

Primljen / Received: 13.3.2013.

Ispravljen / Corrected: 20.11.2013.

Prihvaćen / Accepted: 14.12.2013.

Dostupno online / Available online: 10.5.2014.

Mjerenje i analiza stanja željezničke infrastrukture kao osnova za upravljanje održavanjem

Autori:



Doc.dr.sc. **Stanislav Jovanović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Novom Sadu
Tehnički fakultet
stasha.jovanovic@gmail.com



Doc.dr.sc. **Dragan Božović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
dbozovic@grf.bg.ac.rs



Prof.dr.sc. **Mirjana Tomičić-Torlaković**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
mtomicic@grf.bg.ac.rs

Stručni rad

Stanislav Jovanović, Dragan Božović, Mirjana Tomičić-Torlaković

Mjerenje i analiza stanja željezničke infrastrukture kao osnova za upravljanje održavanjem

Suvremene željeznice danas troše oko pedeset tisuća eura na godinu po kilometru kolosijeka za održavanje i remont. Uštede koje se mogu postići pomoću suvremenog odlučivanja zasnovanog na mjerenju i analizi stanja, primijenjenog kroz adekvatni informacijski sustav za podršku odlučivanju, procjenjuju se u rasponu od skromnih 15 % do optimističkih 55 %. U radu se daje opis najznatnijih metoda za mjerenje stanja željezničke infrastrukture u primjeni danas u svijetu, kao i opis procesa analize izmjerenih podataka radi upravljanja radovima na održavanju i remontu.

Ključne riječi:

željeznička infrastruktura, upravljanje, održavanje, mjerenje stanja kolosijeka

Professional paper

Stanislav Jovanović, Dragan Božović, Mirjana Tomičić-Torlaković

Railway infrastructure condition-monitoring and analysis as a basis for maintenance management

Average annual maintenance and renewal (M&R) expenditures per 1 km of tracks of advanced railway networks nowadays revolve around EUR (€) 50.000. Estimated cost-savings resulting from the use of a modern condition-based decision-making approach, embedded in a suitable decision-support information System, are reported to range from modest 15 % up to the optimistic 55 %. Most important railway track condition-monitoring methods applied worldwide are described, and a data analysis process used for the M&R management purposes is presented.

Key words:

railway infrastructure, management, maintenance, track condition measurements

Fachbericht

Stanislav Jovanović, Dragan Božović, Mirjana Tomičić-Torlaković

Auf Zustandsmessungen und Analysen basierte Wartungsplanung für Eisenbahninfrastrukturen

Durchschnittliche jährliche Wartungs - und Instandhaltungskosten pro Kilometer Gleisstrecke betragen heutzutage für moderne Eisenbahnnetze ca. EUR (€) 50.000. Mögliche Kosteneinsparungen, erzielt durch eine zustandsorientierte Entscheidungsfindung, die in ein angemessenes Informations - und Entscheidungsunterstützungssystem eingefügt ist, werden auf Beträge zwischen bescheidenen 15% und optimistischen 55% eingeschätzt. In der vorliegenden Arbeit sind die wichtigsten Methoden des Zustandsmonitoring für Eisenbahnnetze, die derzeit weltweit angewandt werden, beschrieben. Außerdem ist das Analyseverfahren der zur Anwendung in Wartungs - und Instandhaltungsverwaltung gemessenen Daten dargestellt.

Schlüsselwörter:

Eisenbahninfrastruktur, Verwaltung, Wartung, Messungen des Gleiszustands

1. Uvod

Vrijednost elemenata gornjeg ustroja željezničkih pruga, kao i troškovi njihovog održavanja i remonta (OiR), iznimno su veliki i čine znatan dio ukupnih infrastrukturnih izdataka svake željeznice. Zato svako smanjenje tih troškova ima znatan utjecaj na učinkovitost upravljanja elementima željezničke infrastrukture (EŽI).

Proces definiranja treba li, gdje, kad i kako intervenirati, i odlučivanja o optimalnoj upotrebi i alokaciji resursa, uz obvezno smanjenje troškova, predstavlja izuzetno složen problem zbog sljedećih razloga:

- različite dionice kolosijeka ponašaju se različito pod utjecajem prometnog opterećenja i okruženja,
- procesi odlučivanja o izvođenju radova na održavanju i remontu usko su isprepleteni, kako tehnički tako i ekonomski,
- proces odlučivanja je u okviru planiranja radova na održavanju i remontu zasnovan na velikoj količini raznorodnih tehničkih i ekonomskih podataka, širokog znanja i iskustva.

S obzirom na veličinu troškova infrastrukture, kako je objašnjeno, iznimno je važno osigurati da infrastruktura bude raspoloživa za promet što je više moguće. Također, s obzirom na znatno povećanje brzina vlakova posljednjih desetljeća, kvaliteta infrastrukture, posebno u smislu odstupanja od projektirane kvalitete, mora biti osigurana i održavana na propisanoj razini. Da bi osigurali zahtijevanu raspoloživost željezničke infrastrukture na traženoj razini kvalitete, nadležni upravitelji i inženjeri moraju shvatiti ponašanje EŽI kako bi otkrili stvarne i krajnje uzroke problema koji se javljaju, a sve to kako bi precizno mogli usmjeriti aktivnosti na OiR i tako spriječili nepotrebno ponavljanje intervencija uzrokovanih neprimjerenim aktivnostima. Naravno da su takve intervencije skupe i korisnicima nisu ugodne niti su popularne. U idealnom slučaju, pravilno razumijevanje ponašanja EŽI dovelo bi korak bliže mogućnosti predviđanja njihovog ponašanja, a time sprječavanju većeg dijela kvarova koji izazivaju poremećaje u prometu. Također bi omogućilo pravodobno planiranje nužnih mjera i aktivnosti, ostvarujući tako i dodatne uštede proizašle od mogućnosti njihove optimizacije.

Međutim, pravilno razumijevanje ponašanja EŽI vrlo je složen zadatak. Infrastruktura se sastoji od mnogo raznovrsnih elemenata i objekata, različite starosti, načina izrade, izloženih različitom opsegu i vrstama štetnih utjecaja (prije svega prometa), a koji također reagiraju različito na različite tipove aktivnosti na sanaciji izvršenih na različitoj razini kvalitete. Kao posljedica toga, svaki od ovih EŽI pokazuje drugačije ponašanje u različitim uvjetima uporabe, iskazanim različitim parametrima stanja. Takvo mnoštvo aspekata, kombinacija i međuzavisnosti čini gotovo nemogućim da menadžeri i inženjeri primjereno i učinkovito obave svoje složene zadatke, bez obzira na znanje i iskustvo. To je upravo razlog zašto sljedeća dva zahtjeva moraju uvijek biti ispunjena da bi se pravilno upravljalo željezničkom infrastrukturom:

- a) trebaju postojati prikladna sredstva i primjenjivati se primjereni načini nadgledanja i mjerenja svojstava elemenata infrastrukture,
- b) trebaju postojati pouzdane metode, sredstva i alati za ocjenu i predviđanje stanja elemenata infrastrukture, kao i posljedično planiranje aktivnosti na održavanju i remontu te optimizacija primjene resursa.

S druge strane, navedena dva zahtjeva upravo i izravno opisuju konceptualni okvir pravilno projektiranog sustava upravljanja željezničkom infrastrukturom (eng. *Railway Infrastructure Asset Management System* – "RI AMS").

