

SIGURNOST I LOGISTIKA INDUSTRIJSKOG ŽELJEZNIČKOG SAOBRAĆAJA U TEŠKOJ METALURŠKOJ INDUSTRIJI

DOI: 10.70329/2744-2403.2026.6.11.11

Naučni članak

dr.sc. Nermin Palić, dr. sc. Miliša Todorović, MA Asmir Helvida

Sažetak

Industrijski željeznički sustavi u čeličanicama djeluju u izrazito opasnim uvjetima, gdje se mehanički, hemijski i ljudski faktori rizika međusobno preklapaju i djeluju visokim intenzitetom. Ovaj rad predstavlja sveobuhvatnu analizu sigurnosti željezničkog prometa i upravljanja logistikom u željezari ArcelorMittal Zenica, jednom od najznačajnijih metalurških postrojenja na zapadnom Balkanu. Na temelju interne operativne dokumentacije, relevantne znanstvene literature o procjeni rizika te strukturiranog pregleda sigurnosnih protokola, rad analizira internu mrežu pruga dužine 58 km, vozni park specijaliziranih željezničkih vozila, kao i višestanični dispečerski sustav. Ključni rizici identificirani su u četiri područja: sudari tijekom međupogonskog transporta, nepravilnosti pri utovaru vagona, mehanizmi iskliznuća iz tračnica te izloženost radnika profesionalnim štetnostima. Metode procjene rizika, uključujući Fuzzy Analitički hijerarhijski proces (FAHP), Analizu stabla grešaka (FTA) i dinamičke hibridne Bayesove modele, analizirane su s aspekta njihove primjenjivosti u industrijskom okruženju. Rad dodatno razmatra sustave osiguranja vagona, primjenu iskliznica, upravljanje pružnim prijelazima te tehnologije održavanja pruga, uključujući ultrazvučna ispitivanja i mjerenje geometrije kolosijeka. Identificirani su ključni nedostaci u automatizaciji sigurnosnih sustava, te su predložene mjere za digitalizaciju, modernizaciju infrastrukture i implementaciju integriranih sustava upravljanja sigurnošću (SMS). Rezultati rada doprinose širem području istraživanja sigurnosti rada u teškoj industriji i nude primjenjiv analitički okvir za slična metalurška postrojenja.

Ključne riječi: *sigurnost industrijskih željeznica, logistika čeličane, ranžirne operacije, procjena rizika, Bayesove mreže, FAHP, ArcelorMittal Zenica, sigurnost na radu, osiguranje vagona, SMS*

1. Uvod

Veliki metalurški kompleksi predstavljaju jedno od najzahtjevnijih okruženja za internu logistiku i transport. Za razliku od javnih željezničkih mreža, industrijski željeznički sustavi moraju biti kontinuirano integrirani s aktivnim proizvodnim procesima, pri čemu se transportuju sirovine, poluproizvodi i opasne tvari u neposrednoj blizini radnika. Takav sustav nosi specifičan profil rizika: kombinira mehaničke opasnosti tipične za željeznički promet s hemijskim i toplinskim opasnostima karakterističnim za proizvodnju čelika, dodatno usložen organizacijskom kompleksnošću koordinacije između više pogona.

Željezara ArcelorMittal Zenica, smještena u Zeničko-dobojskom kantonu Federacije Bosne i Hercegovine, predstavlja dobar primjer ove kompleksnosti. S internom mrežom pruga dužine 58 km koja je smanjena s gotovo 80 km u periodu maksimalnog kapaciteta, ali i dalje spada među najveće privatne industrijske željezničke sustave u regiji postrojenje upravlja kontinuiranim tokom koksa, rude, tekućeg metala, otpada i kemijskih reagensa. Željeznica u ovom slučaju nije samo logistički alat, već integrirani dio proizvodnog procesa čija pouzdanost i sigurnost direktno utiču na kapacitet proizvodnje i sigurnost radnika.

Interes za sigurnost industrijskih željezničkih sustava značajno je porastao u posljednje dvije decenije, potaknut evidentiranim stopama nezgoda unutar industrijskih pogona, kao i razvojem probabilističkih i hibridnih metoda procjene rizika. Međupogonski transport prepoznat je kao jedan od glavnih uzroka povreda na radu u čeličanama (Wołowczyk i Klimecka-Tatar, 2024), dok je primjena Fuzzy procjene rizika (FRA) i Fuzzy analitičkog hijerarhijskog procesa (FAHP) u manevarskim operacijama već potvrđena (Huang et al., 2007). U novije vrijeme, dinamički hibridni Bayesovi modeli pojavili su se kao efikasni alati za integraciju tehničkih, ljudskih i okolišnih faktora u analizi željezničkih nesreća (IEEE Access, 2022).

Uprkos rastućem broju istraživanja, mali broj studija primjenjuje ove pristupe na konkretna industrijska postrojenja u tranzicijskim ekonomijama, gdje je infrastruktura često zastarjela, a organizacijski resursi ograničeni. Ovaj rad nastoji popuniti tu prazninu kroz detaljnu studiju slučaja ArcelorMittal Zenica, kombinirajući tehničku analizu infrastrukture s pregledom relevantnih metoda procjene i upravljanja rizikom.

2. Infrastruktura i tehničke specifikacije

Interna željeznička mreža u ArcelorMittal Zenica koristi standardni kolosijek (1.435 mm) i organizirana je oko teretne stanice sa 17 odvojenih kolosijeka. Posebno je značajna dvostruka vlasnička struktura ove mreže: kolosijeci od 1 do 9 su u vlasništvu i pod upravljanjem JP Željeznice Federacije BiH i predstavljaju glavni spoj s vanjskim transportnim sistemom. Kolosijeci od 10 do 17 su u privatnom vlasništvu ArcelorMittal Zenica i koriste se isključivo za interne manevre i transport unutar proizvodnje.

Ovakav model podijeljenog vlasništva ima važne implikacije na upravljanje sigurnošću. Nadležnost regulacije, odgovornost za održavanje i operativno upravljanje razlikuju se između ove dvije grupe kolosijeka, što zahtijeva jasno definirane procedure na tačkama preuzimanja i tokom zajedničkih operacija. Koordinacija između javnog željezničkog operatera i privatnog industrijskog operatera predstavlja sistemski rizik koji se mora kontrolirati kroz formalne procedure i zajedničko planiranje sigurnosti.

Ukupna dužina pruga od 58 km, iako smanjena u odnosu na raniji maksimum od oko 80 km, i dalje predstavlja veliku mrežu koja zahtijeva kontinuiran nadzor i održavanje. Gustina kolosijeka i složenost njihovih međusobnih veza stvaraju brojne potencijalne kritične tačke, posebno na raskrsnicama i u blizini proizvodnih hala gdje dolazi do presijecanja željezničkog saobraćaja s kretanjem radnika i vozila.

2.1 Skretnice, prelazi i infrastruktura skretnica

Mreža uključuje 234 željezničke skretnice, koje omogućavaju fleksibilno usmjeravanje vozniha sredstava kroz kompleks bez potrebe za zaustavljanjem i dodatnim manevriranjem lokomotiva (RMK – Zenica, 1970). Ove skretnice predstavljaju kritične infrastrukturne tačke: mehanički kvar ili nepravilno postavljena skrotnica može direktno dovesti do iskliznuća iz tračnica ili sudara. S obzirom na visoku frekvenciju rada i transport teških tereta, uključujući rastopljeni metal i opasne hemikalije, posljedice kvara mogu biti izuzetno ozbiljne.

Održavanje skretnica podrazumijeva redovne kontrole položaja jezika skretnice, mehanizama zaključavanja i funkcionalnosti pogonskog sistema (gdje postoji). Postojeća infrastruktura se uglavnom oslanja na ručno upravljanje skretnicama uz mehaničke brave, što predstavlja veliko opterećenje za manevarsko osoblje koje

mora pravilno postaviti i osigurati skretnicu prije svakog kretanja. Prelazak na centralizirani elektronski sistem osiguranja skretnica, koji je već predviđen planovima modernizacije, značajno bi smanjio zavisnost od ljudskog faktora.

2.2 Vozni park

Specifična priroda logistike u proizvodnji čelika zahtijeva raznovrstan i namjenski projektovan vozni park. Interni vozni park ArcelorMittal Zenica sastoji se od četiri osnovne kategorije vozila (Grupa autora, 2008):

- **Dizel lokomotive:** Četveroosovinske jedinice prilagođene za manevarske operacije. One obezbjeđuju glavnu vučnu silu za kretanje vagona unutar kompleksa, uključujući vuču i guranje teških kompozicija na usponima i krivinama.
- **Teške motorne drezine (TMD):** Vozila za održavanje i inspekciju pruga, ključna za praćenje geometrije kolosijeka i njegovog stanja bez ometanja proizvodnih procesa.
- **Željezničke dizalice:** Specijalizirana vozila za manipulaciju teškim čeličnim elementima, uključujući ingote i valjane proizvode, kao i za interventne operacije u slučaju iskliznuća ili kvara vagona.
- **Teretni vagoni:** Različite vrste specijaliziranih vagona za transport koksa (otvoreni vagoni serije Kai-z), željezne rude, rastopljenog metala (torpedo vagoni) i hemijskih reagensa (cisterni za H_2SO_4 , NaOH, katran).

Pored kretanja pomoću lokomotiva, u određenim dijelovima postrojenja koriste se i specijalizirani uređaji za vuču bez lokomotive, posebno tamo gdje je pristup lokomotivama otežan ili nemoguć. U upotrebi su dvije osnovne jedinice:

Tabela 1. Specijalizovani uređaji za vuču vagona u ArcelorMittal Zenica

Uređaj	Proizvođač / Država porijekla	Kapacitet	Primarna funkcija
PZ 15 DUO	Arow Line, Češka Republika	325 tona	Manevriranje koksare
Vagon Delivery Trolley	Gipro Petrovski, SSSR	800 tona	Viper 1 istovarna stanica

*Izvor: Metalurški institut „Hasan Brkić“ (1985) Tehnološki procesi – Koksara
Željezare Zenica. Zenica.*

3. Operativno upravljanje i dispečiranje

Efikasno upravljanje mrežom ove veličine i složenosti zahtijeva decentraliziranu dispečersku strukturu. ArcelorMittal Zenica koristi tri glavne dispečerske stanice, od kojih je svaka zadužena za određenu proizvodnu zonu:

- **Glavna dispečerska stanica:** Smještena uz teretnu željezničku stanicu, ovaj centar koordinira ukupno kretanje vozničkih sredstava i upravlja vezom s vanjskom nacionalnom željezničkom mrežom. Predstavlja glavni operativni nivo za međupogonski transport.
- **Dispečer čeličane:** Fokusiran na dopremu starog željeza (otpada) i otpremu gotovih čeličnih proizvoda, uz koordinaciju vremenski osjetljivih operacija vezanih za rad elektro-lučnih peći.
- **Dispečer visoke peći:** Upravlja kontinuiranim snabdijevanjem visokih peći željeznom rudom, koksom i krečnjakom, kao i transportom rastopljenog metala u torpedno vagonima što spada među najsigurnosno osjetljivije operacije u cijelom postrojenju.

