoteka kvara na APB odsjecima na slici 4.8 prikazana je struktura jedne datoteke za slučaj kvara na bateriji 1 i naponu primara.

```
{
  "FSA": 0,
  "FSB": 0,
  "FGSU": 0,
  "FGSD": 0,
  "FRSU": 0,
  "FRSD": 0,
  "FYSU": 0,
  "FYSD": 0,
  "FL1": 0,
  "FL2": 0,
  "FL3": 0,
  "FVI": 1,
  "FB1": 1,
  "FB2": 0,
  "FVO": 0
}
```

Slika 4.8. – Varijable kvara u datotekama *APB1.json* – *APB7.json*

Za svaki od vlakova koji prometuju na pruzi definirane su datoteke *trainID.json* gdje ID predstavlja identifikacijski broj vlaka (1111111 – 1111123). Varijable definirane u tim datotekama su:

- *FDRIVE* – kvar na pogonu vlaka
- *IDRIVE* – smetnja na pogonu vlaka
- *FBRAKE* – kvar na kočionom sustavu vlaka
- *IBRAKE* – smetnja na kočionom sustavu vlaka
- *FWHEEL* – kvar na kotačima vlaka
- *IWHEEL* – smetnja na kotačima vlaka

Primjer datoteke kvara na vlaku za slučaj kvara na kočionom sustavu je na slici 4.9.

```
{  
  "FDRIVE": 0,  
  "IDRIVE": 0,  
  "FBRAKE": 1,  
  "IBRAKE": 0,  
  "FWHEEL": 0,  
  "IWHEEL": 0  
}
```

Slika 4.9. – Varijable kvara u datoteci *trainID.json*

Dva brojača osovina definirana su datotekama *BO1.json* i *BO2.json* sa sljedećim varijablama:

- *FAULT* – kvar na brojaču osovina
- *INTERFERENCE* – smetnja na brojaču osovina

Primjer datoteke kvara za stanje smetnje na brojaču osovina dan je na slici 4.10.

```
{  
  "FAULT": 0,  
  "INTERFERENCE": 1  
}
```

Slika 4.10. – Varijable kvara u datoteci brojača osovina

Stanje ispravnosti cestovnog prijelaza u razini pruge definirano je preko datoteke *CPR.json* sa sljedećim varijablama:

- *FAULT* – kvar na cestovnom prijelazu u razini pruge
- *INTERFERENCE* – smetnja na cestovnom prijelazu u razini pruge

Primjer za stanje smetnje na cestovnom prijelazu u razini pruge prikazan je na slici 4.11.

```
{  
  "FAULT": 0,  
  "INTERFERENCE": 1  
}
```

Slika 4.11. – Varijable kvara u datoteci cestovnog prijelaza

Za generiranje stanja smetnje ili kvara na određenom elementu izrađen je jednostavan program za upravljanje datotekom stanja ispravnosti elemenata željezničke infrastrukture. Naredba za uporabu programa je sljedeća: *generate_events ELEMENT ID ARG_1 ARG_2 ... ARG_N*. ELEMENT predstavlja element željezničke infrastrukture i može biti jedan od:

- *APB* – manipulacija stanja varijabli ispravnosti definiranih za APB
- *TRAIN* – manipulacija stanja varijabli ispravnosti definiranih za vlak
- *BO* – manipulacija stanja varijabli ispravnosti definiranih za brojač osovina
- *CPR* – manipulacija stanja varijabli ispravnosti definiranih za cestovni prijelaz u razini

ID predstavlja oznaku svakog od elemenata kojem se želi promijeniti stanje u danom trenutku. Vrijednost ID ovisi o tipu elementa kojeg se želi mijenjati i broja tih elemenata te oznake željenog elementa. Dijelovi naredbe označeni s "ARG_1 do ARG_N" predstavljaju varijable koje korisnik želi aktivirati. U nastavku su navedeni primjeri korištenja programa:

- *generate_events APB 2 FL1 FVI FB2* – simuliranje kvara na L1 naponu primara i bateriji 2 na APB-u s ID-om 2
- *generate_events TRAIN 111121 FBRAKE IWHEEL* – simuliranje kvara na kočionom sustavu i smetnji na kotačima na vlaku sa ID-om 111121
- *generate_events BO 1 INTERFERENCE* – simuliranje smetnje na brojaču osovina 1
- *generate_events CPR FAULT* - simuliranje kvara na cestovnom prijelazu u razini pruge

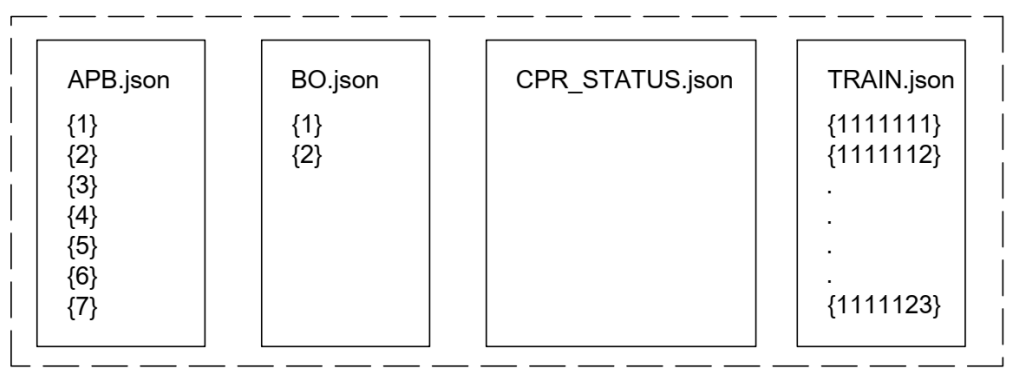
Iz prikazane strukture datoteka vidljivo je da je simulacija izrađena preko dvije skupine datoteka: datoteke stanja i datoteke kvarova i smetnji. Četiri su datoteke stanja:

- *APB* – datoteke stanja automatskog pružnog bloka kojih ima sedam na odabranoj sekciji pruge, ove datoteke sadrže varijable koje definiraju stanja signala svakog APB odsjeka za oba smjera vožnje. Svaki signal APB bloka definiran je preko šest varijabli.
- *BO* – datoteke stanja brojača osovina. Na ovoj dionici pruge predviđena su dva brojača osovina od kojih svaki kontrolira po tri odsjeka.

Zauzetost svakog odsjeka definirana je jednom varijablom, tako da jedna datoteka ima tri varijable koliko ima i odsjeka.

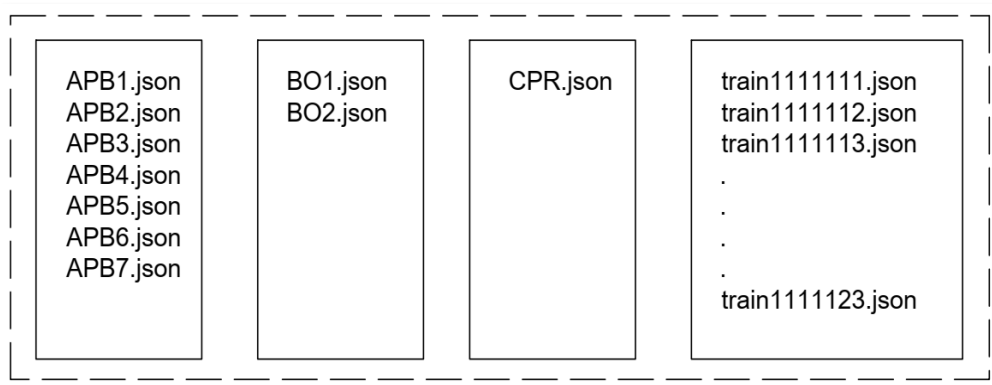
- *CPR_STATUS* – datoteka stanja cestovnog prijelaza definirana je preko tri varijable. Dvije definiraju stanje uključenosti i isključenosti a jedna određuje prepreku u zoni cestovnog prijelaza.
- *TRAIN* – datoteka koja određuje trenutno stanje vlaka definirana je preko četiri varijable. Stanje vlaka određuju: oznaka vožnje, brzina, pozicija i smjer vožnje.

Opisana skupina datoteka stanja grafički je prikazana na slici 4.12. u vidu skice.



Slika 4.12. – Skica datoteka stanja programskog ostvarenja modela

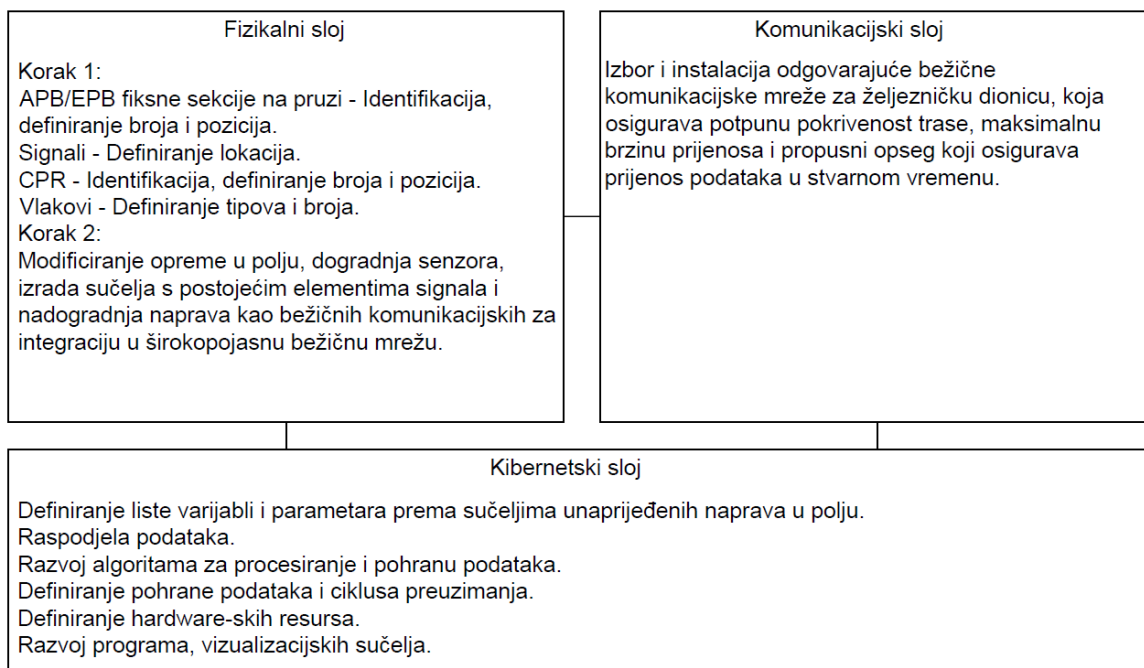
Druga skupinu datoteka formiraju varijable kvarova i smetnji naprava. Za svaku napravu na dionici pruge modela izrađena je po jedna datoteka i njen naziv ju jednoznačno određuje. Varijable sadržane u datotekama navedene su na slikama 4.8 – 4.11. Skica skupine datoteka kvara i smetnji grafički je prikazana na slici 4.13.



Slika 4.13. – Skica datoteka kvarova i smetnji programskog ostvarenja modela

Na kraju ovog poglavlja u kojem je detaljno prikazan razvoj kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava konkretne dionice pruge, izvest će se univerzalni pristup za razvoj ekvivalentnog modela za bilo koju dionicu pruge.

Opis koraka prema slojevima modela prikazan je na slici 4.14.



Slika 4.14. – Univerzalni pristup razvoju kibernetičko-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava željeznice

Ključna prednost primjene kibernetičko-fizikalnog modela na klasični signalno-sigurnosni sustav željeznice je pohrana i obrada podataka u jednom središtu, raspodjela podataka u stvarnom vremenu do svih elemenata sustava.

Univerzalna poboljšanja koja se postižu njegovom primjenom su:

- Stvaranje digitalne slike sustava i pokretanja procesa u svim ključnim pozicijama u stvarnom vremenu, čime se rješava temeljni problem klasičnih sustava - slijepi/nedostupni elementi.
- Povećana mogućnost automatskih radnji u procesu.
- Točnije i brže otkrivanje trenutnih kvarova.
- Mogućnost izrade novih baza podataka o stanju svih elemenata sustava kroz normalan rad sustava, zbog izrade kvalitetnih planova preventivnog održavanja.

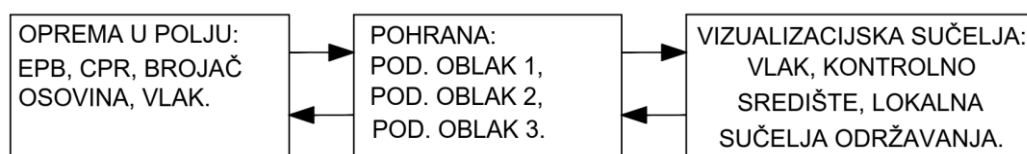
Izradom programa za model postavljen na početku poglavlja 4.1 omogućena je simulacija procesa željezničkog i cestovnog prometa na ograničenoj sekciji pruge koja sadrži simulacije svih signalno-sigurnosnih naprava unaprijeđenih u poglavlju 3.2, a koje grade bilo koju stvarnu dionicu jednokolosječne pruge. Također su izrađena i sučelja putem kojih je moguće korisnički mijenjati proces odvijanja prometa u smislu promjene stanja varijabli u signalno-sigurnosnim napravama, kako bi kroz simulacije bilo moguće ostvariti što veći broj stvarnih različitih stanja sustava. U sljedećem poglavlju bit će prikazana gradnja i rezultati vizualizacije modela kojom će se postići grafički preslik programa i procesa prometa u postavljenom signalno-sigurnosnom modelu željeznice.

5. VIZUALIZACIJA KIBERNETSKO-FIZIKALNOG MODELA SIGNALNO-SIGURNOSNOG SUSTAVA ŽELJEZNICE

U prethodnom poglavlju prvo je definiran fizikalni model dionice pruge na kojem se gradi njegova kibernetička preslika. Potom su postavljeni određeni parametri u obliku voznog reda i broja vlakova koji su bili neophodni za definiranje zbog simuliranja procesa vožnji. Poslije toga je bilo moguće izraditi dijagram tijeka procesa na temelju kojeg se gradi računalni program. Također su definirane sve skupine datoteka i njihova struktura određena varijablama. Sljedeći korak u izradi kibernetičko-fizikalnog modela je izrada vizualizacije programske simulacije. Vizualizacijom procesa, jednostavno rečeno, oživjet će se proces odvijanja prometa prugom i bit će vidljive temeljne prednosti novog modela signalno-sigurnosnog sustava željeznice. Prednosti se ogledaju u otvorenoj razmjeni podataka između elemenata i jednostavnom pristupanju podacima u stvarnom vremenu s bilo kojeg mjesta.

5.1. Vizualizacija rada jednokolosječne otvorene pruge

U ovom poglavlju fokus je stavljen na tehnologije potrebne za grafičko preslikavanje izrađenog računalnog modela u digitaliziranu vizualnu formu. Potpuna integracija kibernetičko-fizikalnog sustava bi značila da svaki element željeznice ima pristup svim informacijama na temelju kojih je moguće djelovati preventivno i spriječiti nastanak neželjenih scenarija. Prvo će biti prikazano kako se na podlozi prikupljenih podataka može vizualizirati trenutno stanje željeznice. Pomoću vizualizacije operateri imaju potpunu sliku sustava i procesa te prema njoj se poduzimaju odgovarajuće akcija. Na primjer, strojovođa u vizualiziranom sustavu ima jasnu sliku stanja zauzetosti svakog pružnog odsjeka a ne samo slijedećeg odsjeka što je slučaj kod većine postojećih sustava. Na taj način se mogućnost nastanka sudara ili sličnog katastrofalnog scenarija uvelike smanjuje. Isto tako, vizualizacija stanja kvarova ili smetnji značajno pojednostavljuje održavanje i otklanjanje kvarova i smetnji jer se detekcija kvara događa trenutno. Također potreba za redovitim pregledima određenih sustava, pri čemu se zaustavlja promet, se smanjuje što svakako štedi vrijeme i materijalne resurse. Opća arhitektura vizualizacijskih sučelja prikazana je na slici 5.1.



Slika 5.1. – Razmjena podataka u kibernetičko-fizikalnom modelu signalno-sigurnosnog sustava željeznice

Sučelja vizualizacije dizajnirana su prema funkcionalnoj pripadnosti podataka. Nalaze se u kibernetском sloju modela i operiraju s podacima pohranjenim na poslužitelju.

5.2. Gradnja sučelja za vizualizaciju

Zbog pregleda stanja sustava i mogućnosti daljinskog djelovanja na promjenu određenih parametara u napravama bit će izrađeno grafičko korisničko sučelje. Sučelje za vizualizaciju predstavlja posljednji sloj kojim se kompletira izrada kibernetско-fizikalnog modela sustava.

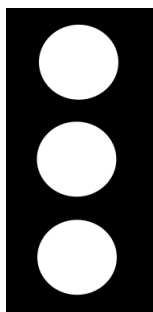
Kako bi spremljeni podatci bili grafički prikazani i dostupni putem sučelja primijenjene su tehnologije: HTML, JavaScript i SVG. Hipertekst dokument stvara se pomoću HTML jezika. HTML jezikom oblikuje se sadržaj i stvaraju se hiperveze hipertekst dokumenta čiji prikaz omogućuje internet preglednik. Jezici za vizualizaciju sadržaja su standardizirani kako bi svaki dokument izgledao jednako bez obzira o kojemu je internet pregledniku, računalu i operacijskom sustavu riječ. Osnovni građevni element svake stranice su znakovi koji opisuju kako će se nešto prikazati u internet pregledniku. Poveznice unutar HTML dokumenata povezuju dokumente u uređenu hijerarhijsku strukturu i time određuju način na koji korisnik doživljava sadržaj sučelja. SVG (*eng. Scalable Vector Graphics*) je XML jezik za prikazivanje dvodimenzionalne vektorske grafike, nepomične ili pomične. To je otvoreni standard stvoren od strane W3C [25]. Integracija SVG grafike u HTML je izravna i predstavlja standardni oblik implementacije grafike i animacija na internetske sadržaje. Kao treći jezik na podlozi kojeg je omogućeno izvršavanje operacija kao što su učitavanje podataka i manipulacija objekata u SVG grafici upotrijebljen je JavaScript. JavaScript je skriptni programski jezik, koji se izvršava u internet pregledniku na strani korisnika. JavaScript s AJAX tehnikom (*eng. Asynchronous JavaScript and XML*) omogućuje internet stranicama komunikaciju sa poslužiteljskim programom, što čini internet aplikaciju interaktivnijom i lakšom za korištenje.