2. Osnovne karakteristike odlučivanja utemeljenog na stanju infrastrukture

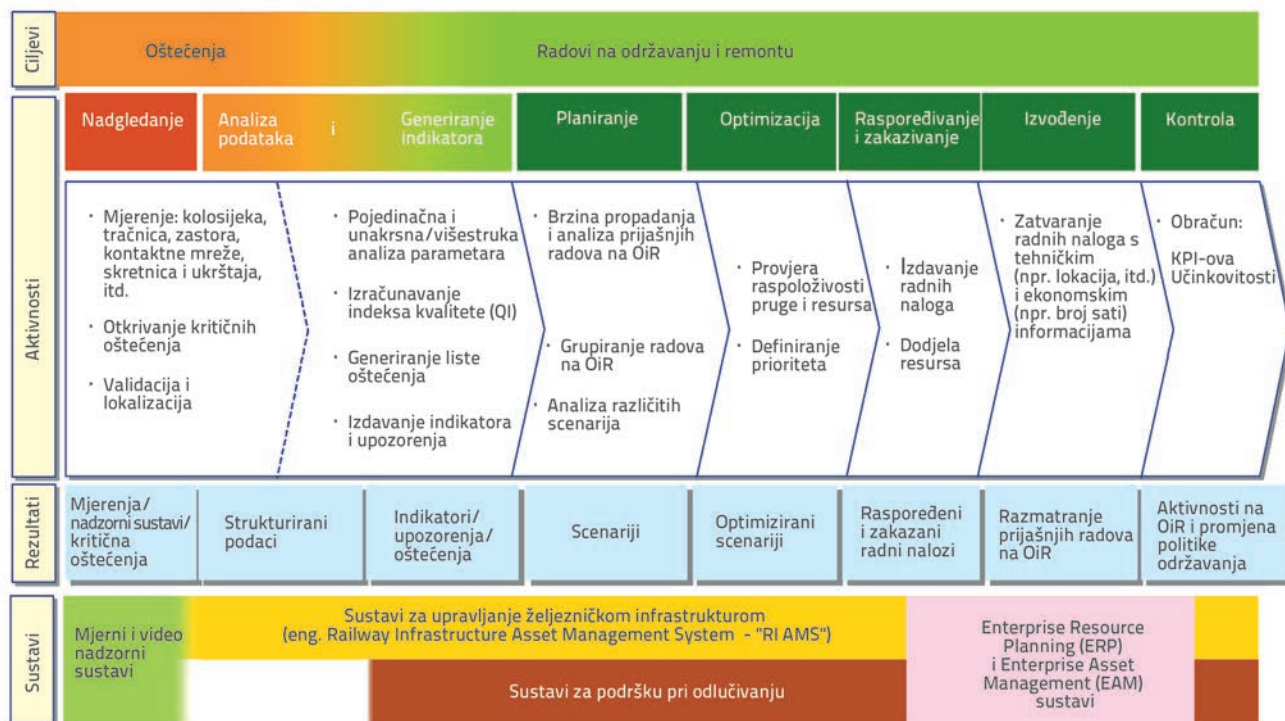
Sve aktivnosti vezane za dijagnostiku EŽI, analizu stanja, planiranje i posljedično izvođenje aktivnosti na OiR mogu se strukturirati u tzv. "condition-based lanac održavanja", koji se tradicionalno sastoji od sljedećih faza (slika 1.) [1] kako slijedi:

1. monitoring i mjerenja, bilo mjernim vozilima ili drugim inspekcijskim sustavima koji omogućuju dijagnostičke podatke,
2. analiza, nužno procesiranje i pohranjivanje podataka radi budućeg korištenja i vizualizacija podataka,
3. generiranje indikatora i upozorenja, generiranje informacija kao što su oštećenja, indeksi kvalitete, itd. radi kasnijeg korištenja za potrebe planiranja aktivnosti na OiR-u,
4. planiranje, izrada planova aktivnosti na OiR-u za kasniju optimizaciju,
5. optimizacija, optimizacija izrađenih planova na OiR-u kako bi se odredio i odabrao završni plan za koji je potrebno izraditi detaljni raspored aktivnosti i resursa,
6. raspoređivanje i izvođenje aktivnosti, završna faza usmjerena na dodjelu resursa i izvršenje aktivnosti na OiR-u
7. kontrola, završna kontrola svih/općih svojstava čitavog procesa održavanja.

Postoji širok raspon različitih dijagnostičkih sustava koji stoje na raspolaganju za podršku trima opisanim fazama *condition-based* lanca održavanja. Tablica 1. daje sažet prikaz osnovnih kategorija tih sustava dostupnih trenutačno na svjetskom tržištu. Osnovne karakteristike najvažnijih sustava, njihova namjena, kao i parametri stanja koje definiraju bit će pobliže opisani u sljedećem poglavlju.

Dijagnostički sustavi mogu biti ugrađeni i integrirani u željeznička vozila, omogućavajući time monitoring i mjerenja pri manjim ili većim brzinama. U zavisnosti od potreba i budžeta željeznica, različiti tipovi i konfiguracije se mogu naći u praksi. Svi dijagnostički sustavi mogu biti postavljeni i integrirani u:

- specijalizirana vozila, koja su projektirale i radile specijalizirane tvrtke, ili željeznička poduzeća,
- standardna vozila (npr. lokomotive, putničke vagoni, teretne vagoni).



Slika 1. Condition-based lanac održavanja željezničke infrastrukture

Tablica 1. Osnovne kategorije željezničkih dijagnostičkih sustava

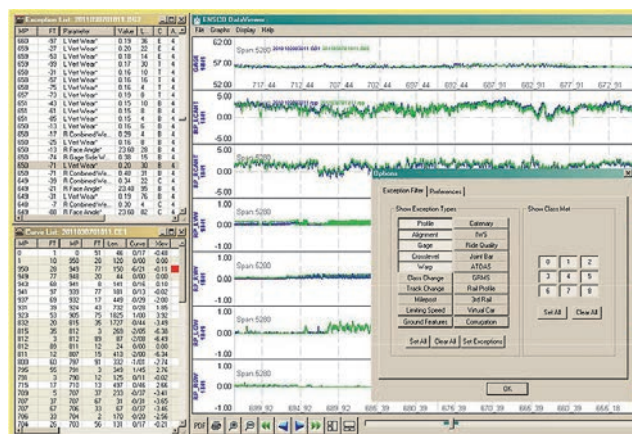
Kategorija	Tip mjerenja
Mjerenja kolosijeka, tj. gornjeg ustroja	Geometrija kolosijeka Profil tračnice Naboranost tračnice Profil zastora
Mjerenja kontaktne mreže	Geometrija kontaktne mreže Trošenje (profil) kontaktne mreže Interakcija pantografa i kontaktne mreže Detekcija iskrenja Električni parametri kontaktne mreže
Mjerenje dinamike vozila	Kvaliteta (komfor) vožnje Ubrzanja sanduka vozila. Ubrzanja osovinskog postolja i osovinskih sklopova Sile na kontaktu kotač-tračnica Geometrija kontakta kotač-tračnica
"Vision" sustavi	Automatska detekcija površinskih oštećenja na tračnicama Automatska detekcija oštećenja na kontaktnomvodu
Video nadzor	Pružni pojas, profil i okruženje Površina kolosijeka Kontaktna mreža i kontaktni vod Peroni
Ostali oblici monitoringa	Signalno-sigurnosni uređaji i njihov rad Kvaliteta telekomunikacijskih signala i opreme Temperatura okruženja Detekcija oštećenja i mjerenje stanja tunelske obloge Profil tunela i drugih građevinskih objekata Kinematički gabarit/profil Pozicijski sustavi (odometar, GPS, itd.)

Također, svi trenutačno postojeći mjerni sustavi mogu biti prilagođeni bilo kojoj širini kolosijeka i mogu biti:

- s operatorima i/ili strojovođaama, kao i raspolagati analizom podataka u realnom vremenu, tj. tijekom vožnje,
- bez operatora ili bilo kakvog drugog osoblja na njima, ali opskrbljeni sustavima za automatsko prikupljanje i odašiljanje podataka.

2.1. Način obrade izmjerenih podataka

Mjerni podaci uobičajeno stižu u tzv. sirovom formatu (slika 2.) koji u većini slučajeva nije prikladan za planiranje radova na održavanju i remontu, što pogotovo vrijedi za linearne/ prostorne objekte.