Decentralizirani model smanjuje kašnjenje u komunikaciji i omogućava brzu reakciju na lokalne operativne potrebe. Međutim, istovremeno stvara izazove u koordinaciji kada se kretanja odvijaju kroz više dispečerskih zona. Procedure primopredaje između stanica moraju biti jasno definirane i dosljedno primijenjene kako bi se spriječila istovremena izdavanja dozvola za kretanje što predstavlja jedan od glavnih uzroka sudara u manevarskim operacijama (Huang et al., 2007).

Plan modernizacije postrojenja prepoznaje uvođenje GPS sistema za praćenje svih vozničkih sredstava u realnom vremenu kao prioritetnu investiciju. Takav sistem bi omogućio glavnoj dispečerskoj stanici jedinstven pregled cijelog sistema, pravovremeno otkrivanje konflikata i dinamičko preusmjerenje vozova funkcije koje trenutno u potpunosti zavise od ljudske komunikacije i proceduralne discipline.

4. Logistika koksare: Fokusirana studija slučaja

Koksara predstavlja najintenzivniji željeznički odjel unutar postrojenja, budući da rukuje velikim količinama koksa, ali i različitim opasnim hemijskim supstancama. Unutrašnja organizacija kolosijeka u ovom odjelu zasniva se na principu funkcionalne podjele, gdje je svaki kolosijek namijenjen određenoj vrsti materijala ili transportnog toka.

Ovakav pristup smanjuje rizik od miješanja nekompatibilnih tereta (npr. hemikalija koje mogu reagovati međusobno), te povećava sigurnost i efikasnost

operacija. Istovremeno, omogućava bolju kontrolu kretanja vagona i jasnije upravljanje logističkim procesima unutar odjela. Drugim riječima, svaki dio sistema ima svoju tačno definisanu ulogu, čime se smanjuje mogućnost greške, sudara ili kontaminacije materijala.

Tabela 2. Zadaci pruge u koksarini

Pruga	Primarna funkcija	Posebna zaštita
K3	Hemijsko rasterećenje (NaOH, naftalen, ulje za pranje)	Isključivač + blokada prekidača
K7 / K8	Utovar katrana i istovar H ₂ SO ₄	Isključivač + blokada prekidača
K1B / K1C	Istovar koksnog uglja (stanica Viper1)	Daljinski upravljani izvlakač + audio-vizualni signali

Izvor: Autori

Upotreba iskliznica (derailera) na mjestima gdje se rukuje hemikalijama predstavlja dobar primjer višeslojne sigurnosne zaštite (tzv. *defense-in-depth* pristup). Čak i u slučaju da zakažu proceduralne mjere i vagon počne nekontrolisano kretanje, iskliznica sprječava da on uđe u zaštićenu zonu.

Ova mehanička zaštita „posljednje linije odbrane“ posebno je važna zbog mogućih posljedica, jer bi sudar odbjeglog vagona s instalacijama koje sadrže sumpornu kiselinu ili natrijev hidroksid mogao izazvati ozbiljne nesreće, uključujući hemijske havarije i ugrožavanje sigurnosti radnika i postrojenja.

4.1 Protokoli za utovar koksa

Dnevna logistika transporta koksa zahtijeva formaliziran proces narudžbe. Uobičajeno se dnevno angažuje oko 10 otvorenih vagona tipa Kai-z za transport većih količina koksa. Proces započinje službenim zahtjevom koji operater bunkera i utovara koksa upućuje šefu smjene saobraćajnog odjela, pri čemu se precizno definišu tip i broj vagona, zahtjevi za tariranjem i vaganjem, kao i specifični uslovi vezani za teret. Procedure utovara uključuju nekoliko ključnih ograničenja s ciljem sprječavanja pomjeranja tereta i preopterećenja vagona. Koks mora biti ravnomjerno raspoređen po cijeloj dužini i širini vagona kako bi se osiguralo jednako opterećenje osovine. Visina utovarenog materijala ne smije prelaziti 50 cm iznad visine bočnih stranica vagona.

Posebna pažnja potrebna je prilikom utovara u vagone koji pripadaju državnim željeznicama. Takvi vagoni se često konstrukcijski razlikuju od internih, a nerijetko imaju i drvene podove, što značajno povećava rizik od požara, naročito ako se utovara vruć ili nedovoljno ohlađen koks. Zahtjev da se koks prethodno ohladi na prihvatljivu temperaturu prije vanjskog transporta pokazuje razumijevanje složenijih i manje kontrolisanih uslova javnog željezničkog saobraćaja. Iako su interni transportni putevi kraći i pod većom kontrolom, isti sigurnosni standard bi se trebao dosljedno primjenjivati zbog prisutnog rizika od požara.

4.2 Pružni prelazi u koksarini

Odjel koksare sadrži ukupno pet željezničko-cestovnih prijelaza (putnih prelaza), što je najveći broj u okviru jednog odjela unutar postrojenja. Nijedan od ovih prelaza nije opremljen automatskim rampama. Upravljanje sigurnošću zasniva se na kombinaciji svjetlosne i zvučne signalizacije (posebno u zoni separacije koksa, gdje rade daljinski upravljani uređaji za vuču) te na ručnom osiguravanju od strane manevrskog osoblja. Željeznička vozila imaju apsolutni prioritet prolaza na svim prelazima, u skladu s važećim zakonima o željezničkom i cestovnom saobraćaju.

Odsustvo automatskih rampi na četiri od pet prelaza predstavlja značajan preostali rizik. Oslanjanje na ručno osiguranje znači da sigurnost prelaza zavisi od stalnog prisustva i pažnje obučenog manevrskog radnika, što uvodi faktor ljudske greške kao ključnu slabost sistema. Takav oslonac na ljudski faktor je inherentno manje pouzdan u odnosu na tehnički automatizovane sigurnosne sisteme. Ovo je posebno problematično s obzirom na visoku frekvenciju kretanja vagona u koksari, kao i istovremeni cestovni saobraćaj koji opslužuje postrojenje, što dodatno povećava ukupni nivo operativnog rizika.

5. Metodologije procjene rizika

Tradicionalni deterministički pristupi procjeni rizika kao što su stabla događaja (event trees), stabla grešaka (fault trees) i metode zasnovane na kontrolnim listama dobro su etablirani u industrijskom upravljanju sigurnošću. Međutim, oni imaju fundamentalna ograničenja u kompleksnim i podatkovno siromašnim okruženjima, kakvi su interni željeznički sistemi u okviru industrijskih postrojenja.

Stope nesreća za specifične manevriske (shunting) scenarije često su preniske da bi omogućile statistički pouzdane procjene učestalosti. Ljudski i organizacijski

faktori teško se precizno kvantificiraju, dok međuzavisnosti između tehničkih kvarova, ljudskih grešaka i okolišnih uslova stvaraju nelinearne uzročne lance koji se ne mogu jednostavno razložiti klasičnim modelima (Imamović, Kablar, Oruč, 2024).

Kao odgovor na ova ograničenja, savremena literatura o procjeni rizika sve više se okreće hibridnim metodama koje kombinuju strukturiranu logiku stabala grešaka i stabala događaja s mogućnostima upravljanja neizvjesnošću kroz teoriju fuzzy skupova i Bayesovu inferenciju. Ovi pristupi omogućavaju bolju obradu nepreciznih i nepotpunih podataka, kao i integraciju različitih tipova rizika. Takve metode su već primjenjivane u kontekstu željezničkog saobraćaja i manevrisanja, te se smatraju posebno pogodnim za operativno okruženje poput ArcelorMittal Zenica, gdje su prisutni složeni tehnički sistemi, ljudski faktor i promjenjivi radni uslovi.

5.1 Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)

FAHP pristup, primijenjen u analizi rizika manevrisanja na Waterloo Depot-u, predstavlja zrelu metodologiju za operacionalizaciju stručne procjene u procjeni rizika. Lingvističke varijable poput „vrlo visok“, „visok“, „umjeren“, „nizak“ i „vrlo nizak“ mapiraju se na fuzzy funkcije pripadnosti, što omogućava da se kvalitativne procjene matematički kombinuju bez stvaranja lažne preciznosti u uslovima inherentne neizvjesnosti (Huang et al., 2007).

Proces uključuje dekompoziciju ukupnog rizika u hijerarhiju faktora koji doprinose riziku (stanje opreme, ljudska greška, okolišni uslovi, upravljački sistemi), zatim prikupljanje poređenja u parovima od strane stručnjaka, te izračunavanje težinskih koeficijenata koji odražavaju relativni značaj svakog faktora. Rezultat je rang prioriteta rizika koji se može direktno koristiti za planiranje i alokaciju resursa za sigurnosne mjere (Garaplija, 2024).

Za ArcelorMittal Zenica, FAHP studija bi logično identifikovala operacije utovara i istovara vagona, upravljanje putnim prelazima i transport tečnog metala kao scenarije sa najvišim prioritetom rizika. Proces prikupljanja stručnih procjena treba da uključi iskustvo maneverskog osoblja, rukovodilaca saobraćajnog odjela i inženjera zaštite na radu koji imaju direktno operativno znanje o postrojenju.

5.2 Mapiranje stabla kvarova u Bayesovu mrežu

Predložena metoda procjene sigurnosnog rizika za utovar željezničkih vagona zasnovana na kategorijskoj klasifikaciji kombinuje SHEL model (Software, Hardware, Environment, Liveware) za razvrstavanje faktora koji utiču na

sigurnost sa fuzzy stablom grešaka koje se zatim konvertuje u Bayesovu mrežu za probabilističko zaključivanje (Fei et al., 2023). Ovakav hibridni pristup je direktno primjenjiv na procese utovara koksa i rukovanja hemijskim vagonima u koksari.