Statička scena simulirane jednokolosječne pruge prikazane na slici 4.2, izrađena je u "Inkscape" programu te su na taj način definirani svi statički elementi kao što su kolodvori, tračnice, signali, cestovno križanje i rampe cestovnog prijelaza. Dinamički elementi grafike kao što su vlakovi i vozila su naknadno dodani pomoću nadgradnje dobivene XML forme preko JavaScript programskog jezika. Glavni prikaz grafike na internetu odvija se preko ugradnje SVG XML-a u HTML glavnoga sučelja. Kako bi bilo izbjegnuto izravno manipuliranje tekстом upotrijebljena je vanjska JavaScript programska biblioteka (*eng. Library*) snap.svg [26] u kojoj su implementirani funkcijski pozivi za manipuliranje SVG sadržaja. Primjer uporabe snap.svg biblioteke prikazat će se na jednostavnoj promjeni znaka na željezničkom signalu.

U nastavku je prikazana XML struktura SVG grafike znaka na željezničkom signalu:

```
<svg id="semafor">
  <g
    inkscape:label="Layer 1"
    inkscape:groupmode="layer"
    id="layer1">
    <rect
      id="semafor"
      width="49.712132"
      height="101.02789"
      x="49.177593"
      y="45.232105"
      style="stroke-width:0.26458332" />
    <ellipse
      id="semafor-signal-crveno"
      cx="72.571426"
      cy="127.81785"
      rx="13.085795"
      ry="12.431215"
      style="fill:#ffffff;stroke-width:0.27631515" />
    <ellipse
      id="semafor-signal-zuto"
      cx="72.420235"
      cy="95.311905"
      rx="13.085795"
      ry="12.431215"
      style="fill:#ffffff;stroke-width:0.27631515" />
    <ellipse
      id="semafor-signal-zeleno"
      cx="73.100594"
      cy="63.183933"
      rx="13.085795"
      ry="12.431215"
      style="fill:#ffffff;stroke-width:0.27631515" />
  </g>
</svg>
```

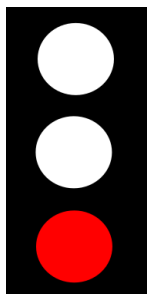
Grafički prikaz prethodne XML strukture prikazana je na slici 5.2.



Slika 5.2. – Grafički prikaz željezničkog signala

Svaki oblik koji se nalazi na grafičkom simbolu (pravokutnik, kružnica) ima svoju jedinstvenu oznaku. Na primjer, oblici za signalizaciju imaju oznaku: semafor-signal-zeleno, semafor-signal-zuto, semafor-signal-crveno. Učitavanje grafike preko snap.svg-a izvršava se instrukcijom `var Model = Snap("#semafor");` U varijabli `Model` spremaju se svi elementi iz signala SVG-a. Kako bi se izvršila manipulacija SVG tako da prikaže upaljen neki od znakova na signalu potrebno je izabrati odgovarajući element te ga naknadno prebojati odgovarajućom bojom. Na primjer, stanje upaljenog crvenog znaka, koji je prikazan na slici 5.3, izvršava sljedeći kod:

```
Model.crveno=Model.select("#semafor-signal-crveno").attr({style:"fill:red"});
```



Slika 5.3 - Upaljeno crveno signalizacijsko svjetlo

Na taj način u stvarnom vremenu moguće je mijenjati grafiku u skladu s odgovarajućim stanjem simulirane jednokolosječne pruge. Na primjer, u slučaju zauzetosti pružnog odsjeka 3 potrebno je na signalu tog odsjeka predstaviti stanje zauzetosti upaljenim crvenim znakom na signalu i istovremeno je potrebno na prethodnom pružnom odsjeku upaliti žuti znak na signalu. Drugi primjer predstavlja prikaz zatvorene rampe za cestovni promet u slučaju zauzetosti odsjeka 5. Za prikaz tog efekta rampa postaje crvena čime se signalizira da je rampa spuštена.

5.3. Vizualizacija nastanka kvarova i smetnji na elementima pruge

Nastanak kvara ili smetnje na elementima signalno-sigurnosnog sustava željeznice predstavlja jedan od bitnih slučajnih procesa koji gradnjom kibernetско-fizikalnog modela postaje vidljiv i moguć za identificiranje. Svaki element ima definirane varijable koje pokazuju određen kvar ili smetnju u sustavu. Praćenjem vrijednosti definiranih varijabli moguće je na odgovarajući način vizualizirati nastanak kvara ili smetnje na određenom elementu sustava.

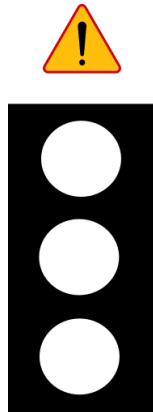
Prikaz kvara ili smetnje na određenom elementu izveden je znakom upozorenja prikazanom na slici 5.4 koji se u vizualizacijskom sučelju pojavljuje pored elementa.



Slika 5.4. - Znak upozorenja

U slučaju promjene stanja ispravnosti određenog elementa znak upozorenja pojavi se iznad elementa koji je u kvaru. Određivanje ispravnosti elemenata željeznice utvrđuje se preko vrijednosti varijabli ispravnosti svakog elementa koje se spremaju u točno određene *.json* datoteke, definirane u poglavlju 4.7.

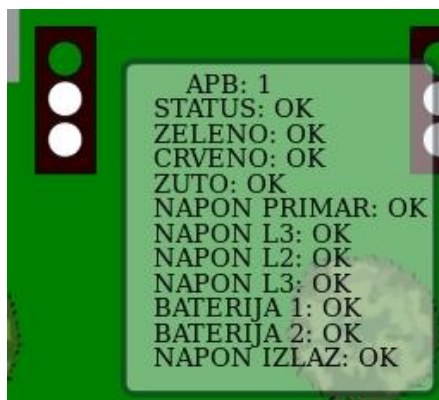
Primjer grafičkog prikaza kvara na jednom od signala prikazan je na slici 5.5.



Slika 5.5. - Kvar ili smetnja na određenom signalu

Znak upozorenja svakako pokazuje da se dogodio slučaj kvara ili smetnje na nekom elementu sustava. Kako bi bilo moguće točno utvrditi koji dio elementa je promijenio stanje ispravnosti a da pri tome slika modela ne bi bila previše kompleksna, vizualizacijom je ostvaren prikaz vrijednosti svih varijabli za određeni element sustava koji se pojavljuje kada se pokazivač miša nalazi na tom elementu (*eng. hover*).

Učinak do kojega dođe kada se pokazivač miša postavi na simbol APB1 prikazan je na slici 5.6.



Slika 5.6. - Trenutno stanje varijabli elementa APB1/EPB1

5.4. Vizualizacija prometa u simuliranom modelu pruge

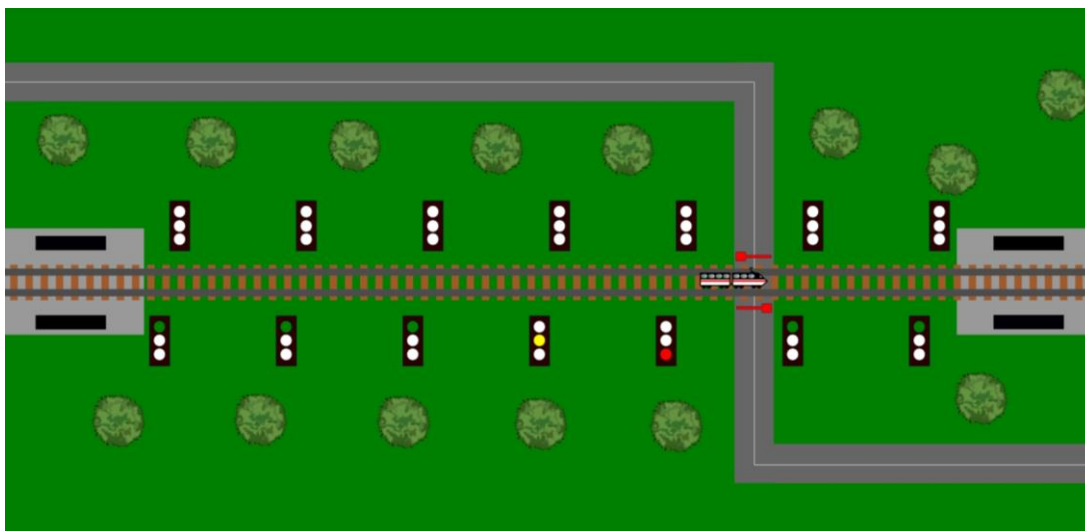
U poglavlju 4 detaljno je objašnjeno kako se odvija simulirani promet na predmetnoj pruzi. Svaki podatak se sprema u *.json* datoteke i na taj način je omogućeno očitavanje trenutnog stanja na pružnom odsjeku. Datoteke zadužene za spremanje stanja signalno-sigurnosnog sustava željeznice su:

- *TRAIN.json* – datoteka za trenutnu vožnju, oznaku i poziciju vlaka, smjer vožnje i njegovu brzinu,
- *APB.json* – datoteka za stanja uključenosti/isključenosti signala svih automatskih/elektroničkih pružnih blokova,
- *CPR_STATUS.json* – datoteka za stanje cestovnog prijelaza u razini,
- *BO.json* – datoteka za stanja brojača osovina.

U nastavku će se kroz određena svojstvena stanja prometa u modelu prikazati vizualno sučelje.

Slika 5.7 prikazuje slučaj normalne vožnje vlaka od kolodvora A prema kolodvoru B, u trenutku kada se vlak nalazi na petom odsjeku i kada je aktivan cestovni prijelaz. Na programskom sučelju za vizualizaciju procesa simulacije vožnje vidljivo je da su elementi signalno-sigurnosnog sustava ispravni jer nema znakova upozorenja u prozoru.

Stanja signala EPB-a na odsjeku 5 pokazuju crveni znak za sljedeći vlak, također je vidljivo da su rampe cestovnog prijelaza crvene boje što znači da je cestovni promet za prijelaz u razini pruge zatvoren. Stanje signala na EPB-u 4 je žuto što signalizira eventualnom sljedećem vlaku opreznu vožnju jer je odsjek 5 zatvoren za promet.



Slika 5.7. – Normalna vožnja vlaka bez kvarova i smetnji

Na slici 5.8 vidi se trenutak kada vlak vozi od kolodvora A prema kolodvoru B, na četvrtom odsjeku, pri čemu su prisutni kvarovi ili smetnje na signalima APB4 i vlaku.



Slika 5.8. – Vožnja vlaka pri određenim kvarovima i smetnjama na napravama

Vožnja vlaka se odvija normalno jer signali prikazuju stvarna stanja zauzetosti odsjeka 4 i 3. Međutim, strojovođa, operater u središtu za upravljanje i službe održavanja vide znakove upozorenja na elementima EPB-a 4 kao i znak upozorenja na samom vlaku što je signal za provjeru i otklanjanje kvarova i smetnji u podsustavima koji su signalizirani.

Prikazano programsko sučelje rezultat je izrade programa kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava predmetne dionice pruge. Glavna prednost ovakvog pristupa je ostvarivanje pune vidljivosti informacija u stvarnom vremenu. To praktički znači da je na svakom mjestu u kojem postoji potreba (upravljačko središte, vlak, uređaji službe za održavanje na terenu) moguće izraditi željeno vizualno sučelje. To su omogućile modifikacije na svakom uređaju u polju u kojem se sada nalazi najmanje jedan senzor i jedno mikroračunalo. Time je omogućeno da svaki uređaj u sustav šalje informacije o svom radnom stanju i informacije o ispravnosti. U slučaju neispravnog funkcioniranja ta informacija je dostavljena glavnom poslužitelju odakle je dostupna svim korisnicima sustava kojima se to programski omogućiti.

Primjenom ovakvog sustava s vizualizacijskim sučeljima na bilo koju stvarnu dionicu pruge sve važne informacije i podatci iz prometa bili bi vidljivi i dostupni u stvarnom vremenu. To bi mnoge podatke koji obično ne budu pravovremeno otkriveni a koji često dovedu do velikih željezničkih nezgoda učinilo vidljivim prije nego se dogode neželjeni događaji. Na taj način bi se sustavi željezničkog prometa učinili sigurnijima jer bi se primjenom predložene tehnologije omogućilo preventivno poduzimanje mjera i radnji u sustavu čime bi se na vrijeme otklonile smetnje, kvarovi ili stanja koji bi mogli dovesti do nezgoda.

6. TEHNIČKA I EKONOMSKA ANALIZA PROMIJENJENIH PARAMETARA SUSTAVA USLIJED PRIMJENE PREDLOŽENOG MODELA

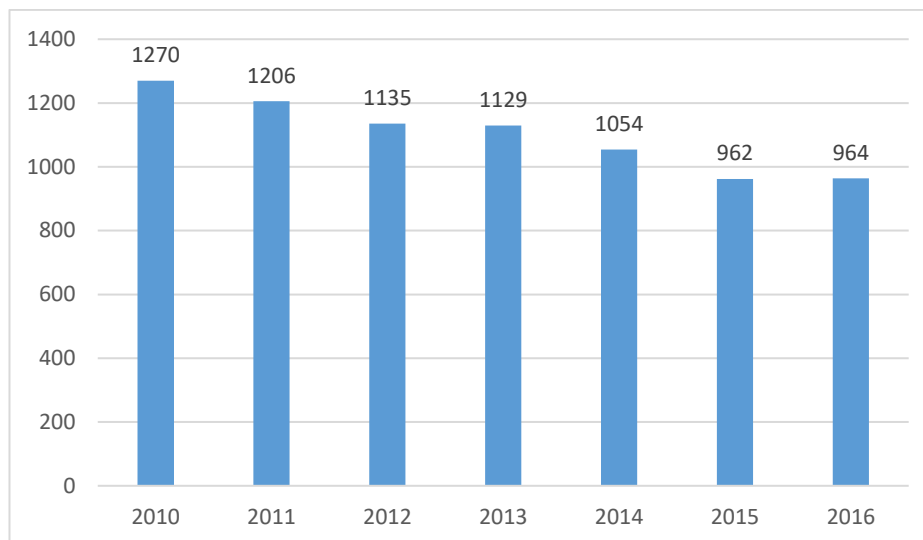
Analiza izvedenog kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava na predmetnoj dionici pruge bit će provedena na više načina u cilju stvaranja realne projekcije na unaprjeđenja koja donosi predloženi model. Kibernetско-fizikalni model definiran je kroz računalnu simulaciju a vizualizacijom je stvorena stvarna vizualna percepcija modela.

Prvo će analizom stvarnih statističkih podataka o nezgodama na europskim željeznicama biti objašnjeno na koji način i u kojim segmentima predmetni kibernetско-fizikalni model može djelovati na smanjenje broja nezgoda čime se podiže razina sigurnosti. Korištenjem stvarnih podataka o broju nezgoda po definiranim tipovima u razdoblju od deset godina i hipotetskom pretpostavkom o udjelu smanjenja broja nezgoda, statističkim t testom odredit će se statistička značajnost djelovanja kibernetско-fizikalnog modela na smanjenje broja nezgoda. U drugom dijelu, analizom izvedljivosti, dokazat će se ekonomsko-tehnička opravdanost implementacije modela na temelju stvarnih podataka o investicionim vrijednostima instalacije signalno-sigurnosnih, komunikacijskih i računalnih sustava. Potom će izračunima biti pokazano na koji način i u kojoj mjeri kibernetско-fizikalni model može povećati prosječnu brzinu vlaka na određenoj dionici čime se postižu značajne uštede u željezničkom transportu.

Na kraju će biti analiziran dugoročni efekt implementacije modela koji se ogleda u segmentu održavanja sustava željeznice, pri čemu se jasno ističu koristi koje donosi implementacija sučelja za vizualizaciju sustava.

6.1. Sigurnosni pokazatelji u europskim željeznicama

Pokazatelj rasta sigurnosti u europskom željezničkom prometu je smanjenje broja preminulih ljudi od posljedica željezničkih nezgoda. Prema podacima Eurostata [27] u periodu od 2010. do 2016. godine, broj preminulih osoba smanjen je za oko 24%, uz stalni trend smanjenja iz godine u godinu. Ukupan broj preminulih osoba po godinama prikazan je na dijagramu na slici 6.1. Povećana sigurnost na europskim željeznicama je posljedica dugogodišnje politike stvaranja jedinstvenih sustava upravljanja i mnogobrojnih investicija u suvremene tehnologije i infrastrukturu. Ipak, zbog preciznije predstave stvarnog stanja i kvalitetnije analize sigurnosti potrebno je pogledati statističke podatke o razvijenosti željeznica u pojedinim zemljama članicama jer se duljina željezničkih pruga i broj prevezenih putnika značajno razlikuju od zemlje do zemlje. Na taj način moguće je doći do relativnih podataka o broju poginulih u prometu u odnosu na ukupan broj prevezenih putnika.



Slika 6.1. - Broj preminulih ljudi od željezničkih nezgoda 2010. – 2016. [25]

Ukupan broj putnika u željezničkom prometu u EU se povećao u 2016. godini u odnosu na 2015. godinu za oko 2,56%. U većini zemalja primjećuje se povećanje broja putnika ali postoje i zemlje s trendom pada broja putnika među kojima je i Republika Hrvatska. Isto tako važno je primijetiti da podatci o broju putnika neizravno pokazuju i razvijenost i veličinu željezničke infrastrukture. Tablica (6.1) prikazuje broj prevezenih putnika u 2015. i 2016. godini u zemljama Europske unije, kao i u nekim zemljama koje još uvijek nisu članice.

