

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET



TONI PAHLJINA I MARIN PULJAR-MATIĆ

**PRIMJENA METODE INFRACRvene
TERMOGRAFIJE ZA OCJENU STANJA
KOLOSIJEČNOG ZASTORA U IN-SITU UVJETIMA**

Zagreb, 2022.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za prometnice, Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc.dr.sc. Ive Haladina i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2021./2022.

Sadržaj:

Popis kratica

Popis slika

Popis tablica

1. Uvod	1
1.1. Termografija	3
1.1.1. Fizikalna osnova	3
1.1.2. Princip rada	4
1.1.3. Prednosti i nedostaci termografije	6
1.1.4. Primjeri primjene ICT mjerenja u građevinarstvu	6
1.1.5. Primjena ICT mjerenja na željeznici	8
1.1.6. Primjena ICT mjerenja na bespilotnim letjelicama.....	9
1.2. Termografsko ispitivanje zastorne prizme	10
1.2.1. Teorijski model temperaturnog ponašanja čistog i zablacenog tucanika	11
1.2.2. Laboratorijska i terenska ispitivanja zastorne prizme metodom infracrvene termografije	15
2. Hipoteza i ciljevi rada	26
3. Provedba terenskih i laboratorijskih istraživanja	27
3.1. Opis ispitne dionice - kolodvor Podsused.....	27
3.2. In-situ termografsko ispitivanje kolosijeka na kolodvoru Podsused.....	30
3.2.1. Opis postupka termografskog snimanja	30
3.2.2. Obrada podataka prikupljenih termografskim snimanjem	35
3.3. Ispitivanje granulometrijskog sastava	38
3.3.1. Uzorkovanje materijala	38
3.3.2. Opis postupka ispitivanja granulometrijskog sastava	40
4. Analiza rezultata.....	44
4.1. Analiza podataka prikupljenih termografskim snimanjem	44

4.1.1. Analiza temperature ugrađenog tucaničkog materijala	46
4.1.2. Analiza usporedbe ispitivanja pragova	48
4.2. Analiza podataka prikupljenih prosijavanjem materijala	51
4.3. Usporedba rezultata termografske analize i prosijavanja agregata.....	55
5. Rasprava	56
6. Zaključak	57
Literatura	60
Zahvala	63
Sažetak	64
Summary	65

Popis kratica

MS – Microsoft

ICT – infracrvena termografija

EU – Europska Unija

IC – Infracrveno

UAV – Unmanned aerial vehicle (bespilotne letjelice)

EN – Europske norme

NIR – Near-infrared spectroscopy (spektrografija bliskog infracrvenog područja)

LIDAR - Laser imaging, detection, and ranging (svjetlosno zamjećivanje i klasifikacija)

Popis slika

Slika 1. Prikaz termografske kamere i termograma.....	3
Slika 2. Elektromagnetski spektar.....	4
Slika 3. Ilustrativni prikaz ICT mjerenja.....	5
Slika 4. Shematski prikaz rada ICT uređaja.....	5
Slika 5. Primjena ICT u građevinarstvu.....	7
Slika 6. ICT provjere rada sustava grijanje – hlađenje.....	7
Slika 7. ICT ispitivanje površinskih oštećenja kolosiječne ploče.....	8
Slika 8. ICT snimka skretnice s prikazom temperature grijača.....	9
Slika 9. Snimanje kolosijeka bespilotnom letjelicom (UAV).....	9
Slika 10. Termografska snimka kolosijeka snimljena bespilotnom letjelicom.....	10
Slika 11. Teoretski model čistog zastora.....	12
Slika 12. Teoretski model zablacenog zastora.....	12
Slika 13. Temperatura površine različitih uzoraka zastora u odnosu na temperaturu donjeg ustroja i atmosfersku temperaturu od 6°C	13
Slika 14. Trodimenzionalni prikaz površinske temperature čistog uzorka zastora.....	14
Slika 15. Trodimenzionalni prikaz površinske temperature zablacenog uzorka zastora.....	14
Slika 16. Shematski prikaz infracrvene kamere na bespilotnoj letjelici.....	16
Slika 17. Prikaz razmještaja za snimanje.....	17
Slika 18. Temperature onečišćenih uzoraka u usporedbi sa čisti uzorak: a) test A i b) test B..	18
Slika 19. Infracrvena slika snimljena kamerom FLIR pri brzini od 1 m/s.....	18
Slika 20. Uzorci pripremljeni za ispitivanje.....	19
Slika 21. Najpovoljniji kutevi snimanja – minimalna refleksija.....	20
Slika 22. Snimka termalnom kamerom.....	21
Slika 23. Temperaturne krivulje pri suhom ispitivanju.....	21
Slika 24. Relativne temperaturne razlike uzoraka s tračnicom u hladu.....	22
Slika 25. Relativne temperaturne razlike uzoraka s osunčanom tračnicom.....	22

Slika 26. Temperaturna razlika čistog i djelomično onečišćenog zastora te čistog i onečišćenog zastora.....	23
Slika 27. Temperaturne krivulje pri ispitivanju vlažnih uzoraka.....	24
Slika 28. Temperaturne razlike djelomično onečišćenog i čistog zastora te onečišćenog i čistog zastora.....	24
Slika 29. Skica željezničkog kolodvora Podsused.....	27
Slika 30. Ortofoto snimak željezničkog kolodvora Podsused.....	27
Slika 31. Tehnološka shema kolodvora Podsused sa naznačenim dionicama, analiziranim u narednim poglavljima, na kolosijecima 1, 2, 4 i 6	28
Slika 32. Prikaz otkopa i zablacenja promatranih kolosijeka.....	29
Slika 33. Karakteristični poprečni presjek novo rekonstruiranih kolosijeka 2 i 3 u kolodvoru Podsused	30
Slika 34. Položaj termo-kamere Fluke TiS45 u poprečnom presjeku.....	31
Slika 35. Položaj termo-kamere Fluke TiS45 u tlocrtu.....	32
Slika 36. Provedba termografskog snimanja kolosijeka na kolodvoru Podsused.....	32
Slika 37. Prikaz računalnog programa SmartView.....	35
Slika 38. Prikaz označavanja promatranih zona.....	35
Slika 39. Temperature promatranog područja drvenog praga a) sa stranim predmetima b) bez stranih predmeta.....	36
Slika 40. Prikaz žlice za uzorkovanje s: a) pravokutnim poprečnim presjekom, b) kružnim poprečnim presjekom.....	39
Slika 41. Prikaz lopate za uzorkovanje.....	39
Slika 42. Prikaz okvira za uzorkovanje.....	40
Slika 43. Kutija za uzorkovanje.....	40
Slika 44. Prikaz dubine otkopavanja tucaničkog materijala.....	41
Slika 45. Prikaz zone uzimanja tucaničkog materijala.....	41
Slika 46. Uzorci materijala s promatranih kolosijeka Kolodvora Podsused.....	42
Slika 47. a) sušenje u peći, b) čišćenje, c) ponovno sušenje na plinskom štednjaku	42

Slika 48. Uređaj za prosijavanje agregata.....	43
Slika 49. Kretanje prosječnih temperatura za tračnicu, prag i tucanik na 28 uzastopnih uzoraka (ispitivanje A1, 2. kol.).....	44
Slika 50. Kretanje prosječnih temperatura za tračnicu, prag i tucanik na 28 uzastopnih uzoraka (ispitivanje A2, 1. kol.).....	45
Slika 51. Prikaz dijagrama prosječnih temperatura za kolosijek 6 (sva ispitivanja).....	46
Slika 52. Prikaz dijagrama apsolutnih temperatura tucanika za ispitivanje B2 za sve kolosijeke.....	47
Slika 53. Prikaz dijagrama relativnih temperatura tucanika za ispitivanje B2 za sve kolosijeke.....	47
Slika 54. Prikaz apsolutnih temperatura pragova za ispitivanje B2 za sve kolosijeke.....	49
Slika 55. Prikaz relativnih temperatura pragova za ispitivanje B2 za sve kolosijeke.....	49
Slika 56. a) zadovoljavajući prag b) nezadovoljavajući prag c) termogram zadovoljavajućeg praga d) termogram nezadovoljavajućeg praga.....	50
Slika 57. Dijagram postotka preostalog materijala na situ.....	52
Slika 58. Dijagram kumulativnih postotaka prolaska materijala kroz sito.....	52
Slika 59. Dijagram kumulativnih postotaka prolaska materijala kroz sito sa granicama kategorija D i F.....	53

Popis tablica

Tablica 1. Opis odabranih kolosijeka.....	29
Tablica 2. Značajke i kontrole kamere.....	34
Tablica 3. Glavne tehničke karakteristike.....	34
Tablica 4. Vrijednosti temperatura ispitivanja A1 za 6. kolosijek.....	37
Tablica 5. Izmjerene mase uzoraka.....	43
Tablica 6. Dobivene vrijednosti prosijavanja materijala za kolosijeke Kolodvora Podsused....	51
Tablica 7. Kategorije ispitanih kolosiječnih zastora u odnosu na udio sitnih čestica.....	54
Tablica 8. Kategorije ispitanih kolosiječnih zastora u odnosu na udio finih čestica.....	54
Tablica 9. Usporedba rezultata termografske analize i prosijavanja agregata.....	55

1. Uvod

Željeznička infrastruktura u toku životnog vijeka zahtjeva značajne aktivnosti održavanja kako bi zadržala razinu usluge prijevoza roba i putnika kroz eksploatacijski period. Održavanje tračničke infrastrukture općenito se može podijeliti na kontrolu stanja infrastrukture, te na provođenje redovnog održavanja, izvanrednog održavanja te kapitalnog remonta građevine. U svakoj od faza održavanja ključna je kontrola stanja infrastrukture na temelju koje se donose odluke i planovi za provedbu aktivnosti održavanja infrastrukture.

Kontrola stanja infrastrukture tradicionalno se provodi skupocjenim mjernim vozilima koja direktno ili indirektno određuju parametre geometrije kolosijeka, stanja određenih komponenti kolosijeka, najčešće tračnica (ravnost, poprečni presjek, oštećenja) i pričvrstnog pribora (puknuća, nedostatak elemenata pričvršćenja). Komponente gornjeg ustroja kolosijeka kao što su pragovi i kolosiječni zastor rjeđe su predmetom kontrole stanja koju provode mjerna vozila. Moguće je određivanjem parametara geometrije kolosijeka pratiti slijeganje kolosijeka kao posljedicu lošeg stanja zastora, no samo slijeganje ne govori nam mnogo o stvarnoj kakvoći zastornog materijala u danom trenutku. Slično, odstupanja geometrijskih parametara kao što su širina kolosijeka i visinski odnos tračnica mogu implicirati loše stanje pragova i njihove veze s tračnicama, no ne daje se uvid u stvarne karakteristike samih građevnih elemenata pragova (puknuća, trulost, raspucalost) [1].

Tradicionalne metode za ocjenu stanja drvenih pragova uključuju razorne metode vađenja uzoraka i analize drvne građe, a ocjena stanja kolosiječnog zastora vrši se iskopavanjem uzorka materijala te prosijavanjem i analizom granulometrijskog sastava [2]. Uzorkovanje opisanim metodama točkastog su karaktera te je često potreban vrlo veliki broj uzoraka kako bi se okarakterizirala duža dionica željezničke pruge. Stoga, ispitivanja mogu biti dugotrajna, spora i financijski zahtjevna. Takav pristup također zahtjeva prisutnost radnika na pruži što je uvijek značajan sigurnosni rizik zbog odvijanja željezničkog prometa.