Glavna prednost reprezentacije pomoću Bayesove mreže jeste mogućnost ažuriranja procjena vjerovatnoće u skladu s novim informacijama. Ako se, na primjer, tokom inspekcije utvrdi pogoršano stanje mehanizma za zaključavanje vrata vagona, mreža automatski propagira tu informaciju i ažurira vjerovatnoću pojave incidenta otvaranja vrata tokom transporta. Ova dinamička sposobnost predstavlja ključnu razliku u odnosu na statička stabla grešaka, jer omogućava kontinuirano prilagođavanje procjene rizika stvarnim operativnim uslovima, umjesto oslanjanja na unaprijed definisane i nepromjenjive pretpostavke.

5.3 Dinamički hibridni modeli rizika

Najsofisticiraniji metodološki pristup identificiran u literaturi je dinamički hibridni model opisan za procjenu rizika iskakanja vozova iz šina (IEEE Access, 2022). Ovaj okvir objedinjuje distribucije učestalosti i težine posljedica kroz tehničke, ljudske i okolišne faktore rizika, primjenjuje Bayesovu metodu maksimalne vjerovatnoće putem Expectation-Maximization (EM) algoritma za procjenu parametara modela na osnovu dostupnih podataka, te provodi analizu osjetljivosti kako bi se identifikovali faktori koji imaju najveći utjecaj na ukupni rizik. Rezultati analize osjetljivosti u okviru ovakvog modela imaju direktnu praktičnu vrijednost: oni omogućavaju menadžerima rizika da utvrde koje mjere ublažavanja rizika donose najveće smanjenje očekivanih posljedica. Za postrojenja koja rade s ograničenim budžetima za održavanje, ova sposobnost prioritizacije predstavlja ključni alat za donošenje odluka i optimalnu raspodjelu resursa.

Tabela 3. Poređenje metodologija procjene rizika za kontekste industrijskih željeznica

Metoda	Rukovanje nesigurnošću	Zahtjevi za podatke	Izlaz	Primjenjivost
Fault Tree Analysis (FTA)	Limitirana	Umjereno	Minimalni setovi rezanja	Akcidentna razgradnja
Event Tree Analysis (ETA)	Limitirana	Umjereno	Vjerovatnoće ishoda	Modeliranje posljedica

FAHP / FRA	Visoko (fuzzy)	Nisko (stručna procjena)	Rangiranje prioriteta rizika	Alokacija resursa
FTA + Bayesian Network	Visoko (vjerovatno)	Umjereno	Ažurirane vjerovatnoće	Dinamičko praćenje rizika
Dynamic Hybrid Model	Vrlo visoko	Nisko-umjereno	Rangiranje osjetljivosti	Strateško planiranje

Izvor: Autori na osnovu IEEE Access, 2022

6. Sigurnosni protokoli i sistemi za osiguranje vagona

Teorijska osnova upravljanja sigurnošću u industrijskom željezničkom saobraćaju je Sistem upravljanja sigurnošću (Safety Management System - SMS), koji predstavlja sistematski okvir koji integriše sigurnost na svim operativnim nivoima, od projektovanja i nabavke opreme, preko operacija i održavanja, pa sve do upravljanja izvođačima i eksternim saradnicima. Prethodna istraživanja koja analiziraju strukturalne zahtjeve i izazove implementacije SMS-a u poljskom željezničkom sektoru pružaju uvide koji su direktno primjenjivi i na kontekst industrijskih željeznica u Bosni i Hercegovini (Antolak et al., 2020).

Efikan SMS za ArcelorMittal Zenica podrazumijevao bi uspostavljanje jasnih politika i ciljeva sigurnosti, definisanje odgovornosti i nadležnosti na svim organizacionim nivoima, te implementaciju sistematskih procesa identifikacije opasnosti i procjene rizika. Također bi uključivao obaveznu obuku i provjeru kompetencija svih zaposlenih uključenih u željezničke operacije, kao i razvijen sistem prijavljivanja i istrage incidenata koji omogućava povratne informacije u proces procjene rizika i kontinuirano unapređenje procedura.

6.1 Osiguranje vagona od samopokretanja

Jedan od najkritičnijih operativnih sigurnosnih zahtjeva u manevrskim (shunting) okruženjima je sprječavanje samopokretanja vagona, odnosno neželjenog kretanja stacioniranog vagona pod uticajem gravitacije. U ArcelorMittal Zenica ovaj rizik se kontroliše isključivo upotrebom ručnih kočionih papuča (stop šina), koje se postavljaju na gornju površinu šine ispod točkova zaustavljenih vagona.

Sistem kočionih papuča je mehanički jednostavan i pouzdan kada se pravilno primijeni. Međutim, njegova efikasnost u potpunosti zavisi od dosljedne ljudske primjene: papuče moraju biti ispravno postavljene, mora se koristiti odgovarajući broj u odnosu na nagib i masu vagona, te ne smiju biti uklonjene bez odobrenja. Zaposlenik zadužen za utovar/istovar ima odgovornost da provjeri ispravnost

osiguranja nakon što manevarski sastav napusti lokaciju i prije početka operacija utovara, što predstavlja jasno definisanu i pozitivnu raspodjelu odgovornosti u okviru procedure.

Kočione papuče su eksplicitno jedini dozvoljeni način osiguranja vagona. Korištenje kranova, viljuškara ili ručnog guranja za pomjeranje vagona strogo je zabranjeno, kao i neovlašteno uklanjanje papuča ili neautorizovana manipulacija skretnicama ili iskliznicama. Ove zabrane adresiraju čestu kategoriju nesreća na radu, gdje improvizovano pomjeranje vagona često pod pritiskom vremena dovodi do nekontrolisanog kretanja ili sudara.

6.2 Sistem mjenjača brzina

Za manipulativne zone (područja gdje se vrši utovar i istovar) osigurava se viši nivo zaštite od nekontrolisanog ulaska vagona upotrebom iskliznica (derailera). Iskliznica je mehanički uređaj postavljen na kolosijek koji, kada je aktiviran, skreće vagon sa šine prije nego što može ući u zaštićenu zonu. Uređaj se sastoji od baze, signalne ploče i ploče sa zakošenim rebrom koja se nalazi na površini šine i usmjerava točak nadolazećeg vagona van kolosijeka.

Ključni operativni zahtjevi za iskliznice uključuju: postavljanje najmanje 20 metara od objekta koji se štiti; zaključavanje pomoću sistema ključa gdje je svaki ključ pojedinačno numerisan i kontrolisan; godišnje sveobuhvatno čišćenje, podmazivanje i inspekciju; te redovne provjere funkcije brave, pokretljivosti ploče, vidljivosti signalne ploče i integriteta pričvrstnih elemenata. Sistem kontrole ključem osigurava da pristup lokomotive zaštićenoj zoni može biti omogućen samo uz eksplicitno odobrenje odgovornog zaposlenika iz nadležnog odjela.

Sistem iskliznica na kolosijecima K7/K8 u koksari (rukovanje sumpornom kiselinom i katranom) predstavlja posebno dobro implementiran primjer principa višeslojne sigurnosne zaštite, s obzirom na potencijal za katastrofalno ispuštanje hemikalija u slučaju sudara.

6.3 Zaključavanje prekidača

Brave za skretnice (switch locks) predstavljaju komplementarni nivo zaštite koji osigurava da se ručno upravljane skretnice ne mogu pomjeriti iz odobrenog položaja tokom osjetljivih operacija. U upotrebi su dva tipa brava: Robel brava i Gac brava. Oba sistema funkcionišu na principu sprječavanja razdvajanja jezika

skretnice od oslonca šine preko definisane maksimalne vrijednosti (1,5 mm u testnim uslovima za zaključani položaj).

Godišnje rastavljanje, čišćenje, podmazivanje i zamjena komponenti po potrebi su obavezni za brave skretnica, što predstavlja standard održavanja koji odražava njihovu sigurnosno-kritičnu ulogu u sistemu. Zahtjev da jedan ključ može otvarati samo jednu bravu, te da su ključevi jasno označeni brojem odgovarajuće brave, uspostavlja jasan revizijski trag i sprječava neovlašteno dijeljenje ključeva. Ovaj sistem kontrole direktno doprinosi smanjenju rizika od neovlaštenih intervencija u radu skretnica.

6.4 Procedure zatvaranja pruge

Kada je zbog održavanja ili drugih radova potrebno isključiti određeni dio kolosijeka iz saobraćaja, primjenjuje se formalna procedura zatvaranja kolosijeka. Saobraćajni odjel (Traffic Department) na zahtjev za zatvaranje reaguje na način da zaključava ili fizički osigurava skretnicu (spiking) u položaj koji ne vodi prema zatvorenom dijelu kolosijeka, postavlja crveni signalni disk na desnu stranu kolosijeka, te u slučaju da je zatvoren samo dio kolosijeka dok je ostatak i dalje u funkciji postavlja zaštitne pragove ili druge odobrene zaštitne uređaje na granici zatvorene zone.

Odjel koji je podnio zahtjev odgovoran je za obilježavanje radilišta u skladu s propisima zaštite na radu, kao i za postavljanje i zaključavanje iskliznice (derailera) u položaj zabrane kretanja na zatvorenom dijelu kolosijeka. Odgovornost za ugradnju i uklanjanje zaštitnih mjera jasno je raspodijeljena po odjelima, što uspostavlja preciznu liniju odgovornosti, ali istovremeno zahtijeva visok nivo koordinacije kada više odjela istovremeno ima zahtjeve za zatvaranje kolosijeka.

7. Tehnologije održavanja i inspekcija infrastrukture

Geometrija kolosijeka predstavlja primarni faktor sigurnog odvijanja željezničkog saobraćaja. Odstupanja od projektovane geometrije uključujući proširenje kolosijeka (gauge widening), greške u poprečnom nivou (cross-level), nepravilnosti u pravcu (alignment) i defekte uzdužnog profila povećavaju rizik od iskakanja iz šina i ubrzavaju trošenje šina i željezničkih vozila. Savremena vozila za mjerenje geometrije kolosijeka omogućavaju kontinuirano, objektivno i ponovljivo mjerenje svih ključnih parametara geometrije pri operativnim brzinama, čime se omogućava održavanje zasnovano na stanju (condition-based maintenance), umjesto isključivo na vremenskim intervalima inspekcije.