Slika 2. Primjer "sirovih" mjernih podataka za geometriju kolosijeka

Razlog je tome što se stanja linearnih objekata mjere uređajima koji imaju svoju frekvenciju mjerenja, tj. korak uzorkovanja (eng. *sampling step*), a koji su respektivno često veoma veliki (frekvencija), ili veoma mali (korak), što je osobito pogodno za određivanje lokalnih oštećenja, tj. nepravilnosti ili prekoračenja.

Ova prekoračenja se, najčešće odmah, u realnom vremenu šalju nadležnim službama željeznice radi pokretanja urgentnih intervencija (što ujedno predstavlja i jedini oblik korištenja sirovih mjernih podataka bez daljnega procesiranja), ali stvara dva ozbiljna problema vezana za njihovu direktnu primjenu u ostale svrhe, npr. predviđanje stanja i planiranje radova:

1. Zbog visoke frekvencije, tj. malog koraka uzorkovanja, kao i (najčešće) velike brzine kojom se kreću mjerni vlakovi, količina podataka koji se generiraju ovim mjerenjima može biti enormna, što zapravo onemogućava bilo kakvu složeniju analizu u realnom vremenu (u Italiji, naprimjer, količina mjernih podataka već prelazi 1 TB (terabajt) svaka dva tjedna!) [2].
2. Predviđanje ponašanja i dosljedno planiranje radova bazirano je na usporedbi više uzastopnih mjerenja na istoj lokaciji. Kako je gotovo nemoguće osigurati da u uzastopnim mjerenjima mjerni vlakovi (tj. mjerni uređaji) uvijek mjere na identičnim lokacijama, to uvijek dolazi do malog pomaka/smicanja između uzastopnih mjerenja, tj. netočnosti u njihovoj lokaciji, što onemogućava njihovo precizno poklapanje radi usporedbe na razini svake pojedinačne mjerne točke. Konačno, kad se uzme u obzir da različiti mjerni vlakovi (tj. mjerni uređaji postavljeni na njima) imaju stalno prisutnu pozicijsku pogrešku koja potječe od inherentne netočnosti pozicijskih uređaja, kao što su odometri (mjerni kotači), GPS-ovi, itd., a koja zavisi od sofisticiranosti samih uređaja, gdje oni stariji, i najmanje sofisticirani mogu imati (akumuliranu) pogrešku i od više metara, pa i desetina metara, postaje automatski jasno da je direktna usporedba uzastopnih mjerenja potpuno neizvodljiva, i to bez obzira na propisane vrijednosti tzv. ponovljivosti (eng. *repeatability*).

Iz prethodno navedenih razloga, da bi se sirovi mjerni podaci mogli iskoristiti za potrebe detaljnijih analiza, a naročito prognoze stanja radi planiranja radova u budućnosti, potrebno ih je najprije obraditi i pretvoriti u tzv. parametre stanja, koji se zatim dalje grupiraju i organiziraju u indekse kvalitete. Njihovo se ponašanje u prošlosti (viđeno pomoću više uzastopnih mjerenja) zatim modelira i koristi za usporedbu stanja u budućnosti, a samim tim i planiranje budućih aktivnosti na održavanju i remontu. Postoji više razina detaljnosti parametara stanja, no osim onih na najnižoj razini, svi ostali se oblikuju tijekom procesa koji se naziva "segmentacija", a koji predstavlja ishodište svih kasnijih analiza, modeliranja i planiranja [3, 4].

3. Parametri stanja elemenata željezničke infrastrukture te načini i instrumenti njihovog mjerenja

3.1. Mjerenje geometrije kolosijeka

Izuzme li se problem odvodnjavanja i donjeg ustroja, kolosijek propada gotovo isključivo uslijed sila induciranih prometom. Te sile uzrokuju propadanje svih elemenata kolosijeka: tračnice (većinom uslijed zamora materijala, koji se očituje preko unutrašnjih i vanjskih/površinskih oštećenja), drveni pragovi (slabljenje pričvršćenja), betonski pragovi (istrošenje na kontaktnoj površini sa zastorom i pričvršćenjima, pukotine uslijed zamora materijala), pričvršćenje (napuknuća i lomovi uslijed zamora materijala), donji ustroj (uslijed rastresanja i zamora izazvanih dinamičkim silama visokih frekvencija), kao i naglo propadanje ukupne geometrije kolosijeka, kako u području kratkih (0 – 3 m) tako i u području dugih valnih dužina (3 – 150 m). Točnije rečeno, kolosijek s lošom geometrijom:

- pokazivat će brže propadanje u odnosu na kolosijek s dobrom geometrijom, tj. kolosijek koji je dovoljno stabilan da zadrži zadovoljavajuću geometriju na duže vrijeme.
- imat će (znatno) češću pojavu oštećenja na svim elementima kolosijeka, koji dalje mogu izazvati iskliznuća iz kolosijeka, poremećaje prometa ili zahtijevati smanjenje uporabnih brzina.

To je razlog zašto geometrija kolosijeka odlučujuće utječe na dužinu trajanja svih elemenata kolosijeka. Prema tome, pravilno i pravodobno kontroliranje geometrije kolosijeka donosi povećanje prihoda u smislu korištenja infrastrukture, ako se produži trajanje svih komponenata, smanje prometne nezgode i drugi poremećaji prometa te smanje uporabne brzine (tzv. spore vožnje), a iznad svega uštedi u troškovima radova na održavanju i remontu [5].

Mjerni sustavi za nadgledanje i mjerenje raznih parametara stanja geometrije kolosijeka postoje već nekoliko desetljeća i danas su to već četvrte ili pete generacije. Većinom primjenjuju najnovije tehnike beskontaktnog optičkoelektroničkog mjerenja i beskontaktnog inercijalnog mjerenja umjesto tradicionalnih, danas zastarjelih tehnika "kontaktnog" mjerenja pomoću mehaničkih uređaja koji su bili u stalnom kontaktu s glavom tračnice i time podložni trošenju i posljedičnom postupnom gubitku točnosti, kao, naravno, i čestim oštećenjima uslijed dinamičkih udara i vibracija. Posljednjih je godina mjerenje geometrije kolosijeka također predstavljalo predmet normizacije od strane CEN-a (*European Committee for Standardization*), tj. Europske komisije za normizaciju. Komisija za kolosijek TC 256 (Radna grupa 28) pripremila je tijekom 2008. europsku normu EN 13848 pod nazivom "Oprema za željeznice - Kolosijek – Kvaliteta geometrije kolosijeka". Ta norma uključuje nekoliko aspekata koji se tiču karakterizacije geometrije kolosijeka i mjernih uređaja. Parametri stanja prema toj normi uključuju:

Tablica 2. Principi i tehnike za mjerenje parametara geometrije kolosijeka

Principi i tehnike mjerenja Parametri geometrije kolosijeka	Principi			Tehnike	
	Direktno mjerenje	Inercijalno mjerenje	Mjerenje "strelice" tetive	Kontaktno	Beskontaktno
Širina kolosijeka	✓			✓	✓
Uzdužni (vertikalni) profil ("stabilnost")		✓	✓	✓	✓
Horizontalni (vertikalni) profil		✓	✓	✓	✓
Bočno nadvišenje		✓			
Vitoperenje	✓	✓		✓	✓

- širinu kolosijeka,
- uzdužni (vertikalni) profil – vertikalnu geometriju kolosijeka (stabilnost),
- horizontalni profil – horizontalnu geometriju kolosijeka,
- bočno nadvišenje kolosijeka,
- vitoperenje kolosijeka.

Za svaki parametar usvojena je odgovarajuća mjerna metoda koja uključuje mjerne principe i dopuštene tehnike. Tablica 2. prikazuje trenutačno raspoložive principe i tehnike za svaki od parametara.