Tablica 6.1. - Broj prevezenih putnika u 2015. i 2016. godini u zemljama EU (broj x 1.000 putnika) [27]

	2015	2016
EU-28	9,393,378	9,640,320
Belgija	:c	:c
Bugarska	22,518	21,425
Češka Republika	176,146	178,766
Danska	212,253	203,637
Njemačka	2,684,908	2,813,782
Estonija	6,659	6,926
Irska	39,660	42,820
Grčka	16,040	15,582
Španjolska	561,973	569,743
Francuska	1,241,078	1,249,299
Hrvatska	21,649	20,709
Italija	829,494	852,220
Cipar	-	-
Latvija	17,065	17,228
Litva	3,790	3,916
Luksemburg	22,496	22,459
Mađarska	144,398	146,583
Malta	-	-
Nizozemska	392,153	391,361

Austrija	240,588	253,196
Poljska	264,322	275,445
Portugal	130,421	133,472
Rumunjska	61,218	58,859
Slovenija	14,135	13,650
Slovačka	60,292	69,150
Finska	75,952	82,114
Švedska	214,434	220,945
Ujedinjeno Kraljevstvo	1,741,562	1,772,563
Norveška	73,836	74,293
Švicarska	474,726	497,289
Crna Gora (*)	81	84
BJR Makedonija	1,022	663
Turska	95,318	89,038

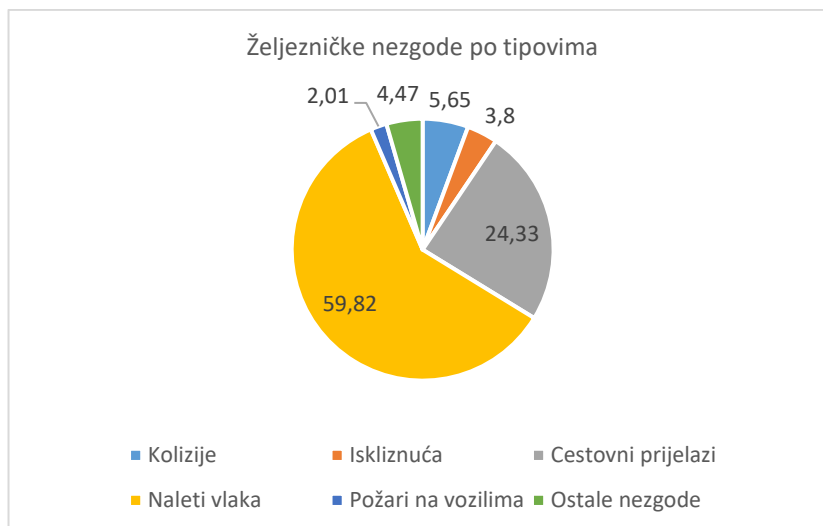
Simboli:

- : *nije dostupno*
- *nije primjenljivo*
- C *povjerljivi podatci*
- 0 *vrijednosti oko nule ili zanemariv transport*
- (*) *ukupna vrijednost je suma kvartalnih podataka*

6.2. Podjela željezničkih nezgoda

Statistika željezničkih nezgoda poznaje pet tipova nezgoda i šestu skupinu neodređenih nezgoda. Prema podacima Eurostata za 2016. godinu prikazanim u prilogu 1, primjetno je da određeni tipovi nezgoda i danas odnose značajan broj ljudskih života. Tipovi nezgoda opisani su u nastavku:

1. Nezgode koje nastaju kada se dva željeznička vozila susretnu na istom kolosijeku nazivaju se kolizije i nastaju kao posljedica pogreške u upravljanju, signalizaciji ili skretnici. Udio kolizija u ukupnom broju nezgoda je oko 5,65 %.
2. Drugi tip nezgode je iskliznuće s tračnica i nastaje zbog kvara na tračnicama, skretnicama ili na voznim ili kočionim sustavima vlaka. Iskliznuća s tračnica predstavljaju još manji udio u ukupnom broju nezgoda od oko 3,80 %.
3. Cestovni prijelazi u razini pruge su još uvijek vrlo rizične točke za ugrožavanje sigurnosti prometa s udjelom od 24,33 % u ukupnom broju željezničkih nezgoda.
4. Najveći udio u nezgodama 59,82 % pripada neosiguranim dijelovima željeznica, kolodvorskim područjima i otvorenoj pruzi gdje se nezgode događaju uslijed naleta vlaka na ljude ili druga vozila koji se nađu u zabranjenom području.
7. Peti tip nezgode su požari na željezničkim vozilima čiji je udio 2,01 %.
8. Ostale, neodređene nezgode su 4,47 % od ukupnog broja nezgoda.



Slika 6.2. - Postotni udio željezničkih nezgoda po tipovima

U prilogu 1 prikazan je broj željezničkih nezgoda po tipovima nezgode. Ovi podatci su vrlo korisni za analize s aspekta sigurnosti jer se uočavaju kritična mjesta na pruzi na kojima se tehničkim unaprijeđenjima može smanjiti broj nezgoda.

Ukupan broj željezničkih nezgoda iskazan je izravno bez relativnog odnosa prema stupnju tehničke opremljenosti i veličini mreže nacionalnih željeznica.

Statistički podatci Eurostata prikazani u tablicama priloga 1 i 2 predstavljaju ukupno stanje na pojedinim nacionalnim željeznicama. Podatci su dani skupno za razvijene i nerazvijene europske zemlje. To znači da u podacima o prometu i nezgodama učestvuju i neosigurane pruge i pruge opremljene suvremenim sustavima (GSM-R, ETCS). Kibernetičko-fizikalni model željeznice može djelovati na smanjenje broja nezgoda jer pretvara rigidne sustave sigurnosti u sustave u stvarnom vremenu i pasivne elemente u aktivne. Nemoguć ili ograničen prijenos prave informacije do mjesta s kojeg se može djelovati na sprječavanje neželjenog događaja je osnovni uzrok za veliki broj željezničkih nezgoda.

6.3. Unaprijeđenje sigurnosti koje donosi kibernetičko-fizikalni model

Kibernetičko-fizikalni model signalno-sigurnosnog sustava popunjava komunikacijsku prazninu koja postoji u rigidnim sustavima upravljanja između cestovnih prijelaza, vlaka i centra za upravljanje. Strojovođa u vlaku u dosadašnjim sustavima ima vizualnu signalizaciju ispravnosti prijelaza pri čemu se za slučaj neispravnosti prijelaza nalaže prolaz vlaka uz ograničenu brzinu i povećan oprez. Ipak, većina nezgoda se događa na ispravnim prijelazima pri čemu se u štićenom području nađu pješaci ili druga vozila. Predloženi model ima sustav za detekciju prepreke u štićenom području pri čemu se u realnom vremenu signal detekcije

prepreke šalje vlaku i centru za upravljanje što omogućuje zaustavljanje vlaka prije nailaska na prepreku. Ovakav sustav zasigurno bi smanjio udio željezničkih nezgoda u ukupnom broju nezgoda i omogućio brži prolaz vlakova čime se povećava sigurnost prometa. Smanjenje broja nezgoda a samim tim i povećanje sigurnosti postiže se i instaliranjem senzorskih sustava za vozne i kočione elemente vlaka jer bi problemi pregrijavanja ležajeva, kvarovi na kotačima i osovinama bili preventivno otkriveni i otklonjeni. Na taj način bila bi izbjegnuta iskliznuća koja nastaju kao posljedica kvara na sustavima vlaka. Signalizacija kvara na signalima, EPB-ovima i brojačima osovina umanjila bi pogreške u prometu koje nastaju kao posljedica kvarova na signalno-sigurnosnim sustavima i njihovim sustavima napajanja.

Dodatna prednost koju nudi kibernetско-fizikalni model željeznice, a koja se može iskoristiti u cilju povećanja sigurnosti, je mogućnost da se pravovremeno šalju obavijesti učesnicima u cestovnom prometu o blizini vlaka. Na taj način se otvara komunikacijski kanal između najugroženijih učesnika u prometu (vozača i pješaka) i kompleksnog industrijskog sustava upravljanja. Tako bi se djelovalo na smanjenje broja nezgoda jer se alarmiranje može vršiti na cijeloj trasi pruge svim učesnicima koji imaju najmanje pametni telefon a ne kao do sada samo na osiguranim dijelovima i uglavnom na strani željezničkog sustava. U tablici 6.2 prikazani su tipovi nezgoda prema Eurostatu na koje se može djelovati primjenom predloženih rješenja u modelu.

Tablica 6.2. – Prikaz unaprjeđenja sigurnosti primjenom kibernetско-fizikalnog modela

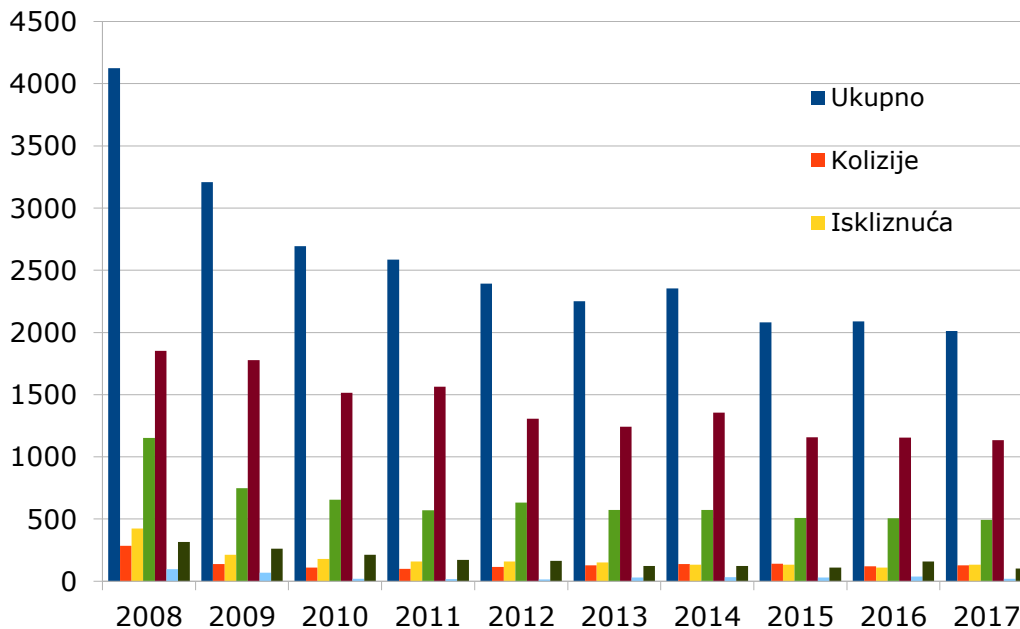
Tip nezgode prema Eurostat-u	Postotni udio u ukupnom broju nezgoda	Unaprjeđenje kibernetско-fizikalnog modela koje djeluje na smanjenje broja nezgoda
Iskliznuća s tračnica	3,8 % (Slika 6.2.)	<ul style="list-style-type: none"> - Kontinuirana signalizacija stanja skretnice u vlaku omogućit će preventivnu reakciju strojovođe na neispravan položaj skretnice. - Signalizacija smetnje na ležaju kotača omogućit će pravovremenu popravku kako ne bi došlo do kvara tijekom vožnje i iskliznuća vlaka.
Cestovni prijelazi (Uključujući pješake)	24,33 % (Slika 6.2.)	<ul style="list-style-type: none"> - Kontinuirana signalizacija stanja prijelaza u vlaku omogućit će preventivnu reakciju strojovođe. - Signalizacija eventualne prepreke na aktivnom prijelazu omogućit će zaustavljanje vlaka prije kolizije. - Signalizacija približavanja vlaka u stvarnom vremenu svim učesnicima u prometu koji su u blizini prijelaza je informacija koja može spriječiti mnogo nezgoda. - Jednostavnije osiguranje i prijenos signala s manje frekventnih prijelaza smanjuje rizik od kolizija.
Nezgode s ljudima kao posljedica kretanja željezničkih vozila (isključujući samoubojstva)	59,82 % (Slika 6.2.)	<ul style="list-style-type: none"> - Signalizacija približavanja vlaka u stvarnom vremenu svim učesnicima koji su u blizini pruge.

6.4. Određivanje statističke značajnosti djelovanja kibernetско-fizikalnog modela na smanjenje broja željezničkih nezgoda

Na temelju statističkih podataka o broju željezničkih nezgoda na godišnjoj razini od 2008. – 2017. [27] i analize djelovanja kibernetско-fizikalnog modela na željeznički signalno-sigurnosni sustav iz koje je proizašla tvrdnja da će primjena kibernetско-fizikalnog modela djelovati na smanjenje broja nezgoda u segmentima kolizija, iskliznuća vlakova, cestovnih prijelaza i naleta vlakova na nepredviđene objekte u pružnom pojasu. Primjenom statističkog T testa [28] za testiranje razlike aritmetičkih sredina bit će određena statistička značajnost primjene kibernetско-fizikalnog modela na stvarne signalno-sigurnosne sustave željeznica.

Tablica 6.3. – Ukupan broj nezgoda na europskim željeznicama po tipovima [25]

Godina	2008.	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.
Ukupno	4124	3208	2694	2585	2393	2250	2355	2080	2089	2013
Kolizije	286	137	110	100	115	127	139	142	121	129
Iskliznuća	423	212	180	159	159	152	133	132	111	134
C. prijelazi	1151	749	656	570	633	574	574	508	505	494
Naleti vlaka	1851	1777	1515	1565	1307	1243	1355	1158	1156	1134
Požari	96	70	19	18	16	31	32	30	37	21
Ostalo	317	263	214	173	163	123	122	110	159	101



Slika 6.3. – Dijagram željezničkih nezgoda u Europi prema tipu nezgode (Grafički prikaz podataka iz tablice 6.3)

Pretpostavit će se da je pojedinačno smanjenje broja nezgoda za sve godine linearno i da prema tipu nezgoda iznosi kako je dano u tablici 6.3. Algoritam za izračun vrijednosti smanjenja broja nezgoda po godinama za interval godina od M do N dan je izrazom 6.1.

$$R[\%] = \frac{\sum_{Y=M}^{M+N} (A_{YT} - A_{YCF}) / A_{YT}}{N+M} \cdot 100 \quad (6.1)$$

gdje je:

A_{YT} – Ukupan broj nezgoda za godinu (Stvarni sustav)

A_{YCF} – Ukupan broj nezgoda za godinu (Kibernetičko – Fizikalni model)

Rezultati primjene izraza (6.1) prikazani su u tablici 6.4.

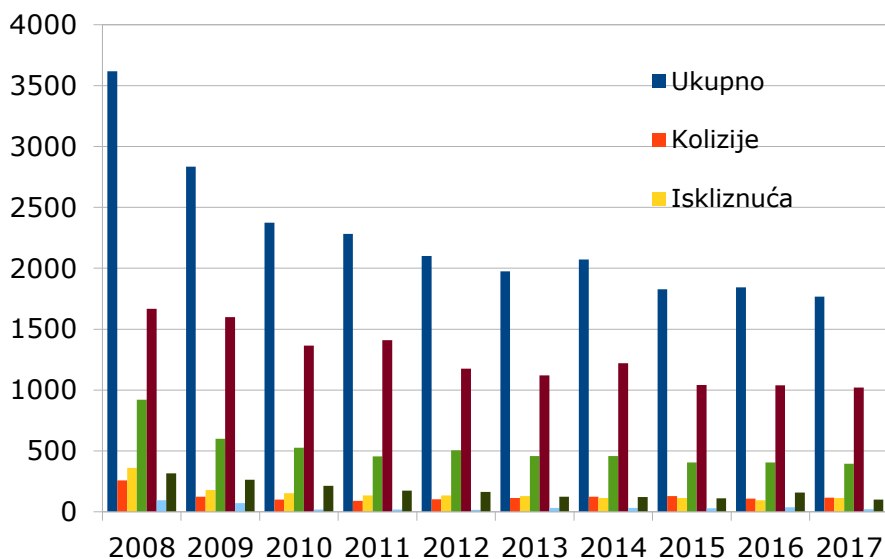
Tablica 6.4. – Hipotetske vrijednosti smanjenja broja nezgoda po tipu nezgode

Tip nezgode	R - Smanjenje (%)
Iskliznuća	15
Cestovni prijelazi	20
Naleti vlaka	10
Kolizije	10

Primjenom hipotetskih postotaka smanjenja broja nezgoda na podatke iz tablice 6.3 dobivaju se nove vrijednosti koje predstavljaju godišnji broj nezgoda po tipovima u slučaju primjene kibernetičko-fizikalnog modela na signalno-sigurnosne sustave željeznice. Tako su dobivene dvije aritmetičke sredine na koje se može primijeniti statistički t test razlike. Tablica 6.5 prikazuje hipotetski broj nezgoda po tipovima koji bi bio ostvaren da je za navedene godine bio implementiran kibernetičko-fizikalni signalno-sigurnosni sustav na prugama za koje su podatci prikazani u tablici 6.3.

Tablica 6.5. – Hipotetski ukupan broj nezgoda na europskim željeznicama po tipovima poslije primjene kibernetičko-fizikalnog modela na signalno-sigurnosne sustave

Godina	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Ukupno	3617	2834	2374	2281	2100	1975	2071	1828	1843	1768
Kolizije	257	123	99	90	104	114	125	128	109	116
Iskliznuća	360	180	153	135	135	129	113	112	94	114
C. prijelazi	921	599	525	456	506	459	459	406	404	395
Naleti vlaka	1666	1599	1364	1409	1176	1119	1220	1042	1040	1021
Požari	96	70	19	18	16	31	32	30	37	21
Ostalo	317	263	214	173	163	123	122	110	159	101



Slika 6.4. – Hipotetski dijagram željezničkih nezgoda u Europi prema tipu nezgode poslije primjene kibernetско-fizikalnog modela na signalno-sigurnosne sustave

Ukupan broj željezničkih nezgoda prije i poslije hipotetske primjene kibernetско-fizikalnog modela na signalno-sigurnosni sustav dan je u tablici 6.6.

Tablica 6.6. – Usporedni prikaz broja nezgoda stvarnih signalno-sigurnosnih sustava i primjenom hipotetskog kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnih sustava na europskim željeznicama

Godina	2008.	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.
Ukupno (stvarno)	4124	3208	2694	2585	2393	2250	2355	2080	2089	2013
Ukupno (KF model)	3603	2827	2369	2276	2094	1969	2064	1821	1837	1762
Razlika	521	381	325	309	299	281	291	259	252	251

Za primjenu statističkog t testa potrebno je poznavati sljedeće parametre statističkog skupa: veličinu uzorka, standardnu razliku i aritmetičku sredinu.

Odlučivanje o ispravnosti hipoteze provodi se usporedbom parametara t kritično i t ostvareno. Parametar t određuje se prema izrazu 6.2.

$$t = \frac{\bar{X}_{uz} - \bar{X}_{os}}{SR_{uz} / \sqrt{n - 1}} \quad (6.2)$$

gdje je:

- \bar{X}_{uz} – aritmetička sredina uzorka
- \bar{X}_{os} – aritmetička sredina osnovnog skupa
- SR_{uz} – standardna razlika uzorka
- $n - 1$ – broj stupnjeva slobode

Nulta hipoteza za slučaj usporedbe aritmetičkih sredina broja nezgoda na europskim željeznicama za stvarne signalno-sigurnosne sustave i broja nezgoda za hipotetsku primjenu

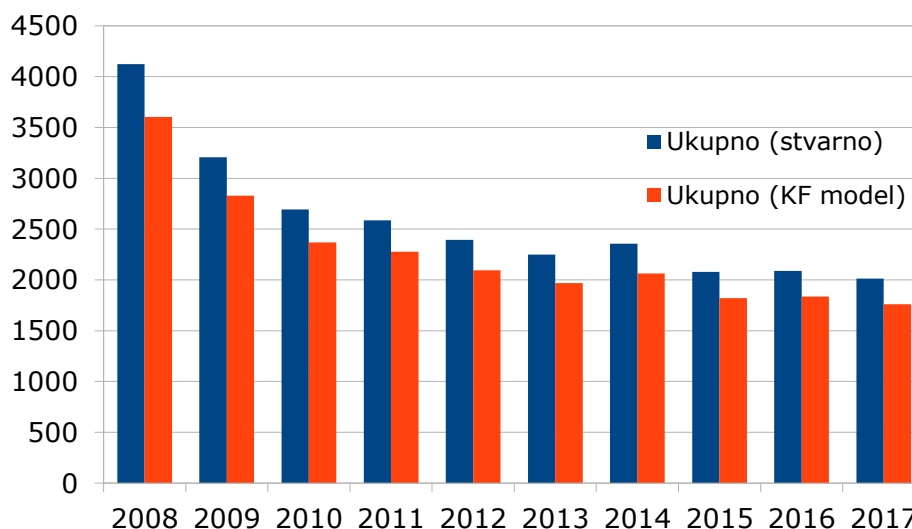
kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava je da nema značajnih promjena odnosno smanjenja broja nezgoda.