Za mrežu ArcelorMittal Zenica, koja sadrži 234 skretnice i složenu konfiguraciju kolosijeka, redovno mjerenje geometrije je posebno važno na lokacijama skretnica, gdje su zahtjevi geometrijske preciznosti najstroži, a posljedice odstupanja najteže. Podaci dobijeni mjerenjem geometrije također omogućavaju analizu trendova, odnosno identifikaciju dionica na kojima se degradacija ubrzava, što omogućava proaktivno održavanje prije nego što se dostignu sigurnosni pragovi (RMK – Zenica, 1970).

7.1 Ultrazvučna inspekcija šina

Unutrašnji defekti šina, posebno poprečne zamorne pukotine na zavarenim spojevima i u glavi šine, predstavljaju ozbiljan sigurnosni rizik jer nisu vidljivi kroz površinsku inspekciju, ali mogu dovesti do iznenadnog loma šine pod opterećenjem. Ultrazvučno ispitivanje (ultrazvučno testiranje) pomoću mjernih vozila opremljenih ultrazvučnim sondama omogućava detekciju ovih unutrašnjih defekata analizom refleksije visokofrekventnih zvučnih talasa koji se šalju kroz materijal šine.

U teškom industrijskom okruženju poput ArcelorMittal Zenica, gdje su osovinska opterećenja visoka, a šine izložene i udarnim opterećenjima te termičkim ciklusima zbog blizine visokotemperaturnih procesa u postrojenju, rizik od razvoja zamornih pukotina je veći nego u klasičnim prugama za putnički saobraćaj. Redovne ultrazvučne inspekcije, čiji su rezultati odmah dostupni kroz onboard analitički sistem mjernog vozila, omogućavaju ciljanu zamjenu ili popravku šina prije nego što defekti dostignu kritičnu veličinu. Inspekcija zavarenih spojeva je posebno važna s obzirom na to da mreža od 58 km sadrži veliki broj zavora, pri čemu svaki od njih predstavlja potencijalnu tačku nastanka pukotina. Industrijska praksa preporučuje ultrazvučno ispitivanje svih zavora odmah nakon ugradnje, kao i u redovnim periodičnim intervalima tokom eksploatacije.

7.2 Mjerenje valovitosti šina

Valovitost tračnica (periodične, kratkovalne neravnine na voznoj površini šine) predstavlja čest problem u željezničkom saobraćaju koji uzrokuje povećane dinamičke sile između vozila i kolosijeka. To dovodi do ubrzanog trošenja, kao i povećane buke i vibracija. U industrijskom okruženju, ovakav tip oštećenja posebno se javlja na krivinama i na ulazima u skretnice, zbog vučnih i kočnih sila koje razvijaju teško opterećene lokomotive.

Draisine za mjerenje valovitosti omogućavaju kvantitativno praćenje amplitude i talasne dužine neravnina na šini, čime se omogućava pravovremeno planiranje brušenja šina kako bi se obnovila glatka vozna površina. Ako se valovitost ne otkloni na vrijeme, dolazi do negativnog povratnog efekta: dinamičke sile sa neravne šine ubrzavaju degradaciju geometrije kolosijeka, što dalje povećava dinamička opterećenja i ubrzava pogoršanje stanja pruge.

7.3 Preporučeni okvir za održavanje

Na osnovu dostupnih dokaza i literature o najboljoj praksi, za mrežu ArcelorMittal Zenica preporučuje se sljedeći okvir održavanja:

Tabela 4. Preporučeni raspored inspekcije održavanja pruge

Vrsta inspekcije	Način	Učestalost	Prioritetne oblasti
Visual walking inspection	On-foot patrol	Weekly	Switches, level crossings, joints
Track geometry measurement	Geometry measurement car	Quarterly	All main lines and sidings
Ultrasonic rail inspection	Ultrasonic measurement car	Semi-annually	Welds, curves, high-load sections
Rail corrugation survey	Corrugation draisine	Annually	Curves, switch entries
Switch comprehensive inspection	Manual + instrument	Annually	All 234 switch locations
Derailer and lock inspection	Manual inspection checklist	Annually	All derailer locations

Izvor: (Helvida, A., 2018)

8. Ljudski faktori i zdravlje na radu

SHEL model (Software, Hardware, Environment, Liveware) predstavlja strukturiran okvir za klasifikaciju ljudskih i organizacijskih faktora koji doprinose nastanku incidenata u složenim operativnim sistemima. Kada se primijeni na utovar i rukovanje željezničkim vagonima, ovaj model identifikira četiri glavne kategorije utjecajnih faktora (Fei et al., 2023):

- **Software (proceduralni faktori):** Obuhvata procedure, pravila, materijale za obuku i operativne protokole. Loše dizajnirane procedure, teško dostupna dokumentacija ili nedovoljna obuka povećavaju vjerovatnoću ljudske greške.

- **Hardware (tehnički faktori):** Odnosi se na dizajn opreme, ergonomiju i fizičko stanje sredstava. Loše konstruisani mehanizmi vrata vagona, nepristupačna mjesta za odlaganje stop-papuča ili neispravne brave na iskliznicama stvaraju uslove za pogrešne radnje.
- **Environment (okolišni faktori):** Uključuje fizičke uslove rada kao što su buka, osvjjetljenje, temperatura, vibracije i vremenski uvjeti. Mašinovođe i manevarsko osoblje u industrijskom okruženju često su izloženi više stresnih faktora istovremeno.
- **Liveware (ljudski faktor):** Obuhvata individualne karakteristike ljudi kao što su umor, nivo vještina, način komunikacije i situacijska svjesnost. Rad u smjenama i produženo radno vrijeme posebno su važni faktori u kontinuiranim proizvodnim procesima.

8.1 Medicina rada lokomotivskih posada i manevarskog osoblja

Utjecaj rada na željeznici u industrijskom okruženju na zdravlje radnika dobro je dokumentiran. Mašinovođe i željezničke posade imaju nepovoljniji profil profesionalne izloženosti u odnosu na druge radnike u postrojenju (Wołowczyk i Klimecka-Tatar, 2024).

Glavne kategorije izloženosti uključuju:

- **Buka:** Dolazi od motora lokomotiva, kontakta kotača i šine te industrijske opreme. Kod mašinovođa je zabilježen povećan rizik od **senzoneuralnog gubitka sluha**.
- **Pare i procesni plinovi:** Predstavljaju drugi važan faktor izloženosti i mogu negativno utjecati na respiratorno zdravlje radnika.
- **Toplotni uvjeti rada:** Rad u blizini koksnih baterija, visokih peći i zona manipulacije vrućim metalom stvara dodatni fiziološki stres, koji utiče na koncentraciju i ubrzava zamor.

Veća stopa obolijevanja kod mašinovođa u odnosu na ostale radnike ukazuje na to da postojeće mjere zaštite (lična zaštitna oprema, programi zaštite sluha i zdravstveni nadzor) vjerovatno nisu dovoljno efikasne. Zbog toga je potrebno provesti sistematsko istraživanje radne higijene za mašinovođe i manevarsko osoblje, uključujući precizna mjerenja buke i hemijske izloženosti. Takav pristup bi omogućio donošenje konkretnih i ciljnih mjera za unapređenje zaštite zdravlja radnika.

8.2 Zahtjevi za obuku i kompetencije

Operativna dokumentacija kompanije ArcelorMittal Zenica propisuje različite zahtjeve za obuku u zavisnosti od vrste upravljanja lokomotivama konvencionalnog i daljinski upravljane. Za **konvencionalne operacije**, programi obuke moraju obuhvatiti svo osoblje koje učestvuje ili može biti uključeno u kretanje lokomotiva, uključujući i radnike na terenu. Za **daljinski upravljane operacije** koje se koriste kod sistema poput PZ 15 DUO i kolica Viper 1 obuka mora posebno obuhvatiti procedure upravljanja kretanjem, praćenje vagona i sigurno zaustavljanje. Pored početne certifikacije, izuzetno je važno kontinuirano održavanje kompetencija kroz:

- periodične provjere znanja i vještina
- učešće u analizama incidenata
- programe posmatranja sigurnosti na radu

Istraživanja u oblasti ljudskih faktora u željezničkom saobraćaju pokazuju da se vještine za rijetke, ali visokorizične situacije (npr. reakcija na nekontrolisano kretanje vagona) ne mogu održavati samo kroz svakodnevno iskustvo, već zahtijevaju plansku i ciljanu obuku. Posebno je važno naglasiti značaj **međusektorske komunikacije**. Mnogi sigurnosno kritični procesi u sistemu ArcelorMittal Zenica između saobraćajnog odjela i proizvodnje, između dispečerskih centara, te između manevarskog osoblja i radnika na utovaru/istovaru zavise od jasne i precizne komunikacije. Uvođenje standardiziranih komunikacijskih fraza, obavezne potvrde prijema informacija (readback) i vođenja evidencije komunikacije značajno bi smanjilo rizik od nesporazuma i povećalo ukupnu sigurnost sistema.

8.3 Ergonomija i radni uslovi

Ergonomski aspekti rada manevarskog osoblja uključuju fizičke zahtjeve kao što su ručno postavljanje i uklanjanje stop-papuča, penjanje na vagone i silaženje s njih (uz obavezno održavanje tri tačke oslonca), kao i napor potreban za ručno upravljanje skretnicama. Ovi zadaci zahtijevaju pravilnu tehniku rada kako bi se smanjio rizik od povreda. Kod mašinovođa, ergonomija kabine ima važnu ulogu. Faktori poput preglednosti, dostupnosti komandi i dizajna sjedišta utiču ne samo na udobnost, već i na sposobnost pravovremenog uočavanja i reagovanja na potencijalne opasnosti. Organizacija smjena i upravljanje umorom predstavljaju važan sistemski izazov u području ljudskih faktora. Kontinuirani proizvodni proces u ArcelorMittal Zenica zahtijeva rad željeznice 24 sata dnevno, što povećava rizik od poremećaja biološkog ritma i nakupljanja umora.

Preporuke iz industrijske prakse uključuju:

- planiranje smjena tako da se smanji rad u ranim jutarnjim satima (otprilike od 02:00 do 06:00), kada su kognitivne sposobnosti najniže
- uvođenje sistema za upravljanje umorom koji prati ukupno radno vrijeme i osigurava sigurnosne rezerve za izvođenje sigurnosno kritičnih zadataka

Ove mjere doprinose povećanju sigurnosti i smanjenju rizika od grešaka uzrokovanih umorom.