Razvojem mjernih tehnika, mijenja se i pristup kontroli stanja tračničke infrastrukture te moderne tehnologije temeljene na nerazornim daljinskim ispitivanjima sve više ulaze u inženjersku praksu [3,4]. Infracrvena termografija jedna je od nerazornih metoda koja na željeznici nalazi sve veću primjenu. S druge strane, ugradnja pojedinih senzora (RGB kamera, LIDAR-a, infracrvenih kamera, NIR kamera, ...) na bespilotne letjelice (UAV) otvara novo područje daljinskog praćenja infrastrukture. Takav pristup potencijalno otklanja veliki broj nedostataka klasičnih metoda ocjene stanja, mjerenjem znatno većeg broja uzoraka na velikom području, bez zaposjedanja pruge, bez sigurnosnih rizika za radnike, uz značajno manje troškove.

Infracrvena termografija predstavlja tehnologiju snimanja tijela koja emitiraju energiju. Snimanje se obavlja pomoću termografske kamere koja opaža zračenja tijela u infracrvenom pojasu te stvara snimke takvih zračenja koja nazivamo termogramima. Primjenjuje se u područjima očuvanja energije, elektrotehnike, strojarstva, medicine ali i u građevinarstvu. U građevinarstvu se primjenjuje kod smanjenja gubitaka toplinske energije u zgradarstvu a za potrebe ovog rada korištena je u svrhu analize stanja kolosiječnog zastora i pragova ugrađenih u željeznički kolosijek.

U ovom uvodnom dijelu rada predstavljeno je stanje područja primjene infracrvene termografije u građevinarstvu i uže na željezničkoj infrastrukturi. Zatim su detaljno razmotrena dosadašnja istraživanja na temu ocjene stanja kolosiječnog zastora metodom infracrvene termografije, na temelju čega su postavljene hipoteze i ciljevi za daljnje eksperimentalno istraživanje. Eksperimentalno istraživanje obuhvaća in-situ vizualni pregled i termografsko snimanje četiri kolosijeka na kolodvoru Podsused kako bi se analizirala mogućnost primjene ove metode za ocjenu stanja zastorne prizme i drvenih pragova. Pretpostavka je da će kolosijeci sa zastornim materijalom u lošijem stanju, odnosno u stanju s povećanim postotkom sitnih čestica postići niže vrijednosti temperatura od kolosijeka sa manjim udjelom sitnih čestica. Potvrda rezultata dobivenih termografskim ispitivanjem potvrđuje se klasičnom metodom određivanja granulometrijskog sastava uzorka uzetog sa svakog od analiziranih kolosijeka. Također će se analizirati temperatura drvenih pragova za koje se pretpostavlja da će u optimalnom stanju upijati manje vode i imati veću temperaturu od pragova koji zbog dotrajalosti i raspucanosti apsorbiraju veću količinu vode tokom kišnog razdoblja. Termografska snimanja odvijat će se u različitim meteorološkim uvjetima kako bi se utvrdili optimalni uvjeti za provedbu terenskih mjerenja.

Analiza rezultata obuhvaća obradu termograma, te interpretaciju i usporedbu rezultata mjerenja na pojedinim kolosijecima na temelju minimalne, maksimalne i prosječne temperature pojedinog promatranog područja (praga i kolosiječnog zastora). Rezultati provedenih analiza, potencijal primjene, nedostaci metode, te potrebna daljnja istraživanja komentirani su u raspravi te su dani konačni zaključci vezani za mogućnost primjene infracrvene termografije za ocjenu stanja kolosiječnog zastora.

1.1. Termografija

Infracrvena termografija (ICT) je tehnologija snimanja tijela koja emitiraju energiju. Termografske kamere opažaju zračenja koja tijela emitiraju u infracrvenom pojasu elektromagnetskog spektra. Kamere zatim stvaraju snimke takvih zračenja koje nazivamo termogramima [5].



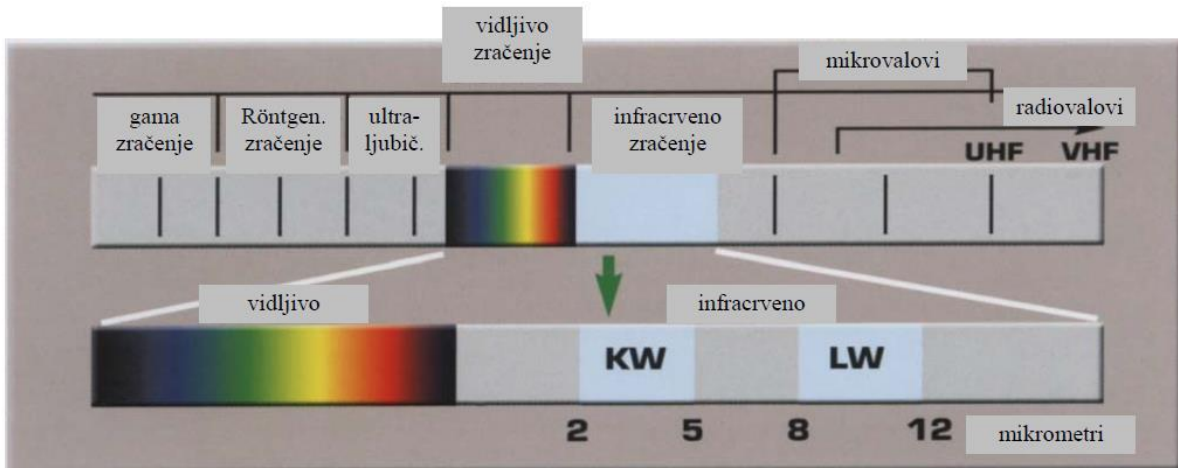
Slika 1. Prikaz termografske kamere i termograma [6]

Infracrvena termografija kao mjerna dijagnostička metoda već desetljećima ima široki spektar primjene naročito u područjima očuvanja energije, elektrotehnike, strojarstva, medicine ali i građevinarstva gdje se od 2. polovice 90-ih godina prošlog stoljeća znatno povećavala primjena. Povećana primjena rezultat je velike potrošnje energije u građevinarstvu u odnosu na ukupnu potrošnju energije. U državama članicama EU prosječna potrošnja energije u građevinarstvu je 41% od ukupne potrošnje energije, a situacija je slična i u Hrvatskoj. [5]

1.1.1. Fizikalna osnova

Sva tijela koja imaju temperaturu iznad apsolutne nule ($0\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$) zrače elektromagnetske valove te je moguća beskontaktna metoda mjerenja intenziteta elektromagnetskog zračenja tih tijela. Infracrvena termografija je mjerenje elektromagnetskog zračenja u dijelu elektromagnetskog spektra koje se naziva infracrvenim (IC) spektrom. Infracrveni spektar proteže se u području valnih duljina od $0,7\ \mu\text{m}$ do $1000\ \mu\text{m}$ što predstavlja vrlo široko područje. U tom području od praktične koristi za opću primjenu je samo spektar od $0,7\ \mu\text{m}$ do $20\ \mu\text{m}$. Valna duljina (λ) povezana je s brzinom širenja elektromagnetskih valova (c) i frekvencijom (ν) sljedećom formulom:

$$c = \lambda \times \nu \text{ [m/s]} \quad (1)$$



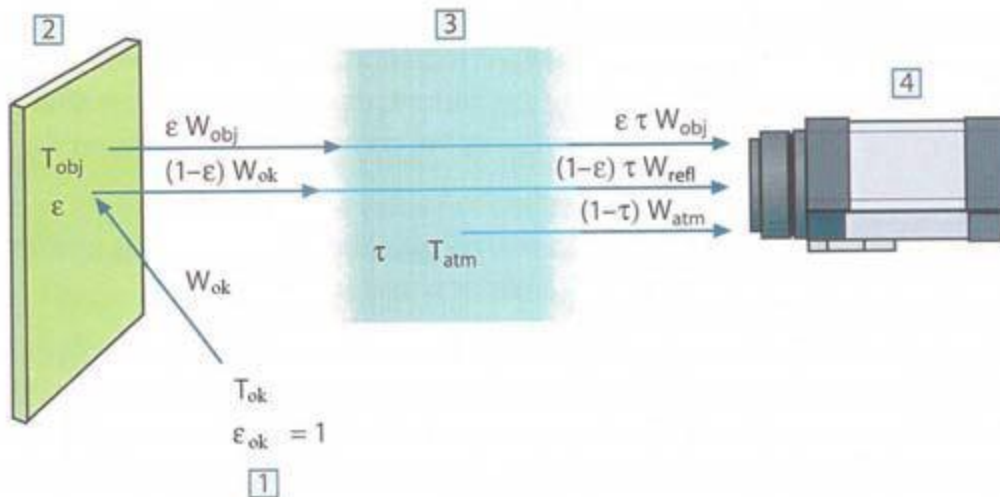
Slika 2. Elektromagnetski spektar [7]

Za razliku od termografske kamere, ljudsko oko vidi elektromagnetska zračenja koja se kreću u granicama od 380 nm do 780 nm te ih razlikuje kao boje, od ljubičaste do crvene.

Emisija elektromagnetskih valova tijela s temperaturom iznad apsolutne nule temelji se na zakonima zračenja (Planckov, Wienov i Stefan-Boltzmannov). Ti zakoni se odnose na idealno tijelo, odnosno crno tijelo. Značajke su crnog tijela da apsorbira cjelokupno zračenje koje pada na njega, bez obzira na valnu duljinu ili kut upada. Isto ima za posljedicu da je cjelokupno zračenje koje dolazi s površine crnog tijela emitirano zračenje, tj. Da nijedno tijelo ne može emitirati više zračenja od crnog tijela na nekoj valnoj duljini i temperaturi. Za razliku od crnog tijela, koje je idealni apsorber odnosno emiter zračenja, realna tijela upadno zračenje mogu apsorbirati, reflektirati i propuštati odnosno transmitirati. [5]

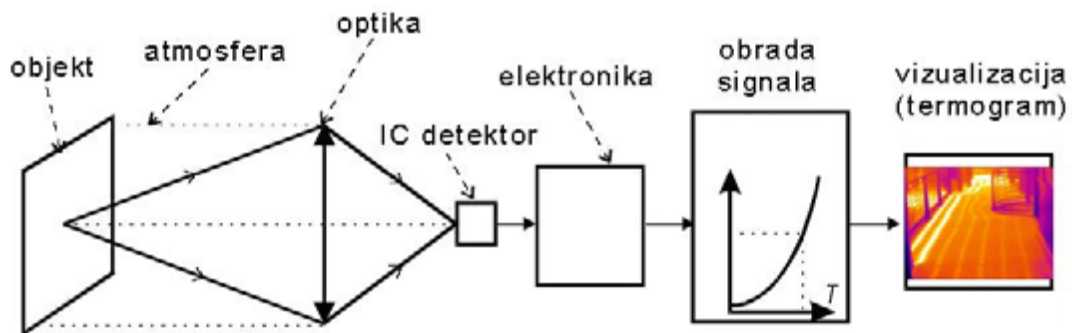
1.1.2. Princip rada

Zahvaljujući razvoju detektora i optike, danas se kao ICT uređaji uglavnom rabe termovizijske kamere koje mjere u dugovalnom i/ili kratkovalnom spektralnom kanalu. Na Slici 3 je prikaz ICT mjerenja termovizijskom kamerom. Ilustrativno je prikazano koje sve energije zračenja mjeri termovizija. W je oznaka za snagu zračenja (obj. – objekt mjerenja, refl. – refleksija, atm. – atmosfera), T je temperatura u kelvinima, ε je koeficijent emisije, a τ propusnosti. Zanimljiva je samo energija zračenja objekta jer služi za izračunavanje temperature površine objekta mjerenja. [5]



Slika 3. Ilustrativni prikaz ICT mjerenja [5]

Optika termovizijske kamere fokusira zračenje s objekta mjerenja na detektor koji pretvara zračenje u električni signal. Elektronika kamere pojačava te električne signale i digitalizira ih. Digitalizirani se signali obrađuju, zavisno od odabrane, a termogram se prikazuje na zaslonu kamere (prikazano na slici 4)