Primjenom t testa u MS Excel programu na podatke iz tablice 6.6. dobiveni su rezultati u tablici 6.7.

Tablica 6.7. – Rezultati primjene t testa

t-Test: Paired Two Sample for Means	
	Variable 1
Mean	2579.1
Variance	422044.1
Observations	10
Pearson Correlation	0.999903228
Hypothesized Mean Difference	0
df	9
t Stat	12.26521821
P(T<=t) two-tail	6.39026E-07
t Critical two-tail	2.262157163

Iz rezultata t testa iz tablice 6.7 vidi se da je t ostvareno ima značajno veću vrijednost od t kritično ($12.26521821 \gg 2.262157163$) što pokazuje da je primjenom modela postignuto statistički značajno smanjenje broja nezgoda zbog čega se odbacuje nulta hipoteza i prihvata alternativna. Statistička značajnost određena je parametrom $p=6.39026E-07 \ll 0.05$.



Slika 6.5. – Dijagram usporedbe statistički stvarnog broja nezgoda i broja nezgoda hipotetskom primjenom kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnih sustava na europskim željeznicama

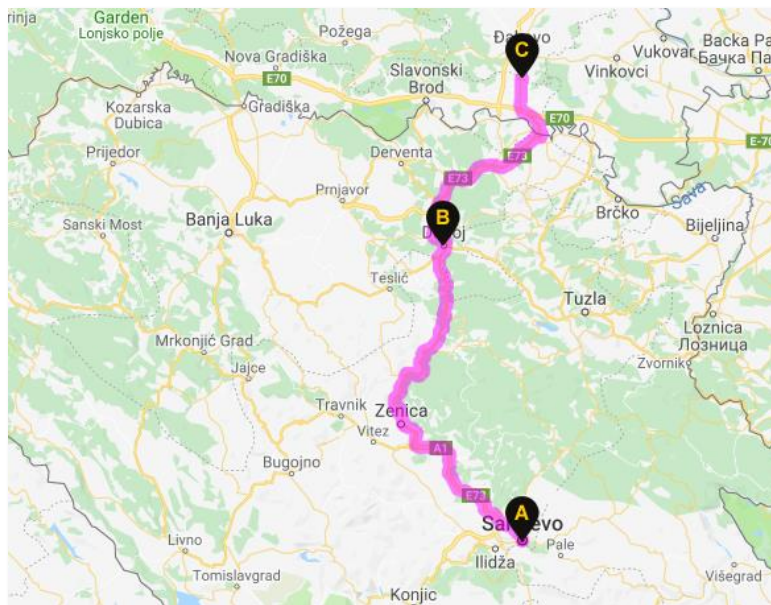
Slika 6.5 prikazuje usporedno stvarni broj nezgoda na europskim željeznicama i broj nezgoda pod pretpostavkom da je primijenjen predloženi kibernetско-fizikalni model. Iz dijagrama se vidi da bi u svakoj godini u periodu od 2008. do 2017. godine, pod pretpostavkom da je za svaku godinu tehnički implementiran kibernetско-fizikalni model, broj nezgoda bio

brojčano manji od stvarnog broja. To pored pokazane statističke značajnosti predstavlja značajnost i iz perspektive sigurnosti ljudi jer se smanjenjem broja nezgoda smanjuje rizik od povreda i smrtnih ishoda za učesnike u prometu.

6.5. Analiza izvedivosti kibernetско-fizikalnog modela na stvarnu dionicu pruge

6.5.1. Opis postojećeg stanja dionice pruge Vrpolje – Granica Hr/BiH - Sarajevo

Studija izvedivosti za implementaciju kibernetско-fizikalnog modela željeznice bit će izrađena za projekt pruge Vrpolje - Sarajevo u duljini 257 km. Veći dio pruge nalazi se u Bosni i Hercegovini a drugi dio u Republici Hrvatskoj. Pruga Vrpolje – Sarajevo izgrađena je i puštena u promet 1947. godine, modernizacija i elektrifikacija ove dionice pruge izvedena je 1971. godine [29]. Osamedesetih godina prošlog stoljeća ova dionica bila je opremljena sustavom digitalnog središnjeg upravljanja tip JZA-711 Ericsson, APB sustavom i autostop sustavom što je za to vrijeme bio visok stupanj opremljenosti. Danas ovi sustavi upravljanja prometom nisu u funkciji. Pored toga mnogi cestovni prijelazi nemaju sustave elektroničkog osiguranja što značajno umanjuje sigurnost prometa na pruži i usporava promet.



Slika 6.6. – Trasa pruge Vrpolje - Sarajevo [30]

6.5.2. Tehnička svojstva dionice pruge Vrpolje - Sarajevo

Prema dokumentu "Uzdužni profil pruge Vrpolje - Sarajevo" [31] izrađen je izvod u prilogu 3 koji sadrži podatke relevantne za analizu u domeni upravljanja i sigurnosti na predmetnoj dionici. Ključni elementi i njihov ukupan broj prikazan je u tablici 6.8.

Tablica 6.8. – Broj objekata na dionici pruge Vrpolje - Sarajevo

Objekt	Ukupan broj:
CPR - Cestovni prijelaz	185
APB - Razdjelnik APB-a	109
PS - Prostorni signal	219
US - Ulazni signal	55
K - Kolodvor	36
S - Stajalište	11

6.5.3. Tipizacija cestovnih prijelaza

Na predmetnoj dionici pruge postoji ukupno 185 cestovnih prijelaza u razini pruge. To je prilično velik broj potencijalno opasnih mjesta za odvijanje prometa koji umanjuju brzinu kretanja vlaka i sigurnost prometa. Ipak, kroz dosadašnje projekte nikada nije bilo moguće promatrati rješavanje svih prijelaza na isti tehnički način nego su cestovni prijelazi rješavani različito i parcijalno, tako da ni rezultati u povećanju sigurnosti nisu mogli biti analizirani na razini kompletnih dionica nego segmentno. Većina postojećih prijelaza osigurana je samo pasivnim znakovima koji vozače upozoravaju da nailaze na prugu manji postotak frekventnih prijelaza je osiguran automatskim elektroničkim uređajima. Nedostatak suvremenih automatskih elektroničkih uređaja za osiguranje prijelaza je taj što djeluju lokalno i što središte za upravljanje ima najviše informaciju o stanju aktivnosti prijelaza dok vlak nema nikakvu informaciju o stanju prijelaza osim vizualnog znaka o ispravnosti koji se ugrađuje pored pruge. Drugi nedostatak je visoka cijena instalacije koja ograničava željezničke korporacije da se osigura veći broj prijelaza. Kibernetско-fizikalni model željeznice konceptualno omogućuje istovremeno rješavanje osiguranja svih postojećih prijelaza. Najvažnija prednost ovog modela je da je ostvaren prijenos potrebnih signala u stvarnom vremenu i do vlaka i do kontrolnog centra. To omogućuje strojovođi informacije o trenutnom stanju na svakom prijelazu i da aktivno djeluje na kretanje vlaka prema potrebama. Takav koncept omogućuje opremanje dijela prijelaza jeftinijim i jednostavnijim sensorima koji će značajno povećati ukupnu sigurnost prometa jer neće biti nikako neosiguranih prijelaza na kojima je ukupan rizik na vozačima koji se približavaju pruzi.

6.5.4. Strateška važnost projekta pruge Vrpolje - Sarajevo

Koridor Vc ili Europski put E-73 treći je ogranak Paneuropskog koridora V (od ukrajinskog grada Lavova i Budimpešte) koji se u duljini od 702 kilometra proteže od Budimpešte do luke Ploče [32]. Plan o izgradnji paneuropskih koridora [33] okvirno je razrađen

i usvojen na 10. Paneuropskoj transportnoj konferenciji održanoj na Kreti 1994. godine, te dorađen 1997. na konferenciji u Helsinkiju, plan paneuropskih koridora prikazan je na slici 6.7.



Slika 6.7. – Europski transportni koridori [30]

Koridor Vc predstavlja poveznicu srednjeeuropskih zemalja sa jadranskim tj. mediteranskim lučkim tranzitnim točkama. U kontekstu geostrateške važnosti koridora, ključna važnost pripada luci Ploče koju cestovno-željeznička komunikacija vezuje uz njeno prirodno gravitacijsko područje.

6.5.5. Ekonomski parametri normalnog remonta pruge Vrpolje - Sarajevo

Na osnovi analize troškovnika iz Glavnih projekta remonta pruge [34] izrađenih za potrebe Investitora (EB) u tablici 6.9 izrađena je rekapitulacija troškova za remont signalno-sigurnosnih sustava predmetne dionice Vrpolje - Sarajevo.

Tablica 6.9. - Rekapitulacija troškova za remont postojećih signalno-sigurnosnih sustava na dionici Vrpolje-Sarajevo

	Naziv sustava	Broj	Jedinična cijena [€]	Ukupno [€]
1.	Osiguranje Cpr	74	148.000,00	10.952.000,00
2.	Brojač osovina za kontrolu zauzetosti odsjeka, komplet s balizama.	32	43.000,00	1.376.000,00
3.	Ostala oprema za međukolodvorsku zavisnost	32	98.000,00	3.136.000,00
4.	Remont APB uređaja i pripadajućih signala	109	12.000,00	1.308.000,00
5.	Remont kablinskih instalacija	32	39.000,00	1.248.000,00
6.	Autostop uređaj kod prostornih signala	218	8.000,00	1.744.000,00
7.	Lokomotivski autostop uređaj	5	25.000,00	125.000,00
				19.889.000,00

Od ukupno 185 cestovnih prijelaza 74 (40%) određeno je za instalaciju sustava osiguranja, ostali prijelazi imaju malu frekvenciju prometa i nikada nisu planirani za neki suvremeniji oblik osiguranja. Ovi prijelazi ostaju označeni Andrejinim križem i trajno predstavljaju rizičnu kolizijsku točku.

Prema podacima iz troškovnika Glavnih projekata komunikacijskih i upravljačkih sustava na autocesti u Koridoru Vc [35], studije za investicije u 5G mreže [16] i iskustvenih procjena došlo se do okvirnih cijena investicije za podsustave kibernetско-fizikalnog modela prikazane u tablici 6.10.

Tablica 6.10. - Procjena investicije za izgradnju komunikacijske i upravljačke infrastrukture i instalaciju kibernetско-fizikalnog signalno-sigurnosnog sustava na dionici Vrpolje-Sarajevo

	Naziv sustava	Broj	Jedinična cijena [€]	Ukupno [€]
1.	Osiguranje Cpr – višeg prioriteta Instalacija 5G komunikacije	74	164.000,00	12.136.000,00
2.	Osiguranje Cpr – nižeg prioriteta Instalacija 5G komunikacije	111	8.000,00	888.000,00
3.	Brojač osovina za kontrolu zauzetosti odsjeka, komplet s balizama.	32	43.000,00	1.376.000,00
4.	Ostala oprema za međukolodvorsku zavisnost	32	98.000,00	3.136.000,00
5.	Remont APB uređaja i pripadajućih signala	109	12.000,00	1.308.000,00
6.	Modifikacija APB uređaja i instalacija 5G komunikacije	109	6.000,00	654.000,00
7.	Remont kablinskih instalacija	32	39.000,00	1.248.000,00
8.	Instalacija 5G mreže duž trase, komplet s napajanjem	380	17.500,00	6.650.000,00
9.	Središnji komunikacijski i poslužitelj sustav	1	450.000,00	450.000,00
				27.846.000,00

U ovoj analizi obuhvaćeni su svi cestovni prijelazi na trasi pruge pri čemu su prijelazi s manjom frekvencijom prometa opremljeni jednostavnijim aktivnim sustavom koji obavještava učesnike u cestovnom prometu o nailasku vlaka zvučnom i svjetlosnom signalizacijom. U ovakvom sustavu predviđa se ugradnja baznih stanica 5G mreže duž trase pruge, komunikacijski kanali i mrežna infrastruktura, pored željezničkog komunikacijskog sustava, mogu biti korišteni i za potrebe drugih operatera čime se može ostvariti dodatni profit za željezničke korporacije i time ubrzati povrat investicije.

6.5.6. Ekonomsko-tehnička analiza i rezultati implementacije kibernetско - fizikalnog signalno-sigurnosnog sustava na pruzi Vrpolje - Sarajevo

Prema trenutnim podacima pruga Vrpolje - Sarajevo ima brojna tehnička ograničenja koja negativno utječu na promet smanjenjem prosječne brzine, smanjanjem kapaciteta pruge, povećanjem rizika od nesreća i značajnim smanjanjem komfora putnika i osoblja. Ipak u tehničko-ekonomskoj analizi krenut će se od pretpostavke da je remont standardnih postojećih signalno-sigurnosnih sustava u potpunosti izveden i da su takvi sustavi potpuno funkcionalni. U tom slučaju prepoznaju se nedostaci takvog sustava iz projekcije kibernetско-fizikalnog modela koji su navedeni u tablici 6.11.

Tablica 6.11. – Komparativna tablica nedostataka standardnih sustava i prednosti kibernetско-fizikalnog sustava

Broj	Sustav	Nedostaci standardnih sustava	Prednosti kibernetско-fizikalnog sustava
1.	Signali	<ul style="list-style-type: none"> - Nema signalizacije kvara žarulja. - Postoji samo vizualna komunikacija strojovođe. 	<ul style="list-style-type: none"> - Signalizacija kvara svake žarulje u vlaku i centru za upravljanje. - Kontinuirana signalizacija stanja u vlaku.
2.	Autostop	<ul style="list-style-type: none"> - Poseban robusan sustav kojim se moraju opremiti i pruga i vlak. - Ne postoje informacije o djelovanju u upravljačkom centru. - Ne postoje informacije o djelovanju u drugim vlakovima. 	<ul style="list-style-type: none"> - Jednostavno programsko rješenje. - Pregled djelovanja na svim sučeljima u stvarnom vremenu.
3.	Osiguranje Cpr-ova	<ul style="list-style-type: none"> - Postoji samo vizualna signalizacija i fizička barijera prema vozačima. - Ne postoji informacija o stanju prijelaza u vlaku i upravljačkom centru. - Nije isplativo osiguranje slabije frekventnih prijelaza. 	<ul style="list-style-type: none"> - Moguće je jednostavno ostvariti prijenos informacije o nailasku vlaka svim učesnicima u prometu u blizini prijelaza. - Vlak ima informaciju u stvarnom vremenu o stanju i eventualnoj prepreci u zoni prijelaza. - Moguće je prijenosom informacije s slabije frekventnih prijelaza izvršiti i njihovo osiguranje.
4.	Upravljanje i nadzor	<ul style="list-style-type: none"> - Ne postoji informacija o trenutnoj brzini vlaka. - Ne postoji informacija o trenutnoj poziciji vlaka (samo zauzetost cijele sekcije). - Ne postoje informacije o stanju svih elemenata na trasi, većina elemenata radi lokalno. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sve informacije o stanju vlaka se u stvarnom vremenu prenose u središte za upravljanje. - Svaki sustav i element pruge je vidljiv na sučeljima.
5.	Održavanje	<ul style="list-style-type: none"> - Ograničen broj signala kvarova i smetnji u središnjem sustavu. - Smetnje i signali su nedovoljno definirani, uglavnom samo kao skupni relejni signali što otežava određivanje razine rizika na promet. - Ne postoje informacije o smetnjama tako da je ograničeno preventivno otklanjanje kvarova. - Ne postoje informacije o kvarovima i smetnjama na vitalnim sustavima vlaka. 	<ul style="list-style-type: none"> - Izrađen je poseban oblik računala s informacijama o smetnjama i kvarovima elemenata i sustava na pruzi. - Izrađen je poseban oblik računala s informacijama o stanju vitalnih sustava vlaka. - Omogućeno je precizno određivanje razine rizika koju predstavlja oštećena smetnja ili kvar na promet.

Svi dosadašnji koncepti modernizacije i nadogradnji sustava planirani su i ostvareni segmentno na manjim sekcijama pruga što je kao rezultat najviše moglo dati lokalno ispravne i funkcionalne sustave osiguranja prijelaza ili kolodvora. Ipak, takve investicije iako su mogle dostići visoke vrijednosti zanemarivo su utjecale na poboljšanja u ukupnoj sigurnosti prometa ili komforu. Na primjer, prosječnu brzinu na jednoj dionici nije moguće povećati sve dok se svi sustavi ili elementi iste funkcionalnosti ne dovedu na istu operativnu razinu. Isto vrijedi i za ostale familije sustava. Kibernetско-fizikalni model željeznice promatra sustav jedinstveno od vrha prema dnu što predstavlja najveću konceptuanu prednost u odnosu na sve dosadašnje sustave preventivno zbog opcije da se isti sustav gradi duže vremena faznom instalacijom podsustava koji će paralelno funkcionirati. U postojećim sustavima se često znalo dogoditi, zbog promatranja od dna prema vrhu, da se podsustavi funkcionalno preklapaju (obrađujući iste informacije više puta) ili da između njih postoji funkcionalna praznina (bitne informacije se uopće ne obrađuju).

Kada bi odluka o izvedbi kibernetско-fizikalnog modela bila jednostavna a njegova gradnja i instalacija brza onda bi se zaključak mogao izvesti na način da je uz sve prednosti koje nudi iz tablice 6.11 investicija veća za oko 30% u odnosu na klasični sustav upravljanja isplativa ili neisplativa (6.9 i 6.10). Ipak, u stvarnosti nije moguće sve pruge na određenom prostoru istovremeno opremiti nekim novim sustavima a napustiti stare osobito u situacijama kada se i infrastruktura i vozila moraju modificirati.

Kibernetско-fizikalni signalno-sigurnosni sustav moguće je instalirati u fazama i to na način da u početku služi kao potpora postojećim sustavima. Poslije testiranja i ispitivanja određenih podsustava kada se dokaže da je sigurnost i učinkovitost na zadovoljavajućoj razini tada se njihove funkcije mogu potpuno preuzeti putem kibernetско-fizikalnih sustava.