9. Mogućnosti digitalizacije i modernizacije

Zaključci željezničkog sistema ArcelorMittal Zenica identificiraju tri ključna područja za ulaganje: GPS praćenje voznih sredstava u realnom vremenu, centralizirano elektronsko upravljanje skretnicama (interlocking) te automatizirane rampe i senzore na putnim prelazima. Svako od ovih rješenja predstavlja prelazak sa oslanjanja na ljudski faktor i proceduralnu disciplinu na tehnički kontrolisane sisteme — što je osnovni princip hijerarhije sigurnosti.

GPS praćenje svih lokomotiva i opremljenih vagona omogućilo bi dispečerima potpun uvid u stanje na mreži u realnom vremenu. Time bi se omogućilo:

- otkrivanje konflikata prije odobravanja kretanja
- optimizacija korištenja lokomotiva
- prikupljanje podataka za analizu incidenata

Savremeni industrijski IoT sistemi omogućavaju vrlo visoku preciznost pozicioniranja (čak ispod jednog metra) uz dovoljno brza ažuriranja za operativnu primjenu.

Elektronski interlocking sistem eliminirao bi potrebu za ručnim zaključavanjem skretnica. Centralizirani sistem, pravilno konfiguriran prema dozvoljenim rutama, fizički onemogućava postavljanje konfliktnih pravaca kretanja. Time se postiže nivo sigurnosti koji nije moguće ostvariti isključivo proceduralnim mjerama. Iako su ulaganja značajna, ona su opravdana zbog visoke kritičnosti skretnica u ovakvom industrijskom okruženju.

Automatizirani putni prelazi sa rampama i senzorima, posebno u pogonu Koksare gdje postoji više prelaza, predstavljaju direktno rješenje za jasno identificiran sigurnosni rizik. Dostupne su različite tehnologije:

- klasične rampe sa detekcijom voza
- sistemi sa radarima i svjetlosnom signalizacijom

Izbor tehnologije treba zavisiti od intenziteta saobraćaja, preglednosti i brzine prilaza.

Pored ovih kratkoročnih mjera, dugoročne mogućnosti digitalizacije uključuju:

- **prediktivno održavanje** putem kontinuiranog nadzora stanja lokomotiva i interakcije voz–pruga
- **digitalne sisteme upravljanja vagonima** sa praćenjem lokacije i tereta u realnom vremenu
- **integrirane sigurnosne nadzorne ploče (dashboarde)** koje objedinjuju podatke o rizicima, inspekcijama i incidentima za potrebe upravljanja

Ovakav pristup omogućava prelazak na proaktivan model upravljanja sigurnošću, gdje se problemi prepoznaju i rješavaju prije nego što dovedu do incidenata.

10. Zaključci i preporuke

Industrijski željeznički sistemi u čeličanama predstavljaju koncentrirano i zahtjevno okruženje visokog rizika koje zahtijeva sistematsko i na dokazima zasnovano upravljanje sigurnošću. Postrojenje ArcelorMittal Zenica, sa svojih 58 km interne mreže, 234 skretnice, raznolikim voznim parkom i složenom hemijskom logistikom, jasno pokazuje i visok nivo operativne razvijenosti, ali i razlike između trenutne prakse i standarda najbolje prakse.

Iz ove analize proizlaze sljedeći zaključci:

- Dvostruka vlasnička struktura kolosijeka (javna željeznica / privatni industrijski sistem) stvara institucionalne i operativne međutačke koje zahtijevaju jasno definirane protokole koordinacije kako bi se izbjegli sigurnosni propusti.
- Funkcionalna podjela kolosijeka u Koksari i upotreba iskliznica predstavljaju dobar primjer višeslojne zaštite (defense-in-depth), koji bi trebalo sistemski primijeniti i na ostale visokorizične zone utovara.
- Hibridne i fuzzy metode procjene rizika — posebno FAHP i Bayesove mreže — vrlo su pogodne za industrijsko okruženje sa ograničenim podacima, ali bogatim ekspertskim znanjem, te ih treba koristiti za sistemsko određivanje prioriteta rizika.
- Isključivo oslanjanje na stop-papuču za osiguranje vagona i na ljudski faktor za sigurnost putnih prelaza stvara preveliku zavisnost od proceduralne discipline bez adekvatne tehničke podrške.

- Mašinovođe i manevarsko osoblje izloženi su povećanim zdravstvenim rizicima (buka, hemijski i toplotni utjecaji), koji nisu dovoljno analizirani niti adekvatno kontrolisani.
- Plan modernizacije postrojenja (GPS praćenje, elektronski interlocking, automatizirani prelazi) dobro je usklađen sa sigurnosnim prioritetima i treba ga implementirati bez odlaganja.

Preporuke (po prioritetima):

1. **Provesti FAHP analizu rizika** u roku od 12 mjeseci za sve operativne scenarije, uz uključivanje iskusnog manevarskog osoblja, dispečera i inženjera zaštite na radu.
2. **Uvesti GPS praćenje u realnom vremenu** kao kratkoročnu mjeru, prvo za lokomotive, a zatim i za visokorizične vagone (tečni metal, hemikalije).
3. **Instalirati automatizirane rampe sa detekcijom voza** na svih pet putnih prelaza u Koksari kao minimalni sigurnosni standard.
4. **Provesti kvantitativno ispitivanje radne higijene** za mašinovođe i manevarsko osoblje (buka, hemijska izloženost) i na osnovu rezultata uvesti ciljane mjere zaštite.
5. **Razviti fazni plan za elektronski interlocking**, počevši od najopterećenijih skretnica i zona rukovanja hemikalijama.
6. **Uspostaviti integrirani sistem upravljanja sigurnošću (SMS)** koji obuhvata sve sektore, sa jasnim ciljevima, koordinacijom i sistemom prijave i analize incidenata.
7. **Standardizirati komunikaciju** kroz definirane fraze, obaveznu potvrdu prijema informacija (readback) i evidenciju komunikacije u svim sigurnosno kritičnim situacijama.

Transformacija sistema sigurnosti željezničkog saobraćaja u ArcelorMittal Zenica — iz modela zasnovanog na procedurama i disciplini prema modelu koji se temelji na podacima, sistemima i tehničkim rješenjima — nije samo tehnički ostvariva, već i operativno nužna. Iako zahtijeva značajna ulaganja, ona su u potpunosti opravdana s obzirom na nivo rizika i strateški značaj ovog industrijskog postrojenja u regionu Zapadnog Balkana.

LITERATURA

1. Antolak, M., Niedzielski, P. and Ziolo, M. (2020) Wybrane aspekty funkcjonowania Systemu Zarządzania Bezpieczeństwem na kolei (SMS) w Polsce, vol. 392, pp. 125–138.
2. Chen, Y. (2013) Improving railway safety risk assessment study, July.
3. Fei, Y., Liu, Q., Zhang, T., Sun, W. and Yue, G. (2023) ‘A category classification based safety risk assessment method for railway wagon loading status’, *Tehnički vjesnik – Technical Gazette*, December. doi: 10.17559/tv-20230412000525.
4. Garaplija, E. (2024). “3D model logičke integracije metafizike i upravljanja rizicima od katastrofa“, časopis „*Zaštita i sigurnost*“, www.zisjournal.com
5. Group of Authors (1970) Regulation on the Maintenance of Industrial Tracks with a Gauge of 1435 mm. Zenica: RMK Zenica.
6. Group of Authors (2008) Occupational Safety. Zenica: ArcelorMittal.
7. Helvida, A. (2018) Sigurnost i zaštita prilikom transporta koksa u kompaniji „Arcelormittal“ Zenica. Kiseljak.
8. Huang, S., An, M., Chen, Y. and Baker, C. (2007) ‘Railway safety risk assessment using FRA and FAHP approaches – A case study on risk analysis of shunting at Waterloo Depot’, pp. 181–186. doi: 10.1049/CP:20070461.
9. IEEE Access (2022) ‘Dynamic hybrid model for comprehensive risk assessment: a case study of train derailment due to coupler failure’, *IEEE Access*, 10, pp. 24587–24600. doi: 10.1109/access.2022.3155494.
10. Imamović, A., Kablar, O., Oruč, M. (2024). “Zahtjevi za bezbjedan rad pri korištenju viljuškara“, časopis „*Zaštita i sigurnost*“, www.zisjournal.com
11. Metalurgical Institute “Hasan Brkić” (1985) Technological Processes – Coke Plant of the Zenica Steelworks. Zenica.
12. Muller, N.V. and Mladova, T.A. (2021) ‘The assessment of the risk of occupational injuries of workers on the railway’. doi: 10.46548/21vek-2021-1056-0036.
13. Wołowczyk, J. and Klimecka-Tatar, D. (2024) ‘Occupational safety management in steel mills due to inter-branch transport’, *System Safety*, 6(1), pp. 485–492. doi: 10.2478/czoto-2024-0049.

INDUSTRIAL RAILWAY SAFETY AND LOGISTICS IN HEAVY METALLURGICAL INDUSTRY

DOI: 10.70329/2744-2403.2026.6.11.11

Scientific article

dr.sc. Nermin Palić, dr. sc. Miliša Todorović, MA Asmir Helvida

Abstract:

Industrial railway systems in steelmaking complexes operate in uniquely hazardous environments where mechanical, chemical, and human-factor risks converge at high intensity. This paper presents a comprehensive analysis of railway safety and logistics management at the ArcelorMittal Zenica steelworks — one of the most significant metallurgical facilities in the Western Balkans. Drawing on internal operational documentation, peer-reviewed risk assessment literature, and a structured review of safety protocols, the paper examines the facility's 58 km internal track network, its fleet of specialized rolling stock, and its multi-station dispatching system. Key hazards are identified across four domains: interdepartmental transport collisions, wagon loading failures, derailment mechanisms, and occupational health exposures. Risk assessment methodologies — including Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP), Fault Tree Analysis (FTA), and Dynamic Hybrid Bayesian models — are evaluated for their applicability to the industrial context. The paper further analyzes wagon securing systems, derailer deployment, level crossing management, and track maintenance technologies including ultrasonic testing and geometry measurement. Critical gaps in safety automation are identified, and recommendations are proposed for digitalization, infrastructure modernization, and integrated safety management systems (SMS). The findings contribute to the broader literature on occupational safety in heavy industry and provide a replicable analytical framework for similar metallurgical facilities.