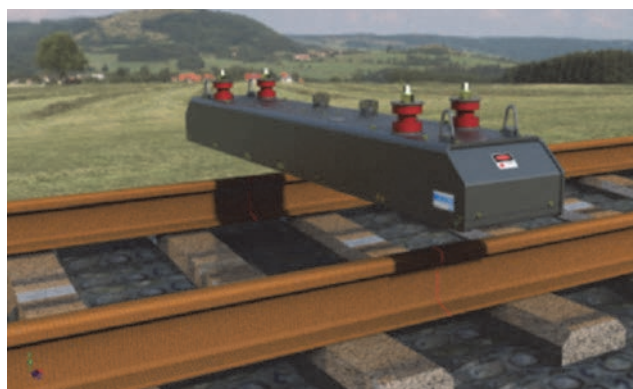
"Kontaktne" sustavi su neprikladni za mjerenja pri velikim brzinama kretanja i također zahtijevaju stalno nadgledanje i kontroliranje, kalibraciju, popravke i zamjene komponenti (naročito mjernih kotačića) uslijed njihovog trošenja, kao direktne posljedice kontakta s tračnicama. Kalibracija se mora obaviti prije (a često i više puta tijekom) svake mjerne kampanje (npr. cjelodnevnog mjerenja). Preciznost mjerenja također je ovisna, tj. ugrožena trošenjem mjernih kotačića, jer nepravilnosti na kotačićima, koje se stvaraju i nagomilavaju, proizvode nerealna/pogrešna mjerenja i posljedično "lažne defekte", pa su aktivnosti na održavanju često potrebne. Također, tijekom prelaska mjernog vozila preko skretnica i/ili križišta, kao i željezničko-cestovnih prijelaza, u nekim slučajevima je čak i nužno podići mjerne osovine s mjernim kotačićima kako bi se izbjegla njihova oštećenja. Za dijelove kolosijeka s velikim trošenjem tračnice također se vrlo često događa da se neke vrijednosti mjerenja "izgube", tj. da se na tim mjestima mjerenja ne mogu obaviti.

Mjerni sustavi zasnovani na inercijalnom principu imaju performanse striktno zavisne od brzine kretanja mjernog vozila. U općem slučaju, inercijalni sustavi često nailaze na probleme kada se mjerenja izvode pri niskim brzinama kretanja mjernog vozila, kao i u slučajevima naglih ubrzanja ili usporenja mjernog vozila (npr. tijekom prolaska kroz stanice ili preko skretnica ili križišta), koji mogu proizvesti ili gubitak mjerenja (mjernih vrijednosti) ili pogrešna/lažna mjerenja ili oštećenja. Osim toga, algoritmi za procesiranje inercijalnih mjernih vrijednosti uključuju iznimno složene filtre koji zahtijevaju veoma visoke frekvencije, tj. veoma mali mjerni korak, i to s vrlo visokom točnošću, što nije uvijek lako dostižno [6, 7].

Laserski beskontaktni sustavi bazirani na mjerenju "strelice" tetive lišeni su spomenutih nedostataka te imaju sljedeće konkretne prednosti u odnosu na prethodna dva sustava u smislu da su sposobni izmjeriti:

- pri izuzetno velikim brzinama (jer ni jedan njihov dio nije u kontaktu s tračnicom niti s bilo kojim drugim objektom, kao i zbog toga što ne sadrže ni jednu pokretnu komponentu),
- pri izuzetno niskim brzinama (sve do 0 km/h),
- sve parametre pri istoj brzini,
- bez ikakvih učinaka/posljedica uslijed nagle promjene dinamičkog ponašanja mjernog vozila (ubrzanja/usporenja), za razliku od inercijalnih sustava,
- bez mehaničkih elemenata podložnim trošenju, tj. s izuzetno visokom vrijednošću MTBF-a (Mean Time Between Failures – srednje vrijeme između kvarova), te stoga bez ikakve potrebe za čestim (pre)kalibracijama, za razliku od kontaktnih sustava,
- istodobno i profil tračnice i geometriju kolosijeka i na potpuno integriran način.

Najsuvremeniji sustavi za mjerenje geometrije kolosijeka (slika 3.) u potpunosti su integrirani sa sustavom za mjerenje profila tračnice što omogućava ekstrakciju parametara kolosijeka iz mjerenja profila tračnica.



Slika 3. Uređaj za mjerenje profila tračnice i geometrije kolosijeka

Mjerenja se provode uz pomoć lasera, specijalnih senzora i kamera na svakih 25 cm i pri svakoj brzini mjernog vozila. Tada



Slika 4. Specijalizirana mjerna vozila [8]

softverskom analizom, sustav izračunava širinu kolosijeka iz izmjerenih vrijednosti profila tračnica. Profil tračnice i "gauge point" (14 mm ispod vozne površine) služe kao osnova za mjerenje i proračunavanje uzdužnog profila kolosijeka, kao i horizontalne geometrije kolosijeka primjenom tehnike mjerenja "strelice" tetive. Neka od specijaliziranih mjernih vozila prikazana su na slici 4.

Inercijalni sustav, koji se bazično sastoji od inklinometra (koji mjeri nagib) kao i odgovarajućih "rate senzora", usvojen je za mjerenje bočnog nadvišenja, iz kojeg se izračunava i vitoperenje. Istrošenost tračnice se izračunava usporedbom izmjerenog i nominalnog profila (profila tračnice u novom stanju), gdje se ovaj drugi uzima iz baze podataka poznatih profila tračnica, dok se iz mjerenja unutrašnjih dijelova profila lijeve i desne tračnice izračunava tzv. ekvivalentna koničnost između kotača i tračnice u točki kontakta. Integrirano mjerenje geometrije kolosijeka i profila tračnica omogućava analize tipa unakrsnog ispitivanja i koreliranja izmjerenih vrijednosti na kolosijeku (pogotovo uz pomoć RI-AMS), što omogućava detaljnu analizu i iznalaženje bitnih uzroka raznih problema i oštećenja.

3.2. Mjerenje naboranosti tračnica

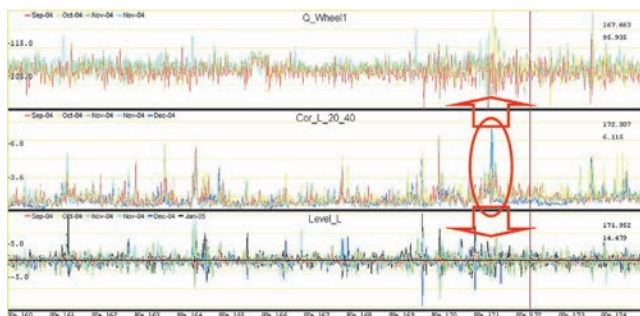
Za naboranost tračnica je poznato da znatno povećava dinamičke sile na kontaktu kotač/tračnica, što dalje može ozbiljno pogoršati vertikalnu geometriju kolosijeka, naročito u području većih valnih dužina. Te dvije pojave zajedno mogu dalje drastično skratiti uporabni vijek svih elemenata kolosijeka. Naboranost tračnica može također izazvati i ozbiljna površinska oštećenja na gornjoj površini glave tračnice, kao i razna unutrašnja oštećenja tračnica, napuknuća

betonskih pragova ili labavljenje pričvršćenja kod drvenih pragova te drobljenja zastornog materijala. Postoje za to dva razloga:

- povećanja dinamičkih sila,
- učestalo podbijanje inicirano ponavljajućim problemima s geometrijom kolosijeka većih valnih dužina, a konačno i veoma opasna (i veoma skupa, kada se moraju sanirati) oštećenja donjeg ustroja.

