

Primljen / Received: 29.8.2024.
Ispravljen / Corrected: 28.11.2024.
Prihvaćen / Accepted: 11.12.2024.
Dostupno online / Available online: 10.2.2025.

Utjecaj klimatskih promjena na elemente gornjeg ustroja kolosiječne konstrukcije

Autori:



Dr.sc. **Katarina Vranešić**, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
katarina.vranesic@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Ivo Haladin**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
ivo.haladin@grad.unizg.hr



Krešimir Burnać, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
kresimir.burnac@grad.unizg.hr

Pregledni rad

Katarina Vranešić, Ivo Haladin, Krešimir Burnać

Utjecaj klimatskih promjena na elemente gornjeg ustroja kolosiječne konstrukcije

Vremenski uvjeti imaju velik utjecaj na prometne sustave, pogotovo na sigurnost, mobilnost, pristupačnost, ekonomsku učinkovitost te infrastrukturu. Trenutačno je oko 27 % cestovne i željezničke infrastrukture na cijelome svijetu izloženo opasnosti od barem jedne vremenske nepogode. To kojim će klimatskim promjenama željeznička pruga biti izložena ovisi ponajprije o njezinoj lokaciji. Klimatske promjene mogu ugroziti tijek željezničkog prometa ili ga u cijelosti prekinuti. U ovome je radu analiziran utjecaj niskih i visokih temperatura, olujnih naleta vjetera, snijega i leda te poplava na elemente gornjeg ustroja kolosiječne konstrukcije sa zastornom prizmom i na kontaktnu mrežu elektrificiranih pruga. U radu su također navedene neke od mjera kojima se može djelovati na smanjenje štetnih posljedica koje će klimatske promjene uzrokovati na kolosijeku te je objašnjena važnost redovitog monitoringa kolosijeka, primjene novih metoda monitoringa te kontrole stanja kolosijeka nakon ekstremnih vremenskih uvjeta.

Ključne riječi:

željeznička infrastruktura, kolosijek sa zastornom prizmom, klimatske promjene, visoke temperature, poplave, monitoring kolosijeka

Subject review

Katarina Vranešić, Ivo Haladin, Krešimir Burnać

Influence of climate changes on railway superstructure

Weather conditions significantly impact transportation systems, particularly in terms of safety, mobility, accessibility, economic efficiency, and infrastructure resilience. Currently, approximately 27 % of the world's road and rail infrastructure is exposed to at least one type of damaging weather condition. The extent to which rail infrastructure is affected by climate change largely depends on its geographic location. Climate change poses a serious risk to rail transport, with the potential to disrupt operations or bring them to a complete standstill. This paper examines the effects of extreme weather conditions, including high and low temperatures, strong wind gusts, snow and ice, as well as flooding, on the superstructure of ballasted tracks. It also highlights measures that can mitigate the adverse impacts of climate change on railway infrastructure. Furthermore, it emphasizes the importance of regular track inspections, the adoption of advanced railway monitoring methods, and thorough track condition assessments following extreme weather events.

Key words:

railway infrastructure, ballasted track, climate change, high temperatures, flooding, track monitoring

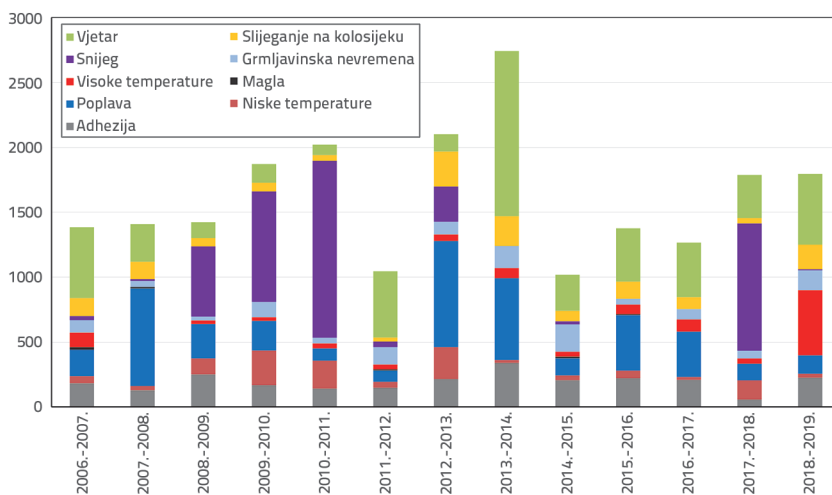
1. Uvod

Od 1850. prosječna globalna temperatura povećala se za 0,76 °C, dok je prosječna temperatura u Europi porasla za gotovo 1 °C [1]. Postojeći modeli klimatskih promjena pokazuju da će se srednja godišnja temperatura nad područjem Europe tijekom 21. stoljeća povećati između 1 °C i 5,5 °C te da će se sve češće pojavljivati ekstremni toplinski valovi [2, 3]. Također, pretpostavlja se da će se godišnja količina oborina povećati na sjeveru, a smanjiti na jugu Europe, dok će se intenzitet dnevnih oborina i vjerojatnost ekstremnih oborina povećati u svim regijama Europe [3]. Očekuje se da će srednja brzina vjetra porasti u sjevernim dijelovima Europe, dok će se smanjiti na Mediteranu, a ekstremne brzine vjetra bit će veće u zapadnoj i središnjoj Europi te u blizini Sjevernog mora [3]. Povećana količina padalina tijekom duljih razdoblja uglavnom će dovesti do fluvijalnih (riječnih) poplava, dok će kraće i intenzivnije oborine izazivati pluvijalne poplave, odnosno poplave urbanih područja, čiji su glavni uzrok ekstremne kišne oborine. Riječne poplave uobičajena su prirodna katastrofa na području Europe te su, zajedno s olujama, rezultirale mnogobrojnim žrtvama i uzrokovale ogromne ekonomske gubitke u posljednja tri desetljeća [4, 5]. Klimatske promjene sve se češće uočavaju i na području Republike Hrvatske, gdje se bilježe trendovi porasta temperature, uz sve češću pojavu najviših dnevnih temperatura iznad 35 °C. U većini dijelova Hrvatske opaža se znatno smanjenje ukupne količine oborina, pri čemu su iznimka istočni ravničarski dijelovi Hrvatske, gdje se ukupna količina padalina u navedenom pedesetogodišnjem razdoblju povećala, i to ponajprije zbog povećanja učestalosti vrlo intenzivnih oborina tijekom jeseni [6]. Znatno se povećava intenzitet i trajanje sušnih razdoblja, a dosadašnje analize pokazuju povećanje nestabilnosti atmosfere, zbog čega raste učestalost ekstremno jakih vjetrova, kratkotrajnih velikih količina oborina po pojedinim lokacijama i grmljavih ekstrema i tuča [6].

Vremenski uvjeti imaju velik utjecaj na prometne sustave, pogotovo na sigurnost, mobilnost, pristupačnost, ekonomsku učinkovitost, ali i na samu infrastrukturu, zbog čega se mora voditi računa o njihovoj održivosti [7, 8]. Prema [9], danas je oko 27 % cestovne i željezničke infrastrukture na cijelome svijetu izloženo opasnosti od barem jedne vremenske nepogode. Globalno očekivani godišnji troškovi održavanja zbog izravne štete uzrokovane vremenskim neprilikama na cestovnim i željezničkim prometnim sustavima kreću se od 3,1 do 22 milijarde američkih dolara, od čega je oko 73 % uzrokovano površinskim i riječnim poplavama [9]. U radu [10] analizirani su troškovi održavanja koje na različitim vrstama

prometa uzrokuju ekstremni vremenski uvjeti u nekoliko zemalja Europe (Ujedinjeno Kraljevstvo, Austrija, Češka Republika, Njemačka, Italija i Švicarska). Analizirana su tri glavna utjecaja: led i snijeg, poplave i kiše te olujna nevremena. Utvrđeno je da 80 % ukupnih godišnjih troškova uzorkuju oštećenja nastala na cestovnoj infrastrukturi, a samo 2,7 % troškovi na željezničkoj infrastrukturi. Ostalih 17,3 % troškova nastaje na ostalim vrstama prometa. Ti će troškovi biti drugačiji u različitim dijelovima Europe jer nisu sve države izložene istim vremenskim nepogodama. Troškovi održavanja cestovne i željezničke infrastrukture zbog oštećenja uzrokovanih visokim temperaturama detaljno su analizirani u radu [11]. Utvrđeno je da je, kada je riječ o djelovanju visokih temperatura, cestovna infrastruktura izložena većemu riziku zbog štetnog utjecaja visokih temperature na asfalt. Prema projekcijama, utvrđeno je da će godišnji troškovi održavanja cestovne i željezničke infrastrukture na području Europske unije i Ujedinjenog Kraljevstva porasti od 0,9 milijardi eura pri globalnome zagrijavanju od 1,5 °C te do 4,8 milijardi eura pri porastu temperature od 4 °C. Cestovna infrastruktura uzrokuje većinu tih troškova: 0,8 milijardi eura pri porastu temperature od 1,5 °C, dok bi za porast temperature od 4 °C taj iznos bio 3,3 milijarde eura [11]. S druge strane, željeznička infrastruktura bilježi manji rast troškova: 0,1 milijardu eura pri porastu temperature od 1,5 °C te 1,5 milijardi eura pri porastu temperature od 4 °C. Međutim, iako se prilikom projektiranja željezničke infrastrukture mora osigurati i njezina otpornost na visoke temperature, ekstremne vrijednosti temperature kakve su prisutne zadnjih godina eksponencijalno povećavaju vjerojatnost izbacivanja kolosijeka, što povećava potrebu za održavanjem [11].

Bez obzira na to što su trenutačno troškovi uzrokovani ekstremnim vremenskim uvjetima niži u željezničkome nego u cestovnom prometu, o štetnim utjecajima klimatskih promjena vrlo je važno voditi računa kada se govori o željezničkome prometu jer on postaje sve važniji oblik prijevoza u svijetu,

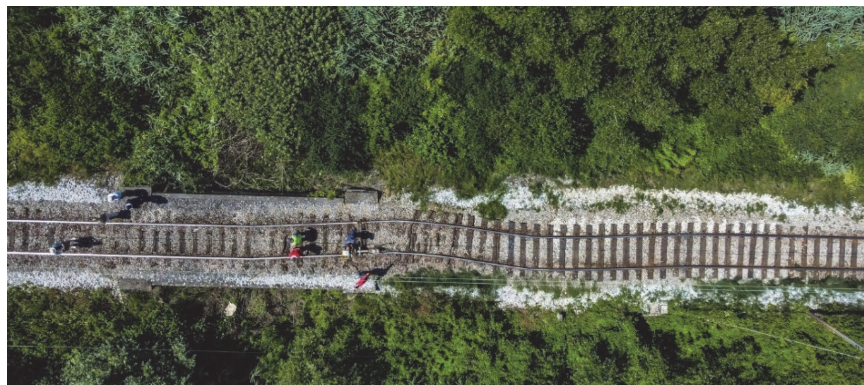


Slika 1. Broj kašnjenja vlakova zabilježen u različitim vremenskim periodima, pri čemu su razlog kašnjenja bili različiti nepovoljni vremenski uvjeti [16]

posebno nakon što je elektrificirana željeznica prepoznata kao uvjerljivo najmanji zagađivač okoliša među svim vrstama javnog prijevoza. Razvoj i korištenje željezničkog prometa sve će se više poticati kako bi se osigurala zaštita okoliša, što je potvrdila i činjenica da je Europski parlament 2021. proglasio Europskom godinom željeznice (engl. *European Year of Rail*) [12]. Elektrificirana željeznica također je ključan faktor u postizanju ciljeva Europskoga zelenog plana (engl. *European Green Deal*), smjernica Europske komisije za održivu ekonomiju, čiji je cilj do 2050. smanjiti emisiju štetnih plinova do 90 % [13].

Vremenski uvjeti imaju negativan utjecaj na željezničku infrastrukturu, a najštetniji učinak na elemente gornjeg ustroja kolosijeka imaju visoke temperature koje mogu izazvati izvijanje tračnica, dok velike količine oborina mogu imati štetan utjecaj na sustave odvodnje [14, 15]. Olujni naleti vjetra negativno djeluju na kontaktnu mrežu kolosiječne konstrukcije, ali i na putničke vlakove velikih brzina te na prazne teretne vagoni. Ekstremni vremenski uvjeti uzrokuju probleme u tijeku prometa, kašnjenje vlakova, a u ekstremnim slučajevima mogu rezultirati i prekidom prometa. Na slici 1. prikazan je broj kašnjenja vlakova zabilježen u vremenskome periodu od 2006. do 2019., uzrokovan različitim vremenskim uvjetima.

Štetan utjecaj klimatskih promjena zabilježen je i na željezničkoj infrastrukturi u Hrvatskoj, gdje su uočeni slučajevi izvijanja tračnica uslijed djelovanja vrlo visokih temperatura (slika 2.).



Slika 2. Stanje dionice željezničke pruge M103 Dugo Selo – Novska nakon djelovanja visokih temperatura [18]



Slika 3. Stanje gornjega pružnog ustroja nakon poplave na dionici željezničke pruge R105 Vinkovci – Drenovci – državna granica [17]

Također, zabilježen je slučaj šumskog požara uzrokovanog iskrenjem vlaka prilikom kočenja. Velike količine oborina koje su 2014. uzrokovale probijanje nasipa rijeke Save i poplave na području Slavonije rezultirale su velikim oštećenjima na gornjemu i donjemu pružnom ustroju, gdje je vodena bujica odnijela dijelove zastorne prizme i nasipnog materijala, a na nekim je mjestima zabilježeno i oštećenje cijeloga pružnog trupa (slika 3.) [17].

Zbog svega navedenog prilikom projektiranja novih željezničkih pruga u obzir se moraju uzeti i klimatske promjene kojima će pruga biti izložena, posebno utjecaji sve viših temperatura, olujnih vjetrova i ekstremnih količina oborina koje dovode do poplava [19]. Na postojećim željezničkim prugama važno je voditi računa o prilagodbi pruge klimatskim promjenama. Većina postojećih pruga izgrađena je prije nekoliko desetljeća kako bi se zadovoljile potrebe društva za mobilnosti te omogućio brži teretni prijevoz. Međutim, zbog sve većih zahtjeva za prijevozom putnika i tereta postojeća željeznička infrastruktura izložena je sve većim prometnim opterećenjima, što u kombinaciji s ekstremnim klimatskim uvjetima izaziva sve veće degradacije [20, 21].

S obzirom na to da je željeznička infrastruktura na području Republike Hrvatske izgrađena u 19. i početkom 20. stoljeća, ona zahtijeva modernizaciju, što je trenutačno jedan od strateških ciljeva Vlade Republike Hrvatske kako bi se povećali razina sigurnosti, brzina prometovanja te prijevozna i propusna moć [18]. Prilikom modernizacije jako je važno uzeti u obzir i klimatske promjene te razmotriti načine kako željeznicu prilagoditi novim klimatskim uvjetima kojima će biti izložena.

U istraživanju opisanome u radu [20] utvrđeno je da su mnogi upravitelji željezničke infrastrukture do sada već prepoznali klimatske promjene kao jedan od problema koji uzrokuje degradaciju kolosiječne konstrukcije te sve više vode računa o štetnim posljedicama koje klimatske promjene mogu izazvati u željezničkome prometu te o mjerama kojima se te štetne posljedice mogu spriječiti ili ublažiti.

Kako bi se skrenula pozornost na opasnosti kojima je tračnička infrastruktura izložena pod utjecajem klimatskih promjena, u ovome je radu analiziran utjecaj vremenskih nepogoda na elemente gornjeg ustroja kolosijeka sa zastornom prizmom. Također, definirane su neke od mjera zaštita kojima se može osigurati smanjenje štetnog utjecaja klimatskih promjena na kolosiječnu konstrukciju. U 4. poglavlju

pokazani su važnost provođenja redovitog praćenja kolosijeka radi održavanja dobrih svojstava kolosijeka te važnost hitnog pregleda kolosijeka nakon ekstremnih vremenskih uvjeta kako bi se detektirala eventualna oštećenja na kolosiječnoj konstrukciji.

2. Utjecaj klimatskih promjena na elemente gornjeg ustroja kolosiječne konstrukcije

Željeznička infrastruktura osjetljiva je na ekstremne vremenske uvjete poput visokih i niskih temperatura, jakih oborina i poplava, povećanja razine mora i jakih vjetrova [22]. Ekstremni vjetrovi i snježne oluje mogu uzrokovati snježne nanose na željezničkoj infrastrukturi tijekom zime i prekinuti prometovanje vlakova. S druge strane, toplinski valovi mogu uzrokovati izvijanje tračnica i izbacivanje kolosijeka, a samim time prekid prometa te u ekstremnim slučajevima rezultirati iskakanjem vozila iz tračnica. Na slici 4. prikazana je vjerojatnost pojave oštećenja na elementima kolosiječne konstrukcije uslijed djelovanja različitih vremenskih neprilika, pri čemu je vidljivo da će snijeg i led najveća oštećenja uzrokovati na skretnicama, dok olujna nevremena mogu uzrokovati oštećenja na kontaktnoj mreži kolosijeka i na signalno-sigurnosnim uređajima [23].

U radu [23] analizirana je vjerojatnost pojave neželjenog događaja na kolosijeku ili određenome elementu kolosijeka pri različitim vrijednostima niskih i visokih temperatura te snježnih padalina. Utvrđeno je da će se neželjeni događaj gotovo sigurno pojaviti ako temperatura zraka prijeđe +35 °C ili se spusti ispod -12 °C te ako snježne padaline premaše vrijednost od 50 mm/d (tablica 1.).

Klimatske promjene rezultirat će većim troškovima održavanja na kolosiječnoj konstrukciji. U radu [24] analizirani

su troškovi održavanja kolosijeka u normalnim vremenskim uvjetima te u slučajevima kada je kolosijek izložen poplavi i visokim temperaturama, pri čemu su u obzir uzeti samo izravni troškovi, a ne i neizravni poput kašnjenja i prekida prometovanja vlakova. Utvrđeno je da će djelovanje poplave povećati troškove održavanja za 22 %, a utjecaj visokih temperatura za 15 %.