Keywords: *industrial railway safety, steel plant logistics, shunting operations, risk assessment, Bayesian networks, FAHP, ArcelorMittal Zenica, occupational safety, wagon securing, SMS*

1. Introduction

Large-scale metallurgical complexes represent some of the most demanding environments for internal logistics and transport. Unlike public railway networks, industrial railway systems must integrate continuously with active production processes, handling raw materials, intermediate products, and hazardous substances in close proximity to personnel. The resulting risk profile is unique: it combines the mechanical hazards typical of railway operations with the chemical and thermal hazards of steelmaking, compounded by the organizational complexity of multi-department coordination.

The ArcelorMittal Zenica steelworks, situated in the Zenica-Doboj Canton of the Federation of Bosnia and Herzegovina, exemplifies this complexity. With an internal track network spanning 58 km — reduced from nearly 80 km at peak capacity, yet still one of the largest private industrial railway systems in the region — the facility manages a continuous flow of coke, ore, liquid metal, scrap, and chemical reagents. The railway is not merely a logistics utility; it is an integrated production component whose reliability and safety directly determine throughput capacity and worker welfare.

Research interest in industrial railway safety has grown considerably over the past two decades, driven by documented accident rates in intra-plant operations and by advances in probabilistic and hybrid risk assessment methodologies. Inter-branch transport has been identified as a leading driver of occupational injury in steel mills (Wołowczyk and Klimecka-Tatar, 2024), while the applicability of Fuzzy Risk Assessment (FRA) and the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) to shunting contexts has been demonstrated (Huang et al., 2007). More recently, dynamic Bayesian hybrid models have emerged as powerful tools for integrating technical, human, and environmental risk factors in railway accident analysis (IEEE Access, 2022).

Despite this growing body of literature, few studies have applied these frameworks to specific operational facilities in transition economies, where infrastructure may be aging and organizational resources constrained. This paper seeks to fill that gap through a detailed case study of ArcelorMittal Zenica, combining technical infrastructure analysis with a structured review of applicable risk assessment and mitigation frameworks.

2. Infrastructure and Technical Specifications

The internal railway network at ArcelorMittal Zenica operates on standard gauge (1,435 mm) and is centered on a freight station with 17 distinct tracks. The dual-ownership structure of this network is noteworthy: Tracks 1 through 9 are owned and operated by JP Željeznice Federacije BiH (the Federation of Bosnia and Herzegovina's public railways), serving as the primary interface for external logistics connections. Tracks 10 through 17 are privately owned by ArcelorMittal

Zenica, dedicated exclusively to internal maneuvering and production-specific transport.

This shared ownership model introduces important implications for safety governance. Regulatory jurisdiction, maintenance responsibility, and operational authority differ across the two track groups, requiring clearly defined protocols for handover points and joint operations. The coordination between the public railway operator and the private industrial operator represents a systemic interface risk that must be managed through formal procedural agreements and joint safety planning.

The total track length of 58 km, while significantly reduced from the facility's historical peak of approximately 80 km, still constitutes a large-scale network requiring continuous monitoring and maintenance. Track density and the complexity of interconnections create numerous potential conflict points, particularly at junctions and near production halls where pedestrian and vehicular traffic intersect with rail movements.

2.1 Switches, Crossings, and Point Infrastructure

The network incorporates 234 railway switches, enabling flexible routing of rolling stock throughout the complex without the need to stop and reposition locomotives (RMK – Zenica, 1970). These switch points represent critical infrastructure nodes: mechanical failure or improper positioning of a switch can directly cause a derailment or collision. Given the high operational frequency and the heavy loads carried — including molten metal and hazardous chemicals — the consequences of switch failure can be severe.

Switch maintenance involves regular inspection of tongue alignment, locking mechanisms, and point motor functionality (where applicable). The existing infrastructure relies predominantly on manual switch operation with mechanical locks, which places a significant burden on shunting personnel to correctly position and secure points before each movement. The transition to centralized electronic interlocking, recommended in the facility's own modernization agenda, would substantially reduce this human-factor dependency.

2.2 Rolling Stock Fleet

The specialized nature of steelmaking logistics demands a diverse and purpose-built rolling stock fleet. The ArcelorMittal Zenica internal fleet comprises four principal vehicle categories (Group of Authors, 2008):

- Diesel Locomotives: Four-axle units configured for maneuvering services. These provide the primary tractive effort for wagon movements throughout the complex, including the pulling and pushing of heavy freight consists on grades and curves.

- Heavy Motor Draisines (TMD): Maintenance and track inspection vehicles, essential for monitoring track geometry and condition without disrupting production operations.
- Railway Cranes: Specialized units for handling heavy steel components, including ingots and rolled products, and for emergency recovery operations in the event of derailment or wagon failure.
- Freight Wagons: A range of specialized units for coke (Kai-z series open wagons), iron ore, liquid metal (torpedo cars), and chemical reagents (tank wagons for H₂SO₄, NaOH, tar).

In addition to locomotive-hauled movements, the facility employs specialized non-locomotive traction devices in areas where full locomotive access is impractical. Two principal units are in service:

Table 1. Specialized Wagon Pulling Devices at ArcelorMittal Zenica

Device	Manufacturer / Origin	Capacity	Primary Application
PZ 15 DUO	Arow Line, Czech Republic	325 tonnes	Coking plant shunting
Vagon Delivery Trolley	Giproperovski, USSR	800 tonnes	Viper 1 unloading station

Source: Metalurgical Institute "Hasan Brkić" (1985) Technological Processes – Coke Plant of the Zenica Steelworks. Zenica.

3. Operational Management and Dispatching

Effective control of a network of this scale and complexity requires a decentralized dispatching architecture. ArcelorMittal Zenica operates three primary dispatch stations, each responsible for a defined production zone:

- Main Dispatch Station: Located adjacent to the freight railway station, this hub coordinates the overall flow of rolling stock and manages the interface with the external national railway network. It serves as the primary operational authority for cross-departmental movements.
- Steelworks (Čeličana) Dispatch: Focused on scrap metal procurement and finished steel product dispatch, coordinating the particularly time-sensitive movements associated with electric arc furnace operations.
- Blast Furnace (Visoka Peć) Dispatch: Manages the continuous and uninterrupted supply of iron ore, coke, and limestone to the blast furnaces, as well as the movement of hot metal torpedo cars — among the most safety-critical operations in the entire plant.

The decentralized model reduces communication latency and allows each dispatch point to respond rapidly to local operational demands. However, it also creates coordination challenges when movements require traversing multiple dispatch zones. Handover protocols between stations must be clearly defined and consistently applied to prevent conflicting movement authorizations — a key source of collision risk in shunting environments (Huang et al., 2007).

The facility's own modernization roadmap identifies GPS-based real-time tracking of all internal rolling stock as a priority investment. Such a system would provide the main dispatch station with a unified operational picture, enabling conflict detection and dynamic re-routing — capabilities that currently depend entirely on human communication and procedural discipline.

4. Coking Plant Logistics: A Focused Case Study

The Coking Plant is the most railway-intensive department in the facility, handling not only the high-volume transport of coke but also a range of hazardous chemical reagents. The department's internal track configuration assigns specific tracks to specific material flows, a form of functional segregation that reduces the risk of incompatible consignments sharing infrastructure:

Table 2. Track Assignments at the Coking Plant

Track	Primary Function	Special Protection
K3	Chemical unloading (NaOH, naphthalene wash oil)	Derailer + switch lock
K7 / K8	Tar loading and H ₂ SO ₄ unloading	Derailer + switch lock
K1B / K1C	Coking coal unloading (Viper 1 station)	Remote-controlled puller + audio-visual signals

Source: Authors

The use of derailleurs at chemical handling points reflects a sound defense-in-depth approach: even if procedural controls fail and a wagon begins to move uncontrolled, the derailer ensures it cannot reach the protected zone. This mechanical last-resort protection is particularly important given the consequences of a runaway wagon colliding with a sulfuric acid or sodium hydroxide tank installation.

4.1 Coke Loading Protocols

The daily logistics of coke transport require a formalized requisition process. Typically, 10 Kai-z series open wagons are allocated per day for large coke transport. The procurement sequence begins with a formal request from the Coke Bunker and Loading Operator to the Traffic Department Shift Leader, specifying

wagon type and quantity, taring and weighing requirements, and cargo-specific constraints.

Loading protocols impose several critical constraints designed to prevent cargo shift and vehicle overloading. Coke must be distributed uniformly across the full length and width of the wagon to ensure equal axle loading. The height of the loaded cargo must not exceed 50 cm above the wagon's side height. Particular care is required when loading into externally-owned wagons from state railways, which are often constructed differently from internal wagons and frequently feature wooden floors — significantly increasing fire risk when hot or insufficiently cooled coke is loaded.

The requirement to cool coke to an acceptable temperature before loading for external transport reflects an understanding of the extended and less-controlled conditions of public railway transit. Internal transport paths within the steelworks are shorter and more controlled, but the standard should arguably be applied consistently given the fire hazard.

4.2 Level Crossings at the Coking Plant

The Coking Plant department contains five level crossings (putni prelazi) — the most of any department in the facility. None are equipped with automated barriers. Safety management relies on a combination of light and sound signals (at the Coke Separation section, where remote-controlled pulling devices operate) and manual securing by shunting personnel. Rail vehicles have absolute priority of passage at all crossings per applicable railway and road traffic law.

The absence of automated barriers at four of the five crossings represents a significant residual risk. The dependence on manual securing means that the safety of a crossing is contingent on the consistent presence and attention of a trained shunting worker — a human-factor dependency that is inherently less reliable than an engineered control. This is particularly concerning given the high frequency of wagon movements at the Coking Plant and the simultaneous road vehicle traffic serving the facility.

5. Risk Assessment Methodologies

Traditional deterministic risk assessment approaches — event trees, fault trees, and checklist-based methods — are well-established in industrial safety management but face fundamental limitations in complex, data-sparse environments such as intra-plant railway systems. Accident rates for specific shunting scenarios are often too low to yield statistically reliable frequency estimates. Human and organizational factors are difficult to quantify with precision. And the interdependencies between technical failures, human errors, and environmental conditions create non-linear causal chains that resist simple decomposition (Imamović, Kablar, Oruč, 2024).

In response to these limitations, the risk assessment literature has increasingly turned to hybrid methods that combine the structured logic of fault trees and event trees with the uncertainty-handling capabilities of fuzzy set theory and Bayesian inference. These approaches have been specifically applied to shunting and railway risk contexts, and are well-suited to the ArcelorMittal Zenica operational environment.