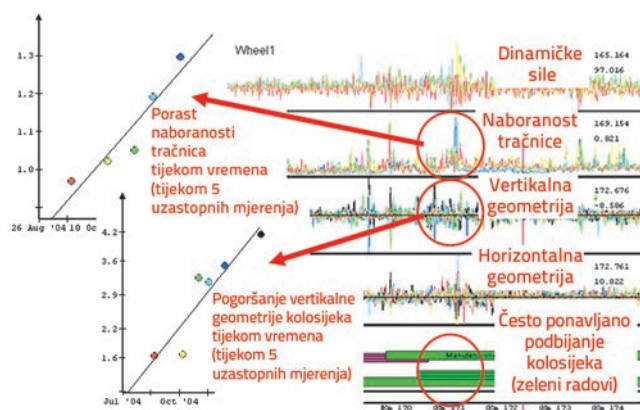
Ova kauzalna veza između naboranosti (kao suštinskog uzroka), dinamičkih sila i geometrije kolosijeka (kao jedne od posljedica) može se najbolje vidjeti na osnovi korespondentnih mjerenja, kao na primjer onih učinjenih u Italiji i prezentiranih kroz RI-AMS sustav (slika 5). Ustvari, na istoj slici može se uočiti ne samo jedno već nekoliko takvih mjesta na kolosijeku, a imajući mogućnost njihove odlične vizualizacije, na očigledan način pogodan za korisnike kao u RI-AMS sustavu, to više što i ne zahtijeva preveliko znanje korisnika da bi se uočile uzročno/posljedične veze između njih.

Međutim, ono što je možda i najinteresantnije jest to da ako se bolje pogleda primjerice označena lokacija (slika 5.) i izračuna progresija naboranosti tijekom vremena i njenih posljedica, progresija dinamičkih sila i vertikalne geometrije kolosijeka može se primijetiti da oni imaju gotovo identičan tijek. Uključi li se zatim u to razmatranje i vizualizacija povijesti radova (slika 6.), odmah se može vidjeti da zbog učestalog i ponavljajućeg problema s geometrijom kolosijeka (a koja je zapravo samo potaknuta porastom naboranosti tračnica), ova lokacija je uporno i često (više puta, točnije četiri puta) podbijana, a ipak, i usprkos tome, problem se s geometrijom kolosijeka i dalje ponovno vraćao i ponavljao (ustvari samo sve više pogoršavao).



Slika 5. Posljedice naboranosti tračnica

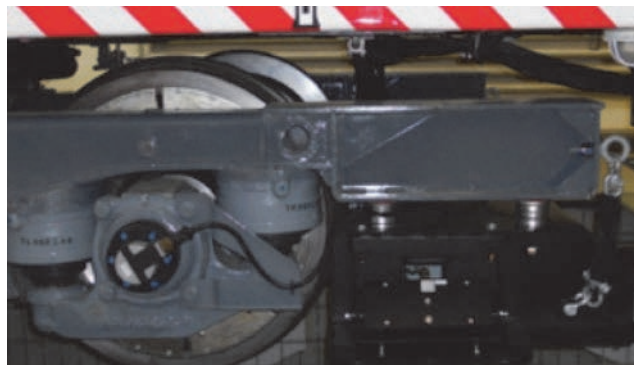
Sve se je to i događalo isključivo zato što je postojao posve drugi, ali bitan razlog, a to je postojanje i sve veći rast, tj. pogoršanje naboranosti tračnica, na koju nitko nije obraćao pozornost, a samim tim niti otklanjao (brušenjem tračnica). I tako, umjesto uporno ponavljano podbijaња kolosijeka, ovoj dionici je nadasve bilo potrebno brušenje tračnica, a tek onda podbijaње, i tada bi ponašanje te dionice bilo mnogo stabilnije u smislu geometrije kolosijeka i u smislu naboranosti tračnica, a učinci podbijaња dugotrajniji, slika 6. U ovom slučaju šteta je samo utoliko što za ovu dionicu nije bilo informacija o postojanju i porastu površinskih i unutrašnjih oštećenja tračnica. Da je bilo, te bi informacije najvjerojatnije još dodatno poduprle ovu priču i potvrdile zaključak da je zaista naboranost tračnica na ovoj lokaciji prouzročila višestruke štetne posljedice. Najteža je od njih, nažalost, bila i najmanje vidljiva i dokaziva, a to je povećanje zamora kod svih komponenti kolosijeka na toj lokaciji, uzrokovanih povećanim dinamičkim silama, a što je ozbiljno skratilo njihov vijek trajanja i tako također ozbiljno povećalo troškove održavanja i remonta.



Slika 6. Korespondirajuće progresije naboranosti tračnica i vertikalne geometrije kolosijeka u vremenu i višestruko (nepotrebno) ponavljano podbijaње kolosijeka

Zahvaljujući sve većoj pozornosti i važnosti u vezi s naboranosti tračnica, počeli su se razvijati i visokoprecizni sustavi za mjerenje naboranosti tračnica (slika 7.). Time se zapravo omogućilo željeznicama da izmjere i nadgledaju postojanje i porast naboranosti, pa bi se ti sustavi dalje, uz pomoć

alata poput RI-AMS sustava, mogli u potpunosti korelirati s ostalim mjernim podacima kako bi se izvukle one bitne, a često skrivene, međusobne veze i uvjetovanosti, te na kraju identificirali pravi uzroci problema i odredile najprimjerenije mjere sanacije.



Slika 7. Sustav za mjerenje naboranosti tračnica

Sustav za mjerenje naboranosti tračnica zasnovan je na laserskoj, optičkoj beskontaktnoj tehnologiji, koja koristi izuzetno brze digitalne kamere i laserske senzore. Korak uzorkovanja je obično 5 mm, a mjerna brzina od 0 do 120 km/h. Tablica 3. daje prikaz mjernih parametara i njihovih respektivnih točnosti.

Tablica 3. Mjerni parametri sustava za mjerenje naboranosti tračnica i njihove respektivne točnosti

Parametar: naboranost tračnica	Točnost / Preciznost
kratke valne dužine (30 mm – 100 mm)	± 20 μm
srednje valne dužine (100 mm – 300 mm)	± 50 μm
duge valne dužine (300 mm – 1000 mm)	± 200 μm

3.3. Sustavi za nadzor i automatsku detekciju površinskih oštećenja na kolosijeku

Ovo je jedno od najnovijih područja u domeni mjerenja stanja elemenata željezničke infrastrukture, i u tom području postoji veoma mali broj sustava na tržištu kao i tvrtki koje ih proizvode. Nadgledanje površinskih oštećenja kolosijeka primjenom *Vision* (ili *Imaging*) tehnologije uključuje sljedeća tri pristupa:

- nadzor površinskih oštećenja kolosijeka (eng. *Track Surface and Right of Way Inspection*) (slike 8. - 12.),
- nadzor tračnice i njenih komponenti, npr. zazora tračničkih spojeva i tzv. *head-checkinga* (eng. *Rail Components (e.g. joints, jointing gap) and Rail Surface (e.g. head checks) Inspection* (slike 13. - 15.) (eng. *head checks* su sitne pukotine na površini glave tračnice u predjelu kontakta s kotačem, a koje se razvijaju uvijek u dominantnom pravcu prometa i mogu izazvati lomove tračnica s katastrofalnim

posljedicama, kao u slučaju Hatfield nesreće u Engleskoj, 2000. godine),

- mjerenje površine kolosijeka (eng. *Track Surface Measurement Subsystem*, slika 16.).