Prijedlog prve faze instalacije kibernetско-fizikalnog signalno-sigurnosnog sustava na dionici pruge Vrpolje - Sarajevo dan je u nastavku:

1. Instalacija opreme za 5G mreže duž trase i izgradnja središnjeg komunikacijskog i sustava poslužitelja.
2. Osiguranje Cpr-ova višeg i nižeg prioriteta i izrada aplikacije i sučelja za operatera.
3. Opremanje lokomotiva 5G komunikacijskim sučeljima.

Prema procjeni iz tablice 6.10. investicijska vrijednost za ovu fazu bila bi 20.624.000,00 € čime bi se dobila pouzdana 5G mreža koja bi donosila profit jer bi pokrivala značajno područje na kojem su potrebe za komunikacijama i drugih korisnika izuzetno velike. Sa strane sigurnosti po prvi put bi bili osigurani svi cestovni prijelazi, ostvarena komunikacija infrastruktura - vlak što bi utjecalo na povećanje brzine prometa, kapacitet pruge i komfor putnika. Prvom fazom radova bila bi stvorena platforma za daljnju nadogradnju i unaprijeđenje željeznice.

Za drugu fazu radova predlaže se implementacija suvremenog APB sustava u koracima:

1. Instalacija brojača osovina za kontrolu zauzetosti odsjeka.
2. Remont APB uređaja i pripadajućih signala.
3. Prilagodba APB uređaja i instalacija 5G komunikacije.
4. Opremanje lokomotiva APB sučeljima.
5. Izrada aplikacije i sučelja operatera u centru i vlaka.

Za ovu fazu radova prema procjeni iz tablice 6.10. investicijska vrijednost bila bi 7.722.000,00 €. Ovim radovima bila bi zaokružena cjelina automatskog upravljanja vlakovima s ostvarenom komunikacijom opreme na pruzi s vlakom i upravljačkim središtem. Upravljanje prometom bi bilo izdignuto na višu razinu jer se svi ključni elementi u stvarnom vremenu prate i u vlaku i u upravljačkom središtu.

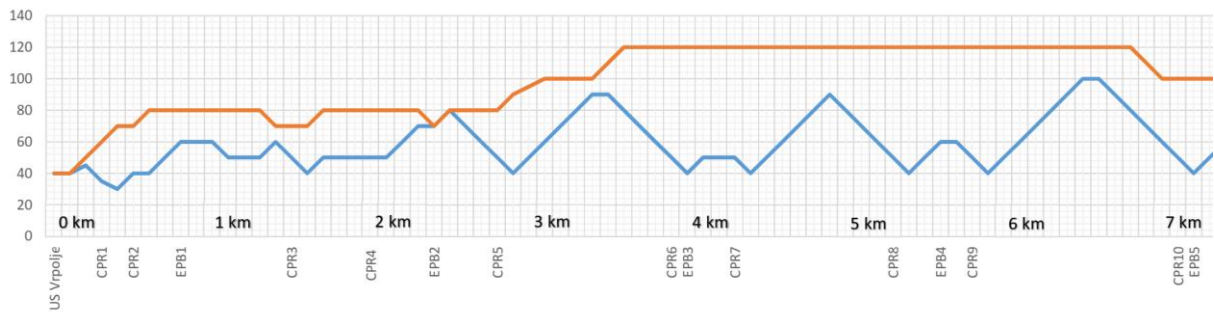
Za treću i posljednju fazu radova predlaže se integracija već instaliranih signala kvara i smetnji u sustav za održavanje. Instalacija dodatnih senzora u vlak i na prugu te izrada aplikacije i operateskog sučelja za službe za održavanje.

Ova analiza predstavlja odgovor na prvo ključno pitanje rada. Ona dokazuje da kibernetско-fizikalni pristup u odnosu na zatvorene signalno-sigurnosne sustave može promijeniti način investiranja u željeznice od principa rijetkih i skupih zamjena kompletne signalno-sigurnosne opreme u učestalije parcijalne investicije koje bi fazno podizale funkcionalnost i sigurnost te time učinile tehnološki razvoj željeznica slojevitim.

6.6. Povećanje prosječne brzine kretanja vlaka

Kako bi se prikazali očekivani doprinosi kibernetско-fizikalnog modela prema stvarnom signalno-sigurnosnom sustavu, za analizu će se uzeti stvarna dionica željeznice u europskom prometnom koridoru Vc. Simulacija željezničkog prometa provodit će se na dionici kroz Republiku Hrvatsku od Vrpolja do državne granice Hrvatska/BiH. Riječ je o jednokolosiječnoj pruzi duljine 21,89 km koja sadrži tri željezničke postaje (Vrpolje, Kopanica i Slavonski Šamac), 21 željeznički prijelaz i 11 dionica zaštićenih signalima [32]. Geometrijska svojstva pruge su povoljne za brzine do 120 km/h na pojedinim dionicama, ali zbog velikog broja željezničkih prijelaza, s različitim razinama signalno-sigurnosne opreme stvarna brzina vlaka ograničena na 40 km/h na kritičnim mjestima, što značajno smanjuje prosječnu brzinu na ovoj dionici. Dijagram stvarne brzine vlaka prikazan je plavom linijom na slikama 6.8, 6.9 i 6.10. Implementacijom kibernetско-fizikalnog sustava signalnih sustava na ovoj željezničkoj dionici svi cestovni prijelazi bili bi opremljeni i integrirani u tako da strojovođa imao bi stvarnu sliku dionice pruge na koju nailazi, što bi povećalo ograničenja brzine na najveće moguće vrijednosti

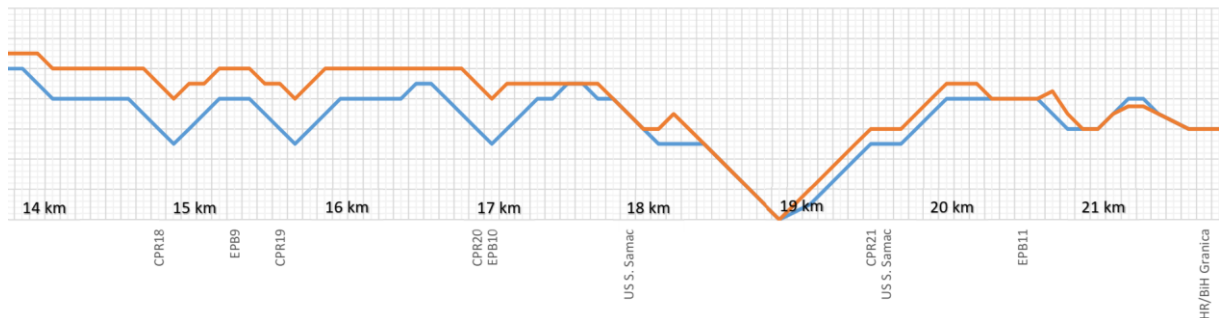
koje dopuštaju geometrijska svojstva pruge. Dijagram brzine bi tada izgledao kao narančasta linija na slikama 6.8, 6.9 i 6.10.



Slika 6.8. – Dijagram brzine vlaka od km 0 do km 7 na sekciji pruge: Vrpolje – Državna granica HR



Slika 6.9. – Dijagram brzine vlaka od km 7 do km 14 na sekciji pruge: Vrpolje – Državna granica HR



Slika 6.10. – Dijagram brzine vlaka od km 14 do km 22 na sekciji pruge: Vrpolje – Državna granica HR

Na cestovnim prijelazima opremljenim klasičnim sustavima signalno-sigurnosne opreme vidljivo je da vlak mora usporiti do 40 km/h zbog ograničenja brzine jer nema informacija o stanju na cestovnom prijelazu. Na istom cestovnom prijelazu uz primjenu kibernetičko-fizikalnog modela ograničenja brzine su veća do 80 km/h jer vlak i upravljačko središte imaju podatke o ispravnosti i slobodnom prolazu kroz prijelaz, što rezultira povećanjem brzine vlaka. Za izračun prosječne brzine i kapaciteta relevantna je najduža dionica željezničke

pruge između dviju kolodvora, a to je ovdje dionica od kolodvora Kapanica (8.927 km) do kolodvora Slavonski Šamac (18.992 km).

Prosječne brzine iz dijagrama brzine na slikama 6.8, 6.9 i 6.10 su:

$$v_{m1} = 64,03 \text{ km/h} \qquad v_{m2} = 81,17 \text{ km/h}$$

Kapacitet jednokolosiječne željeznice definira se kao maksimalni broj vlakova koji se može otpremiti s određene stanice, s obzirom na vrijeme potrebno za vožnju vlaka iz suprotnog smjera, tijekom 24 sata [4]. Kapacitet željeznice izračunava se sljedećim izrazom:

$$N = \frac{1440 \text{ min}}{2 \cdot t_d \text{ min}} \quad (6.3)$$

t_d - predstavlja ukupno vrijeme vožnje između dva kolodvora

Udaljenost između kolodvora Slavonski Šamac i Kapanica izračunava se kao razlika kilometarskih pozicija:

$$L = 18,992 \text{ km} - 8,927 \text{ km} = 10,065 \text{ km} \quad (6.4)$$

Ukupno vrijeme vožnje vlaka između ova dva kolodvora za stvarne uvjete izračunava se na sljedeći način:

$$t_{d1} = \frac{L}{v_{m1}} = \frac{10,065 \text{ km}}{64,03 \text{ km/h}} \cdot 60 = 9,43 \text{ min} \quad (6.5)$$

Ukupno vrijeme vožnje vlaka između postaja za signalizacijski sustav izveden prema predloženom cyber-fizičkom modelu izračunava se na sljedeći način:

$$t_{d2} = \frac{L}{v_{m2}} = \frac{10,065 \text{ km}}{81,17 \text{ km/h}} \cdot 60 = 7,44 \text{ min} \quad (6.6)$$

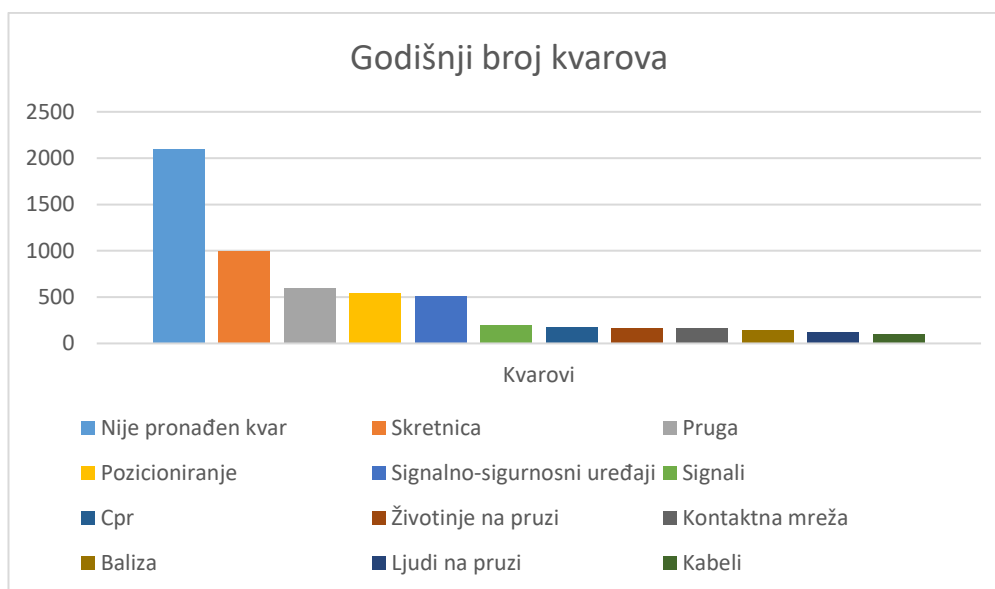
Korištenjem izraza (6.3) dobivaju se dvije vrijednosti željezničkog kapaciteta, jedna za stvarni signalno-sigurnosni sustav, a druga za istu željezničku dionicu, ali uz pretpostavku da je signalno-sigurnosni sustav izveden kao predloženi kibernetско-fizikalni model. To znači da je maksimalni broj parova vlakova koji se mogu otpremiti za stvarni signalno-sigurnosni sustav 76 dok se mogući broj otpremljenih parova vlakova povećava na 96 ako se primijeni predloženi kibernetско-fizikalni model. Jednostavnim usporedbom ovih vrijednosti zaključuje se da je ostvareno povećanje kapaciteta željezničke pruge od oko 20% unaprijeđenjem signalno-sigurnosnog sustava bez ikakvih zahvata u građevinskom dijelu ili na željezničkom vozilu [36].

6.7. Unaprijeđenje održavanja signalno-sigurnosnog sustava željeznice

Parametar raspoloživosti određenog elementa definira se kao njegova sposobnost da bude u stanju da izvede zahtijevanu operaciju u zadanom vremenu. Vrijednost raspoloživosti

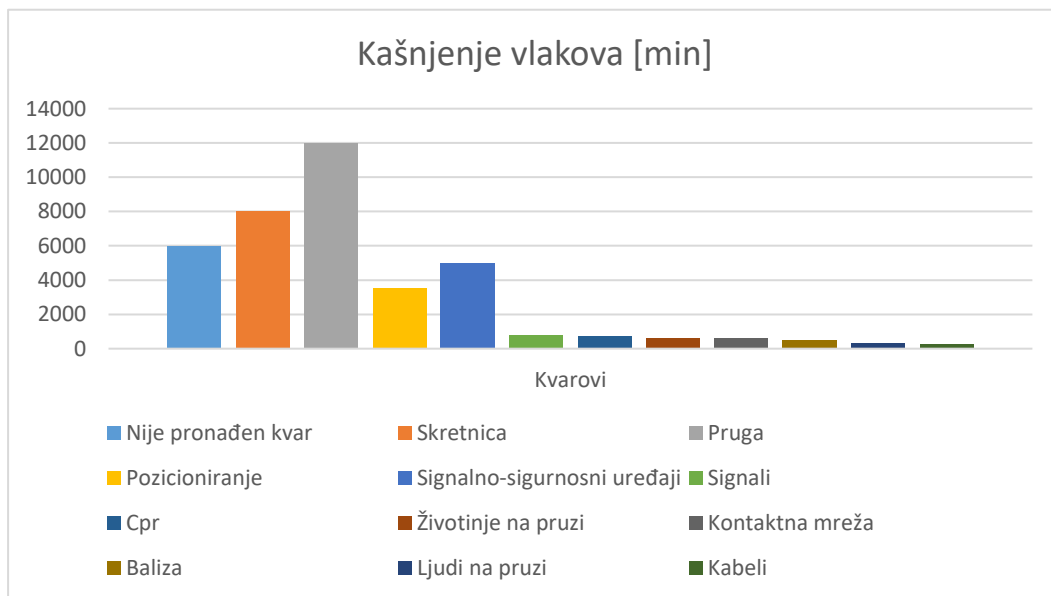
kreće se u granicama od 0 do 1, pri čemu vrijednost 1 određuje 100 % vjerojatnost da će element biti raspoloživ. Temeljni ciljevi za europske željeznice su prebacivanje 50 % cestovnog prometa na željeznički i 60 % smanjenja u emisiji CO₂ do 2050. godine [37]. To implicira značajno povećanje kapaciteta željeznica kroz dobro razrađene strategije razvoja i održavanja sustava. Temelj za izradu ovih strategija su vjerodostojni podatci o kvarovima, kašnjenju vlakova, točnosti vlakova. Stvarni podatci o korektivnom održavanju željeznica odnosno kvarovima i njihovim posljedicama u obliku kašnjenja vlakova pruzeti su iz dokumenta o mjerenju i promatranju operacijske raspoloživosti željezničke infrastrukture na švedskim željeznicama [38]. Ovi podatci su značajni jer pokazuju stvarne kvarove prema uzrocima kvara te posljedice u kašnjenjima vlakova.

Podatci o kvarovima za 2013. godinu prikazani su u dijagramu na slici 6.11. Ukupan broj kvarova je 24.816 od čega je 25% kvarova rezultiralo kašnjenjima vlakova. Podatci su raspodijeljeni prema vrsti kvara.



Slika 6.11. – Godišnji broj kvarova prema vrsti kvara

Na slici 6.12. na dijagramu prikazana su kašnjenja vlakova u minutima raspodijeljena prema vrstama kvara.



Slika 6.12. – Kašnjenje vlakova u ovisnosti od vrste kvara

Kibernetско-fizikalni model željeznice u dijelu održavanja omogućuje zamjenu korektivnih akcija održavanja poslije događanja kvara preventivnim akcijama održavanja pri čemu se u većini slučajeva sprječava neželjeni događaj. Iz dijagrama sa slike 6.12 vidljivo je da određene vrste kvarova dovode do ukupnog kašnjenja vlakova od preko nekoliko stotina sati na godišnjoj razini. Unaprjeđenjem sučelja kvara uređaja u polju moguće je u stvarnom vremenu dobiti informaciju o stanju, smetnji ili kvaru pri čemu se neželjeni događaj brže i lakše lokalizira. To u određenim slučajevima omogućuje preventivno otklanjanje kvara u periodu kada vlakovi ne prometuju čime se izbjegava kašnjenje vlaka. U slučaju da se kvar dogodio tijekom vožnje olakšana je njegova lokalizacija pri čemu se smanjuje srednje vrijeme između popravke (MTTR). Izgradnjom detaljne baze podataka kvarova i smetnji smanjuje se broj nepoznatih kvarova pri čemu se čest slučaj zastoja vlaka pri kojem se kvarovi ne pronađu umanjuje što također predstavlja unaprjeđenje procesa održavanja.

Zaključak

Izrada modela odabrane dionice željeznice zasnovana je na stvarnim postavkama pruge kao fizičkog sustava po principu od dna prema vrhu. Na najnižoj razini, u fizičkom sloju, analizom elemenata i naprava koji se zadržavaju, identificirana su njihova ograničenja u smislu komunikacijskih sučelja te su načelno izvedene nadogradnje i modifikacije u elektroničkim sklopovima. Tako su mnogi pasivni elementi sustava postali aktivni te je stvoren osnov za gradnju jedinstvenog nadzorno-upravljačkog prometnog sustava željeznice. Modifikacijom sučelja u fizičkom sloju otklonjena su brojna ograničenja koja su u dosadašnjim sustavima onemogućavala uvid u osnovna stanja i stanja kvarova uređaja. Na taj način povećana je pouzdanost cjelokupnog prometnog sustava jer je skraćeno vrijeme reakcije na pojavu kvara ili smetnje u sustavu.