5.1 Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)

The FAHP approach, applied to shunting risk analysis at Waterloo Depot, represents a mature methodology for operationalizing expert judgment in risk assessment. Linguistic variables — such as 'very high,' 'high,' 'moderate,' 'low,' and 'very low' — are mapped to fuzzy membership functions, allowing qualitative assessments to be combined mathematically without forcing false precision on inherently uncertain judgments (Huang et al., 2007).

The process involves decomposing the overall risk into a hierarchy of contributing factors (equipment condition, human error, environmental conditions, management systems), eliciting pairwise comparisons from domain experts, and computing priority weights that reflect the relative importance of each factor. The output is a risk priority ranking that can directly inform resource allocation for safety controls (Garaplija, 2024).

For ArcelorMittal Zenica, an FAHP study would logically identify wagon loading/unloading operations, level crossing management, and hot metal transport as the highest-priority risk scenarios. Expert elicitation should draw on the experience of shunting personnel, traffic department managers, and occupational safety engineers who have direct operational knowledge of the facility.

5.2 Fault Tree to Bayesian Network Mapping

A category-classification-based safety risk assessment method for railway wagon loading has been proposed, combining the SHEL (Software, Hardware, Environment, Liveware) model for classifying influencing factors with a fuzzy fault tree converted into a Bayesian network for probabilistic inference (Fei et al., 2023). This hybrid approach is directly applicable to the coke loading and chemical wagon handling operations at the Coking Plant.

The key advantage of Bayesian network representation is the ability to update probability estimates as new evidence becomes available. If an inspection reveals deteriorating condition of a wagon's door locking mechanism, the network immediately propagates this information to update the probability of a door-opening incident during transit — a dynamic capability that static fault trees cannot provide.

5.3 Dynamic Hybrid Risk Models

The most sophisticated methodological approach identified in the literature is the dynamic hybrid model described for train derailment risk assessment (IEEE Access, 2022). This framework aggregates frequency and severity distributions across technical, human, and environmental risk factors, applies Bayesian-Expectation Maximization (EM) learning to estimate model parameters from available data, and performs sensitivity analysis to identify the factors with the greatest influence on overall risk.

Sensitivity analysis outputs from such a model have direct practical value: they tell risk managers which mitigation investments will yield the greatest reduction in expected harm. For a facility with constrained maintenance budgets, this prioritization capability is essential.

Table 3. Comparison of Risk Assessment Methodologies for Industrial Railway Contexts

Method	Uncertainty Handling	Data Requirements	Output	Applicability
Fault Tree Analysis (FTA)	Limited	Moderate	Minimal cut sets	Accident decomposition
Event Tree Analysis (ETA)	Limited	Moderate	Outcome probabilities	Consequence modeling
FAHP / FRA	High (fuzzy)	Low (expert judgment)	Risk priority ranking	Resource allocation
FTA + Bayesian Network	High (probabilistic)	Moderate	Updated probabilities	Dynamic risk tracking
Dynamic Hybrid Model	Very High	Low-Moderate	Sensitivity rankings	Strategic planning

Source: Authors based on IEEE Access, 2022

6. Safety Protocols and Wagon Securing Systems

The theoretical foundation for industrial railway safety management is the Safety Management System (SMS), a systematic framework that integrates safety across all operational levels—from design and procurement to operations, maintenance, and contractor management. Prior research examining the structural requirements and implementation challenges of SMS in the Polish railway sector provides

insights that are directly transferable to the Bosnian industrial railway context (Antolak et al., 2020).

An effective SMS for ArcelorMittal Zenica would establish clear safety policies and objectives, define responsibility and accountability at all organizational levels, implement systematic hazard identification and risk assessment processes, ensure training and competency verification for all personnel involved in railway operations, and maintain incident reporting and investigation procedures that feed back into risk assessment and procedural improvement.

6.1 Wagon Securing Against Self-Movement

One of the most critical operational safety requirements in shunting environments is the prevention of wagon self-movement — the unintended rolling of a parked wagon under the influence of gravity. At ArcelorMittal Zenica, this is managed exclusively through the use of manual stop shoes, which are placed on the upper surface of the rail beneath the wheels of stationary wagons.

The stop shoe system is mechanically simple and reliable when correctly applied. However, its effectiveness depends entirely on consistent human application: the shoes must be correctly positioned, the correct number must be used for the grade and wagon mass, and they must not be removed without authorization. The loading/unloading employee is responsible for verifying correct securing after the shunting consist departs and before loading operations begin — a clear assignment of responsibility that is a positive element of the protocol.

Stop shoes are explicitly the only authorized securing method. The use of cranes, forklifts, or manual pushing to move wagons is strictly prohibited, as is the unauthorized removal of stop shoes or the unauthorized repositioning of switches or derailleurs. These prohibitions address a common category of workplace incident in which improvised wagon movement — often motivated by time pressure — leads to uncontrolled movement or collision.

6.2 Derailer Systems

For manipulative areas (areas where loading and unloading occur), a higher level of protection against runaway wagon access is provided by derailleurs. A derailer is a mechanical device placed on the rail that, when engaged, will divert a wagon off the track before it can reach the protected zone. The device consists of a base, a signal plate, and a plate with an angled rib that sits on the rail surface and deflects the wheel of any approaching wagon.

Key operational requirements for derailleurs include: placement at least 20 meters from the structure being protected; locking with a key system in which each key is individually numbered and controlled; annual comprehensive cleaning, lubrication, and inspection; and regular checks of lock function, plate movement, signal plate visibility, and fastener integrity. The requirement for keyed control

ensures that locomotive access to a protected zone requires explicit authorization from the responsible departmental employee.

The derailer system at the Coking Plant tracks K7/K8 (sulfuric acid and tar handling) represents a particularly well-designed application of this defense-in-depth principle, given the potential for catastrophic chemical release in the event of a collision.

6.3 Switch Locks

Switch locks provide a complementary level of protection by ensuring that manually-operated switches cannot be moved from their authorized position during sensitive operations. Two lock types are in use: the Robel lock and the Gac lock. Both function on the principle of preventing tongue separation from the stock rail beyond a defined maximum (1.5 mm under test conditions for the locked position).

Annual disassembly, cleaning, lubrication, and component replacement as required are mandated for switch locks — a maintenance standard that reflects the safety-critical nature of these devices. The requirement that one key can operate only one lock, and that keys must be labeled with the lock number, creates an audit trail and prevents unauthorized lock sharing.

6.4 Track Closure Procedures

When maintenance or other work requires the exclusion of railway vehicles from a track section, a formal track closure procedure is followed. The Traffic Department responds to a closure request by locking or spiking the junction switch to a position that does not lead to the closed section, placing a red signal disc on the right side of the track, and — if only part of the track is closed while the remainder remains operational — installing protective sleepers or other approved protective devices at the boundary.

The requesting department is responsible for marking the worksite according to occupational safety regulations and for placing and locking a derailer on the closed section in the forbidden-movement position. Responsibility for installing and removing protective measures rests with each department, which creates clear accountability but also requires robust coordination when multiple departments have concurrent track closure requests.

7. Maintenance Technologies and Infrastructure Inspection

Track geometry is a primary determinant of safe train operation. Deviations from design geometry — including gauge widening, cross-level errors, alignment irregularities, and longitudinal profile defects — increase the risk of derailment

and accelerate rail and rolling stock wear. Modern track geometry measurement cars provide continuous, objective, and repeatable measurements across all key geometry parameters at operational speeds, enabling condition-based maintenance scheduling rather than purely time-based inspection intervals.

For the ArcelorMittal Zenica network, with its 234 switches and complex track layout, regular geometry measurement is particularly important at switch locations where geometry requirements are most stringent and where the consequences of deviation are most severe. The maintenance data generated by geometry measurement also supports trend analysis — the identification of sections where deterioration is accelerating, enabling proactive intervention before safety thresholds are reached (RMK – Zenica, 1970).

7.1 Ultrasonic Rail Inspection

Internal rail defects — particularly transverse fatigue cracks at welded joints and in the rail head — represent a serious risk because they are not visible through surface inspection but can cause sudden rail fracture under load. Ultrasonic testing (ultrazvučno ispitivanje) using measurement cars equipped with ultrasonic probes detects these internal defects by analyzing the reflection of high-frequency sound waves transmitted through the rail.

In a heavy industrial environment such as ArcelorMittal Zenica, where axle loads are high and rail is subject to both heavy freight impacts and thermal cycling from proximity to furnace operations, the risk of fatigue crack development is elevated relative to mainline passenger railway contexts. Regular ultrasonic inspection — with results immediately available from the measurement car's onboard analysis system — enables targeted rail replacement or repair before defects reach critical size.

Weld inspections are particularly important given that the 58 km network includes numerous welded joints, each representing a potential crack initiation site. Industry practice recommends ultrasonic inspection of all welds immediately after installation and at regular intervals thereafter.

7.2 Rail Corrugation Measurement

Rail corrugation — periodic, short-wavelength undulations in the rail running surface — is a common problem in railway operations that generates high dynamic forces on both track and rolling stock, accelerating wear and increasing noise and vibration. In an industrial setting, corrugation is particularly likely on curves and at the entry to switches due to the traction and braking forces applied by heavily loaded locomotives.

Corrugation measuring draisines provide quantitative measurement of corrugation amplitude and wavelength, enabling timely rail grinding interventions

to restore the smooth running surface. Unaddressed corrugation creates a feedback loop: the dynamic forces from corrugated rail accelerate track geometry deterioration, further increasing dynamic loading.

7.3 Recommended Maintenance Framework

Based on the available evidence and best practice literature, the following maintenance framework is recommended for the ArcelorMittal Zenica network:

Table 4. Recommended Track Maintenance Inspection Schedule

Inspection Type	Method	Frequency	Priority Areas
Visual walking inspection	On-foot patrol	Weekly	Switches, level crossings, joints
Track geometry measurement	Geometry measurement car	Quarterly	All main lines and sidings
Ultrasonic rail inspection	Ultrasonic measurement car	Semi-annually	Welds, curves, high-load sections
Rail corrugation survey	Corrugation draisine	Annually	Curves, switch entries
Switch comprehensive inspection	Manual + instrument	Annually	All 234 switch locations
Derailer and lock inspection	Manual inspection checklist	Annually	All derailer locations

Source: (Helvida, A., 2018)

8. Human Factors and Occupational Health

The SHEL model — Software, Hardware, Environment, Liveware — provides a structured framework for classifying the human and organizational factors that contribute to incidents in complex operational systems. Applied to railway wagon loading and handling, this model identifies four categories of influencing factors (Fei et al., 2023):

- Software factors: Procedures, rules, training materials, and operational protocols. Poor procedural design, inaccessible documentation, or inadequate training contribute to human error.
- Hardware factors: Equipment design, ergonomics, and physical condition. Poorly designed wagon door mechanisms, inaccessible stop shoe storage racks, or malfunctioning derailer locks create conditions that promote incorrect actions.