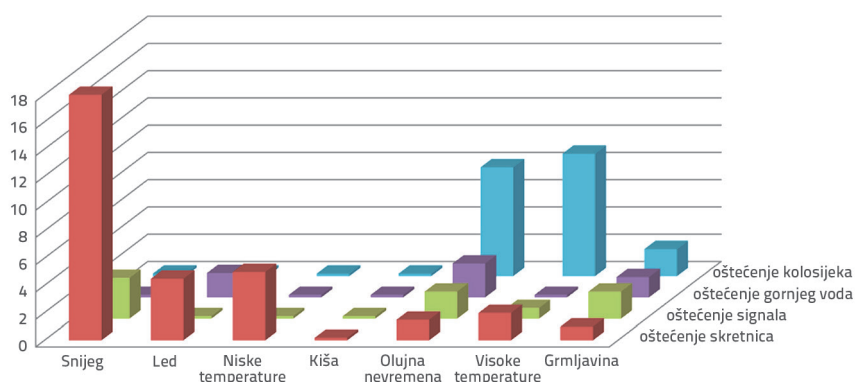
2.1. Utjecaj ekstremno visokih temperatura

2.1.1. Tračnice

Iako su kolosiječne konstrukcije projektirane kako bi mogle izdržati velike temperaturne razlike, vrlo visoke temperature mogu izazvati izvijanje tračnica uslijed stvaranja velikih tlačnih sila koje su posljedica širenja čelika, što je posebno izraženo kod tračnica kontinuirano zavarenih u dugi tračnički trak (DTT) [25-27]. Primjena DTT-a na kolosiječnim konstrukcijama donijela je brojne prednosti poput nižih troškova održavanja kolosijeka i vozila, smanjenja visokih razina buke i vibracija te povećanja razine udobnosti vožnje. Međutim, DTT ima i negativnih posljedica, a najizraženija je izvijanje tračnica, i to najčešće u vodoravnome smjeru, kada temperatura tračnica prijeđe definirane vrijednosti [28]. Izvijanje tračnica rijetko će se dogoditi spontano, već je posljedica djelovanja unutarnjih i vanjskih sila u kolosijeku. Unutarnje sile nastaju zbog djelovanja temperatura, a vanjske su sile prouzrokovane prometnim opterećenjem [29]. Izvijanje kolosijeka vrlo je česta pojava u ljetnim mjesecima, a pojaviti će se u trenutku kada sile koje djeluju na kolosijek budu veće od bočnog otpora kolosijeka, čija vrijednost velikim dijelom ovisi i o stanju kolosiječne konstrukcije. Na slici 5. prikazani su odnos broja

zabilježenih prometnih nesreća u periodu od 2008. i 2018. na području EU-a koje su povezane s izvijanjem tračnica i ostalim nepravilnostima kolosijeka te zabilježene globalne temperature. Može se utvrditi kako s povećanjem temperature zraka raste i zabilježeni broj slučajeva izvijanja tračnica.

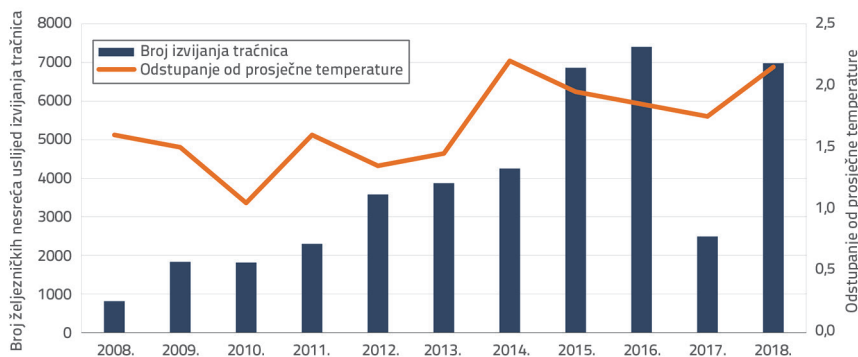
S obzirom na to da se tračnice brzo zagrijavaju, temperatura u tračnici uvijek je viša od temperature zraka, a prema pravilu koje se primjenjuje u praksi, odnos između temperature zraka i tračnice može se izraziti kao [31]:



Slika 4. Učestalost pojave negativnog događaja s obzirom na vremensku nepogodu [23]

Tablica 1. Granične vrijednosti pojave neželjenog događaja na kolosijeku uslijed različitih vremenskih uvjeta [23]

Vremenski uvjeti	Vjerojatnost pojave neželjenog događaja				Ugroženi element
	< 33 %	33 – 66 %	66 – 99 %	99 %	
Visoke temperature [°C]	$T \leq 28$	$28 < T \leq 33$	$33 < T \leq 35$	$T > 35$	Kolosijek
Niske temperature [°C]	$T > -4,5$	$-9 < T \leq -4,5$	$-12 < T \leq -9$	$T < -12$	Skretnice
Snježne padaline [mm/d]	$s \leq 10$	$10 < s \leq 22$	$22 < s \leq 50$	$s > 50$	Skretnice



Slika 5. Zabilježeni broj željezničkih nesreća čiji su uzroci izvijanje tračnica i ostale nepravilnosti na kolosijeku te prikaz globalne temperature na području EU-a u periodu od 2008. do 2018. [30]

$$T_{zrak} \approx (2/3) \cdot T_{trač} \quad (1)$$

pri čemu je:

T_{zrak} – temperatura zraka [°C]

$T_{trač}$ – temperatura tračnice [°C].

Na temperaturu u tračnicama utječe i lokacija kolosijeka. Ako je kolosijek izravno izložen Suncu, tračnice će se zagrijavati puno brže nego kada se kolosijek nalazi u hladu, usjeku, tunelu i sličnome [32].

Kako bi se smanjio rizik od izvijanja tračnica, one su za pragove pričvršćene pri neutralnoj temperaturi, odnosno pri temperaturi pri kojoj nema naprezanja u tračnicama (engl. *Stress Free Temperature – SFT*) [29]. Tlačne sile u tračnicama nastaju uslijed naprezanja izazvanih temperaturama koje premašuju neutralnu temperaturu tračnice te zbog mehaničke naravi kao što su kočenje, trenje kotača prilikom vožnje i kontakt kotača i tračnice prilikom prolaska vlaka kroz zavoje. Neutralna temperatura trebala bi biti postavljena tako da uravnoteži rizik od izvijanja pri visokim temperaturama i puknuća tračnica pri niskim temperaturama [31].

Tablica 2. Definirane vrijednosti neutralne temperature tračnice u različitim europskim državama [10]

Država	Neutralna temperatura [°C]
Njemačka	23
Španjolska	27
Francuska	25
Irska	23
Nizozemska	25
Ujedinjeno Kraljevstvo	27

U praksi održavanja kolosijeka problem znatnoga toplinskog opterećenja rješava se pričvršćivanjem tračnica pri neutralnoj

temperaturi tračnica od 35 °C do 43 °C (od 23 °C do 29 °C pripadna temperatura zraka). Taj visoki raspon neutralne temperature sprječava pojavu prekomjernih sila izvijanja čak i kada temperatura tračnica dosegne vrijednosti između 54 °C i 65 °C (36 °C do 43 °C pripadna temperatura zraka) [10]. Danas ne postoje jedinstveni standardi koji definiraju neutralnu temperaturu u tračnicama, već se razlikuju između država kao što se to može vidjeti iz tablice 2., u kojoj je prikazana definirana neutralna temperatura u nekoliko europskih država.

Na mrežama hrvatskih željeznica prilikom ugradnje nove se tračnice polažu na pričvrсна mјesta i pričvrščuju određenom silom zatezanja. Kolosijek se grubo regulira po smjeru i visini te se nakon toga tračnice zavaruju u dijelove dugoga tračničkog traka. Zavarivanje se ne smije izvoditi pri temperaturama nižima od +5 °C i višima od +35 °C [33]. Nakon zavarivanja pričvrсни se pribor otpušta kako bi se dugi tračnički trakovi oslobodili unutarnjih naprezanja. Nakon što se u tračnicama postignu potrebne temperature, one se vraćaju u ležajna mјesta te se pričvrсни pribor potpuno priteže. Temperatura pri kojoj se tračnice polažu natrag u ležišta može odstupati za do ±3 °C od potrebne temperature koja ovisi o klimatskome području, a u kontinentalnoj Hrvatskoj iznosi 22,5 °C ±3 °C [33].

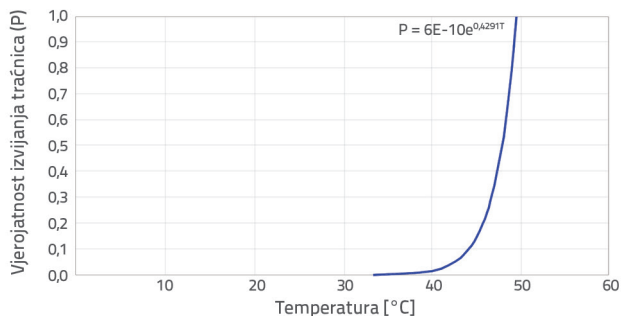
Prema [27], vjerojatnost izvijanja tračnica ovisi o temperaturi u tračnici, pri čemu autori razlikuju sljedeće dvije temperature u tračnicama:

- maksimalnu temperaturu tračnice kod koje ne postoji rizik od izvijanja $T_{b,min}$
- temperaturu tračnice kod koje će se pojaviti određeno izvijanje $T_{b,max}$.

Temperature između $T_{b,min}$ i $T_{b,max}$ imaju određenu vjerojatnost pojave izvijanja. S obzirom na te dvije temperature, moguće je izračunati temperaturu $T_{allowable}$, odnosno maksimalnu temperaturu iznad neutralne temperature pri kojoj se tračnice smatraju sigurnima od izvijanja. Ta se temperatura može izračunati prema sljedećem izrazu:

$$T_{allowable} = T_{b,min} + 0,25 \cdot (T_{b,max} - T_{b,min}) \quad (2)$$

Vjerojatnost pojave izvijanja temelji se na odnosu energije izvijanja i temperature. Pri temperaturama koje su blizu vrijednosti $T_{b,max}$ dodatna energije potrebna za izvijanje smanjuje se eksponencijalno. S druge strane, pri temperaturi $T_{b,min}$ potrebno je najviše dodatne energije da bi se dogodilo izvijanje tračnice. Ovisnost vjerojatnosti pojave izvijanja tračnica i temperature tračnice prikazana je na slici 6.

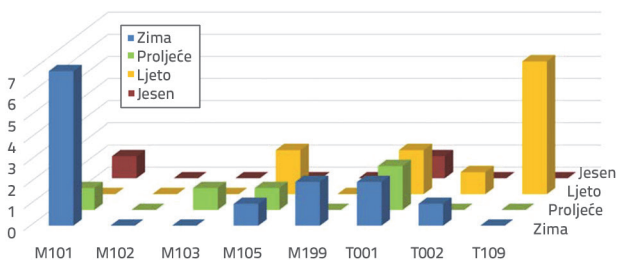


Slika 6. Vjerojatnost pojave izvijanja tračnica ovisno o temperaturi [27]

Neutralna temperatura tračnice može biti poremećena kao rezultat razvoja diferencijalnih slijeganja duž kolosijeka, što stvara lokalne varijacije u naprezanju. To je najčešće izraženo na mjestima promjene kolosiječne konstrukcije, na primjer, s kolosijeka sa zastornom prizmom na kolosijek na čvrstoj podlozi, što je slučaj kod prijelaza s nasipa na vijadukt ili most. U promatranome slučaju različita slijeganja uzrokuju produljenje tračnica i pojave naprezanja u tračnicama [32]. Osim diferencijalnih slijeganja koja će uzrokovati probleme u vertikalnoj geometriji kolosijeka, na izvijanje će dodatno utjecati nepravilnosti u horizontalnoj geometriji, jer će one utjecati na dodatne bočne sile koje u kombinaciji s visokim temperaturama mogu inicirati izvijanje.

2.1.2. Skretnice

Od svih vremenskih uvjeta na skretnice najštetnije djeluju ekstremno visoke i niske temperature. Visoke temperature uzrokuju produljenje tračnica, što može rezultirati promjenom položaja prijevodnica. Skretnice su iznimno osjetljive na bilo kakve promjene u geometriji kolosijeka i zato mala produljenja tračnica mogu uzrokovati probleme u njezinu radu. Također, produljenje tračnica u zoni skretnice može uzrokovati iskakanje vlaka prilikom prolaska preko skretnice [34]. U radu [35] analiziran je broj zabilježenih iskakanja vlaka na skretnicama, pri čemu je najveći broj iskakanja uočen u ljetnim i zimskim mjesecima (slika 7.).



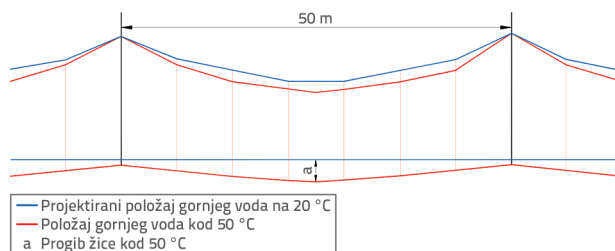
Slika 7. Broj iskakanja vlakova na skretnicama zabilježenih po godišnjim dobima [35]

2.1.3. Kontaktna mreža i signalizacija

Na elektrificiranim željeznicama vozila se strujom potrebnom za pokretanje najčešće opskrbljuju preko kontaktne mreže. Kontaktna

se mreža nalazi iznad pruge te je uglavnom izložena vremenskim neprilikama poput visokih temperatura, vjetrova, snijega i leda [36]. S obzirom na to da vozilo struju preuzima pomoću pantografa, potrebno je osigurati dobar kontakt pantografa i kontaktnog voda, zbog čega je važna napetost voda. Promjene temperature uzrokuju promjenu u geometrijskome položaju kontaktnog voda. Pri djelovanju visokih temperatura kontaktni vod će se istegnuti, dok će se pri djelovanju niskih temperatura stegnuti rezultirajući velikim vlačnim naprezanjima [36, 37].

U radu [37] analiziran je utjecaj promjene temperature na prostorni položaj i vlačna naprezanja u kontaktnomevodu primjenom matematičkog modela. Rezultati provedenih simulacija pokazali su da promjena temperature ima znatan utjecaj na uzdužni položaj kontaktnog voda, dok ne utječe znatno na vertikalni i bočni prostorni položaj voda. Na slici 8. prikazan je položaj kontaktnog voda na projektiranoj temperaturi od 20 °C i 50 °C, gdje je vidljiva razlika u visini voda kao posljedica istezanja materijala uslijed visokih temperatura.



Slika 8. Položaj kontaktnog voda pri temperaturi od 20 °C i 50 °C [37]

Također je utvrđeno da se napetost žica kontaktnog voda mijenja s promjenom vanjske temperature. Smanjenjem temperature napetost žica znatno raste. Zabilježeno je da pri promjeni temperature s 20 °C na -60 °C napetost žica poraste za 0,177 kN, što označava porast od 0,66 %. S druge strane, pri promjeni temperature s 20 °C na 60 °C napetost će se smanjiti za 0,088 kN, što označava smanjenje od 0,33 % [37]. Promjena položaja žica gornjeg voda može utjecati na kontaktnu silu između pantografa i žica gornjeg voda, pri čemu ta sila mora biti u dopuštenim granicama kako bi se osigurala opskrba vozila strujom [38]. Prema pravilniku [39], vrijednost srednje kontaktne sile za sustav napajanja od 25 kV, 50 Hz mora biti veća od 60 N, a manja od $0,00047 V^2 + 90$, pri čemu je V brzina prometovanja vlaka u km/h. U radu [38] analizirana je promjena kontaktne sile pri različitim temperaturama u rasponu od -60 °C do 80 °C, pri čemu temperatura pri kojoj je uspostavljen gornji vod iznosi 20 °C (referentna temperatura). Utvrđeno je da maksimalna razlika u sili između najniže i najviše temperature iznosi 8 N, a zabilježene minimalne i maksimalne kontaktne sile pri različitim temperaturama prikazane su u tablici 3. Kako je vidljivo iz tablice 3., pri bilo kojem odstupanju od referentne temperature zabilježeno je smanjivanje minimalne kontaktne sile. S druge strane, maksimalna kontaktna sila kontinuirano se povećava sa smanjenjem temperature, dok se s povećavanjem temperature sila smanjuje [38].

Tablica 3. Vrijednosti minimalne i maksimalne kontaktne sile između pantografa i gornjeg voda pri različitim temperaturama [38]

Temperatura [°C]	Minimalna zabilježena kontaktna sila		Maksimalna zabilježena kontaktna sila	
	Sila [N]	Postotak promjene [%]	Sila [N]	Postotak promjene [%]
-60	101,81	-4,80	379,09	1,59
-40	102,85	-3,82	377,73	1,23
-20	104,29	-2,48	376,17	0,81
0	105,99	-0,89	374,39	0,33
20*	106,94	0	373,15	0
40	106,69	-0,23	372,52	-0,17
60	105,99	-0,89	372,33	-0,24
80	105,99	-0,89	372,10	-0,28

*temperatura pri kojoj je uspostavljen gornji vod, referentna temperatura

2.2. Snijeg, led i ekstremno niske temperature

Uslijed niskih temperatura dolazi do smrzavanja kolosiječne konstrukcije, a dubina smrzavanja ovisi o temperaturi te o trajanju tako niskih temperatura. Međutim, bez obzira na debljine slojeva kolosiječne konstrukcije, dubina smrzavanja ne smije dosegnuti posteljicu [40]. Snježni pokrivač koji pokriva zastornu prizmu u zemljama s hladnom klimom ima pozitivan učinak na termodinamički proces slojeva željezničke konstrukcije jer dovoljna visina snijega može smanjiti dubinu smrzavanja [40]. Problemi koje na kolosijeku može uzrokovati djelovanje snijega, leda i niskih temperatura jesu [41]:

- formiranje leda na kontaktnoj mreži i trećoj tračnici
- neispravan rad skretnica zbog nakupljanja snijega i leda
- stvaranje leda na tračnicama
- puknuće tračnica
- puknuća na armiranobetonskim pragovima
- smrzavanje u tunelu, osobito na ulazu u tunel
- smrzavanje perona u kolodvorima
- bubrenje i drobljenje zastornog materijala.

2.2.1. Tračnice i skretnice

Uslijed niskih temperatura u tračnicama se javljaju velika vlačna naprezanja koja mogu uzrokovati puknuće tračnica [28]. Vrlo niske temperature mogu dovesti i do gubitka mehaničkih svojstva bandaža kotača te uzrokovati krhkost materijala zbog gubitka plastičnosti. Stvaranje leda na tračnicama smanjuje trenje između kotača i tračnica te produljuje zaustavni put vozila, ali i smanjuje vučnu silu lokomotive. Zbog toga je pri tako ekstremnim uvjetima potrebno ograničiti vožnju brzinu. Tijekom zimskih mjeseci niske temperature zraka rezultiraju formiranjem leda na skretnicama te blokiranjem skretnica, čime se sprječava ispravno mijenjanje položaja prijevodnica i njihovo priljublivanje na glavne naliježne tračnice [23, 42].

Prema [43], ekstremno niske temperature, konkretno temperature niže od -10 °C, također mogu utjecati na mehanička

svojstva elastomerne podtračničke podloške te posljedično rezultirati visokim razinama buke i vibracija pri prolasku vlaka.