Arhitektura kibernetičkog modela izrađena je prema raspodjeli varijabli čije se vrijednosti generiraju putem sučelja modificiranih uređaja u polju. Kako bi se model željeznice razvio prema zahtjevima Industrije 4.0, pohrana i rad s podacima temelji se na korištenju mogućnosti oblaka računala. Tehnologija računarstva u oblaku omogućuje decentraliziranu pohranu podataka koji se prikupljaju iz uređaja u polju. Isto tako, omogućena je dostupnost varijabli iz bilo koje naprave sustava na bilo kojem mjestu i u bilo kojem trenutku. Glavni program koji operira vrijednostima definiranih varijabli izrađen je u programskom jeziku Python. Kako bi se pokazala učinkovitost modela, izrađeni su i dijelovi programa koji simuliraju vožnju vlaka prema predstavljenom redu vožnje. Vizualizacija modela izrađena je korištenjem programskih tehnologija HTML, JavaScript i SVG. Na taj način pokazan je princip izrade digitalne slike pruge i vlaka, odnosno mogućnost izrade virtualnih sučelja prema potrebama (u središtu za upravljanje, u vlaku ili kod službi za održavanje). To predstavlja završni stadij u gradnji kibernetičko-fizikalnog modela sustava, odnosno njegov aktivni vizualni prikaz.

Nakon što je dokazano da je moguća izgradnja funkcionalnog kibernetičko-fizikalnog modela željeznice, provedeno je nekoliko podatkovnih analiza sustava kako bi se dokazala postignuta unaprjeđenja i kako bi se dokazala opravdanost potencijalne investicije. S aspekta povećanja sigurnosti, iz podataka Eurostata, evidentirane su kritične točke na kojima se događaju željezničke nezgode i pokazano je da kibernetičko-fizikalni model može omogućiti identificirati mjesta u sustavu uz pomoć kojih se može smanjiti broj željezničkih nezgoda. Opravdanost investicije i nova mogućnost slojevitog investiranja pri izgradnji kibernetičko-fizikalnog modela dokazana je komparativnom analizom investicijskih troškova za postojeće sustave i novo projektirane sustave. Izračun povećanja prosječne brzine kretanja vlaka koji se postiže primjenom rješenja predloženih za osiguranje svih kategorija cestovnih prijelaza pokazao je mogućnost djelovanja novog modela na povećanje učinkovitosti pruge i komfora

za putnike. U analizi kojom se dokazuje povećanje prosječne brzine vlaka izvedena je simulacija kretanja vlaka krivom brzine za slučaj klasičnih signalno-sigurnosnih sustava na pruzi kao i za slučaj implementiranog kibernetско-fizikalnog modela na istoj sekciji pruge. Analiza u dijelu održavanja željezničke infrastrukture pokazala je da kibernetско-fizikalni model donosi veliki zaokret u smislu procedura za održavanje sustava. U prvom redu to je zbog toga što je značajno unaprijeđena detekcija kvarova uređaja u polju i omogućena je identifikacija širokog spektra kvarova u stvarnom vremenu. To bi značajno smanjilo korektivne akcije u održavanju, a broj preventivnih akcija svelo na optimalnu mjeru prema stvarnim potrebama. Takav pristup značajno bi smanjio troškove održavanja kao i neželjene zastoje u prometu koji uvijek donose nepredvidljive gubitke.

Buduća istraživanja potrebna su u područjima testiranja i odabira optimalnih bežičnih mreža za prijenos signala između opreme na pruzi, vlaka i upravljačkog središta. Također, potrebno je izraditi detaljne tehničke studije koje će odrediti zahvate i modifikacije na opremi u fizičkom sloju željeznice što za podlogu mora imati konkretnu dionicu i opremu na kojoj se planira implementacija njenog kibernetско-fizikalnog modela. Za buduća istraživanja također ostaje široki raspon namjenskih programskih rješenja, analize i obrade podataka, kao i različitih vizualizacijskih sučelja.

Literatura

- [1] Profillidis V. (2014). *Railway Management and Engineering*. Ashgate Publishing Company, Burlington, USA, Vol. 3, pp.119-122.
- [2] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture. (2007). *Pravilnik o tehničkim uvjetima za sigurnost željezničkoga prometa kojima moraju udovoljavati željezničke pruge*. Narodne novine broj 40/07, Članak 32.
- [3] Theyy, G., Vlasenko S. (2009). *Railway Signalling & Interlocking: International Compendium*. Eurailpress. Hamburg, Germany, Vol. 1, pp. 208-225.
- [4] Pachtl, J. (2020). *Railway Signalling Principles*. Braunschweig, pp. 9-12.
- [5] Mikulčić, M., Mlinarić, T., Perakovic, D., Zorić, P. (2018). *The Impact of Indusi Technology on Disruption of Interoperability in European Rail Traffic*.
Doi: 10.4108/eai.6-11-2018.2279611, pp. 5-9.
- [6] Nišandžić, R. (2010). *Europski sustav upravljanja i nadzora željezničkim prometom/ERTMS – European Rail Traffic Management*. Transport Infrastructure and Transport, pp. 3-4.
- [7] *ERTMS – Delivering Flexible: And Reliable Rail Traffic | Rail Transport | High Speed Rail*. n.d. Scribd. Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/29162849/ERTMS-Delivering-Flexible-And-Reliable-Rail-Traffic>. Pristupljeno: 17. rujan, 2020.
- [8] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture. (2007, 2008). *Pravilnik o značenju i uporabi signala, signalnih znakova i signalnih oznaka u željezničkom prometu*. Narodne novine broj 40/07 i 120/08.
- [9] Siemens Press. (2020). *First Hardware Independent Cloud-Enabled Interlocking in Operation*. Siemens Mobility GmbH, Berlin. Dostupno na: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/first-signalling-cloud-operation>. Pristupljeno: 12. pros. 2020.
- [10] Derler, P., Lee, E., Sangiovanni-Vincentelli, A. (2012). *Modeling Cyber-Physical Systems*. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, pp.13-28.
- [11] Germany Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. (2017). *5G Strategy for Germany*. Berlin. Dostupno na: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/EN/publications/5g-strategy-for-germany.pdf?_blob=publicationFile. Pristupljeno: 03. ožujak, 2021.
- [12] Altpro. (2014). *Axle Counter BO32*. Zagreb.
Dostupno na: https://altpro.hr/upload_data/site_files/bo23-datasheet-en.pdf.
Pristupljeno: 12. prosinac, 2021.
- [13] Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., and Gorecky, D. (2015). *Towards Industry 4.0 - Standardization as the Crucial Challenge for Highly Modular, Multi-Vendor Production*

- Systems. IFAC-PapersOnLine, 15th IFAC Symp. on Information Control Problems in Manufacturing, vol. 48 (3), pp. 579–584.
- [14] Neugebauer R., Hippmann S., Leis M., and Landherr M. (2016). Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research. *Procedia CIRP, Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, vol. 57, pp. 2-7.
- [15] Michailow N., Matthe M., Gaspar I., Navarro A. Caldevilla, Mendes L., Festag A., and Fettweis G. (2014). Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks (invited paper), pp. 1-18.
- [16] Oughton, E. J., and Frias, Z. (2018). The Cost, Coverage and Rollout Implications of 5G Infrastructure in Britain. *Telecommunications Policy* 42 (8), pp. 636–652.
- [17] Schmitt M., Meixner G., Gorecky D., Seissler M., and Loskyll M. (2013). Mobile Interaction Technologies in the Factory of the Future. *IFAC Proceedings Volumes, 12th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, vol. 46, no. 15, pp. 536 - 542.
- [18] Krondorf M., Bittner S. (2009). GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing. Invited Paper. Technische Universität Dresden. Dresden. Germany. Vol. 62, No. 9. pp. 3045-3061.
- [19] Haas S., Fettweis G. (2017). Energy-Efficient Hash Join Implementations in Hardware - Accelerated MPSoCs. Technische Universität Dresden. Germany. Dostupno na: https://www.vodafone-chair.org/pbls/legacy/s-haas/Energy-Efficient_Hash_Join_Implementations_in_Hardware-Accelerated_MPSoCs.pdf. Pristupljeno: 15. lip. 2021.
- [20] Railwaypro. (2018). DfT Seeks Companies for 5G Trial in Railway Transport. Dostupno na: <https://www.railwaypro.com/wp/df-t-seeks-companies-for-5g-trial-in-railway-transport/>. Pristupljeno: 11. studeni, 2021.
- [21] Pieriegud, J. (2019). Digital Transformation of Railways. Poland. Dostupno na: https://shift2rail.org/wpcontent/uploads/2018/04/Digital_Transformation_Railways_2018_web. Pristupljeno: 15. prosinac, 2021.
- [22] Furht B., Escalante A. (2010). *Handbook of Cloud Computing*. Springer Publishing Company, Incorporated, vol. 1, pp. 3-20.
- [23] Hermann M., Pentek T., and Otto B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 scenarios. 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), pp. 3928-3937.
- [24] Example HTTP GET Request Using a Query String. (2014). Dostupno na: www.ibm.com/support/knowledgecenter/ssgmcp_5.3.0/com.ibm.cics.ts.webservices.doc/reference/dfhws_query_string_json.html. Pristupljeno: 16. rujan, 2020.
- [25] World Wide Web. (2019). *Encyclopaedia Britannica*.

- Dostupno na: <https://www.britannica.com/topic/World-Wide-Web>. Pristupljeno 17. rujan, 2020.
- [26] Snap.Svg API Reference. (2020).
Dostupno na: <http://snapsvg.io/docs/>. Pristupljeno 17. rujan, 2020.
- [27] Eurostat — Your Key to European Statistics. (2020). n.d.
Dostupno na: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-catalogues/-/KS-02-17-839?inheritRedirect=true>. Pristupljeno: 17. rujan, 2020.
- [28] Excel Easy, t –Test. (2020).
Dostupno na: <https://www.excel-easy.com/examples/t-test.html>. Pristupljeno: 15. svibanj, 2021.
- [29] Ignjatović S. (2015). Vremeplov, Tehnički podaci za prugu Vrpolje – Sarajevo, 1969.
Dostupno na: <http://vremeplov.ba/?p=9910>. Pristupljeno: 26. lipanj, 2021.
- [30] Route planner (2009). GeoBasis DE-BKD.
Dostupno na: <http://www.theaa.com/route-planner>. Pristupljeno: 10. listopad, 2020.
- [31] Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica. (2001). Uzdužni profil pruge Vrpolje – Sarajevo. ŽTP Sarajevo. Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja.
- [32] Božičević J., Steiner S., Smrečki B. (2008). Evaluation of the Croatian Transport System. 16th International Symposium on Electronics in Traffic, ISEP 2008, Ljubljana, pp. G6.
- [33] Poletan Jugović, T., Jolić, N. i Kavran, Z. (2009). Comparative Analysis of Cargo Flows on Branches Vb and Vc of the Pan-European Corridor V. *Promet-Traffic&Transportation*, vol. 21 (3), pp. 205-216.
- [34] J.P. Željeznice FBiH. (2009). Projekt glavne opravke pruge Bosanski Šamac – Sarajevo. Troškovnici projekata osiguranja cestovnih prijelaza i kolodvora. Sarajevo.
- [35] J.P. Autoceste FBiH. (2015). Projekt centra za održavanje i kontrolu prometa. Troškovnik. Autocesta Tuzla - Žepče - priključak na koridor Vc. Mostar.
- [36] Nišandžić R., Martinović G. (2022). Improvement of Railway Signalling System by Using Cyber Physical Model. *Tehnički Vjesnik* 29, 4(2022), 1193-1201.
- [37] White Paper on Transport : Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System. (2011). LU: Publications Office.
Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=com:2011:0144:fin:en:pdf>. Pristupljeno: 15. srpanj, 2021.
- [38] Stenström C., Aditya P. and Kumar U. (2016). Measuring and Monitoring Operational Availability of Rail Infrastructure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 230. pp. 1457-1468.

Sažetak

Signalno-sigurnosni sustav željeznica je temeljni sustav za upravljanje željezničkim prometom. Stalne promjene u tehnologijama i sigurnosnim zahtjevima prometa rezultirale su brojnim unaprjeđenjima. Danas su glavni oslonci razvoja novih naprednih, pa tako i željezničkih sustava, Internet stvari, oblak računala, umjetna inteligencija, analiza podataka, Industrija 4.0 i kibernetско-fizikalni sustavi. Željeznice su kao složeni sustav upravljanja svakako zahvaćene utjecajem tih promjena. Ipak, zbog svoje važnosti, načina gospodarenja i obimnosti, željeznice pokazuju visoki stupanj sporosti u promjenama. Ovim specijalističkim radom nastoji se barem jednim dijelom odgovoriti na izazove koje stvara najavljena revolucija u upravljanju industrijskim okruženjima, te promjene standarda ERTMS. Naglasak je stavljen na transformaciju postojećih signalno-sigurnosnih sustava željeznice kao krutih industrijskih komunikacijsko-upravljačkih mreža u prilagodljivije otvorene komunikacijske sustave u smislu razmjene i prikupljanja podataka, te proširenje nadzora stanja infrastrukture i vlaka zbog unaprjeđenja procesa upravljanja prometom i održavanja opreme. U radu je detaljno obrađen nadzor jednokolosječne otvorene pruge te su analizirani problemi koji se na njoj pojavljuju. Glavni cilj analize postojećih sustava rezultirao je izradom kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava jednokolosječne otvorene pruge zajedno s potrebnim programskim implementacijama komunikacijskih sučelja. Na temelju uspostavljenog modela provedena je usporedna analiza prednosti takvog načina upravljanja prometom, te tehnо-ekonomska analiza investicije koja opravdava uvođenje novog slojevitog pristupa opremanja željezničke infrastrukture s ciljem stvaranja jedinstvene kibernetско-fizikalne mreže. U radu su prikazane i dodatne analize prednosti koje donosi predloženi kibernetско-fizikalni model, a koje se očituju u povećanju sigurnosti, pouzdanosti i učinkovitijem održavanju.

Ključne riječi: Industrija 4.0, kibernetско-fizikalni sustav, prometna sigurnost, signalno-sigurnosni sustav, željeznica.

Abstract

The railway signaling and safety system is the basic system for managing rail traffic. Continuous changes in technology and traffic safety requirements have resulted in numerous improvements. Today, the main pillars of the development of new advanced systems, including railway, are the Internet of Things, cloud computing, artificial intelligence, data analytics, Industry 4.0 and cyber-physical systems. Railways, as a complex management system, are certainly affected by the impact of these changes. However, due to their importance, the way they are managed and the size of the railway, they show a high degree of slowness in change. This paper seeks to address, at least in part, the challenges posed by the announced revolution in the management of industrial environments, and changes to the ERTMS standard. Emphasis is placed on the transformation of existing signaling systems as rigid industrial communication and control networks into more adaptable open communication systems in terms of data exchange and collection, and the expansion of infrastructure and train monitoring to improve traffic management and equipment maintenance processes. The paper deals with the supervision of a single-track railway and analyzes the problems that arise on it. The main objective of the analysis of the existing systems has resulted in the development of a cyber-physical model of the single-track interlocking system along with the necessary software implementations of the communication interfaces. On the basis of the established model, a comparative analysis of the advantages of this method of traffic management was carried out, as well as a feasibility analysis of the investment which justifies the introduction of a new stratified approach to equipping the railway infrastructure with the aim of creating a unified cyber-physical network. The paper also presents additional analyzes of the benefits of the proposed cyber-physical model, which are manifested in increasing security, reliability and more efficient maintenance.

Keywords: Industry 4.0, Cyber-physical system, traffic safety, signaling system, railway.

Životopis

Ranko Nišandžić rođen je 1981. godine u Donjoj Dragunji, u općini Tuzla u Bosni i Hercegovini. Osnovnu školu i srednju elektrotehničku školu završio je u Tuzli. Diplomirao je 2005. godine na Fakultetu elektrotehnike u Tuzli na odsjeku Tehnička informatika. Na kraju diplomskog studija primio je priznanje sveučilišta "Zlatna plaketa" za prosječnu ocjenu 9,00. Poslije diplomskog studija svoju profesionalnu karijeru započinje u industriji suvremenih automobila na primjeni CAN mreža i ugrađenih računalnih sustava. Godine 2007. karijeru nastavlja kao projektant sustava automatskog upravljanja na infrastrukturnim objektima cesta, autocesta, željeznice, vodovoda, elektroenergetike i objekata visokogradnje. U proteklih petnaest godina, kao uposlenik IPSA Instituta Sarajevo, učestvovao je u izradi i ostvarenju nekoliko stotina uspješnih projekata i studija kao odgovorni projektant, nadzorni inženjer i voditelj projekata. Poslijediplomski specijalistički studij, smjer Napredne komunikacijske tehnologije, upisuje školske 2014/2015. godine na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Autor je nekoliko objavljenih stručnih i znanstvenih radova iz oblasti profesionalnog djelovanja. Od 2022. godine postaje osnivač i suvlasnik poduzeća ETAS d.o.o. za projektiranje, inženjering i savjetovanje u polju elektrotehničkog inženjerstva. Pored profesionalnog rada svoje dosadašnje djelovanje i razvoj kreativnosti usmjeravao je i na dizajn, glazbu, arhitekturu, oldtimer automobile pri čemu je stvorena osobna kolekcija objekata, unikatnog namještaja i automobila.