- Environment factors: Physical working conditions including noise, lighting, temperature, vibration, and weather. Locomotive crews and shunting personnel in industrial environments face multiple simultaneous environmental stressors.
- Liveware factors: Individual human characteristics including fatigue, skill level, communication style, and situational awareness. Shift work patterns and overtime exposure are particularly relevant in a continuous production environment.

8.1 Occupational Health of Locomotive Crews and Shunting Personnel

The occupational health implications of railway work in industrial settings are well-documented. Locomotive crews have comparatively unfavorable occupational exposure profiles relative to other plant workers (Wołowczyk and Klimecka-Tatar, 2024).

Primary exposure categories include noise — from locomotive engines, wheel-rail interaction, and industrial process equipment — with sensorineural hearing loss documented as an elevated risk among engine crews. Steam and process gases represent a second major exposure category, with implications for respiratory health. The thermal environment in the vicinity of coke ovens, blast furnaces, and hot metal handling areas creates additional physiological stressors that affect cognitive performance and fatigue accumulation.

Higher occupational morbidity rates among locomotive crews relative to the broader plant workforce suggest that current control measures — personal protective equipment, hearing conservation programs, and health surveillance — may be insufficient. A systematic occupational hygiene survey of locomotive and shunting personnel, with quantitative noise and chemical exposure measurements, would provide the evidence base for targeted control improvements.

8.2 Training and Competency Requirements

The operational documentation for ArcelorMittal Zenica specifies differentiated training requirements for conventional locomotive operations and remote-controlled locomotive operations. For conventional operations, formal training programs must cover all personnel who may be involved in or affected by locomotive movements, including ground personnel. For remote-controlled operations — used with the PZ 15 DUO and the Viper 1 trolley — specific operator procedures must address movement sequences, wagon tracking, and safe stopping.

Beyond initial certification, ongoing competency assurance through periodic re-evaluation, incident debrief participation, and safety observation programs is essential. Research in railway human factors consistently demonstrates that skill maintenance in low-frequency, high-consequence scenarios — such as runaway

wagon response — requires deliberate practice, not merely the accumulation of routine operational experience.

Interdepartmental communication training deserves particular emphasis. Many of the safety-critical handoffs in the ArcelorMittal Zenica system — between the Traffic Department and production departments, between dispatch stations, and between shunting crews and loading/unloading personnel — depend on clear, unambiguous communication. Standardized phraseology, positive readback protocols, and communication logging would all reduce the risk of misunderstanding.

8.3 Ergonomics and Working Conditions

Physical ergonomics considerations for shunting personnel include the manual handling demands of stop shoe deployment and recovery, climbing on and off wagons (with specific requirements for maintaining three points of contact), and the physical demands of manual switch operation. For locomotive crews, cab ergonomics — including visibility, control accessibility, and seat design — affect both comfort and the ability to detect and respond to hazards.

Shift scheduling and fatigue management represent a systemic human factors concern. Continuous production operations at ArcelorMittal Zenica require round-the-clock railway operations, with the associated risks of circadian disruption and fatigue accumulation. Industry best practice calls for shift schedules that minimize exposure to the early morning hours (approximately 02:00–06:00) when cognitive performance is most impaired, and for fatigue risk management systems that monitor cumulative work hours and provide safety margins for safety-critical tasks.

9. Digitalization and Modernization Opportunities

The ArcelorMittal Zenica railway system's own conclusions identify three principal areas for investment: GPS-based real-time tracking of rolling stock, centralized electronic switch interlocking, and automated barriers and sensors at level crossings. Each of these represents a shift from reliance on human procedural compliance to engineered controls — a fundamental principle of the safety hierarchy.

GPS tracking of all internal locomotives and instrumented wagons would transform the operational picture available to dispatchers, enabling conflict detection before movements are authorized, optimizing locomotive utilization, and providing incident investigation data. Modern industrial IoT systems can provide sub-meter positioning accuracy with update rates sufficient for real-time operational use.

Electronic interlocking would eliminate the reliance on manually-operated mechanical switch locks for route protection. A centralized interlocking system,

properly configured with the approved route list for the facility, physically prevents the establishment of conflicting routes — providing a level of protection that no manual procedure can match. The investment required is substantial but justified by the safety criticality of the switch infrastructure in a high-hazard environment.

Automated barriers and sensors at the five level crossings in the Coking Plant department alone would address a clear and documented risk gap. Technologies ranging from conventional barrier systems with train detection to modern radar-based detection with active warning lights are available at a range of investment levels. The appropriate technology selection should be based on crossing traffic volume, sight distances, and approach speeds.

Beyond these near-term priorities, longer-term digitalization opportunities include predictive maintenance through continuous sensor monitoring of locomotive condition and track-train interaction forces, digital wagon management systems that track wagon assignment and cargo information in real time, and integrated safety dashboards that consolidate risk assessment outputs, inspection findings, and incident data for management decision-making.

10. Conclusions and Recommendations

Industrial railway systems in steelmaking complexes present a concentrated and challenging risk environment that demands systematic, evidence-based safety management. The ArcelorMittal Zenica steelworks, with its 58 km internal network, 234 switches, diverse rolling stock fleet, and complex chemical logistics, illustrates both the operational sophistication achievable in such environments and the gaps that remain between current practice and best-practice standards.

The following conclusions emerge from this analysis:

- The dual-ownership structure of the track network (public railway/private industrial) creates jurisdictional interfaces that require formalized coordination protocols to prevent safety governance gaps.
- The coking plant's functional track segregation and derailer deployment represent sound defense-in-depth principles that should be systematically applied across all high-hazard loading areas.
- Hybrid and fuzzy risk assessment methodologies — particularly FAHP and Bayesian network approaches — are well-suited to the data-sparse, expert-knowledge-rich environment of industrial railway operations and should be adopted for systematic risk prioritization.
- The exclusive reliance on manual stop shoes for wagon securing and on manual personnel for level crossing safety places excessive dependence on human procedural compliance without adequate engineered backup.

- Locomotive crews and shunting personnel face elevated occupational health risks from noise and chemical/thermal exposures that appear inadequately characterized and controlled.
- The facility's own modernization agenda — GPS tracking, electronic interlocking, and automated crossing barriers — is well-aligned with safety improvement priorities and should be implemented with urgency.

Specific recommendations, ordered by priority:

1. Conduct a systematic FAHP-based risk assessment across all operational scenarios within 12 months, engaging experienced shunting personnel, traffic managers, and occupational safety engineers as expert elicitors.
2. Install GPS-based real-time rolling stock tracking as a near-term investment priority, beginning with all locomotive units and subsequently extending to high-risk wagon categories (liquid metal, chemical reagents).
3. Implement automated barriers with train detection at all five Coking Plant level crossings, as a minimum safety standard given the volume of both rail and road traffic at these points.
4. Commission a quantitative occupational hygiene survey of locomotive and shunting personnel exposure to noise and process chemicals, and use the results to design targeted engineering and administrative controls.
5. Develop a phased plan for centralized electronic interlocking, beginning with the highest-traffic switch areas and the chemical handling tracks in the Coking Plant.
6. Formalize an integrated Safety Management System covering all departments, establishing shared safety objectives, cross-departmental coordination protocols, and a structured incident reporting and investigation system.
7. Introduce standardized communication phraseology and positive readback protocols for all safety-critical handoffs between dispatch stations and between the Traffic Department and production departments.

The transformation of ArcelorMittal Zenica's railway safety management from a primarily procedural and compliance-based model to a systematic, data-driven, and engineering-controlled framework is both technically feasible and operationally necessary. The investment required is substantial but proportionate to the risk profile of the operations involved and to the facility's strategic importance as a center of steel production in the Western Balkans.

REFERENCES

14. Antolak, M., Niedzielski, P. and Ziolo, M. (2020) Wybrane aspekty funkcjonowania Systemu Zarządzania Bezpieczeństwem na kolei (SMS) w Polsce, vol. 392, pp. 125–138.
15. Chen, Y. (2013) Improving railway safety risk assessment study, July.
16. Fei, Y., Liu, Q., Zhang, T., Sun, W. and Yue, G. (2023) ‘A category classification based safety risk assessment method for railway wagon loading status’, *Tehnički vjesnik – Technical Gazette*, December. doi: 10.17559/tv-20230412000525.
17. Garaplija, E. (2024). “3D model logičke integracije metafizike i upravljanja rizicima od katastrofa“, časopis „*Zaštita i sigurnost*“, www.zisjournal.com
18. Group of Authors (1970) Regulation on the Maintenance of Industrial Tracks with a Gauge of 1435 mm. Zenica: RMK Zenica.
19. Group of Authors (2008) Occupational Safety. Zenica: ArcelorMittal.
20. Helvida, A. (2018) Sigurnost i zaštita prilikom transporta koksa u kompaniji „Arcelormittal“ Zenica. Kiseljak.
21. Huang, S., An, M., Chen, Y. and Baker, C. (2007) ‘Railway safety risk assessment using FRA and FAHP approaches – A case study on risk analysis of shunting at Waterloo Depot’, pp. 181–186. doi: 10.1049/CP:20070461.
22. IEEE Access (2022) ‘Dynamic hybrid model for comprehensive risk assessment: a case study of train derailment due to coupler failure’, *IEEE Access*, 10, pp. 24587–24600. doi: 10.1109/access.2022.3155494.
23. Imamović, A., Kablar, O., Oruč, M. (2024). “Zahtjevi za bezbjedan rad pri korištenju viljuškara“, časopis „*Zaštita i sigurnost*“, www.zisjournal.com
24. Metalurgical Institute “Hasan Brkić” (1985) Technological Processes – Coke Plant of the Zenica Steelworks. Zenica.
25. Muller, N.V. and Mladova, T.A. (2021) ‘The assessment of the risk of occupational injuries of workers on the railway’. doi: 10.46548/21vek-2021-1056-0036.
26. Wołowczyk, J. and Klimecka-Tatar, D. (2024) ‘Occupational safety management in steel mills due to inter-branch transport’, *System Safety*, 6(1), pp. 485–492. doi: 10.2478/czoto-2024-0049.