2.2.2. Kontaktne mreže

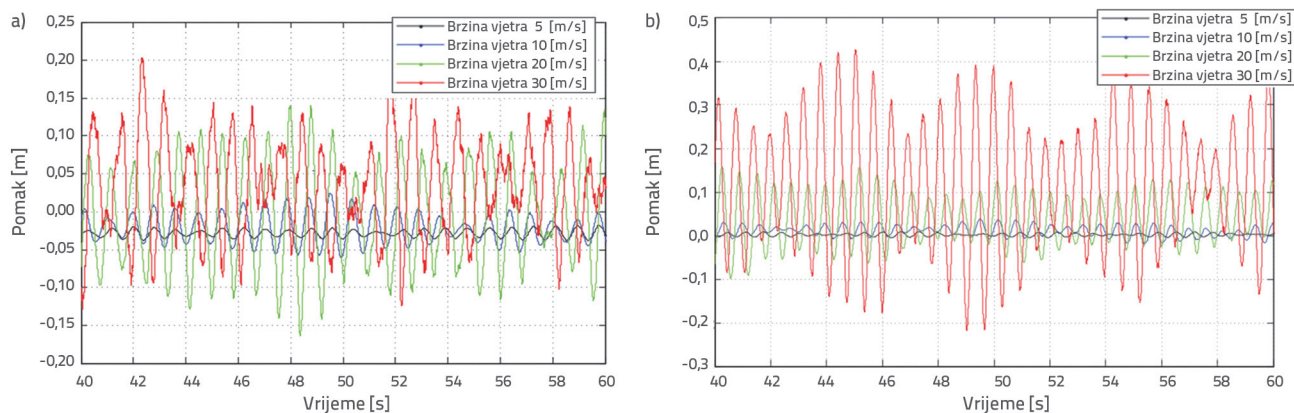
Snijeg svojom težinom opterećuje kontaktnu mrežu i može uzrokovati promjenu njezina položaja [44]. Tijekom zimskih mjeseci led se zadržava na kontaktnome vodu, a formiranje leda može se klasificirati kao poledica, stvaranje zrnatog inja ili kristalnog inja, mokri snijeg te miješano inje. Formiranje leda ovisi o geometriji voda te o atmosferskim parametrima kao što su vlažnost zraka, atmosferska temperatura i brzina vjetra [41, 45]. Formiranje leda na kontaktnome vodu uzrokuje i električni luk između pantografa i voda jer sloj leda utječe na tok struje iz kontaktnog voda u pantograf, što rezultira ubrzanim trošenjem žica [36].

2.3. Olujni naleti vjetra i grmljavinska nevremena

Jaki naleti vjetra mogu srušiti stabla na kolosijek te oštetiti kontaktnu mrežu, što izaziva velike troškove sanacije i prekid željezničkog prometa. Na otvorenim željezničkim prugama važnu ulogu ima atmosferski vjetar koji može puhati iz različitih smjerova u odnosu na smjer kretanja vlaka, a naziva se bočni vjetar. Bočni vjetar brzine veće od 120 km/h pod određenim uvjetima može prevrnuti vlak, što je najčešće izraženo kod praznih teretnih vagona te putničkih vlakova čija se brzina povećava, a masa smanjuje. Puštanjem u promet vlakova velikih brzina sve se više pozornosti usmjerava na sigurnost prilikom prolaska vlaka preko mostova jer most izgrađen u području sklonome jakim udarima vjetra može doživjeti znatne deformacije. Također, vibracije niskih frekvencija uzrokovane djelovanjem vjetra, osim što utječu na most, mogu ugroziti sigurnost prolaska vlaka. Vjetar može uzrokovati vibriranje vlaka, a u slučaju velikih brzina može uzrokovati prevrtanje ili iskakanje iz tračnica [46].

Tablica 4. Analiza utjecaja različitih brzina vjetra na željezničku infrastrukturu [47]

Granična vrijednost	Utjecaj	Posljedica
$W_G \geq 17$ m/s	<ul style="list-style-type: none"> pad drveća na kolosijek i žice gornjeg voda 	<ul style="list-style-type: none"> lokalni problemi u tijeku prometa
$W_G \geq 25$ m/s	<ul style="list-style-type: none"> velika količina drveća srušenog na kolosijek smanjena vidljivost pri niskim temperaturama te zbog snježnih nanosa 	<ul style="list-style-type: none"> prekid struje kašnjenja i otkazivanja vlakova
$W_G \geq 32$ m/s	<ul style="list-style-type: none"> vrlo velika količina srušenog drveća veliki kvarovi (oštećenja) na željezničkoj infrastrukturi oštećenja signalno-sigurnosnih uređaja, smanjena vidljivost 	<ul style="list-style-type: none"> kašnjenja i prekid željezničkog prometa i do nekoliko dana zbog velikih kvarova



Slika 9. Pomaci zabilježeni na sredini promatranog segmenta kontaktnog voda pri različitim brzinama vjetra: a) vertikalni pomak, b) bočni pomak [50]

Olujna nevremena praćena jakim vjetrom mogu nanijeti velike količine lišća na pruga. Prolaskom vlaka lišće se pod pritiskom kotača zalijepi za tračnice i na taj se način stvori sloj koji smanjuje adheziju, odnosno prijanjanje između kotača i tračnice, što produljuje zaustavni put vlaka te smanjuje vučnu silu, čime se povećava potrošnja energije. Oštećenja koja će na kolosijeku uzrokovati vjetar ponajprije ovise o brzini vjetra. U tablici 4. navedeni su utjecaji različitih brzina vjetra na kolosijek te posljedice koje će izazvati.

Osim onoga što je navedeno u tablici 4. treba istaknuti i da velike brzine vjetra mogu imati negativan utjecaj na samo vozilo, odnosno na brze putničke vlakove i prazne teretne vagone jer bočni vjetar može uzrokovati njihovo prevrtanje.

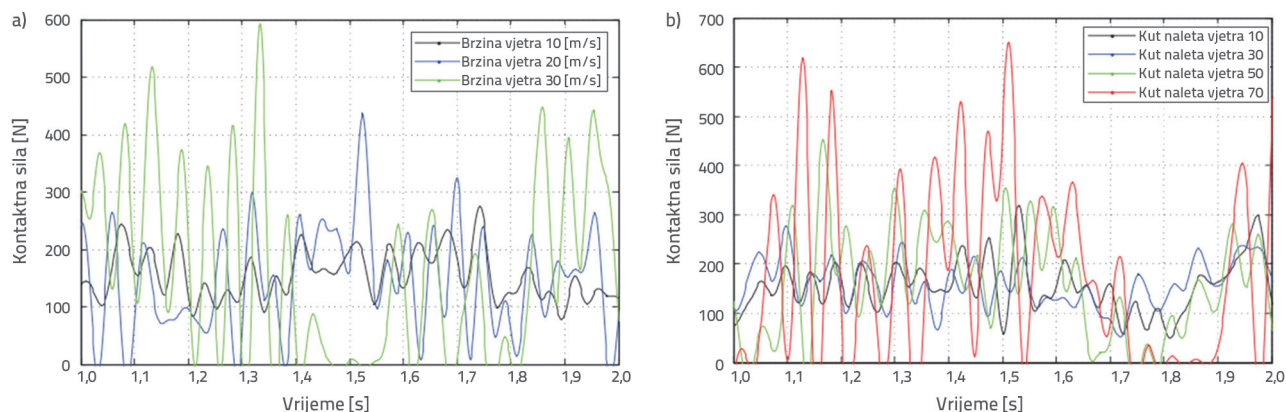
Opterećenje vjetrom u okolišu može se podijeliti u odnosu na to je li stalne ili promjenjive brzine. U nekim ekstremnim uvjetima zaleđeni dalekovod koji se nalazi u jednolikome strujanju zraka izložen je aerodinamičkim silama do kojih dolazi zbog poprečnog presjeka dalekovoda koji nije kružnog oblika. Takva osciliranja velikih amplituda i niskih frekvencija nazivaju se galopiranjem [48]. Sličan se fenomen može dogoditi i na kontaktnome vodu, pri čemu galopirajuće oscilacije može izazvati samo bočni vjetar kada je vod istrošen [49, 50].

Dinamičke karakteristike na kontaktu pantografa i kontaktnog voda važne su kako bi se omogućila opskrba vozila strujom za pokretanje, naročito pri vrlo velikim brzinama prometovanja. U dosadašnjim istraživanjima kontakta pantografa i voda u obzir su uzimane samo vibracije voda, ali vrlo su rijetko promatrani

i utjecaji okoliša, što je važno kako bi se omogućio kontinuirani i konzistentni kontakt između pantografa i kontaktnog voda, s optimalnom kontaktnom silom, te na taj način minimiziralo istrošenje voda [48]. U provedenim istraživanjima utvrđeno je da vjetar brzine veće od 130 km/h može uzrokovati vibracije kontaktnog voda i probleme na kontaktu pantografa i voda te dovesti do prekida toga kontakta [15, 51]. Zbog složenosti konstrukcije kontaktne mreže i stohastičkog učinka okolišnog vjetra vjetrom izazvane vibracije kontaktne mreže s velikom amplitudom mogu uzrokovati probleme električnog napajanja vozila velikih brzina.

Različite brzine vjetra izazivaju i različite vrijednosti vertikalnih i bočnih pomaka na kontaktnome vodu, što je detaljnije analizirano u [50], a dobiveni rezultati istraživanja prikazani su na slici 9. Iz rezultata se može uočiti da zabilježeni vertikalni i bočni pomaci vrlo brzo rastu s povećavanjem brzine vjetra.

U radu [50] analizirana je i kontaktna sila između pantografa i kontaktnog voda pri vjetru različitih brzina i smjera. Rezultati su pokazali da povećanje brzine vjetra dovodi do znatnog povećanja fluktuacije kontaktne sile (slika 10.a). Kut naleta vjetra također utječe na silu između pantografa i kontaktnog voda (slika 10.b). Osim štetnog utjecaja vjetra neželjene posljedice na željezničkoj infrastrukturi mogu izazvati i grmljavinska nevremena tijekom kojih postoji opasnost od udara groma u željezničku infrastrukturu. To može imati posebno negativan utjecaj na signalno-sigurnosne uređaje koji su osjetljivi na elektromagnetske smetnje i magnetska polja [20].



Slika 10. Sila između pantografa i kontaktnog voda pri brzini prolaska vlaka od 325 km/h: a) različita brzina vjetra; b) različit kut naleta vjetra [50]

Štetan utjecaj olujnih nevremena praćenih jakim vjetrom izražen je na otvorenim prostorima uz obale, gdje veliki morski valovi mogu uzrokovati dodatnu štetu na kolosiječnoj konstrukciji [52].

2.4. Poplave i vodene bujice

Velike količine oborina, koje su sve češća pojava i na području Europe, imaju posebno negativan utjecaj na zemljane nasipe i usjeke, ali i na druge elemente kolosijeka. Kiše povećavaju rizik od pojave klizišta tla, a otkazivanje nasipa i usjeka najčešće dovodi do oštećenja elementa gornjeg ustroja kolosijeka, tračnica, pragova, zastora, a mogu prouzrokovati i iskakanje vlaka iz tračnica [21, 53]. Poplave također štetno djeluju na geometriju kolosijeka [54]. Velike količine kiše u kratkome vremenu mogu dovesti do intenzivnih kišnih poplava, a duži periodi kiše do plavljenja podzemnih voda. Željeznička infrastruktura koja se nalazi u blizini mora izložena je opasnosti od povećanja razine mora, što također može rezultirati poplavama [52]. U radu [55] analiziran je utjecaj poplava na oštećenje željezničke mreže u Europi primjenom računalnog programa RAIL pomoću kojega su procijenjeni oštećenje na poprečnome presjeku kolosiječne konstrukcije uzrokovano poplavnom i troškovi obnove. Rezultati su pokazali da procijenjeni godišnji troškovi sanacije kolosiječne konstrukcije zbog djelovanja poplava iznose oko 581 milijun

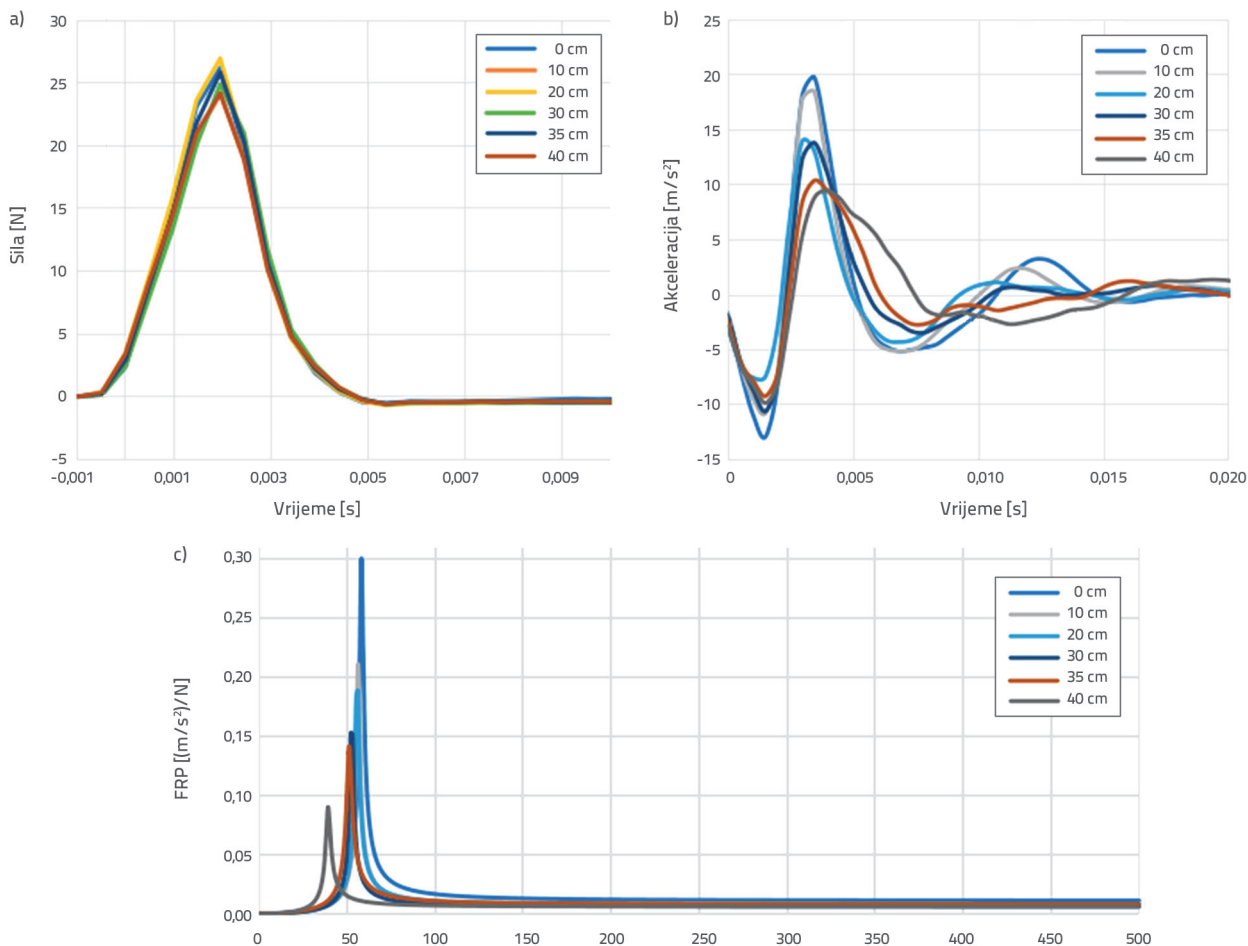
eur. Osim oštećenja na kolosiječnoj konstrukciji poplave mogu izazvati kratki spoj na električnim instalacijama te rezultirati prekidom opskrbe strujom.

U radu [56] analizirana je razina rizika koji na kolosijeku može izazvati poplava pri različitim razinama vode u odnosu na visinu gornjeg ruba tračnice (GRT), pri čemu je u obzir uzeto samo stacionarno stanje vode, a nisu vodene bujice. Utvrđeno je da stabilnost kolosijeka neće biti ugrožena ako je razina vode na visini od $-2,5$ m u odnosu na GRT te promet može biti nastavljen. Ako je razina vode između $-0,45$ m i $-2,5$ m, voda može negativno djelovati na željeznički donji ustroj, međutim željeznički promet i u tome slučaju može biti nastavljen. Razina vode od 0 do $-0,45$ m utjecat će na elemente gornjeg ustroja kolosijeka koji su najosjetljiviji na djelovanje poplava i u tome slučaju postoji umjereni rizik od oštećenja kolosiječne konstrukcije. Također, ako razina vode na kolosijeku iznosi od 0 do $+0,5$ m, rizik od oštećenja kolosijeka vrlo je visok te je potrebno obustaviti željeznički promet. Kada razina vode iznosi $+0,5$ m, svi elementi kolosijeka vrlo su ugroženi te će poplava uzrokovati oštećenja na željezničkome i donjem i gornjem ustroju. Rezultati tog istraživanja sumirani su u tablici 5.