Slika 4. Shematski prikaz rada ICT uređaja [5]

Kako energija zračenja s objekta koje nisu uzrokovane temperaturom objekta, a to su refleksija zračenja okolnih objekata i zračenja atmosfere, predstavljaju smetnju u ICT mjerenjima. Zanimljivo je znati koliki je njihov doprinos rezultatima mjerenja u zavisnosti od uvjeta mjerenja. Udio energije zračenja od refleksije i atmosfere je to manji što je temperatura objekta mjerenja veća i/ili kada je koeficijent emisije objekta mjerenja što veći i obratno. [5]

1.1.3. Prednosti i nedostaci termografije

Svaka eksperimentalna metoda ima svoje prednosti i nedostatke. Tako i za termografiju možemo reći da su joj dobre osobine:

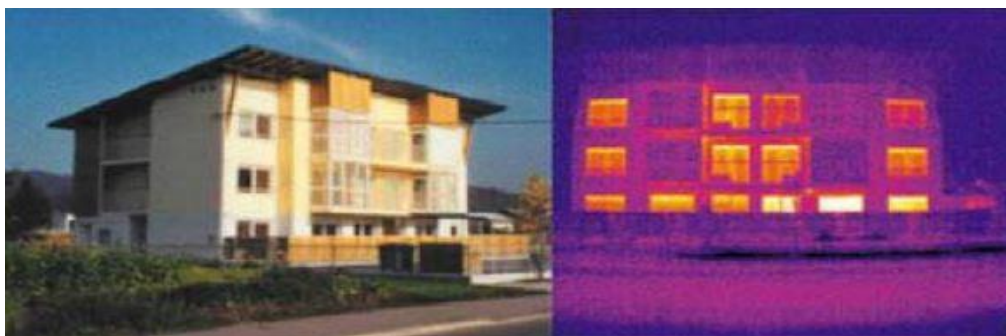
- Bez-kontaktno mjerenje,
- Brzi odziv,
- Relativno jednostavna interpretacija termograma,
- Široke mogućnosti primjene,

a one loše:

- Utjecaj emisijskog faktora, atmosfere, udaljenosti, geometrije objekta i ostalih svojstava tijela na rezultat mjerenja,
- Teško provediva toplinska stimulacija velikih objekata,
- Mogućnost promatranja samo površinskih efekata [7]

1.1.4. Primjeri primjene ICT mjerenja u građevinarstvu

Smanjenje gubitaka toplinske energije u zgradarstvu postaje jedan od prioritetnih projekata država EU, a ICT se dokazao kao uspješna metoda u otkrivanju i kvantificiranju tih gubitaka i za stare, i za novosagrađene građevine. Kvantifikacija gubitaka topline u zgradarstvu moguća je ako je poznata raspodjela temperature po površini vanjskog zida uz istodobno poznavanje temperature s unutarnje strane zida. Iz termograma građevinske konstrukcije također se mogu otkriti različite anomalije u termičkim svojstvima građevinskih konstrukcija upotrijebljenih za gradnju vanjskih zidova, jer takve anomalije rezultiraju promjenama raspodjele temperature po površini strukture (slika 5). Temperatura vanjske površine ovisi i o istjecanju zraka unutar i/ili kroz vanjske zidove. Podaci o raspodjeli temperature po površini zida mogu se upotrijebiti za detektiranje najrazličitijih termičkih neregularnosti, poput toplinskih mostova, defekata u izolaciji, vlage u zidu, istjecanja zraka iz zgrade i sl. [5]



Slika 5. Primjena ICT u građevinarstvu [5]

Zgrade mogu imati probleme uzrokovane neadekvatnim projektom, konstrukcijom i održavanjem koje je teško dijagnosticirati i riješiti. Glavni problemi koji se javljaju u zgradarstvu a za čiju primjenu i rješavanje se koristi infracrvena termografija su:

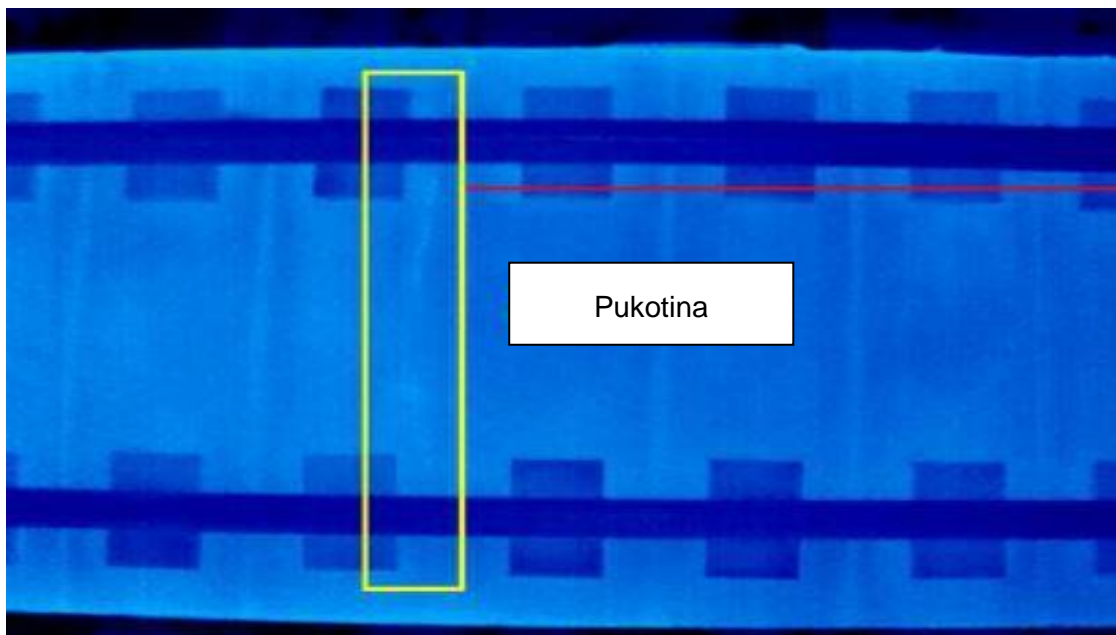
- Pretjerana uporaba energije zbog neadekvatne ili oštećene izolacije, te pretjeranog istjecanja zraka iz zgrade
- oštećenja zidova i krovova uzrokovanih vlaženjem uslijed prodora ili kondenzacije vodene pare
- neoptimalna raspodjela grijaćih tijela, te nezadovoljavajuće značajke sustava grijanje – hlađenje (slika 6)
- nedovoljna potvrda valjanosti detalja konstrukcije ili strukturnih karakteristika
- raslojavanje materijala pročelja
- rast gljivica i druge sa zdravljem povezane pojave („sindromi bolesne zgrade“)
- oštećenja krovova [5]



Slika 6. ICT provjere rada sustava grijanje - hlađenje [5]

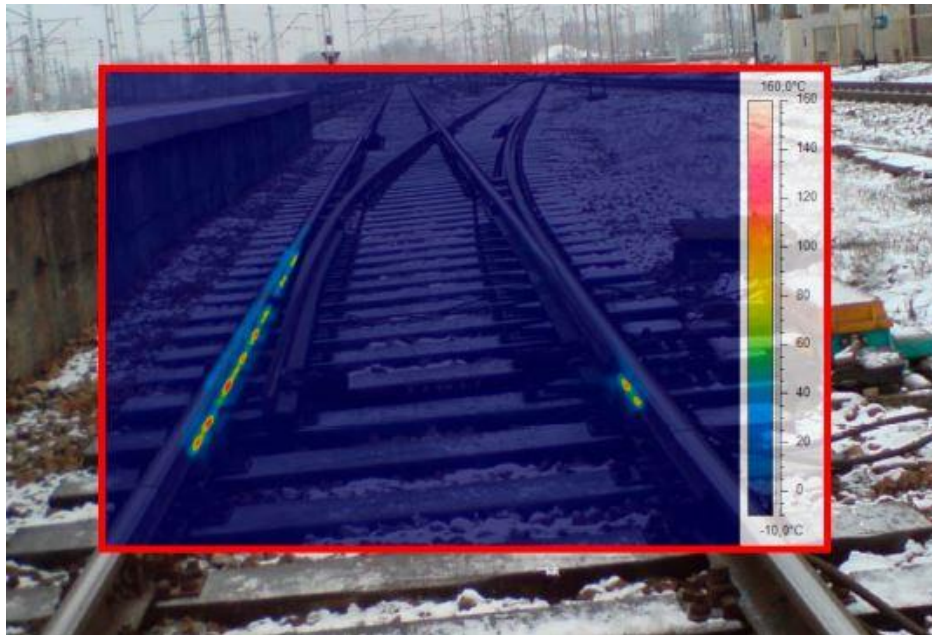
1.1.5. Primjena ICT mjerenja na željeznici

Na željezničkim elementima primjenjuje se infracrvena termografija u svrhu jednostavnijeg detektiranja oštećenja i dotrajalosti kolosiječnih elemenata. Istraživanje [8] koje su proveli Zai-Wei Li i ostali predlaže upotrebu ICT u svrhu otkrivanja površinskih pukotina na kolosijecima bez zastornog materijala, odnosno na betonskoj ploči kao što je prikazano na slici 7. Otkrivanje površinskih pukotina vrlo je bitno zbog toga što mogu ozbiljno smanjiti upotrebljivost i trajnost željeznica za velike brzine. Studija pokazuje da ICT metoda može učinkovito locirati pukotine na površini ploče širine od 0.14 mm pri temperaturi okoline višoj od 20°C.



Slika 7. ICT ispitivanje površinskih oštećenja kolosiječne ploče [8]

Sigurnost i učinkovitost željezničkog prometa u velikoj mjeri ovisi o ispravnosti skretnica. Kako bi skretnice zadržale svoju funkciju tijekom razdoblja niskih temperatura, kada ih snijeg i/ili led mogu onesposobiti vrlo je važno ispravno funkcioniranje električnih uređaja za grijanje skretnica. U radu autora K. Stypułkowskog i suradnika [9] promatra se ponašanje i ispravnost grijača na tračničkim skretnicama primjenom ICT metode (slika 8). Autori su dokazali da predložena metoda analize može biti učinkovit alat za ispitivanje statusa ispravnosti uređaja za grijanje.



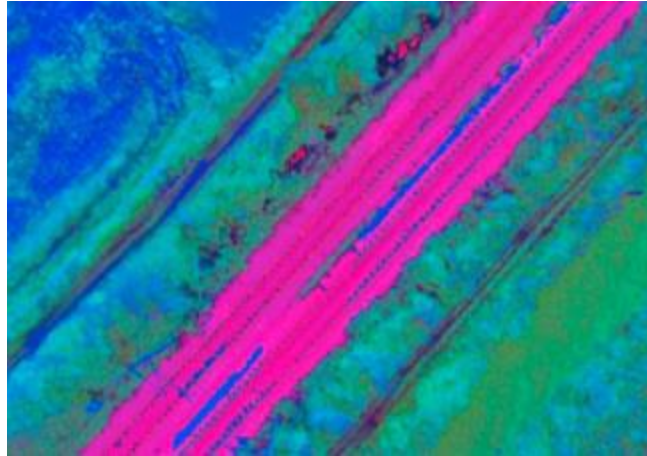
Slika 8. ICT snimka skretnice s prikazom temperatura grijača [9]

1.1.6. Primjena ICT mjerenja na bespilotnim letjelicama

U svrhu jednostavnijeg i bržeg snimanja kolosijeka i njegovih elemenata infracrvenom termografijom kamera se može ugraditi na bespilotne letjelice (slika 9). Takvom upotrebom ICT metode može se obuhvatiti znatno šire područje za razliku od kamere postavljene na površini zemlje u stacionarnom položaju. U radu autora Flammini F. i ostalih [10] koriste se već dostupna tehnološka i istraživačka dostignuća za snimanje bespilotnim letjelicama (UAV). Cilj njihove studije je preliminarno ocjenjivanje sposobnosti drona u okviru pronalaženja nedostataka i/ili oštećenja na željezničkom kolosijeku (slika 10). U radu je dokazano da je primjena ICT metode na bespilotnoj letjelici korisna za ispitivanje različitih stanja elemenata kolosijeka.