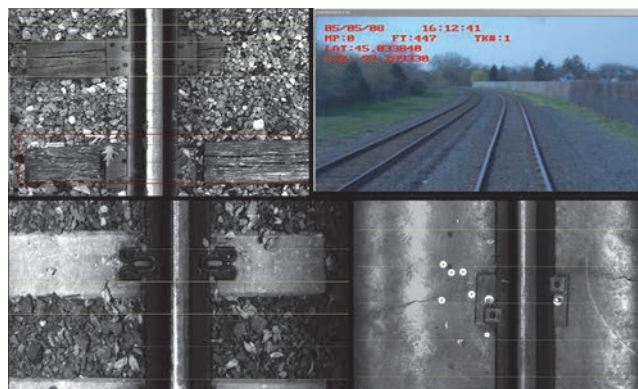
Nadzor površinskih oštećenja kolosijeka pruža inovativne funkcije za nadgledanje stanja kolosijeka u realnom vremenu i automatsko prepoznavanje i kategorizaciju oštećenja. Tradicionalni sustavi video-nadzora površine tračnice podrazumijevali su osposobljeno osoblje koje bi ručno analiziralo svako provedeno snimanje. To je dakako bilo vrlo zamorno i oduzimalo je mnogo vremena, a potencijalno i opasno jer su rezultati bili striktno zavisni od sposobnosti analizatora da uoči i prepozna moguće anomalije i kritične situacije. Nasuprot tome, vision sustavi za detekciju površinskih oštećenja kolosijeka automatski detektiraju i prepoznaju anomalije i tako znatno ubrzavaju proces nadzora jer skraćuju vrijeme analize snimaka, a također i povećavaju pouzdanost procesa detekcije (slika 8.) [9].

Nadzor površinskih oštećenja kolosijeka primijenjuje se za:

- detekciju tipa pragova i nestabilnih pragova (pragova koji se pomiču tijekom prolaska vlakova),
- detekciju tipova pričvrsnog pribora i njihovog stanja, kao i detekciju onog pričvrsnog pribora koji se nalazi u nepropisnom položaju, npr. neželjenom kontaktu s bandažom kotača,
- površinska oštećenja tračnica:
 - oštećenja od proklizavanja pogonskih kotača lokomotiva
 - lomovi tračnica
 - ugnječenja glave tračnice
 - pukotine tračnica (debljine > 0,7 mm),
- stanje podložnih pločica,
- procjenu zazora kod sastava tračnica,
- identifikaciju lokacija s *Head Checks* oštećenjima,
- provjere nepravilnosti zastorne prizme, prisutnost vegetacije, npr. korova, stanje magnetna signalno-sigurnosnih uređaja, propusta, brojača osovina, AFI i ETCS baliza, itd.,
- detaljnu analizu:
 - tragova utisnuća zrna zastora na površini tračnice
 - nedostajućih tirfon vijaka

- odronjenih dijelova bankine
- ispalih ili pogrešno postavljenih elastičnih podloški
- položaja i razmak sprava za sprečavanje pomaka tračnica.

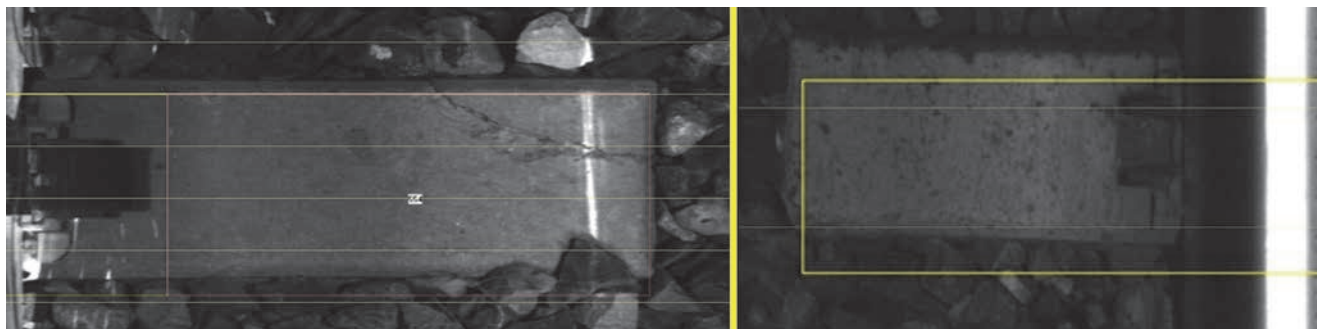
Nadzor površinskih oštećenja kolosijeka zasnovan je na beskontaktnoj optičkoj tehnologiji koja koristi kamere velikih brzina (eng. *high-speed line-scan cameras*) za prikupljanje snimaka o kolosijeku. Moćni algoritmi za obradu snimki identificiraju i klasificiraju oštećenja prema njihovim karakteristikama i/ili njihovoj poziciji na/u kolosijeku. Sustav selektira snimke tračnica i kolosijeka u realnom vremenu i identificira njihov položaj koristeći informacije s hodometra. Dodatna obrada (post-processing) analizira dalje svaku snimku kako bi automatski locirao i klasificirao oštećenja prema njihovom tipu, veličini, ozbiljnosti, poziciji, itd., slike 8. do 12.



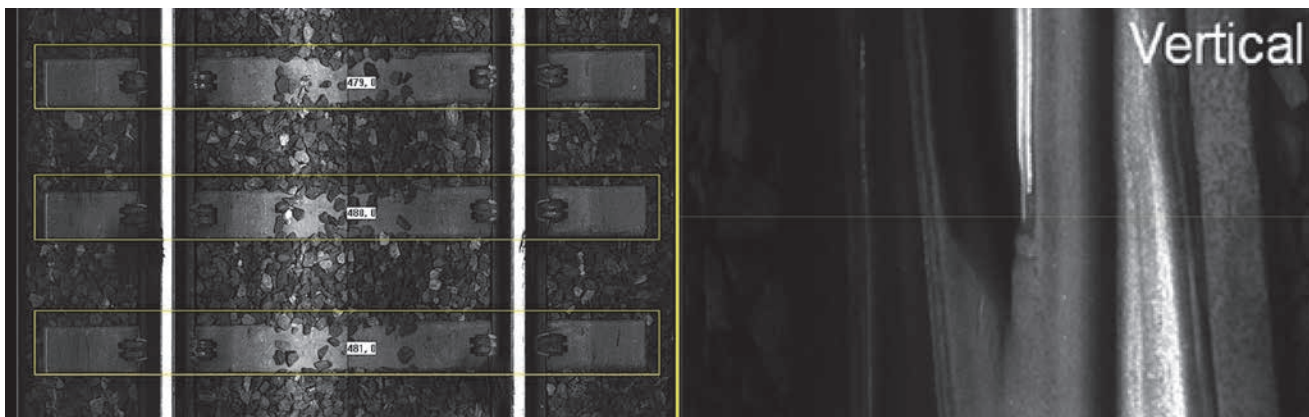
Slika 8. Nadzor površinskih oštećenja kolosijeka – proces i analize [10]



Slika 9. Nadzor površinskih oštećenja kolosijeka - detekcija defekata (nedostajući klinovi) [10]



Slika 10. Nadzor površinskih oštećenja kolosijeka - naprsli prag (lijevo), nedostajući pričvrсни pribor (desno) [10]



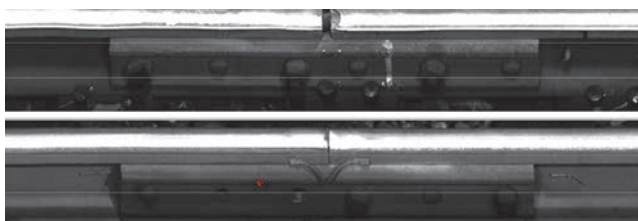
Slika 12. Sustav za nadzor površinskih oštećenja kolosijeka – provjera stanja pragova (lijevo) i elemenata skretnica i srčišta (desno) [10]



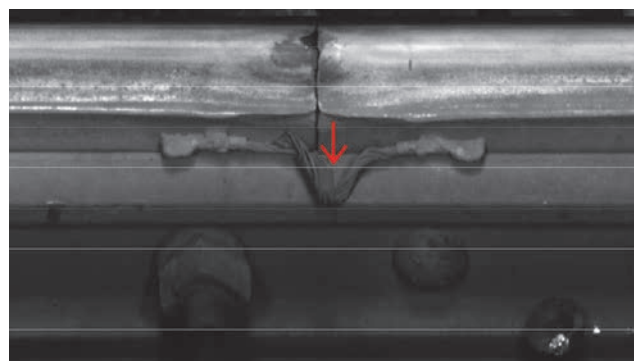
Slika 11. Sustav za nadzor površinskih oštećenja kolosijeka – detekcija "prskavaca" (zablačenja) i nestabilnih pragova

Nadzor tračnica, sastava tračnica i *Head Checks* oštećenja sastoji se od kamere velikih brzina i velike rezolucije, koje omogućavaju automatsku detekciju i izuzetno precizno mjerenje tračnice i njenih komponenti, širine zazora sastava tračnica i površine glave tračnice, npr. tzv. *Head Checks* oštećenja (u smislu dužine, širine, kuta pružanja i grupiranja pukotina koje čine ovu vrstu oštećenja), i sve to pri izuzetno velikim (mjernim) brzinama kretanja vozila, koje dostižu i 250 km/h.