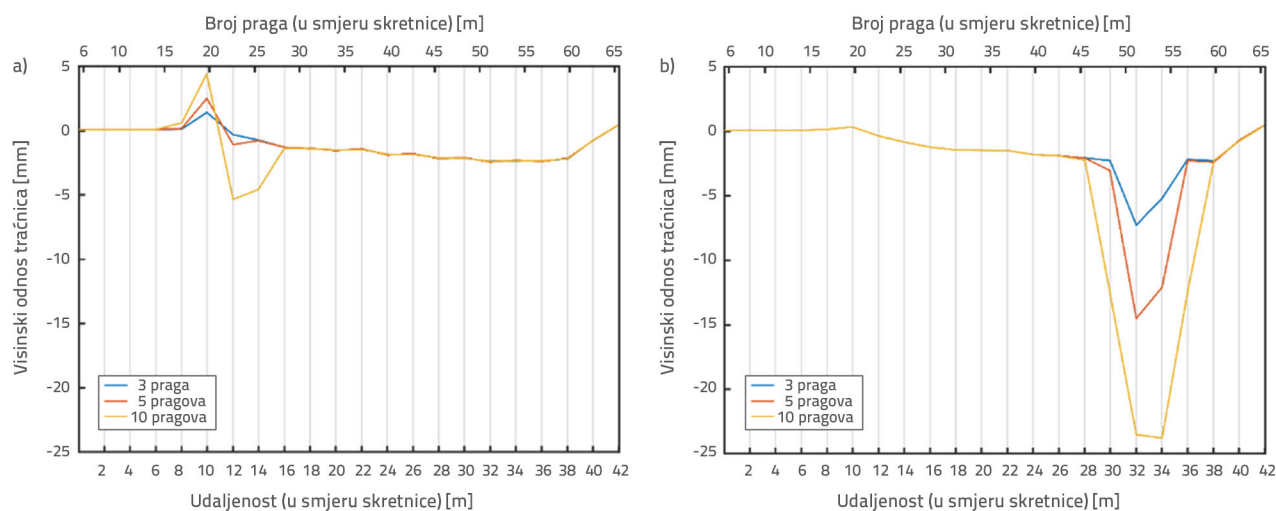
U radu [57] provedena su laboratorijska ispitivanja kako bi se utvrdio utjecaj različitih razina vode na kolosijek sa zastornom prizmom, pri čemu je razina vode povećavana

Tablica 5. Razine rizika pri različitim razinama vode na kolosiječnoj konstrukciji [56]

Kategorija poplave	Razina vode	Razina vode u odnosu na visinu GRT-a	Oštećenje kolosijeka	Razina rizika
I.	Ne doseže donji ustroj kolosijeka	manje od $2,5$ m	-	-
II.	Ne prelazi visinu donjeg ustroja	od $-2,5$ m do $-0,45$ m	Posteljica	Niska
III.	Na razini gornjeg ustroja ili prelazi visinu tračnica	od $-0,45$ m do 0 m	Manji dijelovi zastorne prizme	Srednja
IV.	Prelazi visinu tračnica	od 0 m do $0,5$ m	Većina zastorne prizme i manji dijelovi donjeg ustroja	Visoka
V.	Prelazi visinu tračnica	veće od $0,5$ m	Donji ustroj i većina zastorne prizme	Vrlo visoka



Slika 11. Rezultati dobiveni laboratorijskim ispitivanjem uzorka kolosijeka pri različitim razinama vode u kolosijeku simulirajući poplavu: a) promjena sile u vremenu, b) promjena akceleracije u vremenu, c) promjena funkcije frekvencijskog odziva (engl. *Frequency Response Function – FRF*) [57]



Slika 12. Zabilježeni visinski odnos tračnica duž skretnice kada se opterećenje nalazi na: a) prevodničome uređaju, b) srcištu skretnice [58]

za svakih 10 cm od 0 do 40 cm. Za laboratorijski uzorak korišten je kalup dimenzija 1,85 x 0,9 x 0,5 m u koji je postavljen materijal zastorne prizme debljine 35 cm, a na nju pola armiranobetonskog praga. Za ispitivanje upotrijebljena je nerazorna metoda ispitivanja koja se temelji na pobuđivanju kolosijeka pomoću udarnog čekića te na mjerenju vibracijskog odziva kolosijeka. Za pretvaranje dobivenoga vibracijskih signala u funkciju frekvencijskog odziva primijenjena je Fourierova transformacija. Provedenim ispitivanjima utvrđeno je da su impulsi prigušeni unutar 0,005 sekundi, a najveća vrijednost sile javlja se otprilike u isto vrijeme, bez obzira na razinu vode u uzorcima (slika 11.a). Također, zabilježeno je da se akceleracije smanjuju s povećavanjem razine vode (slika 11.b), što upućuje na to da poplava učinkovito povećava prigušenje kolosijeka. Utvrđeno je i da funkcija frekventnog odziva ima tendenciju pada s porastom razine vode (slika 11.c), a nakon što je razina vode dosegla najveću vrijednost, utvrđena je znatna promjena u prirodnoj frekvenciji materijala zastorne prizme, što rezultira smanjivanjem ukupne dinamičke krutosti kolosijeka.

U radu [58] pomoću modela konačnih elemenata analizirano je ponašanje skretnica u suhim uvjetima te u slučaju plavljenja kolosiječne konstrukcije koje dovodi do ispiranja zastorne prizme i slijeganja kolosijeka. Analiziran je utjecaj ispiranja zastorne prizme ispod 3, 5 i 10 pragova na visinski odnos tračnica u zoni prevodničkog uređaja i srčišta skretnice (slika 12.). Utvrđeno je da broj pragova ispod kojih je isprana zastorna prizma ima izravan utjecaj na visinski odnos tračnica. S obzirom na to da su tračnice jako osjetljive na promjene u geometriji kolosijeka, promjene u visinama tračnica koje uzrokuju ispiranje zastorne prizme mogu rezultirati iskakanjem vlaka prilikom prolaska preko skretnice [59].

3. Načini sanacije i zaštite kolosiječne konstrukcije od klimatskih promjena

3.1. Mjere zaštite tračnica od izvijanja

Budući da do izvijanja najčešće dolazi uslijed prolaska vlaka, standardna je praksa smanjivanja vozne brzine te prometnog opterećenja u razdobljima visokih temperatura [27]. Na taj se

način smanjuju naprezanja u tračnicama i opasnost od iskakanja vozila iz tračnica. Na primjer, u Ujedinjenome Kraljevstvu smanjivanje brzine uvodi se prema tablici 6., kada temperatura zraka prijeđe 36 °C.

Smanjivanje vozne brzine rezultira kašnjenjima vlakova. Kako bi se spriječila pojava izvijanja na postojećim kolosijecima, potrebno je djelovati na [60]:

- sprječavanje pojave velikih tlačnih sila u tračnicama pri visokim temperaturama
- povećanje bočne i uzdužne stabilnosti kolosijeka.

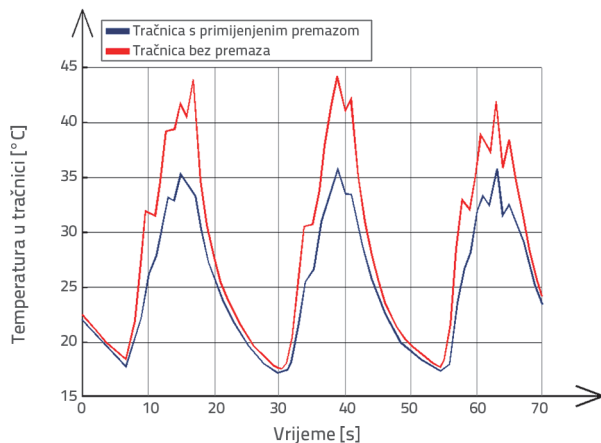
Na sprječavanje pojavljivanja velikih tlačnih sila u tračnicama može se djelovati i odgovarajućim odabirom neutralne temperature. Kao što je to prethodno spomenuto, SFT ili neutralna temperatura tračnica jest temperatura tračnice u trenutku njezina pričvršćenja. Kako bi se smanjila vjerojatnost izvijanja tračnica za visokih ljetnih temperatura, u praksi se tračnice pričvršćuju za pragove pri neutralnoj temperaturi tračnica od 35 °C do 43 °C (23 °C do 29 °C pripadna temperatura zraka). Taj visoki raspon neutralne temperature sprječava pojavu prekomjernih sila izvijanja (tlačnih sila u tračnicama), čak i kada temperatura tračnica dosegne vrijednosti od 54 °C do 65 °C (36 °C do 43 °C pripadna temperatura zraka) [10]. U slučaju da su tračnice pričvršćene pri neutralnoj temperaturi nižoj od potrebne, u tračnicama će se tijekom razdoblja visokih temperatura generirati veće tlačne sile te će vjerojatnost pojave izvijanja biti veća.

3.1.1. Sprječavanje pojave velikih tlačnih sila u tračnicama

U radu [61] provedena je analiza primjene premaza na tračnicama upotrebom kalijeva aluminosilikata radi smanjivanja maksimalnih temperatura. Tim se premazom osigurava visokoreflektirajuća površina kroz bijelu ili prljavu bijelu boju te visoka otpornost na abraziju i svojstva samočišćenja. U radu provedeno je mjerenje temperature na uzorku tračnice koji nije zaštićen te na uzorku tračnice zaštićenom navedenim premazom. Utvrđeno je da se temperatura snižava i do 10,5 °C. Rezultati provedenog istraživanja prikazani su na slici 13.

Tablica 6. Ograničenje vozne brzine koja se primjenjuje u Ujedinjenome Kraljevstvu s obzirom na stanje kolosijeka pri temperaturama visokih vrijednosti [44]

Stanje kolosijeka	U stanju opreznosti	Ograničenje vozne brzine	
		30/60 mph (48/96 km/h)	20 mph (32 km/h)
Dobro stanje	SFT + 32	SFT + 37	SFT + 42
Nedovoljna kvaliteta zastorne prizme	SFT + 10	SFT + 13	SFT + 15
SFT - neutralna temperatura tračnica, mph - milja na sat (1 mph = 1,6093 km/h)			



Slika 13. Izmjerena temperatura u tračnici s premazom i u tračnici bez premaza [61]

3.1.2. Povećanje bočne i uzdužne stabilnosti kolosijeka

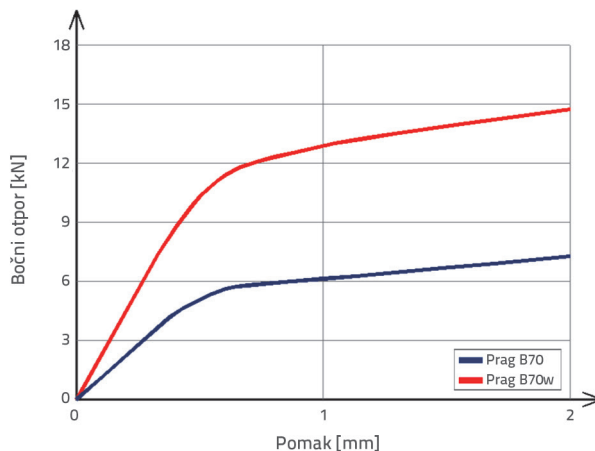
Osim smanjenjem tlačnih sila u tračnicama na sprječavanje pojave izvijanja tračnica može se utjecati povećanjem bočne stabilnosti kolosijeka. Na razinu bočne stabilnosti kolosijeka u velikoj mjeri utječe interakcija zastorne prizme i pragova [32]. Pragovi su važni kod otpornosti kolosijeka na izvijanje jer su oni veza između tračnica i zastorne prizme. U slučaju izvijanja tlačne sile generirane toplinskim produljenjem tračnice prenose se preko kolosiječnog pribora i pragova u zastornu prizmu i donji ustroj kolosijeka. Bočna otpornost kolosijeka na izvijanje ovisi o sljedećim čimbenicima [60, 62]:

- vrsta pragova i razmak između pragova
- interakcija zastorne prizme i pragova
- primijenjeni pričvrtni pribor
- oblik i dimenzije zastorne prizme.

Betonski pragovi općenito se smatraju otpornijima na pojavu izvijanja od drvenih i čeličnih pragova. Razlozi za to su veća težina, veličina i oblik betonskih pragova, što rezultira stabilnijom kolosiječnom rešetkom, koja ima veću otpornost na izvijanje tračnica [63]. Što je razmak između pragova manji, to je bočna stabilnost kolosijeka veća. Interakcija zastorne prizme i pragova odnosi se na sile trenja između donje plohe praga i zastornog materijala, na trenje između bočnih strana pragova i zastornog materijala između pragova (engl. *crib ballast*) te na otpor bankina na krajevima pragova. Sve tri komponente ovise o vrsti pragova, vrsti zastornog materijala te njegovoj zbijenosti [64].

Bočni otpor pragova važno je svojstvo u definiranju bočne stabilnosti kolosiječne konstrukcije. Laboratorijska ispitivanja bočnog otpora kolosijeka s ugrađenim betonskim pragovima B70 i pragovima s krilima (engl. *winged sleeper*) provedena su u radu [65], na uzorku kolosijeka u kojemu je prag postavljen na zastornu prizmu. Na prag je oslonjena i pričvršćena

tračnica. Pri ispitivanju na pragove je primijenjena sila te je mjereno bočno pomak. Utvrđeno je da je bočni otpor kod praga s krilima 101 % veći nego u slučaju praga B70, kod zabilježenog pomaka od 2 mm (slika 14.).

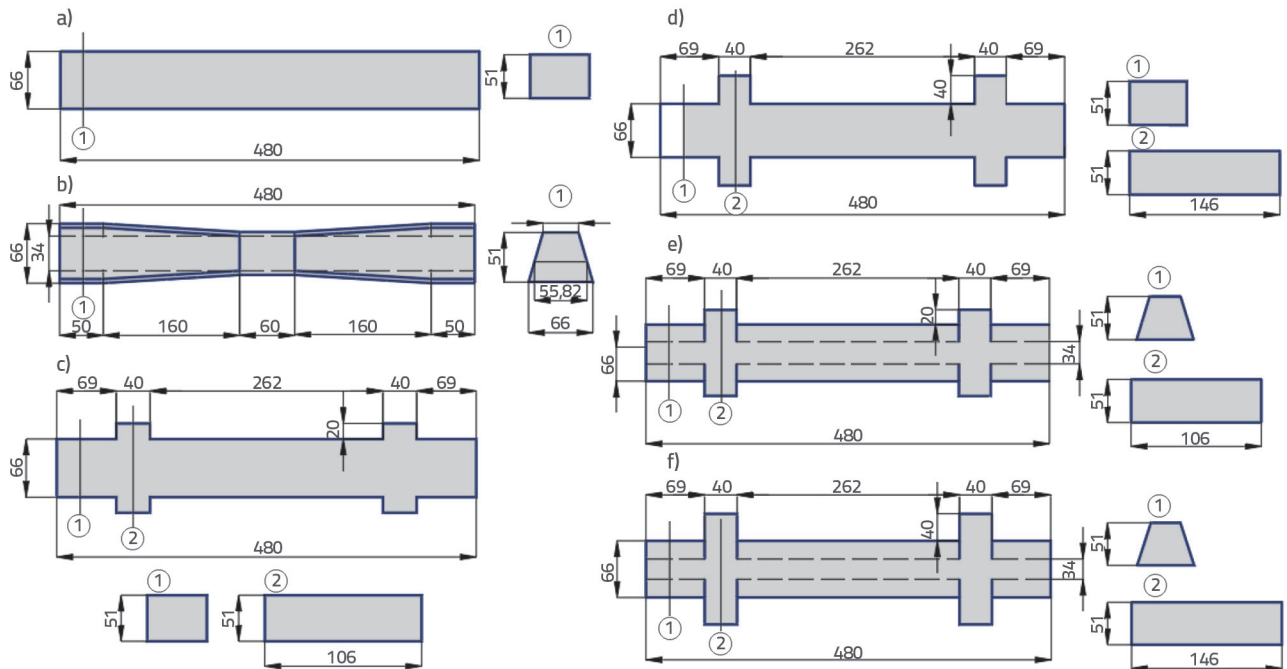


Slika 14. Dijagram pomaka i primijenjene sile pri laboratorijskome ispitivanju pragova [65]

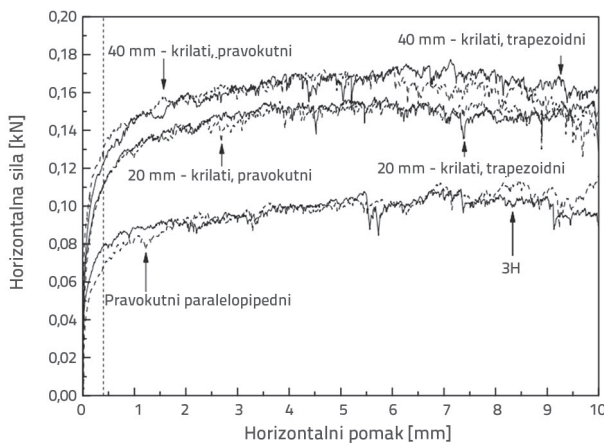
U radu [66] ispitivan je bočni otpor šest različitih tipova betonskih pragova (slika 15.) primjenom *pull-out* testa. Utvrđeno je da bočni otpor nije u skladu s težinom praga, već ovisi o trenju između praga i zastorne prizme te pritisku zastorne prizme koji djeluje na krajeve pragova. Ispitivanje je također pokazalo da razlika u obliku poprečnog presjeka pragova s krilima (engl. *winged sleeper*) ima mali učinak na bočni otpor, dok znatni utjecaj ima širina njegovih krila. Dobiveni dijagrami ovisnosti horizontalne primijenjene sile i zabilježenoga horizontalnog pomaka prikazani su na slici 16.

Povećanje sile trenja i međudjelovanje zastornog materijala i betonskih pragova moguće je ostvariti primjenom pragova nazubljenih s donje strane (engl. *frictional sleepers*). Svojim oblikom ti su pragovi slični armiranobetonskim pragovima B70, no jedino su s donje strane dodatno nazubljeni kako bi se ostvario veći koeficijent trenja između praga i zastorne prizme [67, 68]. Rezultati su pokazali da je bočna otpornost kolosijeka s takvim ugrađenim pragovima oko 67 % veća u odnosu na kolosijek sa standardnim betonskim pragovima [67]. U slučaju čeličnih pragova bočni otpor može se povećati upotrebom pragova s vertikalnim ukrućenjima na donjoj strani [69]. Na taj način povećava se međudjelovanje zastornog materijala i pragova, što rezultira većim silama otpora.

Bočna otpornost dodatno se može povećati ugrađivanjem sprava protiv bočnog pomicanja kolosijeka na pragove [62]. U početku takve su se sprave primjenjivale samo na drvenim pragovima, pri čemu se bočna otpornost može povećati i do 50 %. Međutim, danas se takve sprave primjenjuju i na betonskim pragovima, a mogu se ugrađivati na sredinu i na krajeve betonskih pragova [62].