Slika 9. Snimanje kolosijeka bespilotnom letjelicom (UAV) [11]



Slika 10. Termografska snimka kolosijeka snimljena bespilotnom letjelicom [10]

1.2. Termografsko ispitivanje zastorne prizme

Termografska analiza pomoću infracrvene kamere predstavlja nerazornu metodu ispitivanja stanja zastorne prizme duž duljine kolosijeka. Temelji se na pretpostavci da čisti odnosno novougrađeni tucanički zastor ima drugačija toplinska svojstva za razliku od istrošenog. Udio sitnih čestica u stijenkama između tucaničkog materijala dovodi do smanjenja utjecaja zraka na zagrijavanje i hlađenje zastorne prizme te do duljeg zadržavanja vode u zastoru.

Termografsko ispitivanje zastorne prizme izvodi se na lomljenom tucaničkom materijalu koji se nalazi ispod tračnica i pragova željezničke pruge. Cilj ispitivanja stanja zastorne prizme leži u tome što zastorna prizma od tucaničkog materijala omogućuje prijenos opterećenja vlakova s tračnica na sloj tla ispod kolosijeka, zbog čega je njezino zadovoljavajuće stanje od velike važnosti za stabilnost kolosijek i sigurnost odvijanja željezničkog prometa.

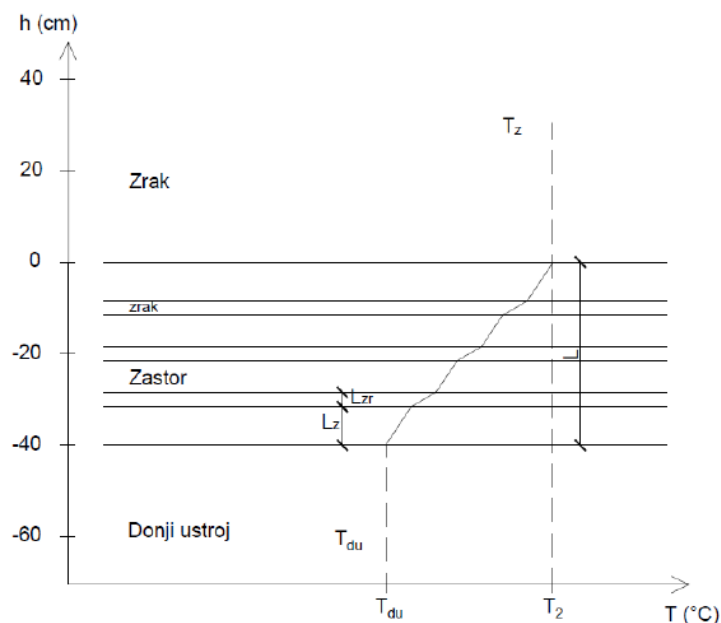
Kvaliteta tucaničkog materijala uvelike ovisi o udjelu sitnih čestica koje popunjavaju praznine između većih tucanika. Povećanje udjela sitnih čestica se javlja usred mehaničkog drobljenja tucaničkog materijala dinamičkom pobudom primarno od prometnog opterećenja, ali i, zbog postupaka podbijanja te ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (bubrenje tucanika). Također se udio sitnih čestica povećava infiltracijom čestica tla iz okolnog područja te kapilarnim djelovanjem odozdo (iz slojeva planuma nasipa), ali i utjecajem prašine, tijekom vremena, nastale kočenjem vlaka. S obzirom da je funkcija šupljina u zastornoj prizmi omogućiti otjecanje vode s površine, nakupljanje sitnih čestica unutar takvih šupljina može rezultirati povećanjem tlaka vode u porama i smanjenjem ukupne čvrstoće tucaničkog materijala. Sa smanjenjem čvrstoće zastorne prizme može doći do smanjenja sigurnosti i udobnosti vožnje po takvom kolosijeku, te pri većim brzinama vožnje postoji i opasnost od iskakanja vlaka sa

kolosijeka. Degradacija kolosiječnog zastora utječe na smanjenje trenja između zrna tucanika što direktno utječe na uzdužni i bočni otpor kolosiječne rešetke čime se ugrožava sposobnosti kolosijeka da zadrži svoj geometrijski položaj osobito u ljetnim mjesecima kad se javljaju velika unutarnja naprezanja od promjene temperature tračnica što često rezultira bočnim izbacivanjem kolosiječne rešetke. Također se smanjuje efikasnost strojnog reguliranja kolosijeka podbijanjem koja je danas osnovna metoda održavanja geometrije kolosijeka.

Princip infracrvene kamere je pretvaranje uzorka toplinskog zračenja proizvedenog infracrvenom emisijom, koja je nevidljiva ljudskom oku, u vizualnu sliku. Zračenje primljeno od objekta preko infracrvene kamere predstavlja funkciju njegove temperature i spektralne emisije te bi se zbog toga praktična mjerenja trebala provoditi u okruženju s kontroliranom temperaturom. Također je potrebno uzeti u obzir i utjecaj vanjskih čimbenika na promjenu temperature zastorne prizme. Sunčeva svjetlost će tako povećati temperaturu tucanika dok će vjetar i kiša utjecati na njezino smanjenje. Infracrvena kamera će pokazati površinsku temperaturu tucaničkog materijala. Prednosti ove metode mjerenja površinske temperature tucaničkog materijala se ogleda u daljinskom principu ispitivanja, dvodimenzionalnom prikupljanju podataka, beskontaktnosti i nerazornosti metode, velikim temperaturnim rasponima te jednostavnoj i lakoj prenosivosti [12].

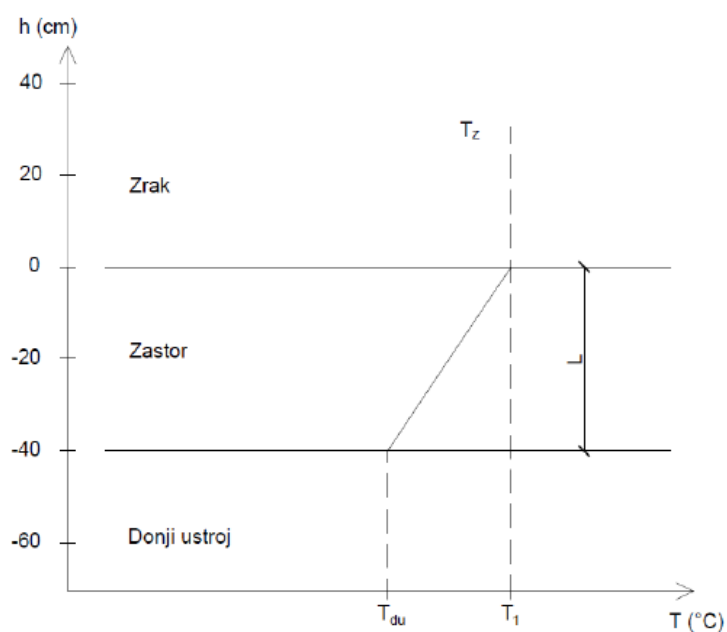
1.2.1. Teorijski model temperaturnog ponašanja čistog i zablacenog tucanika

Temeljem osnovnih principa prijenosa topline unutar nekoherentnih tla, izvedeni su teorijski modeli temperaturnog ponašanja sloja tucaničkog zastora ovisno o udjelu nečistoća [12]. Na temelju takvog modela moguće je uz pomoć termografske analize površine tucanika indirektno ustanoviti stanje zablacenosti zastora. Na slikama 11 i 12 prikazani su teorijski modeli iz kojih su izvedene jednadžbe prijenosa topline koje se koriste za ispitivanje prijenosa topline čiste i onečišćene zastorne prizme. Pretpostavljalo se da čisti uzorak zastorne prizme sadrži šupljine a radi pojednostavljenja pretpostavljano je da između svakog komada tucanika postoji sloj zraka. Tucanik je debljine otprilike 0.05 m sa zračnim šupljinama debljine 0.005m.



Slika 11. Teoretski model čistog zastora [13]

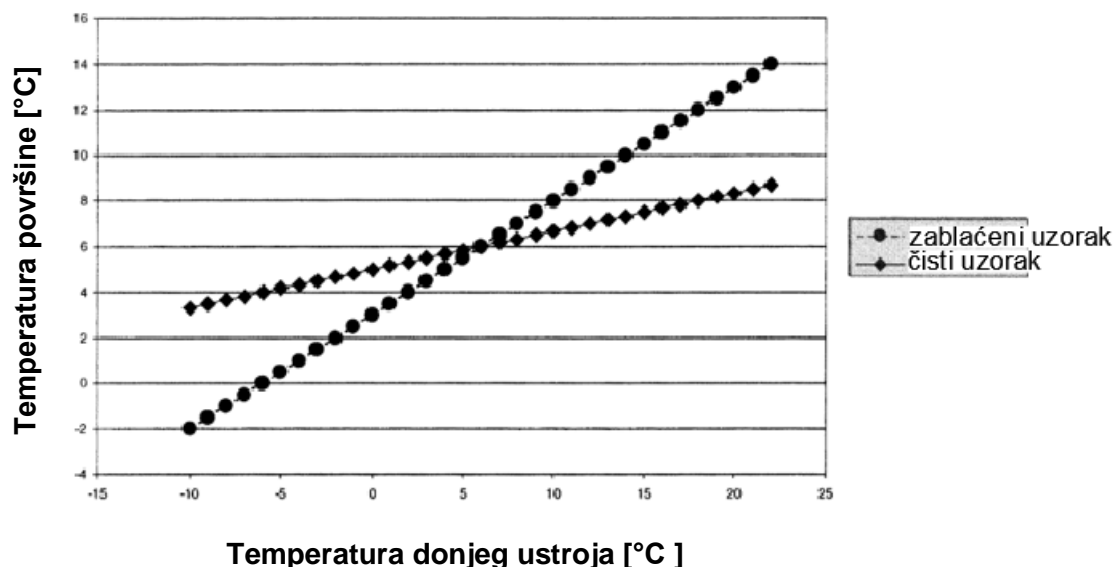
Za onečišćeni odnosno zablaceni uzorak pretpostavlja se da je homogene strukture jer bi finoće popunile sve zračne šupljine. Zbog prisustva sitnih čestica, povećane vegetacije i vlažnosti zablacenog uzorka zastočne prizme, vrijednost temperature na površini onečišćenog uzorka bit će manja od temperature na površini čistog uzorka. Vrijednost T_{du} predstavlja temperaturu donjeg ustroja, T_a temperaturu zraka dok vrijednost T_1 i T_2 predstavljaju temperaturu površine mjerenu infracrvenom kamerom.



Slika 12. Teoretski model zablacenog zastora [13]

S obzirom da se temperatura tla i atmosferska temperatura mogu mjeriti što je veća temperaturna razlika između čistog i zablaćenog uzorka zastora, imat ćemo bolje uvjete za provođenje termografske analize. Na slici 13 možemo vidjeti površinske temperature čistog i zablaćenog uzorka u odnosu na temperaturu tla pri atmosferskoj temperaturi od 6°C. Linearni odnos gradijenata linija je konstantan tako da varijacije u atmosferskoj temperaturi su prisutne u točkama presjeka linija. Temperaturna razlika između temperature tla i atmosferske temperature mora biti preko 5°C da bi se dobila razlika od 2°C između dvije vrste zastorne prizme.