Popis tablica

Tablica 2.1.	Komparativni pregled signalno-sigurnosnih sustava.....	11
Tablica 3.1.	Signali modificiranog napojnog uređaja za računalno sučelje	16
Tablica 3.2.	Ulazi elektroničkog pružnog bloka broj 2 (EPB 2).....	19
Tablica 3.3.	Izlazi elektroničkog pružnog bloka broj 2 (EPB 2).....	19
Tablica 3.4.	Ulazne varijable za EPB-ove iz brojača osovina i kolodvorskih uređaja i izlazne varijable EPB 2.....	20
Tablica 3.5.	Ulazne i izlazne varijable brojača osovina BO1.....	22
Tablica 3.6.	Ulazne i izlazne varijable brojača osovina BO2.....	22
Tablica 3.7.	Ulazne i izlazne varijable uređaja cestovnog prijelaza.....	23
Tablica 3.8.	Ulazne i izlazne varijable vlaka kao aktivnog el. u procesu.....	24
Tablica 3.9.	Varijable automatskog pružnog bloka.....	30-31
Tablica 3.10.	Varijable brojača osovina.....	31
Tablica 3.11.	Varijable uređaja za osiguranje cestovnog prijelaza.....	31
Tablica 3.12.	Varijable vlaka.....	31-32
Tablica 4.1.	Vozni red pruge predmetnog modela.....	37-39
Tablica 6.1.	Broj prevezenih putnika u 2015. i 2016. godini u zemljama EU	58-59
Tablica 6.2.	Prikaz unaprijeđenja sigurnosti primjenom kibernetско-fizikalnog modela.....	61
Tablica 6.3.	Ukupan broj nezgoda na europskim željeznicama po tipovima	62
Tablica 6.4.	Hipotetske vrijednosti smanjenja broja nezgoda po tipu nezgode.....	63
Tablica 6.5.	Hipotetski ukupan broj nezgoda na europskim željeznicama po tipovima poslije primjene kibernetско-fizikalnog modela na signalno-sigurnosne sustave.....	63
Tablica 6.6.	Usporedni prikaz broja nezgoda stvarnih signalno-sigurnosnih sustava i primjenom hipotetskog kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnih sustava na europskim željeznicama.....	64
Tablica 6.7.	Rezultati primjene t testa.....	65
Tablica 6.8.	Broj objekata na dionici pruge Vrpolje – Sarajevo.....	67
Tablica 6.9.	Rekapitulacija troškova za remont postojećih signalno-sigurnosnih sustava na dionici Vrpolje – Sarajevo.....	68
Tablica 6.10.	Procjena investicije za izgradnju komunikacijske i upravljačke infrastrukture i instalaciju kibernetско-fizikalnog signalno-sigurnosnog sustava na dionici Vrpolje – Sarajevo.....	69
Tablica 6.11.	Komparativna tablica nedostataka standardnih sustava i prednosti kibernetско-fizikalnog sustava.....	70

Popis slika

Slika 3.1.	Slojevi kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava željeznice.....	13
Slika 3.2.	Lijevo – standardni napojni uređaj SEL-Iskra SbL5, desno – modificirani napojni uređaj	15
Slika 3.3.	Shema signalnog razdjelnika s ugrađenim računalom.....	17
Slika 3.4.	Shema elektroničkog pružnog bloka s ugrađenim računalom...	18
Slika 3.5.	a. Induktivni senzor kotača b. Montirana kutija elektroničkog upravljačkog sklopa c. Komponente elektroničkog upravljačkog sklopa.....	21
Slika 3.6.	Shematski prikaz arhitekture modela podataka.....	29
Slika 4.1.	Blok shema uređaja u polju za odabranu dionicu pruge.....	35
Slika 4.2.	Vizualizacija modela jednokolosiječne pruge.....	36
Slika 4.3.	Dijagram tijeka unutarnje pohrane podataka u sustava.....	41
Slika 4.4.	Varijable stanja signala zapisane u APB.json datoteku.....	42
Slika 4.5.	Varijable stanja odsjeka zapisane u datoteke brojača osovina BO.json.....	42
Slika 4.6.	Varijable stanja cestovnog prijelaza zapisane u datoteci CPR_STATUS.json.....	43
Slika 4.7.	Varijable stanja vlaka zapisane u datoteci TRAIN.json.....	43
Slika 4.8.	Varijable kvara u datotekama ABP1.json – APB7.json.....	44
Slika 4.9.	Varijable kvara u datoteci trainID.json.....	45
Slika 4.10.	Varijable kvara u datoteci brojača osovina.....	45
Slika 4.11.	Varijable kvara u datoteci cestovnog prijelaza.....	46
Slika 4.12.	Skica datoteka stanja programskog ostvarenja modela.....	47
Slika 4.13.	Skica datoteka kvarova i smetnji programskog ostvarenja modela.....	47
Slika 4.14.	Univerzalni pristup razvoju kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnog sustava željeznice.....	48
Slika 5.1.	Razmjena podataka u kibernetско-fizikalnom modelu signalno-sigurnosnog sustava željeznice.....	49
Slika 5.2.	Grafički prikaz željezničkog signala.....	52
Slika 5.3.	Upaljeno crveno signalizacijsko svjetlo.....	52
Slika 5.4.	Znak upozorenja.....	53
Slika 5.5.	Kvar ili smetnja na određenom signalu.....	53
Slika 5.6.	Trenutno stanje varijabli elementa APB1/EPB1.....	54
Slika 5.7.	Normalna vožnja vlaka bez kvarova i smetnji.....	55
Slika 5.8.	Vožnja vlaka pri određenim kvarovima i smetnjama na napravama.....	55
Slika 6.1.	Broj preminulih ljudi od željezničkih nezgoda 2010. – 2016.....	58
Slika 6.2.	Postotni udio željezničkih nezgoda po tipovima.....	60
Slika 6.3.	Dijagram željezničkih nezgoda u Europi prema tipu nezgode....	62
Slika 6.4.	Hipotetski dijagram željezničkih nezgoda u Europi prema tipu nezgode poslije primjene kibernetско-fizikalnog modela na signalno-sigurnosne sustave.....	64

Slika 6.5.	Dijagram usporedbe statistički stvarnog broja nezgoda i broja nezgoda hipotetskom primjenom kibernetско-fizikalnog modela signalno-sigurnosnih sustava na europskim željeznicama.....	65
Slika 6.6.	Trasa pruge Sarajevo – Vrpolje.....	66
Slika 6.7.	Europski transportni koridori.....	68
Slika 6.8.	Dijagram brzine vlaka od km 0 do km 7 na sekciji pruge: Vrpolje – Državna granica HR - BiH.....	73
Slika 6.9.	Dijagram brzine vlaka od km 7 do km 14 na sekciji pruge: Vrpolje – Državna granica HR - BiH.....	73
Slika 6.10.	Dijagram brzine vlaka od km 14 do km 22 na sekciji pruge: Vrpolje – Državna granica HR - BiH.....	73
Slika 6.11.	Godišnji broj kvarova prema vrsti kvara.....	75
Slika 6.12.	Kašnjenje vlakova u ovisnosti od vrste kvara.....	76

Popis korištenih kratica

AJAX	(eng. Asynchronous JavaScript and XML)
APB	Automatski pružni blok
BO	Brojač osovina
CPR	Cestovni prijelaz
D2D	(eng. Device to Device)
DfT	(eng. Department For Transport)
EB	Europska Banka
EPB	Elektronički pružni blok
ERTMS	(eng. European Railway Traffic Management System)
ETCS	(eng. European Train Control System)
GFDM	(eng. Generalized Frequency Division Multiplexing)
GSM-R	(eng. Global System for Mobile Communications– Railway)
HTML	(eng. HyperText Markup Language)
HTTP	(eng. HyperText Transfer Protocol)
HŽ	Hrvatske željeznice
IT	(eng. Information Tehnology)
ITU	(eng. International Telecommunication Union)
IoT	(eng. Internet of Things)
IoP	(eng. Internet of People)
LED	(eng. Light Emitting Diode)
LEU	(eng. Lineside Electronic Unit)
MTTR	(eng. Mean Time to Repair)
OFDM	(eng. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)
RBC	(eng. Radio Block Center)
SVG	(eng. Scalable Vector Graphics)
WS	(eng. Wheel Sensor)
XML	(eng. eXtensible Markup Language)
ŽFBiH	Željeznice Federacije Bosne i Hercegovine

Prilozi (na CD-u)

Prilog 1 - Broj željezničkih nezgoda, po tipu nezgode, 2016. [27]

Prilog 2 - Broj poginulih osoba u željezničkim nezgodama, po tipu nezgode, 2016. [27]

Prilog 3 - Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje – Sarajevo [31]

Prilog 1 - Broj željezničkih nezgoda, po tipu nezgode, 2016. [27]

	UKUPNO	Kolizije	Iskliznuća s tračnica	Cestovni prijelazi (Uključujući pješačke)	Nezgode s ljudima kao posljedica kretanja željezničkih vozila (isključujući samoubojstva)	Požari na želj. vozilima	Ostale nezgode
EU-28	1,787	101	68	433	1,069	36	80
Belgija	22	2	0	12	7	0	1
Bugarska	40	3	6	5	24	2	0
Češka Republika	87	6	2	34	38	2	5
Danska	5	0	0	1	3	1	0
Njemačka	310	29	3	50	183	6	39
Estonija	15	3	0	8	1	1	2
Irska	0	0	0	0	0	0	0
Grčka	13	1	0	1	10	0	1
Španjolska	45	6	7	10	22	0	0
Francuska	146	7	5	48	79	4	3
Hrvatska	23	0	2	5	15	0	1
Italija	99	4	2	15	72	1	5
Latvija	18	0	0	3	15	0	0
Litva	20	0	1	6	13	0	0
Luksemburg	2	1	0	1	0	0	0
Mađarska	162	1	2	27	115	9	8
Nizozemska	28	7	0	7	11	1	2
Austrija	87	7	5	31	41	0	3
Poljska	265	5	16	76	168	0	0
Portugal	38	4	5	8	21	0	0
Rumunjska	184	1	0	42	140	1	0
Slovenija	11	1	1	8	0	0	1
Slovačka	60	2	1	12	42	2	1
Finska	18	4	1	6	4	0	3
Švedska	36	2	3	7	15	4	5
Ujedinjeno Kraljevstvo	53	5	6	10	30	2	0
Norveška	16	11	2	0	3	0	0
Švicarska	35	2	0	2	26	1	4
Crna Gora	:	:	:	:	:	:	:
BJR Makedonija	88	1	16	14	12	0	45
Turska	120	6	23	51	36	0	4

Prilog 2 - Broj poginulih osoba u željezničkim nezgodama, po tipu nezgode, 2016. [27]

	UKUPNO	Kolizije	Iskliznuća s tračnica	Cestovni prijelazi (Uključujući pješačke)	Nezgode s ljudima kao posljedica kretanja željezničkih vozila (isključujući samoubojstva)	Požari na želj. vozilima	Ostale nezgode
EU-28	964	44	11	256	651	0	2
Belgija	14	3	0	4	7	0	0
Bugarska	22	0	7	5	10	0	0
Češka Republika	34	0	0	23	11	0	0
Danska	1	0	0	1	0	0	0
Njemačka	150	11	0	28	111	0	0
Estonija	0	0	0	0	0	0	0
Irska	0	0	0	0	0	0	0
Grčka	10	2	0	1	7	0	0
Španjolska	28	0	4	8	16	0	0
Francuska	81	0	0	31	50	0	0
Hrvatska	11	0	0	2	9	0	0
Italija	85	23	0	7	55	0	0
Latvija	15	0	0	3	12	0	0
Litva	16	0	0	4	12	0	0
Luksemburg	0	0	0	0	0	0	0
Mađarska	97	3	0	15	77	0	2
Nizozemska	8	0	0	4	4	0	0
Austrija	31	0	0	13	18	0	0
Poljska	167	0	0	48	119	0	0
Portugal	25	0	0	8	17	0	0
Rumunjska	87	2	0	23	62	0	0
Slovenija	5	0	0	5	0	0	0
Slovačka	26	0	0	6	20	0	0
Finska	10	0	0	7	3	0	0
Švedska	13	0	0	5	8	0	0
Ujedinjeno Kraljevstvo	28	0	0	5	23	0	0
Norveška	3	0	0	0	3	0	0
Švicarska	18	0	0	1	17	0	0
Crna Gora	5	0	0	1	4	0	0
BJR Makedonija	6	0	0	0	6	0	0

Prilog 3 - Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje – Sarajevo [31]

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja								
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U
0+000,00	Kolodvor Vrpolje					1		
0+314,00	Cestovni prijelaz	1						
0+552,50	Cestovni prijelaz	1						
0+769,00	Prostorni signal			1				
0+818,50	APB		1					
0+869,00	Prostorni signal			1				
1+560,90	Cestovni prijelaz	1						
2+043,00	Cestovni prijelaz	1						
2+386,00	Prostorni signal			1				
2+436,50	APB		1					
2+486,00	Prostorni signal			1				
2+809,50	Cestovni prijelaz	1						
3+958,00	Prostorni signal			1				
3+967,00	Cestovni prijelaz	1						
4+008,00	APB		1					
4+058,30	Prostorni signal			1				
4+367,00	Cestovni prijelaz	1						
5+386,20	Cestovni prijelaz	1						
5+555,30	Prostorni signal			1				
5+605,00	APB		1					
5+655,00	Prostorni signal			1				
5+821,60	Cestovni prijelaz	1						
7+107,00	Cestovni prijelaz	1						
7+152,00	Prostorni signal			1				
7+202,00	APB		1					
7+252,00	Prostorni signal			1				
7+910,50	Cestovni prijelaz	1						
8+152,90	Ulazni signal				1			
8+493,05	Cestovni prijelaz	1						
8+927,00	Kolodvor Kopanica Beravci					1		
9+680,00	Ulazni signal				1			
9+950,00	Cestovni prijelaz	1						
10+574,00	Prostorni signal			1				
10+624,00	APB		1					
10+674,20	Prostorni signal			1				
10+737,70	Cestovni prijelaz	1						
11+569,67	Stajalište Sikirevci						1	
11+583,00	Cestovni prijelaz	1						
12+091,00	Prostorni signal			1				
12+145,00	APB		1					
12+195,00	Prostorni signal			1				
12+545,70	Cestovni prijelaz	1						
12+912,00	Cestovni prijelaz	1						
13+375,50	Cestovni prijelaz	1						
13+761,00	Prostorni signal			1				

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
13+813,00	APB		1						
13+863,00	Prostorni signal			1					
14+964,30	Cestovni prijelaz	1							
15+435,00	Prostorni signal			1					
15+485,00	APB		1						
15+535,00	Prostorni signal			1					
15+744,00	Cestovni prijelaz	1							
17+066,00	Prostorni signal			1					
17+075,20	Cestovni prijelaz	1							
17+116,00	APB		1						
17+166,00	Prostorni signal			1					
18+056,10	Ulazni signal				1				
18+992,50	Kolodvor S. Šamac						1		
19+693,70	Cestovni prijelaz	1							
19+733,80	Ulazni signal				1				
20+631,00	Prostorni signal			1					
20+681,00	APB		1						
20+731,00	Prostorni signal			1					
21+891,55	Granica HR / BiH								
22+393,00	Prostorni signal			1					
22+443,00	APB		1						
22+493,00	Prostorni signal			1					
23+393,50	Ulazni signal				1				
23+783,20	Cestovni prijelaz	1							
24+136,00	Kolodvor B. Šamac						1		
25+188,50	Cestovni prijelaz	1							
26+040,50	Cestovni prijelaz	1							
26+292,00	Prostorni signal			1					
26+342,00	APB		1						
26+392,00	Prostorni signal			1					
27+420,00	Cestovni prijelaz	1							
28+005,70	Cestovni prijelaz	1							
28+129,80	Prostorni signal			1					
28+180,00	APB		1						
28+230,00	Prostorni signal			1					
28+521,50	Cestovni prijelaz	1							
29+431,50	Cestovni prijelaz	1							
29+969,00	Prostorni signal			1					
30+019,00	APB		1						
30+069,00	Prostorni signal			1					
30+779,00	Cestovni prijelaz	1							
31+504,70	Cestovni prijelaz	1							
31+808,00	Prostorni signal			1					
31+858,00	APB		1						
31+908,00	Prostorni signal			1					

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja								
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U
32+279,50	Cestovni prijelaz	1						
32+839,00	Ulazni signal				1			
33+005,00	Cestovni prijelaz	1						
33+666,00	Kolodvor B. Miloševac					1		
34+502,00	Ulazni signal				1			
34+508,50	Cestovni prijelaz	1						
35+524,70	Cestovni prijelaz	1						
35+370,00	Prostorni signal			1				
35+420,00	APB		1					
35+470,00	Prostorni signal			1				
35+956,00	Cestovni prijelaz	1						
36+963,00	Prostorni signal			1				
37+013,00	APB		1					
37+063,00	Prostorni signal			1				
37+828,70	Cestovni prijelaz	1						
37+883,50	Stajalište Garevac						1	
38+556,00	Prostorni signal			1				
38+606,00	APB		1					
38+656,00	Prostorni signal			1				
38+681,00	Cestovni prijelaz	1						
39+856,00	Cestovni prijelaz	1						
40+050,00	Prostorni signal			1				
40+091,00	Cestovni prijelaz	1						
40+100,00	APB		1					
40+150,00	Prostorni signal			1				
41+153,20	Ulazni signal				1			
41+373,50	Cestovni prijelaz	1						
41+979,00	Kolodvor Modriča					1		
42+690,50	Cestovni prijelaz	1						
42+811,00	Ulazni signal				1			
43+682,00	Prostorni signal			1				
43+732,00	APB		1					
43+782,00	Prostorni signal			1				
44+351,50	Cestovni prijelaz	1						
45+482,50	Cestovni prijelaz	1						
45+489,00	Prostorni signal			1				
45+538,70	APB		1					
45+588,70	Prostorni signal			1				
46+465,90	Cestovni prijelaz	1						
47+300,00	Prostorni signal			1				
47+346,00	APB		1					
47+471,00	Prostorni signal			1				
47+961,50	Cestovni prijelaz	1						
48+861,40	Cestovni prijelaz	1						
49+103,30	Prostorni signal			1				

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
49+153,10	APB		1						
49+203,00	Prostorni signal			1					
49+834,50	Cestovni prijelaz	1							
50+103,00	Ulazni signal				1				
50+409,50	Cestovni prijelaz	1							
50+908,50	Kolodvor Vranjak					1			
51+695,00	Ulazni signal				1				
52+116,00	Cestovni prijelaz	1							
52+595,00	Prostorni signal			1					
52+644,00	APB		1						
52+695,00	Prostorni signal			1					
52+944,50	Cestovni prijelaz	1							
53+806,00	Cestovni prijelaz	1							
54+291,00	Prostorni signal			1					
54+341,00	APB		1						
54+391,00	Prostorni signal			1					
54+665,00	Cestovni prijelaz	1							
55+084,50	Cestovni prijelaz	1							
55+790,00	Stajalište Koprivna						1		
55+845,00	Cestovni prijelaz	1							
55+977,00	Cestovni prijelaz	1							
55+987,00	Prostorni signal			1					
56+037,00	APB		1						
56+087,70	Prostorni signal			1					
57+683,20	Prostorni signal			1					
57+733,00	APB		1						
57+783,00	Prostorni signal			1					
58+047,00	Cestovni prijelaz	1							
58+682,00	Ulazni signal								
58+877,00	Cestovni prijelaz	1							
59+483,00	Kolodvor Koprivna Gornja					1			
60+250,70	Cestovni prijelaz	1							
60+293,50	Ulazni signal				1				
61+193,00	Prostorni signal			1					
61+243,00	APB		1						
61+292,10	Prostorni signal			1					
61+787,50	Cestovni prijelaz	1							
63+001,00	Prostorni signal			1					
63+080,00	APB		1						
63+160,00	Prostorni signal			1					
64+642,80	Cestovni prijelaz	1							
65+047,00	Prostorni signal			1					
65+090,00	APB		1						
65+140,00	Prostorni signal			1					
65+921,00	Stajalište Kožuhe						1		