Slika 15. Tipovi pragova na kojima je provedeno ispitivanje: a) pravokutni paralelopipedni prag; b) 3H prag; c) prag s krilima duljine 20 mm, s pravokutnim krajevima; d) prag s krilima duljine 40 mm, s pravokutnim krajevima; e) prag s krilima duljine 20 mm, s trapezoidnim krajevima; f) prag s krilima duljine 40 mm, s trapezoidnim krajevima [66]



Slika 16. Ovisnost primijenjene horizontalne sile i zabilježenoga horizontalnog pomaka ispitivanih različitih vrsta pragova [66]

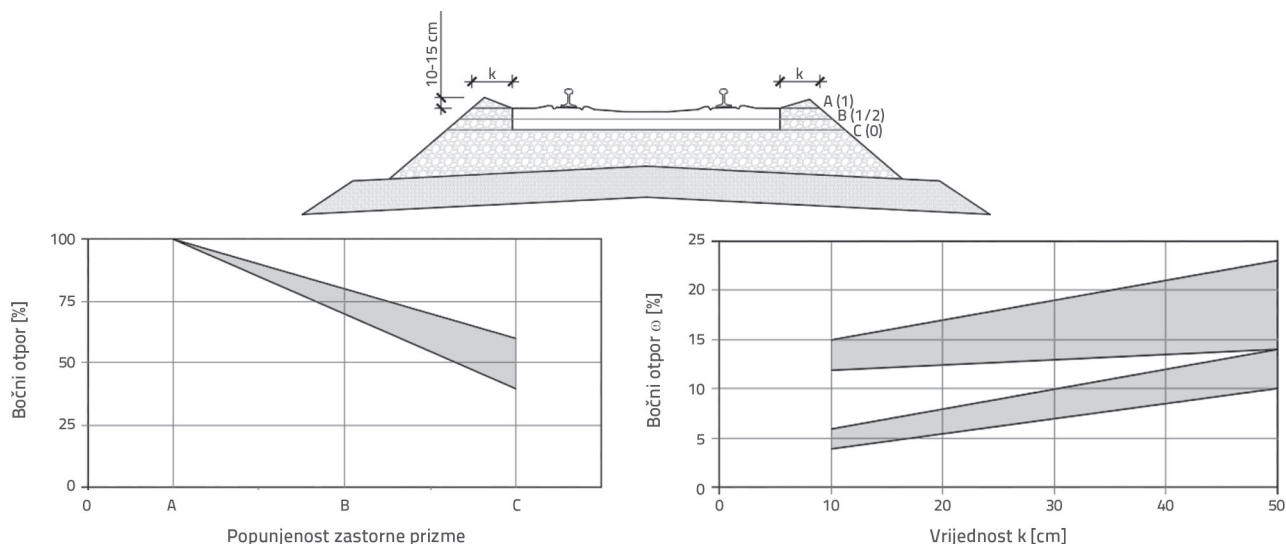
Osim o utjecaju na samu interakciju između zastorne prizme i pragova bočna stabilnost kolosijeka ovisi o vrsti kolosiječnoga pričvrstnog pribora. Pojedinačna tračnica ima malu vrijednost krutosti na savijanje u bočnome smjeru, no povezivanjem tračnica s pragovima povećava se bočna krutost kolosijeka, a ona ovisi o vrsti pričvrstnog pribora, pri čemu je, prema provedenim istraživanjima, elastični pričvrstni pribor pokazao veću torzijsku otpornost od krutoga pričvrstnog pribora. Rezultat toga jest veća čvrstoća kolosiječne rešetke te veća otpornost na izvijanje [60, 70]. U radu [71] analizirana je torzijska otpornost za sustave pričvršćenja na drvenim i betonskim pragovima.

Sustav pričvršćenja na drvenom pragu pokazao je znatno bolje rezultate nego na betonskome pragu. Torzijska otpornost sustava pričvršćenja na betonskome pragu iznosi oko 40 do 70 % vrijednosti dobivene za drveni prag. Također, otpor zakretanju tračnice prema pragu utječe na otpornost oko 15 do 30 % u ukupnoj vrijednosti bočnog otpora.

Oblik i dimenzije zastorne prizme također imaju velik utjecaj na bočni otpor kolosijeka. U radu [63] navedeno je da se s povećavanjem debljine zastorne prizme smanjuje vrijednost njegova bočnog otpora, zbog čega bi debljina od 30 cm trebala biti definirana kao optimalna debljina.

Na bočni otpor kolosijeka najviše će utjecati zastorni materijal iza čela praga, tj. na bankini kolosijeka, te na zastorni materijal između pragova i s donje strane praga. Prema [70], otpor koji stvara zastorna prizma jest kombinacija otpora koji će nastati na kontaktu donje strane praga i zastorne prizme (rezultira s 26 do 35 % ukupnog otpora), na kontaktu bočne strane praga i zastorne prizme (rezultira s 37 do 50 % ukupnog otpora) te na kontaktu prednje i stražnje strane praga i zastorne prizme koja se nalazi između dvaju pragova (rezultira s 15 do 37 % ukupnog otpora). Osim povećavanja trenja zastorni materijal osigurava stabilniju kolosiječnu rešetku [63]. Prema [72], podloške ispod pragova znatno utječu na vrijednost bočnog otpora kolosijeka. U ovome slučaju vrijednost bočnog otpora povećava se s tvrdoćom podloške, međutim, prema preporukama, tvrdoća ne bi smjela biti veća od $7,5 \times 10^7 \text{ Nm}^{-1}$.

Budući da se zastorni materijal bankine svojom težinom odupire izvijanju tračnica, povećanje širine i visine bankine ima pozitivan učinak na bočnu stabilnost kolosijeka. U skladu s time neki



Slika 17. Ovisnost bočnog otpora o obliku zastočne prizme [73]

upravitelji preporučuju da minimalna širina bankina kolosijeka u pravcu i krivinama iznosi 350 mm. Ovisnost bočnog otpora o obliku zastočne prizme prikazan je na slici 17.

3.2. Zaštita pruge od naleta vjetra

U Europi, u sklopu Tehničke specifikacije za interoperabilnost (TSI) i norme EN14067-6, procjena sigurnosti vlakova uslijed djelovanja jakoga bočnog vjetra obavezna je kod pruga namijenjenih za vlakove velikih brzina [74]. Kako bi se smanjila brzina vjetra koja će djelovati na vlak, najčešće se primjenjuju barijere za zaštitu od vjetra koje se postavljaju uzduž kolosiječne konstrukcije [75]. U radu [76] numeričkim je modelom analiziran koeficijent iskliznuća vlaka koji se kreće brzinom od 300 km/h, pri čemu brzina vjetra iznosi 260 km/h u slučajevima kada nisu postavljene barijere za zaštitu od vjetra te kada su postavljene barijere visine 2, 4 i 6 m. Utvrđeno je da su barijere za zaštitu od vjetra rezultirale znatnim promjenama aerodinamičkoga koeficijenta vlaka. Krajevi barijera bitno su promijenili lokalni uzorak strujanja zraka, što se odražava u fluktuacijama aerodinamičkoga koeficijenta te uzrokuje iznenadnu promjenu bočnog otpora u trenucima kada vlak ulazi u zonu gdje su postavljene barijere i izlazi iz nje. Također, koeficijent iskliznuća nastavio se smanjivati s povećanjem visine barijera za vjetar. Utvrđeno je da barijera visoka 2 metra nema znatan utjecaj na zaštitu vlaka od djelovanja vjetra, dok je znatan utjecaj ostvaren primjenom barijera visine 4 m. Barijera visine 6 m bila je predimenzionirana.

3.3. Zaštita pruge od poplava i olujnih nevremena

Upravitelji željezničkih infrastruktura kao jedan od odgovora na oluje primjenjuju ograničenje vozne brzine, pri čemu se ograničenja razlikuju ovisno o razini ozbiljnosti, a mogu dovesti do prekida prometa [77]. Kada se infrastruktura nalazi u obalnim

područjima, porast razine mora može se detektirati pomoću senzora koji će upraviteljima dati informacije o eventualnim ograničenjima prometovanja kako bi se izbjegle negativne posljedice [77].

Usljed poplava na kolosijecima su vrlo česta oštećenja zastočne prizme i nasipa. Takva se oštećenja mogu spriječiti primjenom zaštitnoga kamenja (engl. *rock armour*). To je pouzdana metoda zaštite zastočne prizme u slučaju poplava i ekstremnih vremenskih uvjeta. Veliki kameni blokovi polažu se na pokos zastočne prizme uzduž pruge i djeluju tako da sprječavaju odnošenje zastornog materijala smanjenjem brzine vode i ograničavanjem njezina protoka [78].

Prema [65], kako bi se infrastruktura zaštitila od poplava, važno je provoditi kontinuirani monitoring vremenskih uvjeta te prilikom najave mogućih poplava reagirati na vrijeme i ugrožene lokacije opremiti potrebnom opremom kako bi se spriječila poplava. Navedeno uključuje postavljanje sustava obrane od poplava poput barijera na napuhavanje koje su punjene vodom. Kako bi se kod velikih količina oborina omogućilo učinkovito otjecanje vode, sustave odvodnje potrebno je redovito održavati i čistiti od lišća, granja i ostalog [65]. U slučaju čestih poplava na kritičnim je lokacijama moguće postaviti crpne stanice koje omogućuju brzo ispušavanje vode kada je to potrebno [65].

U radu [79] analizirana je primjena GIS sustava za detektiranje kritičnih dijelova željezničke mreže koji su ugroženi različitim vrstama poplava. Analizirani su glavni izvori poplava: velike količine oborina, povećavanje razine podzemne vode i površinske poplave. GIS modelom identificirane su zone visokog rizika, procijenjeni intenziteti poplava, vjerojatnost pojavljivanja te ranjivost infrastrukture. Model je primijenjen na oko 380 km željezničke pruge, a rezultati su pokazali da je lokacije ranjive na poplave moguće identificirati vrlo uspješno. Također, moguće je identificirati prioritete lokacije za daljnje detaljne analize i implementaciju zaštitnih mjera. Model također olakšava planiranje održavanja kolosiječne konstrukcije. Sustav

za rano upozorenje na poplave primijenjen je na željezničkoj infrastrukturi u Austriji na mjestima gdje se pruga pruža uz riječne tokove, a rezultati su prikazani u radu [80]. Sustav se temelji na kombinaciji postojećih podataka o poplavama te dodatnim hidrolozijskim i hidrauličkim analizama kako bi se predvidjeli potencijalno ugroženi dijelovi infrastrukture. Analizirani su ključni poplavni događaji u Austriji, uključujući poplave koje su uzrokovale prekide u željezničkome prometu. Metodologija je uključivala identificiranje kritičnih točaka, simulaciju protoka vode pomoću hidrauličkih modela i primjenu sustava za predviđanje protoka rijeka. Rezultati su pokazali da se primjenom tog sustava mogu poslati upozorenja unutar dva do četiri sata prije potencijalne poplave.

3.4. Zaštita pruge od snijega i leda

3.4.1. Grijači skretnica

Tijekom zimskih razdoblja snijeg i led mogu onemogućiti ispravno mijenjanje položaja prijevodnica skretnica i njihovo priljublivanje uz glavne naliježne tračnice, što vlakovima onemogućuje prelazak s jednoga kolosijeka na drugi. Kako bi se spriječio takvo blokiranje skretnica snijegom i ledom, na skretnice se ugrađuju grijači [81]. Suvremeniji sustavi grijanja posjeduju temperaturne senzore koji reagiraju na promjene u temperaturama zraka te, ako je postignuta određena niska temperatura, grijači počinju grijati tračnice dok se ne zagriju na unaprijed definiranu vrijednost, najčešće +7 °C. Ta se temperatura mjeri temperaturnim senzorom koji je montiran na vozne tračnice srčišta [82].

3.4.2. Uklanjanje snijega i leda s tračnica i gornjeg voda

Uklanjanje snijega s pruge uobičajena je praksa tijekom zimskih razdoblja. Lokacija, pristupačnost i količina snijega određuju vrstu strojeva i metodu koja će se primjenjivati za čišćenje snijega. Kada je visina snježnog pokrivača između 20 i 30 cm, konvencionalni vlakovi trebaju biti opremljeni običnim, malim ralicama kako bi bilo moguće njihovo kretanje. U slučajevima težih vremenskih uvjeta, pri visinama snježnog pokrivača višima od 45 cm, snijeg je moguće ukloniti s tračnica upotrebom posebnih, većih ralica montiranih na lokomotive [47].

Različite metode primjenjuju se kako bi se spriječio smrzavanje na žicama gornjeg voda. Te metode uglavnom zahtijevaju vanjsku opskrbu energijom toplinskoga grijanja kako bi se djelovalo na otapanje formiranoga leda ili mehaničku energiju kojom bi se razbio led na žicama gornjeg voda [83, 84].

Danas se primjenjuju pantografi koji umjesto konvencionalne karbonske kontaktne trake sadržavaju filc-valjak koji služi za premazivanje kontaktnog voda smjesom protiv smrzavanja koja se skladišti u posebnome spremniku unutar vozila [85]. Primjenjuju se i različita sredstva kojima se tretiraju žice gornjeg voda kako bi se spriječio smrzavanje, a na nekim željeznicama u primjeni su vibropantografi koji stvaraju dodatne vibracije kako

bi razbili led formiran na žicama gornjeg voda [85]. Također, ako je izvor napajanja vozila treća tračnica, u zimskim je mjesecima potrebno obratiti pozornost na to da ona ne bude prekrivena snijegom i ledom jer je na taj način spriječena opskrba strujom koja je vozilima potrebna za pokretanje. Kako bi se spriječio taj problem, mogu biti provedene sljedeće mjere [86]:

- postavljanje grijača (engl. *heating strips*) na treću tračnicu radi otapanja snijega i leda
- upotreba posebnih željezničkih vozila za uklanjanje leda s tračnica, koja špricanjem vruće tekućine za odleđivanje mogu otkloniti led s tračnica ili su pak opremljena grijačima koji pušu vrući zrak i na taj način otapaju led.

4. Monitoring stanja kolosijeka kao preventivna mjera održavanja kolosijeka i sprječavanja štetnog utjecaja klimatskih promjena

S obzirom na sve veći negativni utjecaj klimatskih promjena na kolosiječne konstrukcije, osim navedenih mjera zaštita kolosijeka od ekstremnih vremenskih nepogoda na željezničkoj infrastrukturi neophodna je primjena novih metoda monitoringa kako bi se kontinuirano pratilo i održavalo stanje kolosijeka. Tradicionalne metode analize stanja kolosijeka uglavnom se svode na vizualne preglede te na mjerenja različitih parametara kolosijeka mjernim kolicima i ručnim prijenosnim uređajima. Veliki nedostatak takvih mjerenja jest to što je njihovo provođenje vremenski vrlo zahtjevno, a ručnim je uređajima moguće provesti jedino točkasta mjerenja. Također, upotrebljavajući takve uređaje na velikim infrastrukturnim mrežama, zbog dugotrajnosti mjerenja vrlo je teško redovito pratiti stanje kolosijeka [87]. Metode monitoringa koje se primjenjuju na željezničkoj infrastrukturi mogu se podijeliti na kontaktne i beskontaktne. Kod kontaktnih metoda vrlo je zahtjevan proces obuke stručnjaka koji će provoditi mjerenja, a pri mjerenju promet ponekad treba prekinuti [88]. Zbog toga kontaktne metode postaju nepoželjne te se sve češće počinju primjenjivati beskontaktne metode. Jedna od takvih metoda jest i detektiranje stanja kolosijeka primjenom računalnog vida pomoću standardnih, termalnih ili laserskih kamera pričvršćenih za konvencionalna željeznička vozila, zbog čega promet neće biti prekinut, a stanje kolosijeka prati se uz vrlo niske troškove [88]. Može se reći da sve veći razvoj željezničke infrastrukture zahtijeva moderne sustave monitoringa i detektiranja stanja kolosiječne konstrukcije. Danas se vrlo često primjenjuje monitoring pomoću mjernih vlakova ili vozila iz konvencionalne upotrebe koja su opremljena različitim vrstama senzora. Najčešće primjenjivani senzori su akcelerometri pomoću kojih je moguće bilježiti vibracije uzrokovane prolaskom vozila. Na temelju tih podataka moguće je analizirati udobnost vožnje i geometriju kolosijeka. Međutim, osim geometrije kolosijeka važno je kontinuirano pratiti stanja svih elemenata kolosiječne konstrukcije, što se danas provodi na različite načine. Na primjer, primjenom različitih senzora moguće je detektirati pogreške na kolosijeku poput puknuća tračnice ili degradacije zastorne

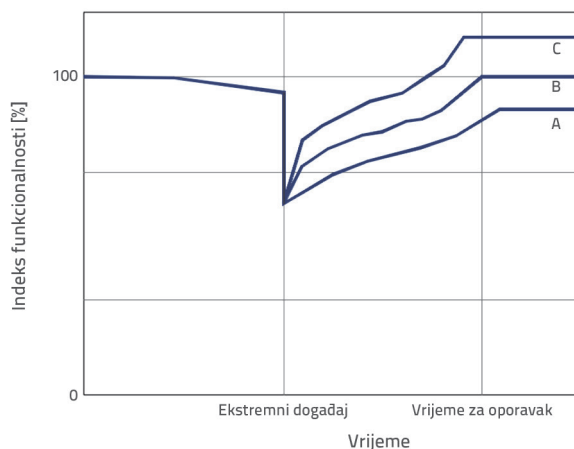
prizme [89]. Stanje zastorne prizme te donjega kolosiječnog stroja, uključujući zblaćenost te udio vlage, moguće je pratiti primjenom GPR-a (engl. *ground penetration radar*) [90]. Stanje pričvrstnog pribora uglavnom se vizualno pregledava, no takvim pregledima detektira se stanje samo onih elemenata koji su vizualno dostupni. Zato je u radu [91] provedena analiza detektiranja stanja pričvrstnog pribora, koja je uključivala propadanja podtračničke podloške i popuštanje sidrenih vijaka, na temelju podataka o vibracijama vozila. Primjenom tehnologija kao što su kabeli od optičkih vlakana također se može omogućiti kontinuirano prikupljanje podataka o stanju pruge, što je analizirano u radu [92]. Analizom povratno raspršene svjetlosti duž takvih kabela s vrlo velikom preciznošću moguće je utvrditi vibracije, zvučne valove i promjene naprežanja. Na taj način cijela se duljina kabla može kontinuirati pratiti, pretvarajući kabel u kontinuiranu mrežu senzora. Po prolasku vlaka po kolosijeku kabelom se mogu detektirati zvučni signali nastali iz kontakta kotača i tračnice. Tom je metodom također moguće utvrditi stanje zastorne prizme i prisutnost anomalija na kolosijeku kao što su temperaturne varijacije koje upućuju na pregrijavanje ili promjenu naprežanja koja upućuje na deformacije tračnice [92]. Za učinkovitu analizu stanja elemenata gornjeg stroja kolosiječne konstrukcije danas se sve češće primjenjuje infracrvena termografija kojom se može pratiti temperatura u elementima gornjega kolosiječnog stroja, što je osobito važno kod tračnica kada je riječ o utjecaju visokih temperatura [93].

S obzirom na sve češće ekstremne vremenske uvjete, osim redovitih pregleda kolosijeka upravitelji željezničke infrastrukture moraju biti spremni na brze i učinkovite preglede infrastrukture nakon nepovoljnog događaja kako bi se bilo kakva oštećenja detektirala u najkraćem roku te donijela odluka može li se željeznički promet nastaviti ili ga treba obustaviti. Degradacija koja će nastati na kolosiječnoj konstrukciji uslijed ekstremnih vremenskih uvjeta rezultira drastičnim smanjenjem indeksa funkcionalnosti kolosijeka. U tome slučaju neophodno je odgovarajućim interventnim radnjama vratiti konstrukciju na željeni indeks funkcionalnosti. Konstrukciju je moguće obnoviti tako da se omogući znatno veća otpornost na buduće ekstremne događaje (krivulja C na slici 18.). Međutim, može se dogoditi i to da, nakon provedenih mjera, konstrukcija

nema ista svojstva kao prije ekstremnoga vremenskoga događaja (krivulja A na slici 18.). Važno je napomenuti da je uslijed svih ekstremnih vremenskih neprilika kojima je željeznička infrastruktura izložena monitoring stanja kolosijeka učinkovit način praćenja indeksa funkcionalnosti i vrlo velika pomoć pri prediktivnome održavanju [94].