Veličina/širina zazora spoja tračnica i zavarenost vrlo su važni jer direktno određuju povećanje dinamičkih sila na kontaktu kotač/tračnica na tim mjestima, a to opet direktno utječe na trajnost svih komponenta kolosijeka koje se nalaze ispod njih i u njihovom najbližem okruženju, slike 13. i 14.



Slika 13. Nadzor tračnice i njenih komponenti – utučenost glave tračnice i nedostajući vijci [11]

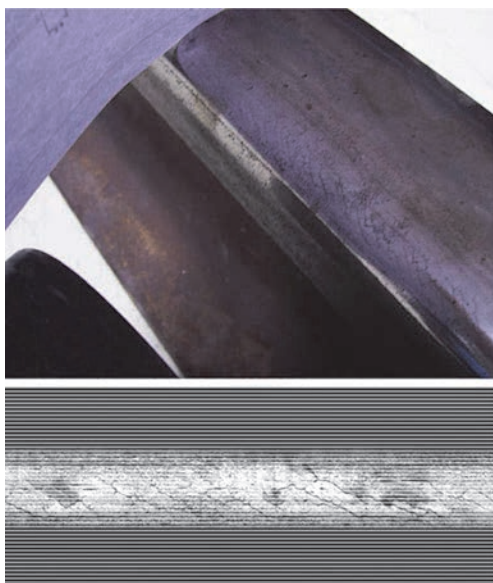


Slika 14. Nadzor tračnice i njenih komponenti – napuknuće vezice [11]

Head Checks oštećenja na tračnicama (također u praksi često nazivana još i *Rolling contact fatigue* – RCF, tj. zamor materijala uslijed kotrljanja kotača po tračnici, ili *Gauge corner cracking* - GCC, tj. pucanje ruba glave tračnice, slika 15.), izazivaju sve veću pozornost kod svih željeznica širom svijeta jer su takva oštećenja naglo, i često drastično porasla, kako je primijećeno posljednjih godina. RCF oštećenja, kao *Head Checking*, ako se zapostave predugo, mogu se razviti veoma brzo i prerasti u lomove tračnica često s fatalnim posljedicama, kao što se moglo vidjeti na primjeru tragične nesreće u mjestu Hatfield, Hertfordshire, Engleska, 17. listopada 2000. Tada je vlak *Great North Eastern Railway Intercity* iskočio iz tračnica pri brzini od 115 milja na sat (185 km/h) južno od kolodvora *Hatfield* i četiri su osobe izgubile život, a još sedamdeset ih je bilo povrijeđeno. Kada je preliminarna istraga pronašla da se glava tračnice bukvalno raspala, i to u mnogo komada u trenutku dok je vlak prelazio preko nje, i da je najvjerojatniji uzrok bio RCF/GCC defekt (mikroskopske pukotine na voznoj površini glave tračnice), tada je došlo do privremenog ograničenja brzine na mnogim dijelovima britanske željezničke mreže.

Za mjerenje površine kolosijeka često se upotrebljavaju tzv. *area scan* kamere integrirane sa setom laserskih glava radi preciznog mjerenja pozicije različitih elemenata u kolosijeku, s ciljem provedbe sljedećih provjera koje zahtijevaju procesiranje visokog intenziteta:

- nadzor komponenti skretnica i križišta,
- detekcija nepravilnosti zastora,
- provjera vegetacije,
- mjerenje razmaka između različitih komponenti pričvrstnog pribora,
- provjera stanja magneta, brojača osovina, AFI uređaja i ETCS baliza signalno-sigurnosnih uređaja.



Slika 15. Head Checks oštećenje: stvarna tračnica viđena ljudskim okom (gore), ista tračnica viđena kroz mjerni sustav (dolje)

Da bi se provela zahtijevana detekcija i mjerenje, sustav trodimenzionalno laserski skenira čitav kolosijek ispod sebe sa svim objektima koji se u njemu nalaze (namjerno ili slučajno) i prikazuje rezultate skeniranja u obliku 3D modela visina, slika 16. Kod 2D bitmap modela visina intenzitet boje daje predodžbu visine, tj. treće dimenzije. Specijalno razvijeni program omogućava vizualizaciju tih snimaka i njihovo puštanje u videoformatu, već po želji korisnika. Izuzetno inteligentna analiza međutim dolazi tek poslije vizualizacije. Ustvari, čitav sustav uopće ne zahtijeva niti 2D niti 3D vizualizaciju, tj. ručnu obradu/gledanje snimaka, već automatski provodi sve detekcije, identifikacije, mjerenja i ostale obrade primjenom visokosofisticiranih metoda prepoznavanja (*pattern-recognition*) baziranih na algoritmima neuronskih mreža [12].

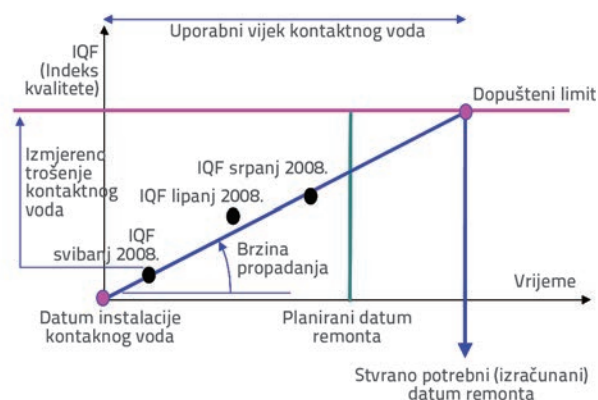


Slika 16. Sustav za mjerenje površine kolosijeka – 3D interpretacija, mjerenje i detekcija

3.4. Mjerenja kontaktne mreže i kontaktnog voda

Radovi na održavanju i remontu kontaktne mreže i kontaktnog voda obično se izvode kad je zatvorena pruga (dakle, bez prometa) jer je potrebna opsežna mehanizacija i brojno osoblje, što jasno upućuje na visoku cijenu tih radova. Radi što bolje pripreme i optimizacije tih radova, a s obzirom na to da troškove treba smanjiti na najmanju moguću mjeru, iznimno je važno imati preciznu sliku o statusu geometrije i trošenju kontaktnog voda. Nasuprot ručnom mjerenju trošenja kontaktnog voda pomoću razmjernika i kalipera koji su i neučinkoviti i podložni pogreškama, suvremeni su mjerni sustavi bazirani na laserskoj tehnologiji i CCD (eng. *charge-coupled device*) kamerama, omogućavajući automatsko beskontaktno mjerenje i geometrije i trošenja kontaktnog voda visoke preciznosti, i to i pri malim i pri velikim brzinama kretanja mjernog vozila [13].