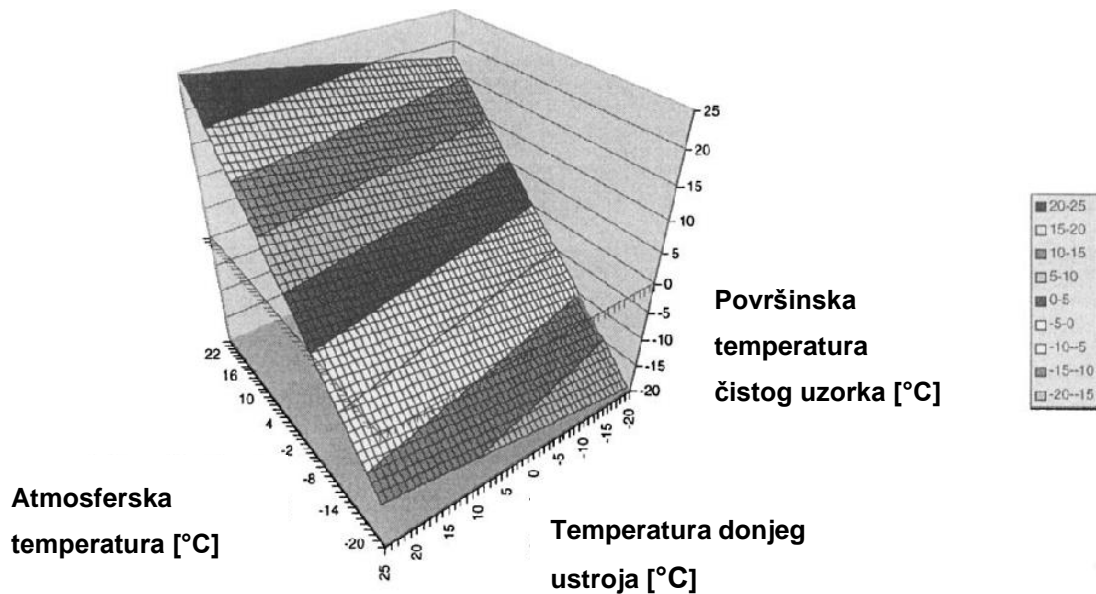
Temperatura donjeg ustroja ekvivalentna je temperaturi tla ispod kolosiječnog zastora te je iz slike 13. vidljivo da je zablaćeni uzorak pri nižim temperaturama tla puno niže površinske temperature od čistog uzorka pri istoj temperaturi tla. Isto tako, vidljivo je da zablaćeni uzorak postiže puno veće površinske temperature od čistog uzorka pri visokim temperaturama tla ispod kolosiječnog zastora. Iz toga se može zaključiti da se čisti uzorak puno sporije zagrijava i hladi, što je rezultat većeg sadržaja zraka u njemu. Zrak u tom uzorku djeluje kao prirodni izolator i zbog njega čisti uzorak postiže manje razlike u temperaturi od zablaćenog uzorka koji ima manji sadržaj zraka uslijed povećanog postotka sitnih čestica.



Slika 13. Temperatura površine različitih uzoraka zastora u odnosu na temperaturu donjeg ustroja i atmosfersku temperaturu od 6°C [12]

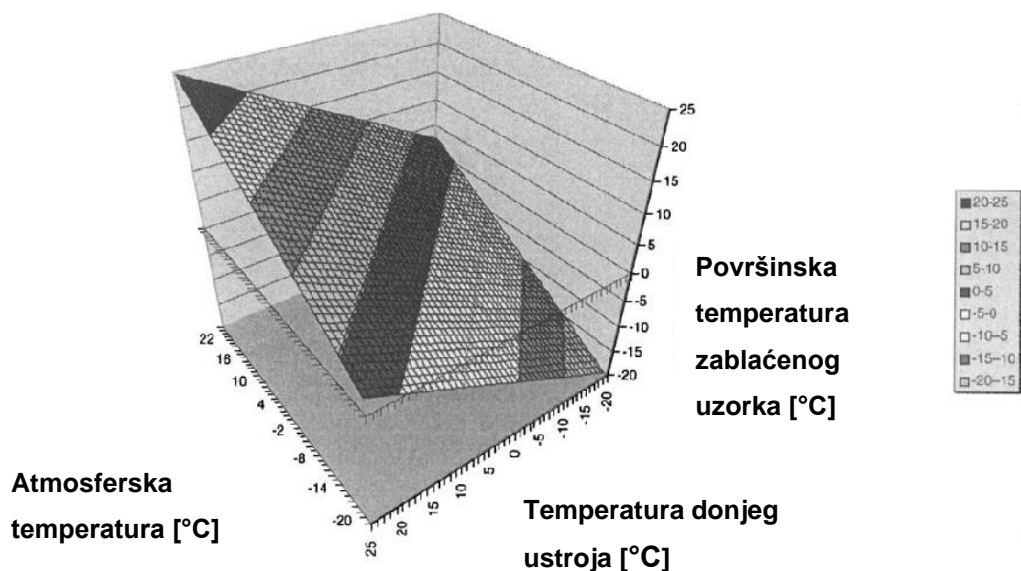
Na slikama 14 i 15 možemo vidjeti trodimenzionalne prikaze čistog i zablaćenog uzorka zastora u odnosu na temperaturu tla i atmosfersku temperaturu. Trodimenzionalni modeli su dobiveni na temelju mjerenja i prikazuju skup podataka o temperaturama površine tucanika. Prilikom infracrvenog ispitivanja na licu mjesta, potrebno je promotriti postoji li teoretska temperaturna razlika između čistog i zablaćenog uzorka. Na slici 14 iz dijagrama možemo

odrediti površinsku temperaturu čistog uzorka samo ako su atmosferska i temperatura donjeg ustroja unaprijed poznate.



Slika 14. Trodimenzionalni prikaz površinske temperature čistog uzorka zastora [12]

Slika 15 slično kao i prethodno slika koristi se za izračun površinske temperature onečišćenog odnosno zablacenog uzorka zastora preko trodimenzionalnog modela. Uspješnost postupaka ispitivanja odnosno mjerenja može se zaključiti na temelju dobivenih trodimenzionalnih modela.



Slika 15. Trodimenzionalni prikaz površinske temperature zablacenog uzorka zastora [12]

1.2.2. Laboratorijska i terenska ispitivanja zastorne prizme metodom infracrvene termografije

Za potrebe ovog rada promatrano je više stranih stručnih literatura u kojima su se provodila razna laboratorijska ispitivanja na malim uzorcima [12, 14, 15] te prethodno pojašnjeni teoretski model temperaturnog ponašanja čistih i zablacenih uzoraka [12]. Na temelju tih istraživanja doneseni su zaključci koji će kasnije uvelike pomoći u izradi vlastitog istraživanja. U fokusu ovog rada je istraživanje u stvarnim uvjetima, odnosno na realnom kolosijeku, što je trenutno u ovom području veliki nedostatak. S ciljem definiranja ciljeva i hipoteze ovog rada detaljno su razmotrena sljedeća 3 istraživanja.

M. Clark, D.M. McCann, M.C. Forde, 2002

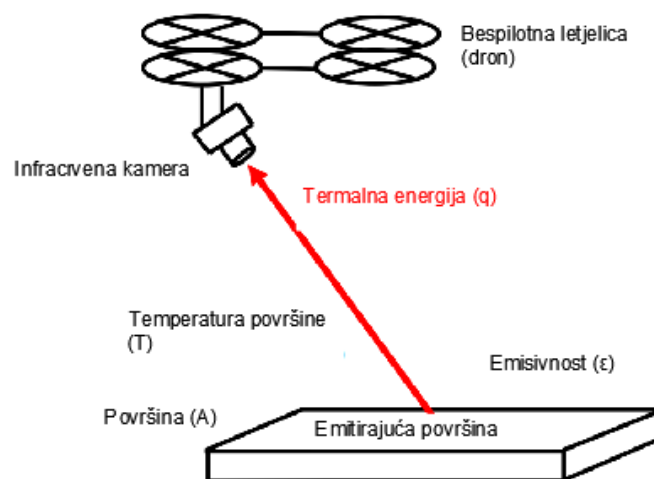
Laboratorijska ispitivanja zastorne prizme izvode se kako bi se moglo provjeriti da li se različite brzine prijenosa topline mogu kalibrirati i tako koristiti na terenu za identifikaciju različitih stanja zastora od tucanika. Pokusi se izvode na dvije različite zastorne prizme, jednu u čistom ne zablacenom i drugu u zablacenom stanju. U zablacenom zastoru veći je udio sitnih čestica i drugih materijala koji ispunjavaju šupljine. Prilikom zagrijavanja ili hlađenja zablacenog zastora zbog potpunosti šupljina prijenos topline će se odvijati mehanizmom vodljivosti. Emitirana toplina bit će veća kod zablacene nego kod čiste zastorne prizme jer je na zablacenoj zastornoj prizmi izložena veća površina. Stoga će se zablaceni tucanički materijal zagrijavati ili hladiti na ravnotežnu temperaturu različitom brzinom u usporedbi s čistim. Te su se pretpostavke pokazale točnima u ispitivanju koje su proveli autori rada [12] pri kontroliranim uvjetima okoline. Zatim su autori preusmjerili svoj rad na terensko ispitivanje na malim uzorcima kako bi dokazali ili opovrgnuli laboratorijske analize.

Navedeni autori u istom radu [12] provodili su ispitivanja zastorne prizme uz pomoć termovizijske kamere Agema Thermovision 900 koja hvata toplinske informacije objekta i prosljeđuje ih preko računalnog softvera na računalo radi obrade podataka i pohrane. Ovakva kamera emitiranjem infracrvenog zračenja može mjeriti razlike u temperaturi do $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$. Zračenje koje mjeri kamera ne ovisi samo o temperaturi površine objekta već i o funkciji emisivnosti odnosno mjeri učinkovitosti površine koja djeluje po principu radijatora. Prije provedbe mjerenja određena je emisivnost tucanika u određenoj referentnoj točki. Kako emisivnost predstavlja funkciju zračenja emitiranog s površine, bilo je potrebno da postoji temperaturna razlika između tucanika i atmosferske temperature kako bi se omogućilo da se emisivnost može mjeriti a ne nešto drugo. Na temelju ispitivanja zaključeno je da se emisivnost tucanika ne mijenja ako je on vlažan za razliku od nekih drugih materijala kao što je pijesak, koji mijenja svojstva ako je mokar.

Laboratorijska ispitivanja bila su provedena na način kako bi se moglo pomoću terenskih ispitivanja dokazati ili opovrgnuti dobivene zaključke. Iz rezultata oba ispitivanja bilo je dokazano da čisti i zablaćeni uzorak imaju različite brzine prijenosa topline, također je bilo dokazano da voda predstavlja važan faktor za njen prijenos. Ispitivanja koja su proveli u radu [8] dokazuju da se pomoću termovizijske kamere mogu uočiti različita stanja zastorne prizme te da vlažnost kolosiječnog zastora ne utječe na njegovu emisivnost (pri snimanju konstantna za sva stanja zastorne prizme). [12]

Y. Tan, Y. Chen, A.W. Peterson, M. Ahmadian, 2019

Za otkrivanje dotrajalog i oštećenog sloja zastorne prizme mogu se koristiti i infracrvene kamere na bespilotnim letjelicama odnosno dronovima, pod nazivom FLIR zračna tehnologija. Dronovi omogućuju kameri brzo mjerenje temperature zastora od tucanika na velikoj površini. Princip snimanja temperature površine sloja tucanika prikazan je na slici 16.