Prema [95], za monitoring željezničke infrastrukture često se primjenjuju mreže bežičnih senzora. Takvi se senzori najčešće primjenjuju za monitoring mostova, kolosijeka, kolosiječne opreme,

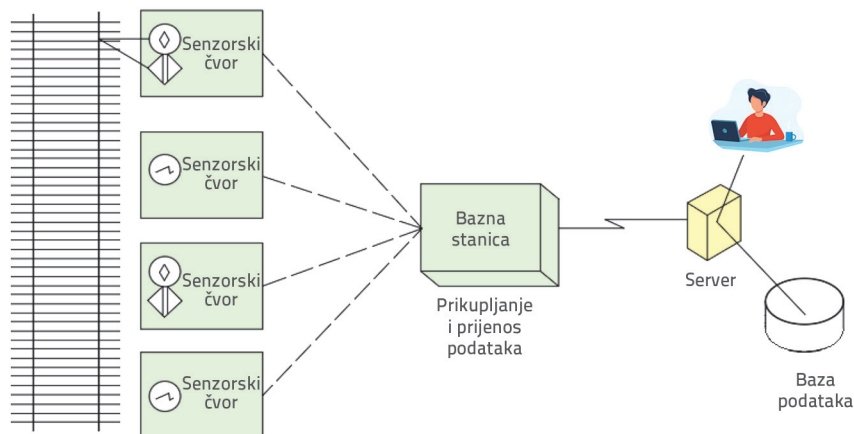
ali i stanja vlakova, odnosno njihovih dijelova kao što su osovine, kotači, vagoni i slično. Sensorima je moguće detektirati bilo kakve znatne promjene na kolosijeku prije djelovanja ekstremnih vremenskih uvjeta ili nakon njih. Nadalje, zbog brzine i učinkovitosti vrlo dobra svojstva, osobito prilikom pregleda kolosijeka nakon ekstremnoga vremenskoga događaja, pokazala je primjena bespilotnih letjelica opremljenih raznim sensorima [96]. U nastavku ovoga rada opisane su neke od najvažnijih novih metoda kontrole stanja kolosijeka kojima se može doprinijeti smanjivanju štetnog utjecaja klimatskih promjena na kolosijek ili brzemu i učinkovitijemu detektiranju oštećenja na kolosijeku uzrokovanog ekstremnim vremenskim uvjetima.



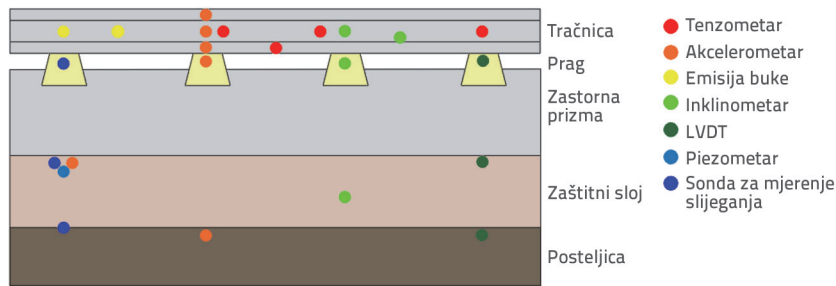
Slika 18. Krivulja indeksa funkcionalnosti konstrukcije tijekom ekstremnih vremenskih uvjeta [94]

4.1. Primjena mreža bežičnih senzora za detektiranje stanja kolosiječne konstrukcije

Mreže bežičnih senzora sastoje se od velikog broja prostorno raspoređenih senzora koji omogućuju nadzor infrastrukture, konstrukcija i vozila. Takav sustav omogućuje monitoring u realnome vremenu, a sastoji se od senzora, bazne stanice i servera (slika 19.) [94, 97]. Kod takvog sustava svaki senzorski čvor zasebno kontinuirano prikuplja podatke u stvarnome



Slika 19. Shematski prikaz kontinuiranoga monitoringa stanja kolosijeka [95]



Slika 20. Shematski prikaz lokacija na kolosijeku na koja se ugrađuje pojedini tip senzora za monitoring stanja kolosijeka [94]

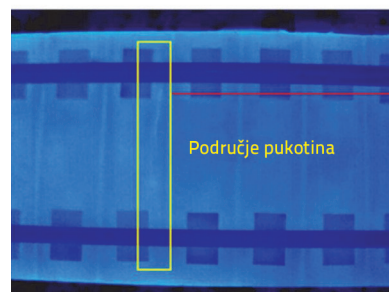
vremenu, a podaci se stalno nadziru primjenom različito definiranih klasifikacija predviđanja ili detektiranja oštećenja [95]. S obzirom na sve veća osovinska opterećenja, brzine prometovanja vlakova i sve češće vremenske nepogode kojima je izložena željeznička infrastruktura, potreba za takvim monitoringom postaje sve izraženija. Monitoringom je moguće detektirati puknuće i izvijanje tračnica, slijeganja kolosiječne konstrukcije i slično. Također, primjenjuju se niz senzora koji služe za detektiranje promjena u tlu poput promjene tlaka, naprezanja ili pomaka [98].

Ovisno o složenosti sustava koji se primjenjuje, monitoring konstrukcije moguće je provesti na različitim razinama detaljnosti. U radu [99] definirane su različite razine detaljnosti monitoringa, pri čemu prva razina obuhvaća samo detektiranje oštećenja, dok razina 4 obuhvaća detektiranje oštećenja i lokacije oštećenja, analizu učestalosti pojave oštećenja te definiranje posljedica oštećenja, a razina 5 uz sve navedeno definira preporuke za uklanjanje određenog oštećenja. U skladu s time jasno je da veća razina zahtijeva i složeniji sustav monitoringa. Kako bi se uspostavio sustav kontinuiranog monitoringa, primjenjuju se različiti tipovi senzora poput akcelerometra, senzora pomaka, optičkih senzora kojima je moguće mjeriti temperaturu, tenzometra, žiroskopa, senzora za detektiranje nagiba, piezometra, magnetno električnih senzora, ultrazvuka i sličnog [95]. Pozicije na koje se takvi senzori ugrađuju prikazane su na slici 20.

Najveći nedostatak takvog monitoringa jesu osiguravanje izvora električne energije na mjestima ugradnje senzora, zbog čega se dodatno moraju primjenjivati baterije, i velike količine podataka koje je potrebno procesuirati.

4.2. Primjena infracrvene termografije (ICT) za analizu stanja kolosiječne konstrukcije

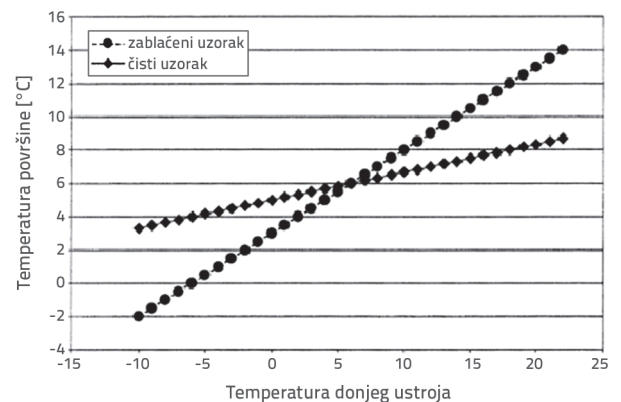
Primjenom infracrvene termografske analize moguće je utvrditi stanje pojedinih elemenata gornjeg ustroja kolosiječne konstrukcije. To se zasniva na činjenici da, na primjer, novougrađeni materijal



Slika 22. ICT ispitivanje oštećenja kolosiječne betonske ploče [93]

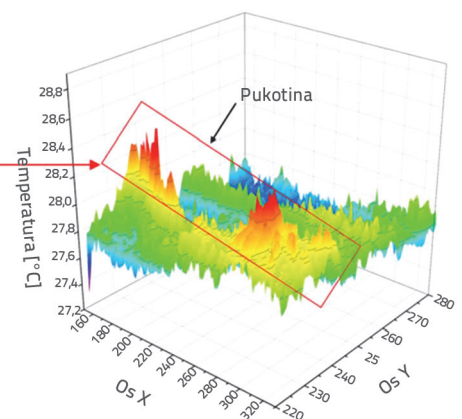
zastorne prizme ima drugačija toplinska svojstva u odnosu na zablaceni zastor jer veći udio sitnih čestica u zastornoj prizmi dovodi do duljeg zadržavanja vode, a samim time i do nižih temperatura. Na slici 21. prikazana je površinska temperatura čiste i zablacene zastorne prizme u odnosu na temperaturu donjeg ustroja.

S obzirom na to da stanje zastorne prizme utječe na bočni otpor kolosijeka, takav je monitoring vrlo važan pri djelovanju visokih temperatura koje mogu uzrokovati izvijanje tračnica. Termografsko je snimanje poželjno provoditi u stabilnim vremenskim uvjetima jer površina promatranog objekta ovisi o svojstvima okoline. Važna su i svojstva materijala koji se promatra poput provodljivosti topline, konvekcije, toplinskog kapaciteta i promjene infracrvenog zračenja.



Slika 21. Temperatura površine zastora u odnosu na temperaturu donjeg ustroja i atmosfersku temperaturu [100]

U radu [93] primjenom infracrvene termografije detektirana su površinska i unutrašnja oštećenja na kolosijecima na čvrstoj podlozi. Studija je pokazala da se tom metodom mogu učinkovito locirati pukotine na površini ploče širine



od 0,14 mm pri temperaturi okoline višoj od 20°C (slika 22.). U istraživanju [101] utvrđeno je da se primjenom ICT metode mogu analizirati i ponašanje te ispravnost grijača na skretnicama (slika 23.).



Slika 23. ICT snimka skretnice s prikazom temperatura grijača [101]

4.3. Primjena bespilotnih letjelica za detektiranje stanja kolosiječne konstrukcije

S obzirom na velike duljine infrastrukturnih objekata, kontrola i monitoring vrlo su zahtjevni, zbog čega se danas sve češće traže automatizirana, jednostavnija i učinkovitija rješenja, pri čemu vrlo dobre rezultate pokazuje primjena bespilotnih letjelica [96]. Bespilotne letjelice su letjelice ili zrakoplovi bez posade koje se nadzire na daljinu, pomoću daljinskog upravljača ili mogu letjeti samostalno na temelju unaprijed programiranog plana letenja [102]. Te su letjelice primarno razvijene za vojne potrebe, no danas se vrlo često primjenjuju u znanstvenim i gospodarskim granama. Na temelju njihovih svojstava kao što su veličina, težina, vrijeme leta, udaljenost i visina leta definirane su sljedeće tri kategorije: taktičke, strateške te letjelice s posebnom namjenom [103].

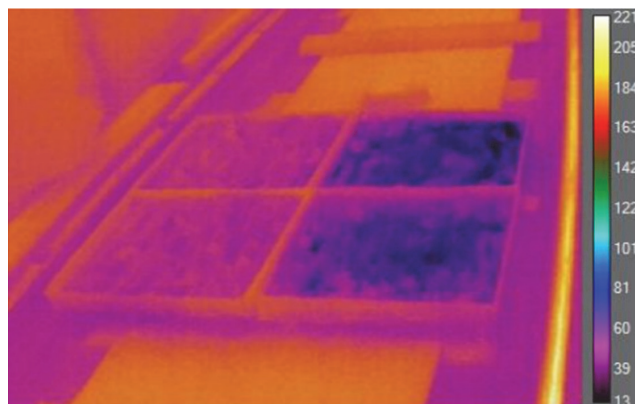
Prema [103], osnovni zahtjevi kojima bespilotne letjelice moraju udovoljiti da bi se mogle koristiti za snimanje jesu izvođenje planiranog leta definiranog prije snimanja, mogućnost nošenja opreme za snimanje i navigaciju, autonomija leta te mogućnost apsorpiranja vibracija i ostalih vanjskih utjecaja prilikom leta.

U zadnje se vrijeme bespilotne letjelice sve češće primjenjuju na mnogim cestovnim i željezničkim infrastrukturnama u Europi i svijetu. Najčešće se primjenjuju za ocjenu stanja infrastrukturnih objekata [104], monitoring klizišta na nasipima [105], analizu stanja kolosijeka, skretnica, kontaktnog voda [106], ali i za analizu oštećenja na infrastrukturnim objektima uzrokovanih nepogodama poput poplava, požara, potresa i sličnog [107]. Tijekom kontrole bespilotne letjelice mogu biti opremljene različitim sensorima kao što su ultrazvučni senzori, termalne ili infracrvene kamere, laserski daljinomjeri pomoću kojih se dobivaju informacije o okruženju i stanju promatranog objekta, vegetaciji u blizini objekta [108-110]. Pomoću bespilotnih letjelica moguće je generirati 3D model terena ili objekta, pri

čemu je potrebno snimiti velik broj fotografija analiziranog prostora s međusobnim uzdužnim i poprečnim preklapanjem. Te se fotografije primjenom računalnih programa povezuju u jedinstvenu cjelinu stvarajući oblak točaka, odnosno skup točaka u nekome koordinatnom sustavu [103].

Upotreba bespilotnih letjelica za monitoring željezničke infrastrukture smanjuje troškove i skraćuje vrijeme potrebno za kontrolu kolosijeka jer se njima u kratkome vremenu pokriva široko područje [111, 112]. Bespilotne su letjelice u odnosu na standardne metode prikupljanja podataka o stanju kolosijeka bolje rješenje zbog mogućnosti istraživanja i snimanja velikih područja i teško pristupačnih područja te mogućnosti različitih prilagodbi potrebama korisnika. Njihovom primjenom podaci se prikupljaju brže i jeftinije jer nije potrebno prikupljati velik broj uzoraka s terena, a u slučaju neispravnosti ili pada letjelice život pilota nije ugrožen. Snimanje se može obaviti bez zaustavljanja prometa te u blizini pruge nije potrebno osoblje, što dodatno povećava razinu sigurnosti. Neki od njihovih nedostataka jesu nemogućnost primjene u svim vremenskim uvjetima, troškovi proizvodnje i održavanja letjelice, opasnost od pada te ograničeni kapacitet baterije [103, 112].

Upotreba bespilotnih letjelica opremljenih infracrvenom kamerom za detektiranje stanja zastorne prizme kolosiječne konstrukcije analizirana je u radu [113]. Prvi korak ispitivanja proveden je kako bi se dokazalo da se primjenom infracrvene kamere mogu detektirati temperaturne razlike za različita stanja zastorne prizme, pri čemu je snimanje uzoraka zastorne prizme obavljeno fiksno montiranom kamerom. Kamera je montirana na visinu od 2,4 m te su analizirane temperaturne razlike četiriju različitih uzoraka zastorne prizme: čiste zastorne prizme, vlažne zastorne prizme te uzoraka 25-postotne i 50-postotne zablacenosti zastorne prizme. Nakon te faze ispitivanja provedeno je ispitivanje na pokretnoj konstrukciji radi definiranja sposobnosti razlikovanja temperature tijekom kretanja kamere te utvrđivanja mogućnosti upotrebe bespilotnih letjelica za termografska snimanja. Prilikom ispitivanja kamera je postavljena na uređaj na visini od 1,7 m, a različiti uzorci zastorne prizme postavljeni su u plitke drvene posude (slika 24.).



Slika 24. Termogram uzoraka pri brzini kretanja kamere od 1 m/s [113]



Slika 25. Upotreba bespilotnih letjelica i termografije za kontrolu ispravnosti grijača na skretnicama [114]

Uređaj se tijekom ispitivanja kretao različitim brzinama te se temperatura okoline nije mijenjala. Mjerenjem je pokazano da je na temelju dobivenih temperaturnih razlika moguće utvrditi stanje zastorne prizme kada je riječ o zablacenosti.

Bespilotne letjelice opremljene infracrvenim sensorima standardna su praksa u nizozemskoj željezničkoj tvrtki ProRail za provjeravanje funkcioniranja sustava grijanja na skretnicama (slika 25.).