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
65+974,50	Cestovni prijelaz	1							
66+860,00	Prostorni signal			1					
66+860,00	APB		1						
66+610,00	Prostorni signal			1					
66+664,30	Cestovni prijelaz	1							
67+249,00	Cestovni prijelaz	1							
67+810,10	Ulazni signal				1				
67+896,70	Cestovni prijelaz	1							
68+805,48	Kolodvor Osječani						1		
69+224,00	Cestovni prijelaz	1							
69+449,49	Ulazni signal				1				
70+350,00	Prostorni signal			1					
70+400,00	APB		1						
70+450,00	Prostorni signal			1					
70+495,00	Cestovni prijelaz	1							
71+431,00	Cestovni prijelaz	1							
72+044,20	Prostorni signal			1					
72+095,00	APB		1						
72+145,00	Prostorni signal			1					
72+254,00	Cestovni prijelaz	1							
73+000,00	Cestovni prijelaz	1							
73+742,00	Prostorni signal			1					
73+780,00	Cestovni prijelaz	1							
73+791,40	APB		1						
73+800,00	Stajalište Bušetlić							1	
73+839,70	Prostorni signal			1					
74+834,00	Cestovni prijelaz	1							
75+498,00	Prostorni signal			1					
75+560,00	APB		1						
75+656,00	Cestovni prijelaz	1							
75+670,00	Prostorni signal			1					
76+795,00	Cestovni prijelaz	1							
77+128,60	Prostorni signal			1					
77+202,00	APB		1						
77+229,00	Prostorni signal			1					
78+126,00	Cestovni prijelaz	1							
78+136,00	Ulazni signal				1				
78+857,50	Kolodvor Grapska						1		
79+601,20	Ulazni signal				1				
80+600,00	Prostorni signal			1					
80+650,00	APB		1						
80+751,36	Prostorni signal			1					
81+990,00	Prostorni signal			1					
82+230,00	Prostorni signal			1					
82+255,50	APB		1						

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
82+291,50	Cestovni prijelaz	1							
83+316,00	Prostorni signal			1					
84+727,00	Odvajanje za kol. Doboj					1			
87+970,00	Cestovni prijelaz	1							
88+138,10	Prostorni signal			1					
88+189,80	APB		1						
88+239,00	Prostorni signal			1					
88+459,60	Prostorni signal			1					
88+509,20	APB		1						
88+559,10	Prostorni signal			1					
88+734,50	Cestovni prijelaz	1							
89+458,60	Ulazni signal				1				
90+291,00	Kolodvor Ševarlije					1			
90+801,00	Cestovni prijelaz	1							
90+838,40	Ulazni signal				1				
92+060,50	Prostorni signal			1					
92+111,30	APB		1						
92+160,40	Prostorni signal			1					
92+294,60	Cestovni prijelaz	1							
93+306,00	Prostorni signal			1					
93+314,00	APB		1						
93+326,10	Prostorni signal			1					
94+445,50	Prostorni signal			1					
94+466,80	Cestovni prijelaz	1							
94+469,70	APB		1						
94+466,80	Prostorni signal			1					
94+967,80	Cestovni prijelaz	1							
95+414,00	Cestovni prijelaz	1							
95+418,00	Stajalište Trbuk							1	
96+111,60	Prostorni signal			1					
96+121,40	APB		1						
96+131,50	Prostorni signal			1					
96+183,00	Cestovni prijelaz	1							
97+056,50	Cestovni prijelaz	1							
97+757,20	Ulazni signal				1				
97+766,80	Cestovni prijelaz	1							
98+094,00	Cestovni prijelaz	1							
98+528,00	Ukrsnica Rječice							1	
99+094,00	Cestovni prijelaz	1							
99+339,00	Ulazni signal				1				
100+221,00	Prostorni signal			1					
100+265,50	Cestovni prijelaz	1							
100+268,20	APB		1						
100+356,20	Prostorni signal			1					
100+822,65	Cestovni prijelaz	1							

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
101+325,00	Stajalište Rječica Stara								1
102+049,40	Prostorni signal			1					
102+059,40	APB		1						
102+069,40	Prostorni signal			1					
103+427,30	Cestovni prijelaz	1							
104+017,10	Prostorni signal			1					
104+026,50	APB		1						
104+043,90	Prostorni signal			1					
104+746,20	Cestovni prijelaz	1							
106+112,10	Prostorni signal			1					
106+126,30	Cestovni prijelaz	1							
106+136,30	APB		1						
106+141,00	Prostorni signal			1					
107+145,10	Ulazni signal				1				
107+966,70	Kolodvor Maglaj								1
108+491,00	Cestovni prijelaz	1							
108+829,00	Ulazni signal				1				
109+893,90	Cestovni prijelaz	1							
110+909,80	APB		1						
110+055,50	Prostorni signal			1					
110+098,72	Prostorni signal			1					
110+996,10	Cestovni prijelaz	1							
111+489,10	Prostorni signal			1					
111+498,96	APB		1						
111+508,60	Prostorni signal			1					
112+092,50	Cestovni prijelaz	1							
112+561,00	Cestovni prijelaz	1							
113+148,50	Cestovni prijelaz	1							
113+224,10	Prostorni signal			1					
113+245,10	Prostorni signal								
113+260,50	APB		1						
113+904,40	Stajalište Fojnica								1
114+287,50	Cestovni prijelaz	1							
115+239,00	Prostorni signal			1					
115+249,60	APB		1						
115+259,80	Prostorni signal			1					
115+273,50	Cestovni prijelaz	1							
115+559,00	Cestovni prijelaz	1							
116+627,30	Ulazni signal								
116+771,30	Cestovni prijelaz	1							
117+301,10	Kolodvor Bradići								1
117+931,30	Cestovni prijelaz	1							
118+050,30	Ulazni signal				1				
118+452,30	Cestovni prijelaz	1							
119+037,40	Prostorni signal			1					

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
119+045,70	APB		1						
119+052,10	Prostorni signal			1					
120+182,00	Cestovni prijelaz	1							
120+336,00	Prostorni signal			1					
120+343,80	APB		1						
120+352,10	Prostorni signal			1					
121+114,00	Cestovni prijelaz	1							
121+224,80	Stajalište Globarica							1	
121+935,30	Cestovni prijelaz	1							
122+093,70	Prostorni signal			1					
122+103,20	APB		1						
122+113,20	Prostorni signal			1					
123+744,60	Prostorni signal			1					
123+797,00	APB		1						
123+847,00	Prostorni signal			1					
124+836,30	Ulazni signal				1				
125+262,80	Ukrsnica Dolina								1
126+047,80	Cestovni prijelaz	1							
126+941,80	Cestovni prijelaz	1							
126+954,00	Prostorni signal			1					
127+004,00	APB		1						
127+054,00	Prostorni signal			1					
127+228,80	Cestovni prijelaz	1							
128+269,50	Prostorni signal			1					
128+279,80	APB		1						
128+289,70	Prostorni signal			1					
128+385,80	Cestovni prijelaz	1							
129+499,00	Ulazni signal				1				
130+453,00	Kolodvor Zavidovići							1	
130+708,45	Cestovni prijelaz	1							
131+010,00	Ulazni signal				1				
131+795,60	Cestovni prijelaz	1							
133+377,00	Prostorni signal			1					
133+387,20	APB		1						
133+397,20	Prostorni signal			1					
134+056,50	Cestovni prijelaz	1							
135+249,60	Ulazni signal				1				
135+700,50	Cestovni prijelaz	1							
135+918,50	Kolodvor Vinište							1	
136+623,30	Ulazni signal				1				
137+520,70	Prostorni signal			1					
137+568,50	APB		1						
137+621,10	Prostorni signal			1					
137+737,60	Cestovni prijelaz	1							
138+598,00	Prostorni signal			1					

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
138+649,50	APB		1						
138+700,50	Prostorni signal			1					
138+973,85	Cestovni prijelaz	1							
140+384,70	Prostorni signal			1					
140+394,60	APB		1						
140+404,80	Prostorni signal			1					
141+399,26	Ulazni signal				1				
141+528,06	Cestovni prijelaz	1							
142+242,50	Kolodvor Žepče					1			
142+731,50	Cestovni prijelaz	1							
142,917,10	Ulazni signal				1				
143+497,50	Cestovni prijelaz	1							
144+005,40	Prostorni signal			1					
144+027,40	APB		1						
144+048,40	Prostorni signal			1					
144+939,20	Prostorni signal			1					
144+962,00	APB		1						
144+950,50	Cestovni prijelaz	1							
144+971,20	Prostorni signal			1					
146+486,00	Prostorni signal			1					
146+495,80	APB		1						
146+506,20	Prostorni signal			1					
146+563,20	Cestovni prijelaz	1							
147+487,90	Ulazni signal				1				
148+281,40	Kolodvor Želeće					1			
148+906,80	Ulazni signal				1				
149+978,70	Prostorni signal			1					
149+990,40	APB		1						
150+002,20	Prostorni signal			1					
151+630,90	Prostorni signal			1					
151+641,50	APB		1						
151+651,30	Prostorni signal			1					
153+699,70	Prostorni signal			1					
153+709,90	APB		1						
153+719,80	Prostorni signal			1					
155+288,80	Ulazni signal				1				
155+900,00	Kolodvor Begov Han					1			
156+548,68	Ulazni signal				1				
157+598,30	Prostorni signal			1					
157+649,90	APB		1						
157+698,40	Prostorni signal			1					
158+120,00	Cestovni prijelaz	1							
158+383,70	Prostorni signal			1					
158+401,50	APB		1						
158+533,20	Prostorni signal			1					

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
159+203,00	Cestovni prijelaz	1							
159+860,40	Cestovni prijelaz	1							
160+188,10	Prostorni signal			1					
160+198,80	APB		1						
160+208,00	Prostorni signal			1					
160+763,50	Cestovni prijelaz	1							
161+513,00	Cestovni prijelaz	1							
161+937,70	Prostorni signal			1					
161+954,00	APB		1						
161+968,30	Prostorni signal			1					
162+675,00	Cestovni prijelaz	1							
163+140,50	Cestovni prijelaz	1							
163+287,00	Ulazni signal				1				
163+482,50	Cestovni prijelaz	1							
164+135,40	Kolodvor Nemila					1			
164+771,20	Ulazni signal				1				
165+779,50	Prostorni signal			1					
165+820,60	APB		1						
165+870,80	Prostorni signal			1					
167+024,00	Prostorni signal			1					
167+074,00	APB		1						
167+124,00	Prostorni signal			1					
168+242,50	Prostorni signal			1					
168+293,00	APB		1						
168+293,00	Prostorni signal			1					
169+793,00	Prostorni signal			1					
169+804,50	APB		1						
169+813,80	Prostorni signal			1					
170+720,00	Cestovni prijelaz	1							
170+919,00	Ulazni signal				1				
171+611,00	Kolodvor Jelina					1			
172+304,60	Ulazni signal				1				
173+291,30	Prostorni signal			1					
173+304,00	APB		1						
173+312,30	Prostorni signal			1					
174+030,00	Cestovni prijelaz	1							
174+594,80	Prostorni signal			1					
174+655,70	APB		1						
174+701,80	Prostorni signal			1					
175+973,80	Prostorni signal			1					
176+010,00	APB		1						
176+120,00	Prostorni signal			1					
177+192,00	Ulazni signal				1				
177+932,00	Kolodvor Zenica Teretna					1			
178+674,20	Cestovni prijelaz	1							

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja								
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U
179+664,15	Kolodvor Zenica Putnička					1		
180+200,00	Ulazni signal				1			
180+546,00	Cestovni prijelaz	1						
181+171,00	Prostorni signal			1				
181+222,80	APB		1					
181+271,00	Prostorni signal			1				
182+920,00	Cestovni prijelaz	1						
183+056,00	Prostorni signal			1				
183+056,00	APB		1					
183+105,50	Prostorni signal			1				
183+580,00	Cestovni prijelaz	1						
184+818,40	Prostorni signal			1				
184+886,00	APB		1					
184+936,50	Prostorni signal			1				
185+818,30	Ulazni signal				1			
186+295,00	Cestovni prijelaz	1						
186+771,35	Kolodvor Drivuša					1		
187+373,00	Ulazni signal				1			
188+365,00	Cestovni prijelaz	1						
188+411,00	Prostorni signal			1				
188+583,40	Kolodvor Janjići							
188+885,30	Cestovni prijelaz	1						
189+966,00	Cestovni prijelaz	1						
189+999,00	Prostorni signal			1				
190+999,00	APB		1					
190+099,00	Prostorni signal			1				
191+059,40	Stajalište Suha						1	
191+693,00	Prostorni signal			1				
191+717,00	APB		1					
191+793,00	Prostorni signal			1				
191+949,30	Cestovni prijelaz	1						
193+509,50	Kolodvor Lašva					1		
194+152,20	Ulazni signal				1			
194+950,00	Prostorni signal			1				
195+095,50	APB		1					
195+173,50	Cestovni prijelaz	1						
195+174,50	Cestovni prijelaz	1						
195+173,50	Stajalište Jehovina						1	
195+202,60	Prostorni signal			1				
196+628,70	Prostorni signal			1				
196+700,00	APB		1					
196+747,00	Prostorni signal			1				
197+922,00	Cestovni prijelaz	1						
198+240,00	Prostorni signal			1				
198+290,70	APB		1					

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
199+344,50	Prostorni signal			1					
199+247,40	Ulazni signal				1				
200+074,50	Ukrsnica Modrinje								1
200+689,80	Ulazni signal				1				
201+599,00	Prostorni signal			1					
201+645,30	APB		1						
201+698,50	Prostorni signal			1					
203+115,00	Prostorni signal			1					
203+196,50	APB		1						
203+265,00	Prostorni signal			1					
204+810,00	Prostorni signal			1					
204+857,00	APB		1						
204+910,00	Prostorni signal			1					
206+746,00	Prostorni signal			1					
206+509,20	APB		1						
206+565,00	Prostorni signal			1					
207+465,80	Ulazni signal				1				
207+773,80	Cestovni prijelaz	1							
207+955,60	Kolodvor Kakanj						1		
209+103,60	Ulazni signal				1				
209+663,00	Cestovni prijelaz	1							
210+006,00	Prostorni signal			1					
210+045,00	APB		1						
210+052,00	Cestovni prijelaz	1							
210+087,50	Prostorni signal			1					
210+840,00	Cestovni prijelaz	1							
211+252,00	Stajaliste Ćatići								
211+596,00	Prostorni signal			1					
211+629,80	APB		1						
211+696,00	Prostorni signal			1					
212+818,00	Cestovni prijelaz	1							
213+312,00	Prostorni signal			1					
213+318,80	APB		1						
213+312,00	Prostorni signal			1					
214+573,20	Cestovni prijelaz	1							
214+891,50	Prostorni signal			1					
214+940,40	APB		1						
214+991,50	Prostorni signal			1					
215+895,00	Ulazni signal				1				
216+159,50	Cestovni prijelaz	1							
216+632,90	Ukrsnica Dobrinje								1
217+066,80	Cestovni prijelaz	1							
217+271,00	Ulazni signal				1				
217+657,00	Cestovni prijelaz	1							
218+094,00	Prostorni signal			1					

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja									
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U	
218+185,00	APB		1						
218+227,00	Prostorni signal			1					
219+004,50	Stajaliste Buzici								
219+293,50	Cestovni prijelaz	1							
219+992,00	Prostorni signal			1					
220+041,30	APB		1						
220+101,00	Prostorni signal			1					
220+332,10	Cestovni prijelaz	1							
221+011,30	Cestovni prijelaz	1							
222+142,00	Prostorni signal			1					
222+189,60	APB		1						
222+242,00	Prostorni signal			1					
223+246,20	Cestovni prijelaz	1							
223+866,40	Prostorni signal			1					
223+911,80	APB		1						
223+966,00	Prostorni signal			1					
224+965,60	Ulazni signal				1				
225+201,50	Cestovni prijelaz	1							
226+008,20	Kolodvor Visoko						1		
226+306,50	Cestovni prijelaz	1							
226+420,20	Ulazni signal				1				
227+308,00	Prostorni signal			1					
227+375,00	Cestovni prijelaz	1							
227+377,00	APB		1						
227+420,60	Prostorni signal			1					
228+885,00	Cestovni prijelaz	1							
228+952,00	Prostorni signal			1					
229+000,00	APB		1						
229+052,00	Prostorni signal			1					
229+433,00	Cestovni prijelaz	1							
230+920,30	Cestovni prijelaz	1							
232+406,00	Cestovni prijelaz	1							
232+572,70	Pr. Signal 1 i Pr. signal2								
232+716,00	Cestovni prijelaz	1							
233+050,00	Kolodvor Podlugovi						1		
233+648,70	Cestovni prijelaz	1							
234+290,00	Cestovni prijelaz	1							
234+658,00	Prostorni signal			1					
234+708,00	APB		1						
234+758,00	Prostorni signal			1					
234+796,00	Cestovni prijelaz	1							
235+715,00	Cestovni prijelaz	1							
236+063,50	Cestovni prijelaz	1							
236+617,00	Prostorni signal			1					
236+668,00	APB		1						

Izvod iz uzdužnog profila pruge Vrpolje - Sarajevo Iskra Commerce Ljubljana - Biro za automatizaciju željeznica ŽTP Sarajevo Građevinska, signalno-sigurnosna, telegrafsko-telefonska i elektro postrojenja								
Stacionaža (km)	Objekt	CPR	APB	PS	US	K	S	U
236+717,00	Prostorni signal			1				
237+640,50	Cestovni prijelaz	1						
238+366,00	Cestovni prijelaz	1						
238+578,00	Prostorni signal			1				
238+628,00	APB		1					
238+678,00	Prostorni signal			1				
238+951,50	Cestovni prijelaz	1						
239+930,00	Cestovni prijelaz	1						
240+391,00	Prostorni signal			1				
240+487,00	APB		1					
240+583,00	Prostorni signal			1				
241+422,30	Ulazni signal				1			
241+672,00	Cestovni prijelaz	1						
242+356,00	Kolodvor Semizovac					1		
242+940,40	Ulazni signal				1			
244+240,50	Prostorni signal			1				
244+297,00	APB		1					
244+341,60	Prostorni signal			1				
245+931,00	Prostorni signal			1				
245+983,00	APB		1					
246+000,00	Cestovni prijelaz	1						
246+033,00	Prostorni signal			1				
246+836,90	Cestovni prijelaz	1						
247+136,10	Cestovni prijelaz	1						
247+442,90	Prostorni signal			1				
247+487,00	APB		1					
247+543,00	Prostorni signal			1				
248+398,00	Cestovni prijelaz	1						
248+452,75	Ulazni signal				1			
248+703,40	Cestovni prijelaz	1						
249+096,50	Kolodvor Rajlovac					1		
249+882,70	Cestovni prijelaz	1						
250+119,10	Ulazni signal				1			
250+580,30	Cestovni prijelaz	1						
251+058,20	Cestovni prijelaz	1						
252+664,00	Kolodvor A. Most					1		
254+317,50	Cestovni prijelaz	1						
257+085,50	Kolodvor Sarajevo					1		
Ukupno:		185	109	219	55	32	11	4

Legenda:

CPR - Cestovni prijelaz
APB - Razdjelnik APB-a
PS - Prostorni signal
US - Ulazni signal

K - Kolodvor
S - Stajalište
U - Ukrsnica