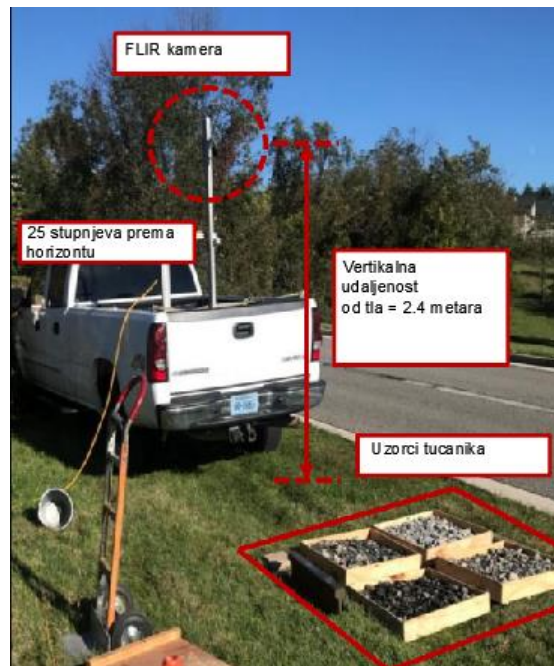


Slika 16. Shematski prikaz infracrvene kamere na bespilotnoj letjelici [14]

Mjereni objekt, u našem slučaju zastorna prizma od tucanika, emitira elektromagnetsko zračenje u infracrveno područje elektromagnetskog spektra ako mu je temperatura iznad 0 K, odnosno iznad -273.15°C . Infracrveni detektor koristi se u FLIR kameri za određivanje infracrvene energije emitiranog objekta. Prije korištenja bespilotnih letjelica FLIR kamere su ispitane u stacionarnom položaju tako da su postavljene na konstrukciju na visinu od 2.4 metra, kao što je prikazano na slici 17, kako bi se utvrdilo da li mogu otkriti temperaturne razlike za različito stanje zastorne prizme.

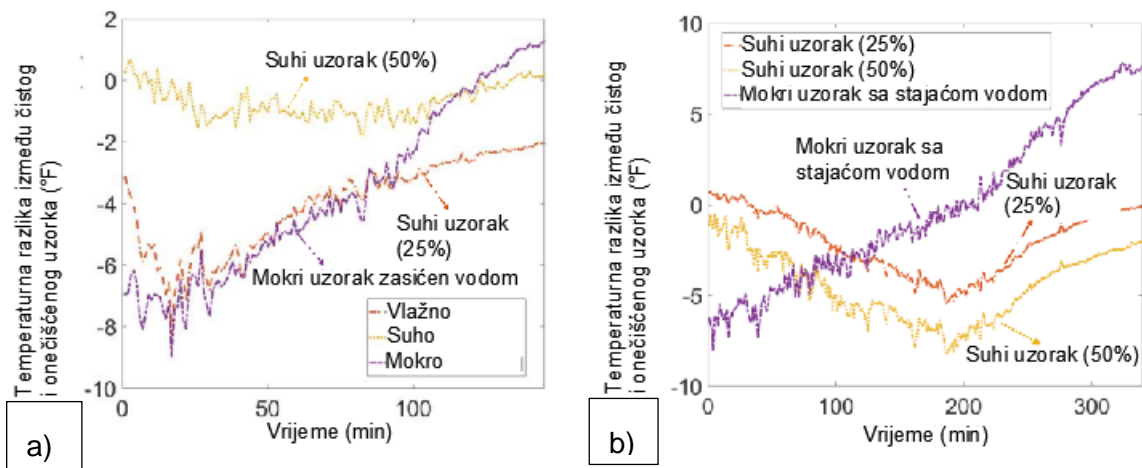
Uspoređeni su različiti uzorci onečišćenja zastorne prizme sa čistim uzorkom. Izvode se dva testa te se uzorci tucanika postavljaju u plitke drvene kutije. Kod testa A ispitni uzorci uzeti su iz 4 vrste zastorne prizme uključujući čisti, vlažni uzorak te uzorke onečišćene suhim i mokrim

tlom. Kod testa B uzeti su uzorci čiste zastorne prizme, suhi uzorak sa 25% onečišćenja i 50% onečišćenja te vodom zasićeni uzorak tucaničkog materijala koji se postavljaju u dublje kutije za razliku od testa A.



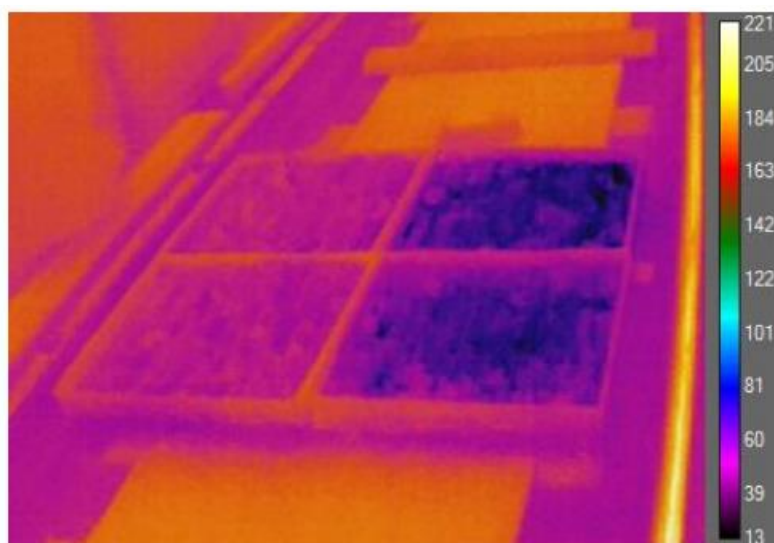
Slika 17. Prikaz razmještaja za snimanje [14]

Na slici 18a) prikazani su rezultati ispitivanja temperature između čiste i onečišćene zastorne prizme. Onečišćena mokra i vlažna zastorna prizma imaju znatno niže temperature na početku ispitivanja za razliku od čistog uzorka, no temperaturna razlika se smanjuje sa vremenom ispitivanja. Razlog tome je da toplinski kapacitet vlažnog uzorka je znatno veći nego kod suhog uzorka zbog čega je hladniji na početku jer mu treba više energije za zagrijavanje. Drugi razlog leži u činjenici da vlažni uzorak ima tendenciju isparavanja tijekom vremena zbog sunčevog zračenja. Na slici 18b) vidljivi su rezultati ispitivanja testa B gdje onečišćeni uzorci sa stajaćom vodom imaju znatno niže početne temperature od čistog uzorka, no s vremenom njihova temperatura prelazi temperaturu čistog uzorka zbog toga što vlažni uzorak treba više toplinske energije za zagrijavanje. Kod slučaja suhog uzorka zastorne prizme imamo pad temperature u odnosu na čisti uzorak zbog toga što se čisti uzorak brže zagrijava.



Slika 18. Temperature onečišćenih uzoraka u usporedbi sa čistim uzorkom: a) test A i b) test B [14]

Na kraju su još provedena ispitivanja uzoraka zastorne prizme pomoću FLIR kamere na pokretnoj konstrukciji kako bi se vidjelo da li kamera ima sposobnost razlikovanja temperatura uzoraka u uvjetima kretanja. Cilj izvođenja ovog pokusa je bio kako bi se vidjelo da li će se pomoću bespilotnih letjelica moći razlikovati različite temperature uzoraka. FLIR kamera se postavlja na visini od 1.7 metara na uređaj koji se kreće različitim brzinama. Različiti uzorci zastorne prizme su postavljeni u plitke drvene posude. Tijekom ispitivanja temperatura okoline se ne mijenja. Na slici 19 možemo vidjeti infracrvenu sliku snimljenu FLIR kamerom koja se kreće brzinom od 1 m/s. Slika je dobre kvalitete što znači da je FLIR kamera u pokretnoj konfiguraciji sposobna detektirati temperaturne razlike čistog i onečišćenog uzorka zastorne prizme. [14]



Slika 19. Infracrvena slika snimljena kamerom FLIR pri brzini od 1 m/s [14]

M. Ahmadian, Y. Tan, Hosseini S.M., 2020

U ovom poglavlju bavit ćemo se istraživanjem kojeg je proveo Ahmadian M. zajedno sa svojim suradnicima na Politehničkom institutu i fakultetu u Virginiji, Sjedinjene Američke Države. Glavna ideja njihova rada bila je iskoristiti činjenicu da se čisti i onečišćeni željeznički zastori, podložni prirodnim promjenama temperature, različito ponašaju u toplinskom smislu (opisano u prethodnim poglavljima) što bi se moglo iskoristiti u svrhu otkrivanja onečišćenja u zastoru, još u ranoj fazi, snimanjem infracrvenom kamerom.

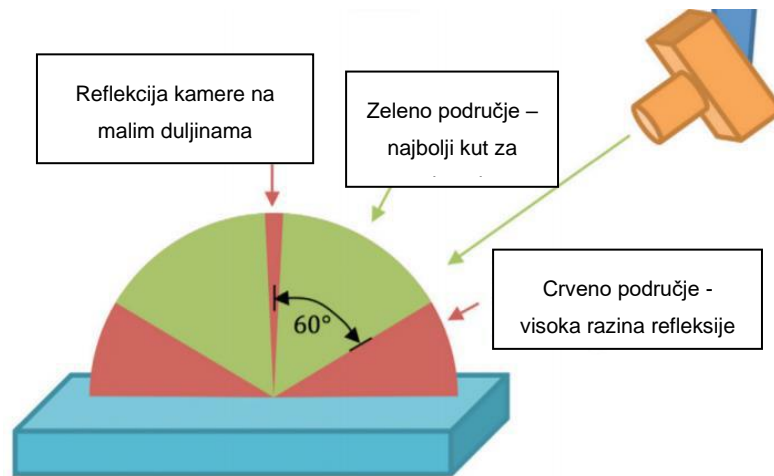
Ispitivanje je provedeno na otvorenom tijekom ljetnih mjeseci, a zastori korišteni u njemu dobiveni su od lokalnih željezničkih tvrtki (s terena) kako bi toplinska svojstva ostala što bliža stvarnim uvjetima. Ispitivana su 3 uzorka: onečišćeni, djelomično onečišćeni i čisti zastor koji su postavljeni u direktnom kontaktu s podom kako bi temperatura na dnu uzorka bila ista, kao što je prikazano na slici 20 Ispitivanja su podijeljena u dvije skupine: ispitivanje suhog zastornog materijala i ispitivanje vlažnog zastornog materijala, te se provode u vremenskom intervalu od 14:00 do 20:00 tijekom više dana.



Slika 20. Uzorci pripremljeni za ispitivanje [15]

Najveće ograničenje termalnog snimanja je to što se ne može izravno mjeriti temperatura okoline. No, studija preporučuje da bi temperatura tračnice mogla biti izvrsna alternativa za izravno mjerenje temperature okoline zbog niskog toplinskog kapaciteta čelika, te posljedično njegove brze reakcije na okoliš. Zbog toga je uz uzorke na slici 20 postavljena tračnica na drvenom pragu kako ne bi bila u direktnom dodiru s tlom.