5. Diskusija

5.1. Utjecaj klimatskih promjena na kolosijek

Klimatske promjene na kolosiječnoj konstrukciji mogu uzrokovati velika oštećenja koja rezultiraju prekidom prometovanja vlakova i velikim troškovima sanacije. U slučaju ekstremnih vremenskih uvjeta važno je u što kraćem roku provesti kontrolu kolosijeka

Tablica 7. Sumarni prikaz utjecaja klimatskih promjena na elemente kolosiječne konstrukcije

Klimatski faktor	Utjecaj na željezničku infrastrukturu	Standardne metode zaštite
Visoka temperatura	<ul style="list-style-type: none"> Izvijanje tračnica 	<ul style="list-style-type: none"> Povećanje bočnog otpora kolosijeka Premazivanje tračnica
	<ul style="list-style-type: none"> Problemi u radu skretnica 	
	<ul style="list-style-type: none"> Produljenje žica gornjeg voda 	
Snijeg, led i ekstremno niske temperature	<ul style="list-style-type: none"> Formiranje leda na žicama gornjeg voda i treće tračnice 	<ul style="list-style-type: none"> Premazivanje kontaktnog voda smjesom protiv smrzavanja Primjena vibropantografa Postavljanje grijača na treću tračnicu
	<ul style="list-style-type: none"> Neispravan rad skretnica zbog nakupljanja snijega i leda 	<ul style="list-style-type: none"> Primjena grijača na skretnicama
	<ul style="list-style-type: none"> Stvaranje leda na tračnicama 	<ul style="list-style-type: none"> Upotreba posebnih željezničkih vozila za uklanjanje leda s tračnica
	<ul style="list-style-type: none"> Puknuće tračnice, puknuća na armiranobetonskim pragovima 	
	<ul style="list-style-type: none"> Smrzavanje u tunelu 	
	<ul style="list-style-type: none"> Smrzavanje perona u kolodvorima 	<ul style="list-style-type: none"> Provođenje češćih mjera održavanja
Olujni naleti vjetrova i grmljavinska nevremena	<ul style="list-style-type: none"> Pad drveća na kolosijek i žice gornjeg voda Puknuće žica gornjeg voda Oštećenja na signalno-sigurnosnim uređajima 	<ul style="list-style-type: none"> Redovito održavanje vegetacije pružnog pojasa
	<ul style="list-style-type: none"> Prevrtanje brzih putničkih vlakova i praznih teretnih vagona 	<ul style="list-style-type: none"> Izgradnja burobrana
Poplave	<ul style="list-style-type: none"> Promjene u geometriji kolosijeka uslijed slijevanja željezničkih nasipa 	<ul style="list-style-type: none"> Kontinuirani monitoring vremenskih uvjeta te prilikom najave mogućih poplava ugrožene lokacije opremiti potrebnom opremom (postavljanje sustava obrane od poplava) Redovito održavanje sustava odvodnje Postavljanje crpnih stanica na kritičnim lokacijama
	<ul style="list-style-type: none"> Ispiranje zastorne prizme 	
	<ul style="list-style-type: none"> Kvarovi na signalno-sigurnosnim uređajima 	

kako bi se utvrdilo može li željeznički promet nastaviti teći ili je potrebno obustaviti promet i sanirati kolosijek. U tablici 7. sumirani su ekstremni vremenski uvjeti kojima je željeznička infrastruktura izložena te štetne posljedice koje mogu izazvati. Ako ekstremni vremenski uvjeti uzrokuju oštećenje kolosijeka, važno je detektirati nastalo oštećenje i sanirati ga u najkraćem roku kako bi željeznički promet mogao neometano nastaviti teći. Međutim, osim na elemente kolosijeka, klimatske promjene, osobito visoke temperature i ekstremne količine oborina, imaju negativan utjecaj na provođenje redovitih mjera održavanja. Visoke temperature uzrokuju probleme pri održavanju kolosijeka po smjeru i visini. Na primjer, podbijanje kolosijeka za visokih temperatura može uzrokovati izbacivanje kolosijeka, a ako se podbijanje provodi za niskih temperatura, velika je vjerojatnost da će tračnice puknuti [115]. Tijekom podbijanja podbijačica podiže kolosiječnu konstrukciju i u tom se trenutku u cijelosti eliminira bočni opor kolosijeka. Drugim riječima, ako su u tome slučaju u tračnici prisutne visoke temperature, one će uzrokovati izbacivanje kolosijeka. Na temelju navedenoga može se zaključiti da se s duljim trajanjem intervala vrlo visokih temperatura skraćuje period u godini u kojima se kolosijeci mogu regulirati po smjeru i visini, što posljedično može rezultirati pogoršavanjem geometrije kolosijeka te stvaranjem većih dinamičkih sila u kolosijeku i bržom degradacijom elemenata kolosijeka. Na mreži hrvatskih željeznica strojno reguliranje kolosijeka po smjeru i visini izvodi se pri temperaturama koje mogu odstupati do ± 15 °C od potrebne temperature koja u kontinentalnome dijelu Hrvatske iznosi $22,5 \pm 3$ °C [33]. Pri povišenim temperaturama podbijanje se može izvoditi primjenom podbijačica s dinamičkim stabilizatorima, ali i tom je slučaju potrebno paziti na to da temperature nisu ekstremne kao što je slučaj tokom ljetnih mjeseci. Međutim, s obzirom na sve više temperature na području Europe tijekom cijele godine, može se zaključiti da će takav rast temperature rezultirati obaveznom upotrebom podbijačica s dinamičkim stabilizatorima, što danas još uvijek nije slučaj, a svakako i poskupljenjem podbijanja kolosijeka. Kada je riječ o velikim količinama oborina, važno je da je zastorna prizma u dobrom stanju, odnosno s malim udjelom sitnih čestica kako bi se osigurala učinkovita odvodnja. Međutim, u slučaju ekstremnih količina oborina nije moguće osigurati učinkovitu odvodnju te će zadržavanje vode u kolosijeku rezultirati preraspodjelom materijala zastorne prizme, što može dovesti do znatno bržeg slijeganja [116]. Takva slijeganja zahtijevat će češće provođenje redovitih mjera održavanja kolosijeka. Nadalje, drobljenjem zastorne prizme uslijed prometnog opterećenja stvaraju se sitne čestice koje u kombinaciji s čestim oborinama mogu eliminirati njegovu elastičnost, zbog čega je češće potrebno izvoditi rešetanje ili zamjenu zastorne prizme.

5.2. Preporuke za smanjivanje štetnih utjecaja klimatskih promjena na postojećim kolosiječnim konstrukcijama

Zbog sve većih ekstremnih vremenskih uvjeta kojima je izložena željeznička infrastruktura, neophodno je sve češće provoditi

mjere održavanja kako bi se očuvala dobra svojstva kolosiječne konstrukcije. Na primjer, redovitim mjerama održavanja gornjega kolosiječnog ustroja važno je omogućiti visoku vrijednost bočnog otpora kako bi se spriječilo izbacivanje kolosijeka uslijed pojave velikih naprezanja u tračnicama koja su posljedica visokih temperatura. Također, održavanjem vegetacije pružnog pojasa moguće je izbjeći pad stabala na kontaktnu mrežu i kolosijek tijekom olujnih nevremena. S obzirom na sve veće intenzitete padalina, redovitim mjerama održavanja potrebno je omogućiti učinkovitu odvodnju kolosijeka te redovitim čišćenjem spriječiti nakupljanje lišća i ostalih sedimenata. Ako na postojećim kolosijecima postoje lokacije na kojima se često događaju poplave, potrebno je definirati način tijeka prometa u slučaju povećavanja razina vode te utvrditi pri kojoj se razini vode promet mora obustaviti. Također je važno definirati procedure za hitni pregled kolosijeka i sanaciju nakon povlačenja visokih razina vode. Međutim, kako je vidljivo u tablici 7., na poneke vremenske uvjete ne može se djelovati preventivnim mjerama, već je nakon takvog događaja neophodno sanirati kolosijeku. U takvim slučajevima dobro je rješenje primjena novih sustava monitoringa kolosijeka kojim će se nakon ekstremnih vremenskih uvjeta u kratkome roku detektirati stanje kolosijeka i eventualna oštećenja uzrokovana vremenskim uvjetima [81]. U ovome su radu prikazane neke od novih metoda monitoringa kolosijeka koje se sve češće primjenjuju na željezničkoj infrastrukturi. Jedna od takvih metoda jest i primjena bespilotnih letjelica, a preliminarna istraživanja detektiranja stanja kolosijeka bespilotnim letjelicama opremljenima infracrvenom kamerom također su provedena na dionici željezničke infrastrukture u Hrvatskoj. Ta istraživanja zasnivala su se na detektiranju stanja zastorne prizme na temelju zabilježenih temperaturnih vrijednosti prizme, a rezultati su pokazali da se na temelju takvog monitoringa može utvrditi stanje zastorne prizme.

5.3. Prilagodba novih kolosiječnih konstrukcija klimatskim promjenama

Zbog sve češćih ekstremnih vremenskih uvjeta prilikom projektiranja novih i rekonstrukcije postojećih kolosiječnih konstrukcija neophodno je provesti studije kojima će se utvrditi kojim će vremenskim neprilikama kolosiječna konstrukcija biti izložena tijekom eksploatacije te analizirati koji se maksimalni vremenski ekstremi mogu očekivati tijekom eksploatacije kolosijeka. Primjenom klimatskih modela i povijesnih podataka može se predvidjeti kako će se klimatski uvjeti razvijati u budućnosti. S obzirom na rezultate takvih analiza, potrebno je predvidjeti mjere kako bi se spriječila degradacija kolosijeka uslijed nepovoljnih vremenskih uvjeta.

Da bi se smanjio negativan utjecaj vjetrova, potrebno je provesti studije o njegovu utjecaju na kolosiječnu konstrukciju, vijadukte i mostove, ali i na vozila, odnosno prazne teretne vagone te brze putničke vlakove. U područjima koja su najizloženija jakim naletima vjetrova prilikom projektiranja potrebno je predvidjeti burobrane, odnosno vjetrobranske barijere.

Također, odgovarajućim odabirom neutralne temperature u tračnicama te primjenom metoda snižavanja temperature u tračnicama kada su izravno izložene Sunčevoj svjetlosti (npr. primjenom različitih premaza) moguće je smanjiti opasnost od izvijanju tračnica. Neutralna temperatura u tračnici mora biti definirana na temelju podataka o dosadašnjim vanjskim temperaturama i temperaturama koje se očekuju tijekom eksploatacije kolosiječne konstrukcije. Također, prilikom projektiranja potrebno je predvidjeti optimalnu vrstu i oblik pragova te ugradnju sprava za povećavanje bočnog otpora kako bi se spriječilo izbacivanja kolosijeka. Također, bočni otpor kolosijeka moguće je povećati i promjenom oblika i dimenzija zastorne prizme.

Ako na području novoprojektirane željezničke infrastrukture postoji opasnost od poplava uslijed velikih količina oborina, neophodno je već u fazi projektiranja osmisliti i implementirati sveobuhvatne mjere zaštite. To je moguće osigurati postavljanjem nivelete iznad očekivane razine poplava, pozornim projektiranjem sustava za odvodnju i propusta većega kapaciteta protoka kako bi se omogućilo otjecanje poplavnih voda.

Moderni sustavi za praćenje stanja infrastrukture mogu unaprijed otkriti potencijalne probleme uzrokovane klimatskim promjenama. Takvi sustavi mogu biti planirani već u fazi projektiranja, a mogu obuhvaćati ugradnju senzora na kolosijek (npr. uz tračnice) pomoću kojih će se detektirati temperatura, pomaci, vibracije ili drugi parametri u realnome vremenu koji će pratiti promjene na kolosiječnoj konstrukciji. Ugradnjom takve opreme za daljinsko praćenje može se odmah djelovati u slučaju nepravilnosti ili potencijalnih oštećenja.

6. Zaključak

Klimatske promjene, obilježene porastom prosječnih godišnjih temperatura, sve češćim ekstremnim vremenskim događajima

i povećanim količinama oborina, stvaraju znatne izazove kojima je potrebno prilagoditi kolosiječne konstrukcije. U ovome su radu opisani utjecaji klimatskih promjena na pojedine elemente kolosijeka sa zastornom prizmom kako bi se osvijestila štetnost nepovoljnih vremenskih uvjeta i potaknulo pravodobno djelovanje. Uz analizu štetnih posljedica prikazane su i najčešće primjenjivane mjere zaštite od klimatskih promjena poput poboljšanja sustava odvodnje, primjene novih tehnologija i načina zaštita pojedinih elemenata kolosijeka te implementacija suvremenih metoda monitoringa.

S obzirom na sve veću važnost željezničkog prometa kao ekološki održivog oblika prijevoza, pri izgradnji i rekonstrukciji kolosijeka neophodno je voditi računa i o otpornosti na klimatske promjene. Redoviti pregledi kolosijeka, osobito nakon ekstremnih vremenskih događaja, ključni su za osiguranje sigurnosti. Primjena tehnologija poput bespilotnih letjelica i senzora koji prate stanje kolosijeka u stvarnome vremenu omogućuje brzu detekciju oštećenja nakon nekog ekstremnog događaja te donošenje informiranih odluka o nastavku prometa ili potrebi za hitnom sanacijom.

Prilagođavanje željezničke infrastrukture klimatskim promjenama smanjuje rizik od ekonomskih gubitaka, prekida prometa i visokih troškova sanacije. Može se reći da je za osiguravanje dugoročne otpornosti kolosiječne konstrukcije na klimatske promjene potrebno kombinirati preventivne mjere održavanja, nove tehnologije monitoringa te predvidjeti brze sanacije u slučaju oštećenja kolosijeka. Ignoriranje navedenih izazova ugrozilo bi ne samo financijsku održivost sustava već i njegovu sposobnost da se nosi s rastućim potrebama za brzim, sigurnim i pouzdanim prometom. Uz sve veće brzine i frekvencije vlakova primjena novih metoda monitoringa i održavanja postaje neophodna kako bi se željeznički promet prilagodio sve izazovnijim uvjetima koje donose ekstremni vremenski uvjeti.

LITERATURA

- [1] European Commission Directorate-General for the Environment: Climate Change Climate change: what is it all about?, 2005.
- [2] Thaduri, A., Garmabaki, A., Kumar, U.: Impact of climate change on railway operation and maintenance in Sweden: A State-of-the-art review, Maintenance, Reliability and Condition Monitoring, 1 (2021) 2, pp. 52–70, <https://doi.org/10.21595/mrcm.2021.22136>
- [3] Petkovic, G., Thordarson, S.: Adaptation to Climate Change – Task Group Under CEDR, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 48 (2012), pp. 2555–2565, 10.1016/j.sbspro.2012.06.1226
- [4] Milić, P., Kušter Marić, M.: Climate change effect on durability of bridges and other infrastructure, GRAĐEVINAR, 75 (2023) 9, pp. 893–906, <https://doi.org/10.14256/JCE.3756.2023>
- [5] Hrapović, K.: Sustainability in road construction – Two case studies, GRAĐEVINAR, 76 (2024) 5, pp. 413–423, <https://doi.org/10.14256/JCE.3979.2024>
- [6] Vitali Čepo, D.: Klimatske promjene u Hrvatskoj, Državni hidrometeorološki zavod
- [7] Rossetti, M.A.: Potential impacts of climate change on railroads, The Potential Impacts of Climate Change on Transportation, 2002.
- [8] Milić, I., Bleiziffer, J.: Rating systems for the sustainability assessment of infrastructure, GRAĐEVINAR, 76 (2024) 4, pp. 335–345, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3858.2023>
- [9] Koks, E.E., Rozenberg, J., Zorn, C., Tariverdi, M., Vousdoukas, M., Fraser, S.A., et al.: A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets, Nature Communications, 10 (2019) 1, <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3>
- [10] Nemry, F., Demirel, H.: Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures Impacts of Climate Change: A focus on road and rail transport infrastructures Françoise Nemry, Hande Demirel 2012. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC72217>, pristupljeno 25.11.2024.
- [11] Mulholland, E., Feyen, L.: Increased risk of extreme heat to European roads and railways with global warming, Climate Risk Management, 34 (2021) 100365, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100365>

- [12] EC, 2021: The European Year of Rail – The European Green Deal, European Union factsheet, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1b7073d2-5dcb-11ea-b735-01aa75ed71a1>, pristupljeno: 27.08.2024.
- [13] EC, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal (COM/2019/640 final), Annex: Roadmap – Key Actions, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>, pristupljeno: 27.08.2024.
- [14] Neumann, J.E., Chinowsky, P., Helman, J., Black, M., Fant, C., Strzepek, K., Martinich, J.: Climate effects on US infrastructure: the economics of adaptation for rail, roads, and coastal development, *Climatic Change*, 167 (2021) 3-4, <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03179-w>
- [15] Baker, C.J., Chapman, L., Quinn, A., Dobney, K.: Climate change and the railway industry: A review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224 (2010) 3, pp. 519–528, <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1558>
- [16] Weather Resilience and Climate Change Adaptati: <https://safety.networkrail.co.uk/home-2/environment-and-sustainable-development/wrcca/>, pristupljeno: 20.06.2024.
- [17] Živković, S., Bušić, B., Vicković, D.: Utjecaj poplava u Slavoniji na željezničku infrastrukturu, *Dani prometnica 2015 Kvaliteta prometne infrastrukture – ključ razvoja gospodarstva*, Zagreb, pp. 202–228, 2015.
- [18] Željeznica za budućnost Program obnove i modernizacije željezničke infrastrukture do 2030. godine, <https://www.hzinfra.hr/wp-content/uploads/2021/01/HZI-Zeljeznica-za-buducnost.pdf>, pristupljeno: 20.08.2024.
- [19] Love, G., Soares, A., Püempel, H.: Climate Change, Climate Variability and Transportation, *Procedia Environmental Sciences*, 1 (2010) 5, pp. 130–145, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.010>
- [20] Garmabaki, A.H.S., Thaduri, A., Famurewa, S., Kumar, U.: Adapting railway maintenance to climate change, *Sustainability*, 13 (2021) 24, <https://doi.org/10.3390/su132413856>
- [21] Liu, K., Wang, M., Zhou, T.: Increasing costs to Chinese railway infrastructure by extreme precipitation in a warmer world, *Transportation Research Part D*, 93 (2021) 102797, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102797>
- [22] Wang, T., Qu, Z., Nichol, T., Yang, Z., Dimitriu, D., Clarke, G.: Impacts of climate change on rail systems: A new climate risk analysis model, 28th International European Safety and Reliability Conference, ESREL 2018, Trondheim, Norway, pp. 2771–2780, 2018.
- [23] Oslakovic, I.S., Maat, H., Hartmann, A., Dewulf, G.: Risk Assessment Of Climate Change Impacts On Railway Infrastructure, *Engineering Project Organization Conference*, Colorado, 2013.
- [24] Hamarat, M.Z., Kaewunruen, S., Papaalias, M.: A Life-Cycle Cost Analysis of Railway Turnouts Exposed to Climate Uncertainties, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471 (2019) 6, 10.1088/1757-899X/471/6/062026
- [25] Palin, E.J., Stipanovic Oslakovic, I., Gavin, K., Quinn, A.: Implications of climate change for railway infrastructure, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12 (2021) 5, 10.1002/wcc.728
- [26] Dobney, K., Baker, C. J., Quinn, A. D., Chapman, L.: Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom, *Meteorological Applications*, 16 (2009) 2, pp. 245–251, <https://doi.org/10.1002/met.114>
- [27] Chinowsky, P., Helman, J., Gulati, S., Neumann, J., Martinich, J.: Impacts of climate change on operation of the US rail network, *Transp Policy*, 75 (2019), pp. 183–191, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007>
- [28] Pucillo, G.P.: Thermal buckling and post-buckling behaviour of continuous welded rail track, *Vehicle System Dynamics*, 54 (2016) 12, pp. 1785–1807, <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1237665>
- [29] Sanchis, I.V., Franco, R.I., Zuriaga, P.S., Fernández, P.M.: Risk of increasing temperature due to climate change on operation of the Spanish rail network, 2nd International Congress on Transport Infrastructure and Systems in a changing world, Rome, pp. 5–12, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.056>
- [30] Villalba Sanchis, I., Insa, F.R., Martínez Fernández, P., Salvador, Zuriaga, P., Font Torres, J. B.: Risk of increasing temperature due to climate change on high-speed rail network in Spain, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 82 (2020) 102312, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102312>
- [31] Dobney, K.: Quantifying the effects of an increasingly warmer climate with a view to improving the resilience of the gb railway network: is a new stressing regime the answer, *The University of Birmingham, doktorska disertacija*, 2010.
- [32] Skarova, A., Harkness, J., Keillor, M., Milne, D., Powrie, W.: Review of factors affecting stress-free temperature in the continuous welded rail track, *Energy Reports*, 8 (2022), pp. 107–113, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.151>
- [33] Rekonstrukcija željezničkog kolodvora Rijeka Brajdica i kontejnerskog terminala Brajdica na katastarskim česticama u katastarskoj općini Sušak, *Knjiga 3 – tehničke specifikacije, II dio – opće napomene i tehnički uvjeti*, HŽ Infrastruktura, Zagreb. 2017.
- [34] Chang, W., Cai, X., Wang, Q., Tang, X., Sun, J., Yang, F.: The influence of track irregularity in front of the turnout on the dynamic performance of vehicles, *Applied Sciences*, 12 (2022) 9, <https://doi.org/10.3390/app12094169>
- [35] Dindar, S., Kaewunruen, S., An, M., Osman, M.H.: Natural Hazard Risks on Railway Turnout Systems, *Procedia Engineering*, 161 (2016), pp.1254–1259, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.561>
- [36] Maciołek, T., Szelağ, A.: Methods of reducing the negative influence of weather phenomena, icing in particular, on the operation of an overhead catenary, *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 18 (2016) 2, pp. 640–651
- [37] Li, K., Feng, C., Jin, S., Yao, Y., Zhou, N.: Effect of Ambient Temperature on Catenary System, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 692 (2021) 022081, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/692/2/022081>
- [38] Yao, Y., Huang, P., Zhou, N., Yang, Z., Zhang, W.: Effect of Ambient Temperature on Current Collection Quality in Pantograph-Catenary Interaction, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 23 (2023) 13, <https://doi.org/10.1142/S0219455423501456>
- [39] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture: Pravilnik o tehničkim uvjetima kojima mora udovoljavati željeznički elektroenergetski infrastrukturni podsustav, NN 129/2010, 19.11.2010.
- [40] Navikas, D., Sivilevičius, H.: Modelling of Snow Cover Thickness Influence on the Railway Construction Temperature Regime under Variable Weather Conditions, *Procedia Eng.* 187 (2017), pp. 124–134
- [41] Lotfi, A., Virk, S.M., Pettersen, J.: Atmospheric Ice Accretion on Railway Overhead Powerline Conductors- A Numerical Case Study, *The International Journal of Multiphysics*, 17 (2023) 3, pp. 253–268