Podaci prikupljeni sustavima za mjerenje parametara kontaktne mreže omogućavaju izračunati i arhivirati različite parametre stanja kontaktne mreže, kao što su primjerice visina, poligonacija, uzdužni nagib, debljina (trošenje) kontaktnog voda, kao i različite vrste indeksa kvalitete. Parametri koji se odnose na stupanj i brzinu trošenja kontaktnog voda od presudne su važnosti za identifikaciju problematičnih mjesta i mogu u vrlo kratkom roku dovesti i do pucanja/prekida kontaktnog voda, koji uvijek izaziva goleme poremećaje u prometu, a samim tim i financijske štete za željeznicu. Osim toga, analiza povijesne baze mjerenja vrijednosti trošenja kontaktnog voda može uspješno poslužiti za optimizaciju i objektivno određivanje vremena remonta/zamjene kontaktnog voda zasnovanog na modeliranju propadanja indeksa kvalitete kontaktnog voda (IQF), kao što je prikazano na slici 17.



Slika 17. Promjena vrijednosti indeksa kvalitete kontaktnog voda (IQF)

U slučajevima kada postoje precizni i pouzdani podaci i o kontaktnoj mreži i o kolosijeku, a koji su nažalost čak i u današnje vrijeme poprilično rijetki, može se provesti unakrsno istraživanje i korelacija različitih parametara kako bi se identificirali stvarni i glavni problemi oštećenja kontaktne

mreže, među kojima naročito onih uzrokovanih neprimjerenom geometrijom kolosijeka, prije nego kumulativnim utjecajem prometa. Moderni beskontaktni sustavi za mjerenje stanja kontaktne mreže (slika 18.) obično obavljaju višestruka integrirana mjerenja ne samo svih aspekata geometrije kontaktnog voda, nego i njegovog trošenja (preciznost mjerenja trošenja 0,1 milimetra), pri svakoj brzini (tj. od 0 do 300 km/h) i u statičkim i dinamičkim uvjetima. Svi parametri stanja kontaktne mreže mjere se (tj. referenciraju) u odnosu na os kolosijeka, preračunavajući pri tom kompenzacije zbog kinematičkog/dinamičkog kretanja vozila, uzimajući u obzir (tj. kompenzirajući):

- bočne pomake mjernih uređaja (tj. mjerne ravnine) u krivinama,
- kotrljanje i vertikalno pomicanje vozila,



Slika 18. Sustav za mjerenje parametara stanja kontaktne mreže

4. Zaključak

Pristup *Condition-based* podrazumijeva da se odluke o održavanju i remontu donose na osnovi stvarnog stanja objekata i načina na koji se to stanje mijenja (kroz vrijeme, ili još bolje, u odnosu na način i količinu uporabe), što daje "ponašanje objekata", a ne na osnovi unaprijed definiranih

ciklusa održavanja i remonta. Očigledno, *condition-based* pristup podrazumijeva također da se stanje, tj. ponašanje objekata u svim mogućim aspektima može izmjeriti i pomoću takvih mjerenja primjereno razumjeti.

Istodobno, "misija" *condition-based* pristupa jest da se učini pomak i promjena sa sadašnjeg pristupa upravljanju radovima na održavanju i remontu - koji je prije svega korektivan, kruto propisan i cikličan - prema onome kako bi trebao izgledati u budućnosti, a to je preventivni i što je moguće više prediktivni, tj. prognostički.

Ovaj pomak moguće je ostvariti povećanjem opsega mjerenja i nadgledanja stanja objekata kao i omogućavanjem mnogo boljega razumijevanja stanja objekata (i to sa što većeg broja aspekata) i njegove promjene tijekom vremena (tj. "ponašanja objekata"). Tada se upotrebom naprednih sustava za upravljanje objektima / dobrima željezničke infrastrukture (*Railway Infrastructure Asset Management Systems - RI-AMS*) mogu učinkovito obraditi goleme količine informacija koje pristižu od mjerenja stanja objekata, a to je vrlo važni napredak u modeliranju ponašanja objekata koji otvara put prema njegovom predviđanju. Ovo konačno i posljedično daje mogućnost proračuna momenta kada će ponašanje objekata doseći i/ili prevladati dopuštene granice, što zapravo omogućava prognostičko-preventivno održavanje. Uz takvu mogućnost količina je planiranog prognostičko-preventivnog održavanja povećana na štetu korektivnoga i to je upravo ono gdje se i čime se ostvaruju velike uštede.

Sve ovo može se smatrati posebno važnim kad je riječ o željeznicama južne i istočne Europe. Naime, kvaliteta je njihove infrastrukture često ispod željene, što samo znači da će sigurno zahtijevati znatnu količinu radova na održavanju i remontu u godinama koje dolaze. Opisani objektivni mjerni sustavi, a nadasve metode i sustavi za analizu stanja, bili bi zato od iznimne koristi, jer bi se njihovom primjenom mogla učinkovito odrediti pravila prednosti potrebnih radova i optimalni planovi radova, u kratkoročnom i u dugoročnom smislu.

LITERATURA

- [1] Pace, P., Jovanovic, S.: Using measurement data for decision support, *International Railway Journal*, July 2011 issue, Volume 51, Issue 7, p. 37-39.
- [2] Gianessi, S., Pascoschi, G.: "ARCHIMEDE - The first European diagnostic train for global monitoring of railway infrastructure", WCCR2003 World Congress on Railway Research, Edinburgh, U.K., 2003.
- [3] Jovanovic, S.: Kostenreduktion bei der Oberbauinstandhaltung durch ECOTRACK, *Der Eisenbahn Ingenieur (EI)*, Germany, May 2003 issue
- [4] Jovanovic, S.: Condition-based decision making minimizes track costs, *Railway Gazette International*, UK, May 2003 issue
- [5] Jovanovic, S., Zaalberg, H.: ECOTRACK: Two years of experience, *Rail International - Schienen der Welt*, April 2000.
- [6] Aurisicchio, G.: Advanced Diagnostic of the High-Speed Railway Infrastructure: Peculiar Characteristics, UIC 7th World Congress on High Speed Rail, Beijing 2010
- [7] Aurisicchio, G., et al.: A fuzzy logic based filter for spike-noise detection in railways monitoring systems, *IEEE International Workshop on Soft Computing in Industrial Applications*, Binghamton University, Binghamton, New York, June 23-25, 2003
- [8] Maffei, G., et al.: ARCHIMEDE The first European Diagnostic Train for global monitoring of railway infrastructure, 8th UIC "USER-PRODUCER INTERACTION PROGRAMME on Track Technology", Tehran, 9th December 2003

- [9] Aurisicchio, G., et al.: Infrastructure Monitoring Systems for Improved Operation and Safety in CVRD, 8th International Heavy Haul Conference, June 2005, Rio de Janeiro, Brazil.
- [10] Stevens, J.: Onboard monitoring aids track maintenance, International Railway Journal, May 2013 issue (Volume 53, Issue 5), p. 44-45, ISSN 0744-5326
- [11] Stevens, J., Brown, W., Maldony, M.: Unattended vehicle/ track interaction monitors – applied approaches for improving track safety and maintenance planning, AusRAIL PLUS 2009 Conference, 17–19 November 2009, Adelaide, Australia
- [12] Aurisicchio, G., et al.: ARCHIMEDE The first European Diagnostic Train for global monitoring of railway infrastructure, 8^o UIC "USER-PRODUCER INTERACTION PROGRAMME on Track Technology", Tehran, 9th December 2003
- [13] Maffei, G., et al.: A global approach for condition monitoring to optimize maintenance and renewal planning, IQPC International Track Maintenance i Renewal conference, Amsterdam, 19th February 2004.
- [14] CEN: EN 13848-1:2003 - Railway applications - Track - Track geometry quality - Part1: Characterization of track geometry
- [15] CEN: EN 13848-2:2006 - Railway applications - Track - Track geometry quality - Measuring systems - Track recording vehicles