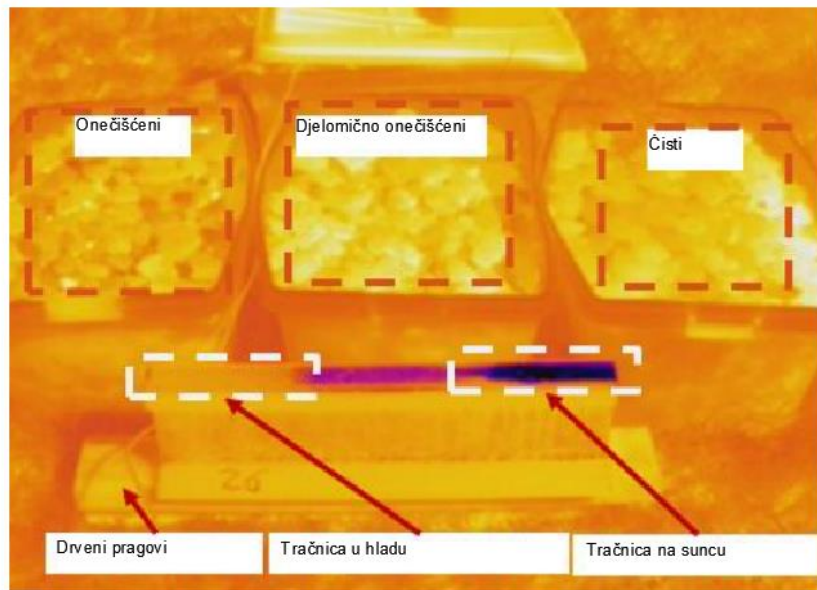
Za termalno snimanje korištena je kamera FLIR VUE Pro R. Postavljena na visini od 1.5 m te je kut snimanja 45 stupnjeva u odnosu na horizontalu kako bi se što bolje smanjili štetni učinci refleksije (slika 21).



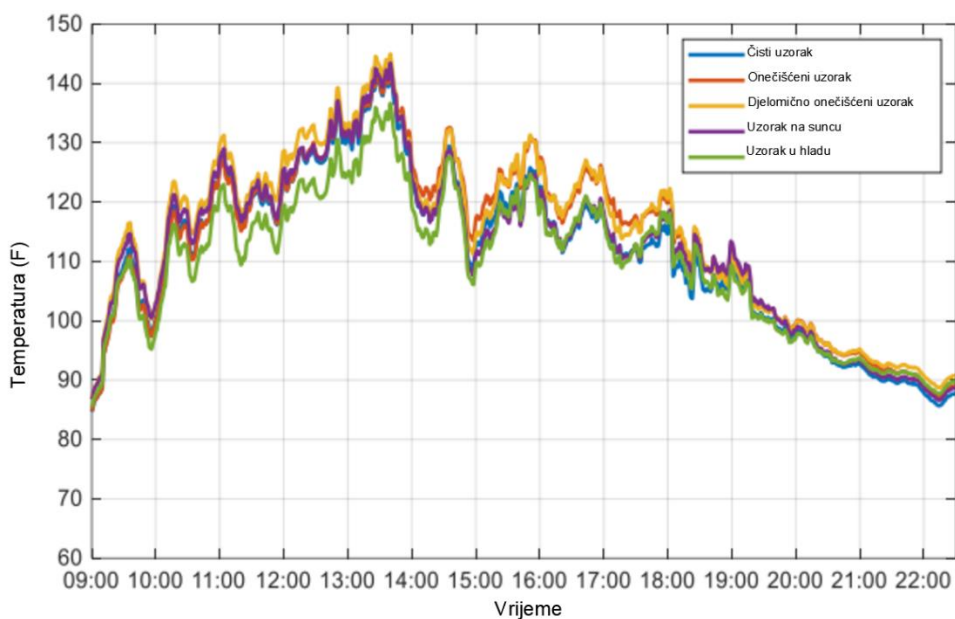
Slika 21. Najpovoljniji kutevi snimanja – minimalna refleksija [15]

Ispitivanje suhih uzoraka

Prvo ispitivanje izvedeno je na suhim uzorcima željezničkog zastora u srpnju pri temperaturi okoline od 26 do 34 stupnjeva celzijusa. Ispitivanje je započelo u 9:00 te završilo u 22:00, a pratila se temperatura gornje površine snimanjem termalnom kamerom svakih 60 sekundi (slika 22). Dobivene temperature tijekom ispitivanja za sva 3 uzorka, kao i za tračnicu koja je bila podijeljena na 2 dijela (dio na direktnom suncu te dio u hladu) prikazane su na slici 23. Temperaturu tračnice također je bilo važno pratiti kako bi se ustanovilo je li ona pogodni predstavnik temperature okoline. Temperaturna krivulja dobivena je na način da svaka toplinska slika predstavlja jednu točku u vremenu, te spajanjem točaka dobivamo krivulju. Istovremeno su provedena mjerenja dodirnim, ručnim termo mjeračima koja su pokazala da je točnost kamere u granicama predviđenim specifikacijama uređaja.



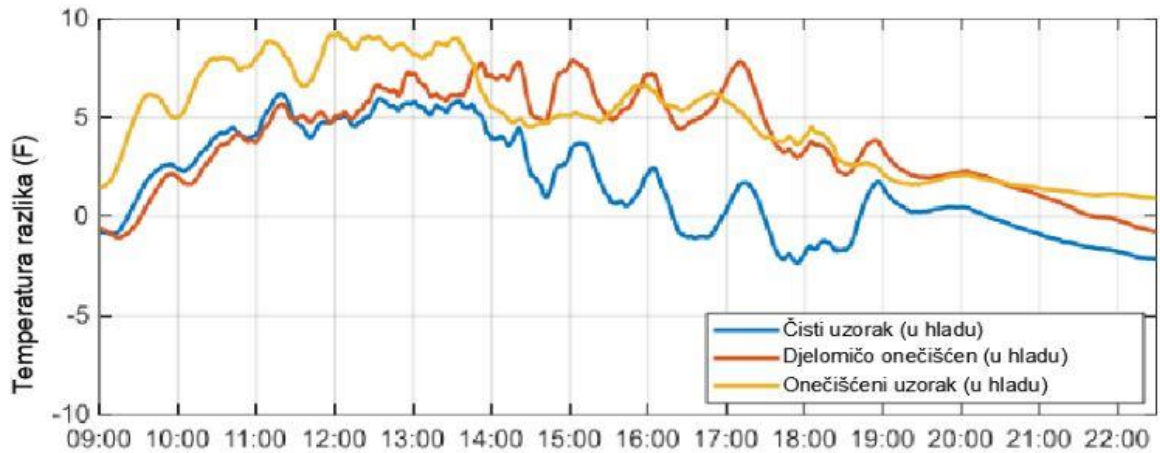
Slika 22. Snimka termalnom kamerom [15]



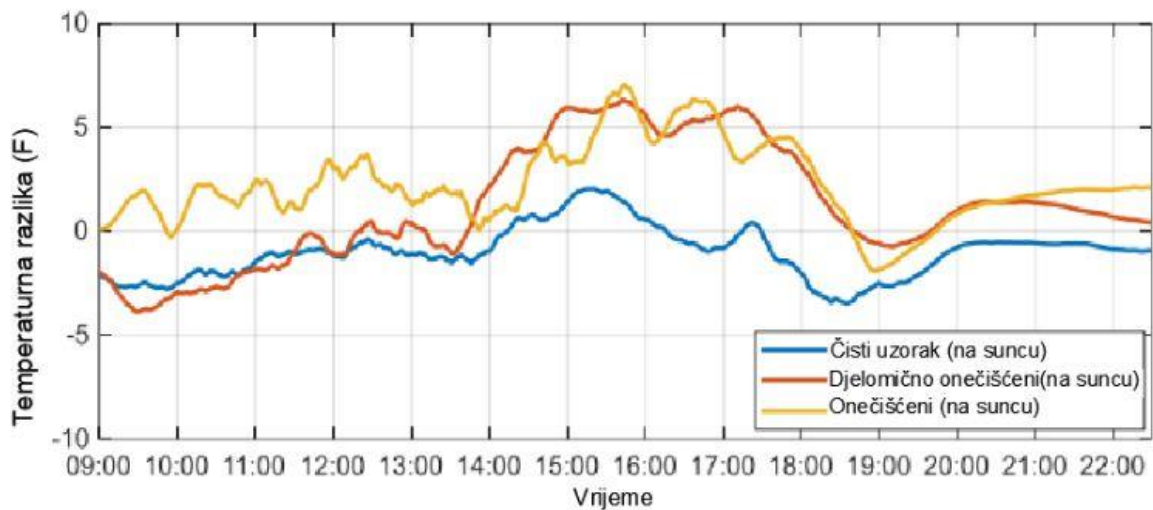
Slika 23. Temperaturne krivulje pri suhom ispitivanju [15]

Proučavanjem dobivenih temperaturnih krivulja možemo odrediti krivulje relativnih temperaturnih razlika između pojedinih uzoraka. Za potrebe istraživanja bitno je promatrati relativne temperaturne razlike između svakog pojedinog uzorka željezničkog zastora s tračnicom u hladu (slika 24), kao i s tračnicom na suncu (slika 25). Relativna temperaturna razlika u odnosu na dio tračnice u hladu kreće se od 0 do 10 stupnjeva fahrenheitita (najveća vrijednost u 12:00). Uzorak onečišćenog zastora pokazuje najveću razliku prije podneva, a djelomično onečišćenog zastora nakon podneva, dok tijekom cijelog dana uzorak čistog zastora pokazuje vrlo male temperaturne razlike u odnosu na tračnicu u hladu. Međutim, kada

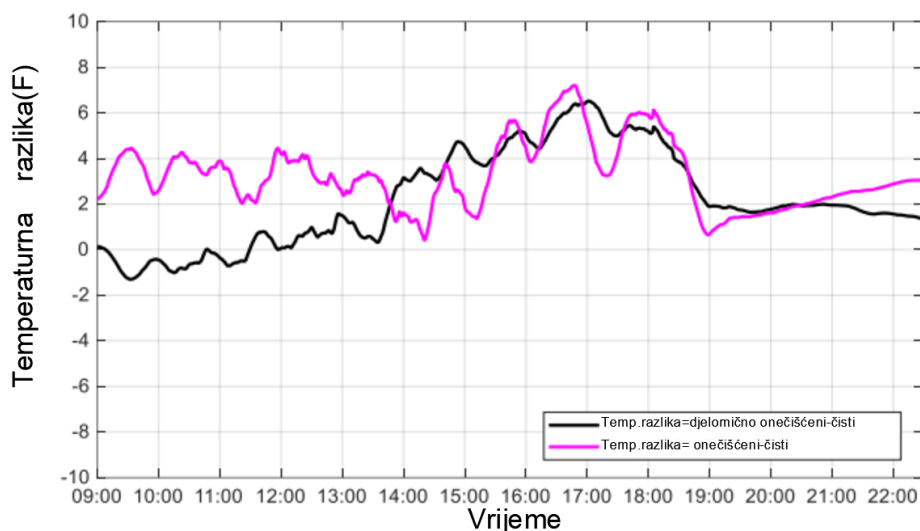
uzorke uspoređujemo s tračnicom koja je direktno izložena Sunčevim zrakama, očitavanja pokazuju da je temperaturna razlika za onečišćeni i djelomično onečišćeni zastor najveća u razdoblju od 12:00 do 18:00, dok je za čisti zastor (kao i u prvom slučaju) temperaturna razlika vrlo mala. Na slici 26 prikazana je temperaturna razlika između čistog i onečišćenog zastora te čistog i djelomično onečišćenog zastora. [15]



Slika 24. Relativne temperaturne razlike uzoraka s tračnicom u hladu [15]



Slika 25. Relativne temperaturne razlike uzoraka s osunčanom tračnicom [15]