- [42] Memar, S., Napoles, O.M., Hofland, B., Melling, G.: Characterization of Long-period Ship Wave Loading and Vessel Speed for Risk Assessment for Rock Groynes Designs via Extreme Value Analysis, 31st European Safety and Reliability Conference, ESREL 2021, Angers, France, pp. 2525–2532, 2021.
- [43] Yang, F., Gao, M., Cong, J., Wang, P.: System dynamics modeling and experimental study of railway track with thermoelectric heater/generator in extreme weather conditions, *Journal of Cleaner Production*, 249 (2020), Paper 119367, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119367>
- [44] Chapman, L., Thornes, J. E., Huang, Y., Cai, X., Sanderson, V. L., White, S. P.: Modelling of rail surface temperatures: A preliminary study, *Theor Appl Climatol*, 92 (2008) 1–2, pp. 121–131
- [45] Jogun, T.: Analiza svojstava materijala kontaktnog vodiča u eksploatacijskim uvjetima na prugama HŽ infrastrukture, Sveučilište u Zagrebu, završni specijalistički rad, 2016.
- [46] Guo, W., Xia, H., Karoumi, R., Zhang, T., Li, X.: Aerodynamic effect of wind barriers and running safety of trains on high-speed railway bridges under cross winds, *Wind and Structures, An International Journal*, 20 (2015) 2, pp. 213–236
- [47] Tahvil, N.: Winterization of Railways, Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [48] Kulkarni, S., Pappalardo, C.M., Shabana, A.A.: Pantograph/Catenary contact formulations, *Journal of Vibration and Acoustics*, 139 (2017) 1, <https://doi.org/10.1115/1.4035132>
- [49] Feng, D., Yu, Q., Sun, X., Zhu, H., Lin, S., Liang, J.: Risk Assessment for Electrified Railway Catenary System under Comprehensive Influence of Geographical and Meteorological Factors, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7 (2021) 4, pp. 3137–3148
- [50] Song, Y., Liu, Z., Wang, H., Lu, X., Zhang, J.: Nonlinear analysis of wind-induced vibration of high-speed railway catenary and its influence on pantograph–catenary interaction, *Veh Syst Dyn*, 54 (2016) 6, pp. 723–747, <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1156134>
- [51] Kostianaia, E.A., Kostianoy, A.G., Scheglov, M.A., Karelov, A.I., Vasileisky, A.S.: Impact of Regional Climate Change on the Infrastructure and Operability of Railway Transport, *Transp Telecommun*, 22 (2021) 2, pp. 183–195
- [52] Dawson, D., Shaw, J., Roland Gehrels, W.: Sea-level rise impacts on transport infrastructure: The notorious case of the coastal railway line at Dawlish, England, *Journal of Transport Geography*, 51 (2016) 97–109, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.11.009>
- [53] Ochsner, M., Palmqvist, C., Olsson, N. O. E., Winslott, L.: The effects of flooding on railway infrastructure: A literature review, *Transportation Research Procedia*, 2022.
- [54] Sresakoolchai, J., Hamarat, M., Kaewunruen, S.: Automated machine learning recognition to diagnose flood resilience of railway switches and crossings, *Scientific Reports*, 13 (2023) 1, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29292-7>
- [55] Bubeck, P., Dillenardt, L., Alfieri, L., Feyen, L., Thieken, A.H., Kellermann, P.: Global warming to increase flood risk on European railways, *Clim Change*, 155 (2019) 1, pp. 19–36
- [56] Sulejmanović, S., Albinović, S., Ljevo, Ž., Pozder, M., Šarić, A.: Flood Risk Analysis of the Rail Network at Federation of Bosnia and Herzegovina, *Advanced Technologies, Systems, and Applications VII Proceedings of the International Symposium on Innovative and Interdisciplinary Applications of Advanced Technologies (IAT) 2022, Sarajevo*, pp. 196–208, 2022.
- [57] Kaewunruen, S., Tang, T.: Idealisations of dynamic modelling for railway ballast in flood conditions, *Applied Sciences*, 9 (2019) 9, 10.3390/app9091785
- [58] Hamarat, M., Papaalias, M., Kaewunruen, S.: Vulnerability of Railway Switches and Crossings Exposed to Flooding Conditions, *Virtual Conference on disaster risk reduction*, pp. 337–348, 2021.
- [59] Dindar, S., Kaewunruen, S., An, M., Sussman, J.M.: Bayesian Network-based probability analysis of train derailments caused by various extreme weather patterns on railway turnouts, *Safety Science*, 110 (2018), pp. 20–30, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2017.12.028>
- [60] Ole, Z. K.: Track Stability and Buckling - Rail Stress Management, University of Southern Queensland, završni rad, 2008.
- [61] Wang, H., Chen, J., Balaguru, P.N., Al-Nazer, L.: Thermal benefits of low solar absorption coating for preventing rail buckling, 2015 Joint Rail Conference, JRC 2015, San Jose, California USA, 2015.
- [62] Jing, G., Ji, Y., Aela, P.: Experimental and numerical analysis of anchor-reinforced sleepers lateral resistance on ballasted track, *Construction and Building Materials*, 264 (2020) 120197, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120197>
- [63] Jing, G., Aela, P.: Review of the lateral resistance of ballasted tracks, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 234 (2020) 8, pp. 807–820
- [64] Sussmann, T., Kish, A., Trosino, M.: Influence of Track Maintenance on Lateral Resistance of Concrete-Tie Track, *Transportation Research Record*, 1825 (2003), pp. 56–63, <https://doi.org/10.3141/1825-08>
- [65] Zakeri, J.A., Hassanrezaei, H.: Experimental investigation of the effect of winged sleeper on lateral resistance of ballasted track, *Scientia Iranica*, 28 (2021) 2 A, pp. 656–665
- [66] Koike, Y., Nakamura, T., Hayano, K., Momoya, Y.: Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks, *Soils Found*, 54 (2014) 3, pp. 502–514, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2014.04.014>
- [67] Zakeri, A.J.: Lateral Resistance of Railway Track, *Reliability and Safety in Railway*, 2012, <https://doi.org/10.5772/35421>
- [68] Zakeri, J.A., Mirfattahi, B.: Field investigation on the lateral resistance of railway tracks with frictional sleepers, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671 (2020) 1, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012125>
- [69] Jing, G., Fu, H., Aela, P.: Lateral displacement of different types of steel sleepers on ballasted track, *Construction and Building Materials*, 186 (2018), pp. 1268–1275, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.095>
- [70] Cools, R.: Influence of ballast stabilisation and transversal underpasses, master's dissertation, Ghent University, 2021.
- [71] Ngamkhanong, C., Wey, C. M., Kaewunruen, S.: Buckling analysis of interspersed railway tracks *Applied Sciences*, 10 (2020) 9, <https://doi.org/10.3390/app10093091>
- [72] Tan, P., Xiao, Y., Jiang, Y., Wang, M., Wang, X., Zhang, C., et al.: Investigating influencing mechanisms of under-sleeper pads on lateral resistance of ballasted railway trackbed via hybrid DEM-FDM simulations, *Transportation Geotechnics*, 45 (2024) 101200, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101200>
- [73] Lakušić, S.: Gornji ustroj željeznica: Predavanja za studente IV godine Građevinskog fakulteta, 2006.

- [74] Brambilla, E., Giappino, S., Tomasini, G.: Wind tunnel tests on railway vehicles in the presence of windbreaks: Influence of flow and geometric parameters on aerodynamic coefficients, *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 220 (2022), 10.1016/j.jweia.2021.104838
- [75] Xiang, H., Li, Y., Wang, B., Liao, H.: Numerical simulation of the protective effect of railway wind barriers under crosswinds *International Journal of Rail Transportation*, 3 (2015) 3, pp. 151–163, <http://dx.doi.org/10.1080/23248378.2015.1054906>
- [76] Yan, J., Chen, T., Deng, E., Yang, W., Cheng, S., Zhang, B.: Aerodynamic response and running posture analysis when the train passes a crosswind region on a bridge, *Applied Science*, 11 (2021) 9, <https://doi.org/10.3390/app11094126>
- [77] Nazarnia, H., Nazarnia, M., Sarmasti, H., Wills, W.O.: A systematic review of civil and environmental infrastructures for coastal adaptation to sea level rise, *Civil Engineering Journal*, 6 (2020) 7, pp. 1375–1399, <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091555>
- [78] Work begins to install Rock Armour on Cambrian line between Welshpool and Newtown, <https://www.railadvent.co.uk/2022/07/work-begins-to-install-rock-armour-on-cambrian-line-between-welshpool-and-newtown.html>, pristupljeno: 10.06.2024.
- [79] Cheetham, M., Chirouze, F., Bredier, L.: RISK VIP: Evaluation of Flood Risk on the French Railway Network Using an Innovative GIS Approach, 3rd European Conference on Flood Risk Management, 20016, 10.1051/e3sconf/20160710004
- [80] Nester, T., Schobel, A., Drabek, U., Rachoy, C., Wiesenegger, H.: A flood warning system for railways, *Georisk*, 2 (2008) 4, pp. 237–249, 10.1080/17499510802199745
- [81] Doll, C., Trinks, C., Sedlacek, N., Pelikan, V., Comes, T., Schultmann, F.: Adapting rail and road networks to weather extremes: Case studies for southern Germany and Austria, *Nat Hazards*, 72 (2014) 1, pp. 63–85
- [82] Electrical Point heating systems Turnout heating for depot switches, https://www.fenixrailsystems.com/wp-content/uploads/2020/06/ElectricalPointheatingsystems_updated.pdf, pristupljeno 10.06.2024.
- [83] Laforte, J.L., Allaire, M.A., Laflamme, J.: State-of-the-art on power line de-icing, *Atmospheric Research*, 46 (1998) 1–2, pp. 143–158, 10.1016/S0169-8095(97)00057-4
- [84] Nilsson, F., Moyassari, A., Bautista, Á., Castro, A., Arbeloa, I., Järn, M., et al.: Modelling anti-icing of railway overhead catenary wires by resistive heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143(2019) 118505. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118505>
- [85] Five railway hacks to survive winter | RailTech.com, <https://www.railtech.com/infrastructure/2019/12/04/five-railway-hacks-to-survive-winter/?gclid=accept>, pristupljeno 06.05.2024.
- [86] Seasonal track treatment and weather support fleet - Network Rail, <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/looking-after-the-railway/our-fleet-machines-and-vehicles/seasonal-track-treatment-and-weather-support-fleet/>, pristupljeno: 05.03.2024.
- [87] Stoura, C.D., Dertimanis, V.K., Hoelzl, C., Kossmann, C., Cigada, A., Chatzi, E.N.: A Model-Based Bayesian Inference Approach for On-Board Monitoring of Rail Roughness Profiles: Application on Field Measurement Data of the Swiss Federal Railways Network. *Struct Control Heal Monit.* 2023;2023.
- [88] Karakose, M., Yaman, O., Murat, K., Akin, E.: A new approach for condition monitoring and detection of rail components and rail track in railway, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 11 (2018) 1, pp. 830–845, 10.2991/ijcis.11.1.63
- [89] Peinado Gonzalo, A., Horridge, R., Steele, H., Stewart, E., Entezami, M.: Review of Data Analytics for Condition Monitoring of Railway Track Geometry, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23 (2022) 12, pp. 22737–54, 10.1109/TITS.2022.3214121
- [90] Koohmishi, M., Kaewunruen, S., Chang, L., Guo, Y.: Advancing railway track health monitoring, Integrating GPR, InSAR and machine learning for enhanced asset management, *Automation in Construction*, 162 (2024), Paper 105378, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105378>
- [91] Chen, M., Zhai, W., Zhu, S., Xu, L., Sun, Y.: Vibration-based damage detection of rail fastener using fully convolutional networks, *Vehicle System Dynamics*, 60 (2022) 7, pp. 2191–2210, <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1896010>
- [92] Rahman, M.A., Jamal, S., Taheri, H.: Remote condition monitoring of rail tracks using distributed acoustic sensing (DAS): A deep CNN-LSTM-SW based model, *Green Energy and Intelligent Transportation*, 3 (2024) 5
- [93] Li, Z.W., Liu, X.Z., Lu, H.Y., He, Y.L., Zhou, Y.L.: Surface crack detection in precasted slab track in high-speed rail via infrared thermography, *Materials (Basel)*, 13 (2020) 21, pp. 1–16
- [94] Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., Afonso Costa, B. J.: State-of-the-art review of railway track resilience monitoring, *Infrastructures*, 3 (2018) 1, <https://doi.org/10.3390/infrastructures3010003>
- [95] Hodge, V.J., O’Keefe, S., Weeks, M., Moulds, A.: Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: A survey, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16 (2015) 3, pp. 1088–1106, <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2366512>
- [96] Kochan, A., Rutkowska, P., Wójcik, M.: Inspection of the railway infrastructure with the use of unmanned aerial vehicles, *Transport Systems Telematics Conference*, pp. 11–17, Kraków, Poland, 2018.
- [97] Alawad, H., Kaewunruen, S.: Wireless sensor networks: Toward smarter railway stations, *Infrastructures*, 3 (2018) 3, <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030024>
- [98] Shafiullah, G.M., Gyasi-Agyei, A., Wolfs, P.: Survey of wireless communications applications in the railway industry, *The 2nd International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications*, Sydney, NSW, Australia, 2007.
- [99] López-Higuera, J.M., Cobo, L.R., Incera, A.Q., Cobo, A.: Fiber optic sensors in structural health monitoring, *Journal of Lightwave Technology*, 29 (2011) 4, pp. 587–608, <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2106479>
- [100] Clark, M., McCann, D.M., Forde, M.C.: Infrared thermographic investigation of railway track ballast, *NDT & E International*, 35 (2002) 2, pp. 83–94, [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00032-9)
- [101] Stypurowski, K., Gołda, P., Lewczuk, K., Tomaszewska, J.: Monitoring system for railway infrastructure elements based on thermal imaging analysis, *Sensors*, 21 (2021) 11, <https://doi.org/10.3390/s21113819>
- [102] Kochan, A., Rutkowska, P., Wójcik, M.: Inspection of the railway infrastructure with the use of unmanned aerial vehicles, *Archives of Transport System Telematics*, 11 (2018) 2, pp. 11–17
- [103] Jurić Kačunić, D., Librić, L., Car, M.: Application of unmanned aerial vehicles on transport infrastructure network, *GRAĐEVINAR*, 68 (2016) 4, pp. 287–300, 10.14256/JCE.1382.2015

- [104] Jurić Kačunić, D., Bačić, M., Kovačević, M.S.: Hrvatski i europski trendovi u ocjenjivanju stanja postojećih željezničkih nasipa, *Željeznice* 21, 2007, pp. 36–44
- [105] Carvajal, F., Agüera, F., Pérez, M.: Surveying a Landslide in a Road Embankment Using Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1 (2012), pp. 201–206
- [106] Advanced UAV Railway Surveillance, Equinox's Drones: <https://equinoxdrones.com/railway-inspection-monitoring-using-uav-drone-technology/>, pristupljeno: 20.10.2024.
- [107] Flammini, F., Pragliola, C., Smarra, G.: Railway infrastructure monitoring by drones, 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, Toulouse, France, 2016.
- [108] Máthé, K., Buşoniu, L.: Vision and control for UAVs: A survey of general methods and of inexpensive platforms for infrastructure inspection, *Sensors (Switzerland)*, 15 (2015) 7, pp. 14887–14916, <https://doi.org/10.3390/s150714887>
- [109] Rahman, M.A., Mammeri, A.: Vegetation Detection in UAV Imagery for Railway Monitoring, *International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, pp. 457–464, online, 2021.
- [110] Ivashov, S.I., Tataraidze, A.B., Razevig, V. V., Smirnova, E.S.: Railway Transport Infrastructure Monitoring by UAVs and Satellites, *Journal of Transportation Technologies*, 9 (2019) 3, pp. 342–353
- [111] Maghazei, O., Steinmann, M.: Drones in railways: Exploring current applications and future scenarios based on action research, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 20 (2020) 3, pp. 87–102
- [112] Zschiesche, K., Reiterer, A.: Optical Measurement System for Monitoring Railway Infrastructure - A Review, *Applied Sciences*, 14 (2024), Paper 8801, <https://doi.org/10.3390/app14198801>
- [113] Tan, Y., Chen, Y., Peterson, A.W., Ahmadian, M.: Monitoring and detecting fouled ballast using Forward-Looking Infrared Radiometer (FLIR) aerial technology: Possibilities and limitations, 2019 Joint Rail Conference, JRC 2019, Snowbird, Utah
- [114] Sheikh, M., Ortengren, A.: UAVs for railway infrastructure operations and maintenance activities, 2018, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1289961/FULLTEXT01.pdf>, pristupljeno: 10.07.2024.
- [115] Guo, Y., Markine, V., Jing, G.: Review of ballast track tamping: Mechanism, challenges and solutions, *Construction and Building Materials*, 300 (2021) 3, 123940, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123940>
- [116] Charoenwong, C., Connolly, D.P., Alves Costa, P., Galvín, P., Romero, A.: The effect of ballast moisture content and fouling index on railway track settlement, *Transportation Geotechnics*, 45 (2024) 4, 101193, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101193>