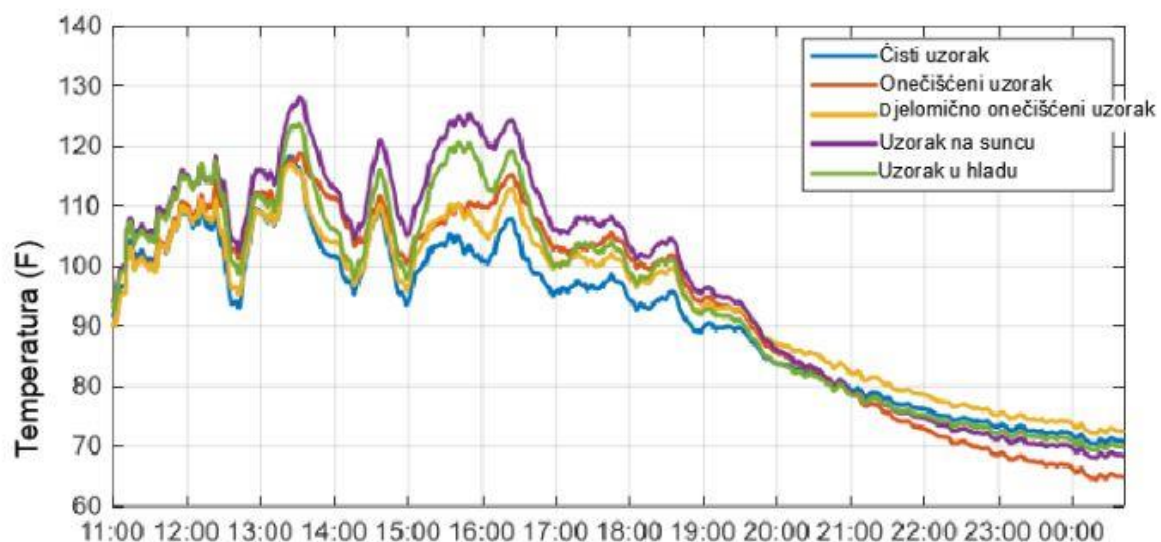


Slika 26. Temperaturna razlika čistog i djelomično onečišćenog zastora te čistog i onečišćenog zastora [15]

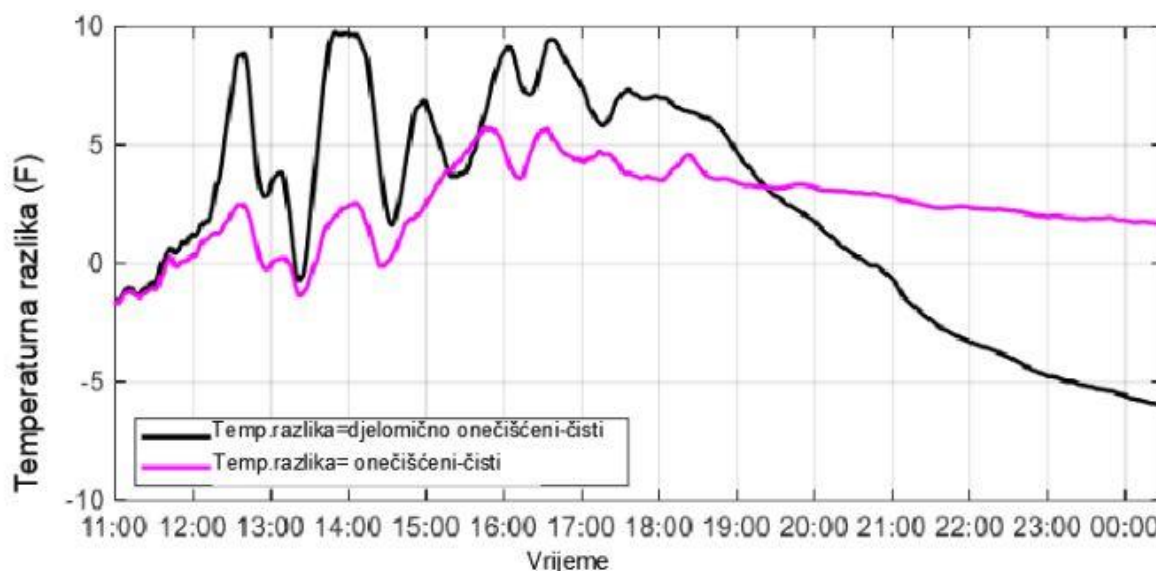
Ispitivanje vlažnih uzoraka

Za drugo ispitivanje, djelomično onečišćenom i onečišćenom zastoru dodana je voda. Količina dodane vode izmjerena je po masi uzorka, odnosno 50% od mase suhog uzorka. Ispitivanje je provedeno u roku od nekoliko dana od testiranja suhih uzoraka kako bi se postigli što sličniji uvjeti prirodne okoline. Razdoblje u kojem je provedeno je od 11:00 do ponoći. Termalne slike snimljene su istom brzinom kao i prvi test, odnosno uzorci su slikani je svakih 60 sekundi.

Dodavanje vode uzrokovalo je drugačije ponašanje uzoraka željezničkog zastora (slika 27). Raspon temperaturne razlike dostigao je najviše do 10 stupnjeva Fahrenheita i ta razlika je postala izraženija kada se uzorci zastora hlade. To se može objasniti povećanim toplinskim kapacitetom uzoraka koji sadrže vodu. Temperaturna razlika između djelomično onečišćenog i čistog uzorka, te između onečišćenog i čistog uzorka prikazana je na slici 28. Trend razlike između onečišćenog i čistog uzorka vrlo je sličan suhom testu. Temperaturna razlika je u početku niža, ali ostaje na sličnoj razini sve do 19:00 kada počinje lagano opadati što u potpunosti odgovara očekivanom jer dodavanjem vode se povećava toplinski kapacitet uzoraka. U uzorak čistog zastora nije dodavana voda zbog toga što čisti zastor ne može zadržavati vodu te je njegovo ponašanje pri ovom ispitivanju gotovo identično ispitivanju suhih uzoraka.



Slika 27. Temperaturne krivulje pri ispitivanju vlažnih uzoraka [15]



Slika 28. Temperaturne razlike djelomično onečišćenog i čistog zastora te onečišćenog i čistog zastora [15]

Rezultati oba ispitivanja ukazuju na to da su temperature dobivene termalnim snimanjem pod velikim utjecajem refleksivnosti na gornjoj površini željezničkog zastora. Uvjeti u kojima je refleksivnost konstantna daju točnije informacije o temperaturi od onih s različitom refleksivnošću. To implicira da mjerenja termalnom kamerom tijekom dana možda neće dati potpuno točne površinske temperature, ali u ovom slučaju temperature odstupaju u granicama koje su dane specifikacijom uređaja. Primjećuje se da sadržaj vode u uzorcima povećava temperaturnu razliku između onečišćenog/djelomično onečišćenog uzorka s čistim uzorkom. Usporedbom brzina promjena temperatura može se zaključiti da je mjerenje najpovoljnije izvesti tijekom ciklusa zagrijavanja i hlađenja, odnosno oko podne (zagrijavanje) i pri zalasku

sunca (hlađenje). Rezultati ispitivanja prikazuju da je u prosjeku temperaturna razlika 7-8 stupnjeva Fahrenheita, odnosno oko 4 stupnjeva Celzijusa, između površina djelomično onečišćenog, mokrog zastora i čistog zastora. Temperaturne razlike od 10 stupnjeva Fahrenheita također su uočene ali u jako kratkim vremenskim razdobljima pri ispitivanju vlažnih zastora. No, sve temperaturne razlike uočene u ovom ispitivanju mogle bi biti unutar granica pogreške uređaja koje se javljaju u praksi, stoga je potrebno testiranje na terenu kako bi se potvrdili ili opovrgnuli dobiveni rezultati laboratorijskog ispitivanja. [15]

2. Hipoteza i ciljevi rada

Osnovna hipoteza ovog znanstvenog istraživanja glasi: „Nerazornom metodom infracrvene termografije moguće je odrediti stanje zablacenosti kolosiječnog zastora u in-situ uvjetima na klasičnoj kolosiječnoj konstrukciji“.

Na temelju prikupljenih podataka iz prethodnih istraživanja, posebice [12, 14, 15] te u skladu s postavljenom hipotezom, ustanovljeni su ciljevi rada:

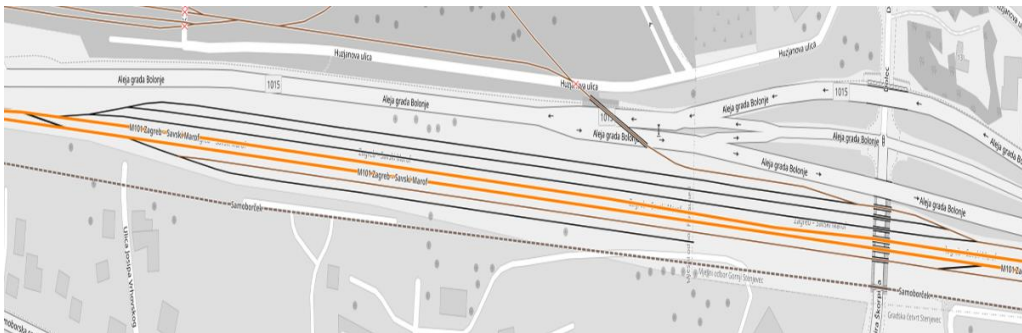
- dokazati mogućnost primjene termografije za ocjenu stanja kolosiječnog zastora u realnim uvjetima na 4 kolosijeka različitog stanja kolosiječnog zastora,
- metodom prosijavanja tucaničkog materijala utvrditi stvarne udjele sitnih čestica na uzorcima uzetim iz analiziranih kolosijeka,
- odrediti optimalne uvjete za provođenje ispitivanja (doba dana, meteorološke),
- stvoriti preduvjete za daljinsku analizu kolosiječnog zastora primjenom UAV,
- analizirati mogućnost otkrivanja nepravilnosti na željezničkim pragovima metodom infracrvene termografije.

3. Provedba terenskih i laboratorijskih istraživanja

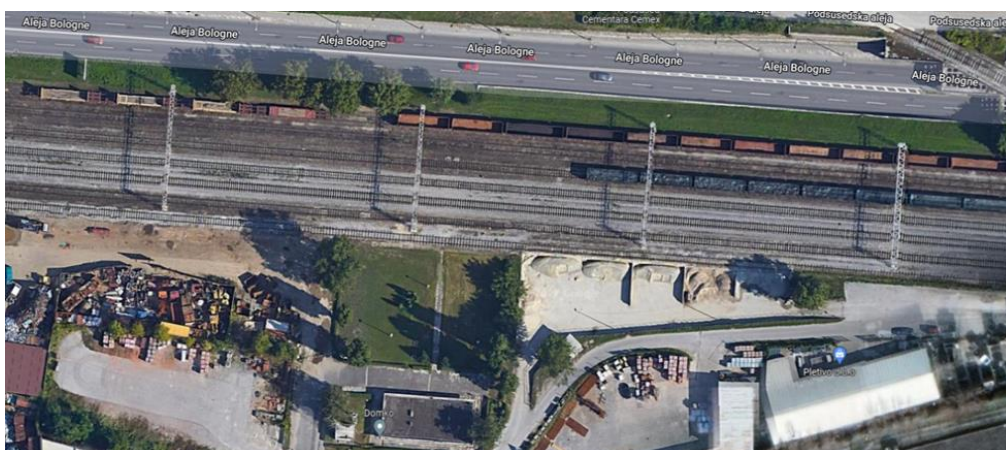
U ovom poglavlju biti će prikazana terenska ispitivanja koja su obavljena na Kolodvoru Podsused te laboratorijska ispitivanja uzoraka prikupljenih na navedenoj lokaciji. Provedena su ispitivanja termografskog snimanja (3.2.) te kao kontrola točnosti takvog ispitivanja provedeno uzorkovanje je prosijavanje zastornog materijala (3.3.), odnosno određivanje granulometrijskog sastava.

3.1. Opis ispitne dionice - kolodvor Podsused

Željeznički kolodvor Podsused odabran je u svrhu ovog rada iz više praktičnih razloga: veliki broj kolosijeka (7), različito stanje kolosijeka (od nedavno renoviranog do gotovo potpuno zblaćenog kolosiječnog zastora) te zbog smanjene brzine vožnje za vrijeme ispitivanja zbog radova na skretnicama u blizini – povećana sigurnost boravka na kolosijeku. Željeznički kolodvor Podsused prikazan je na slikama 29 i 30.



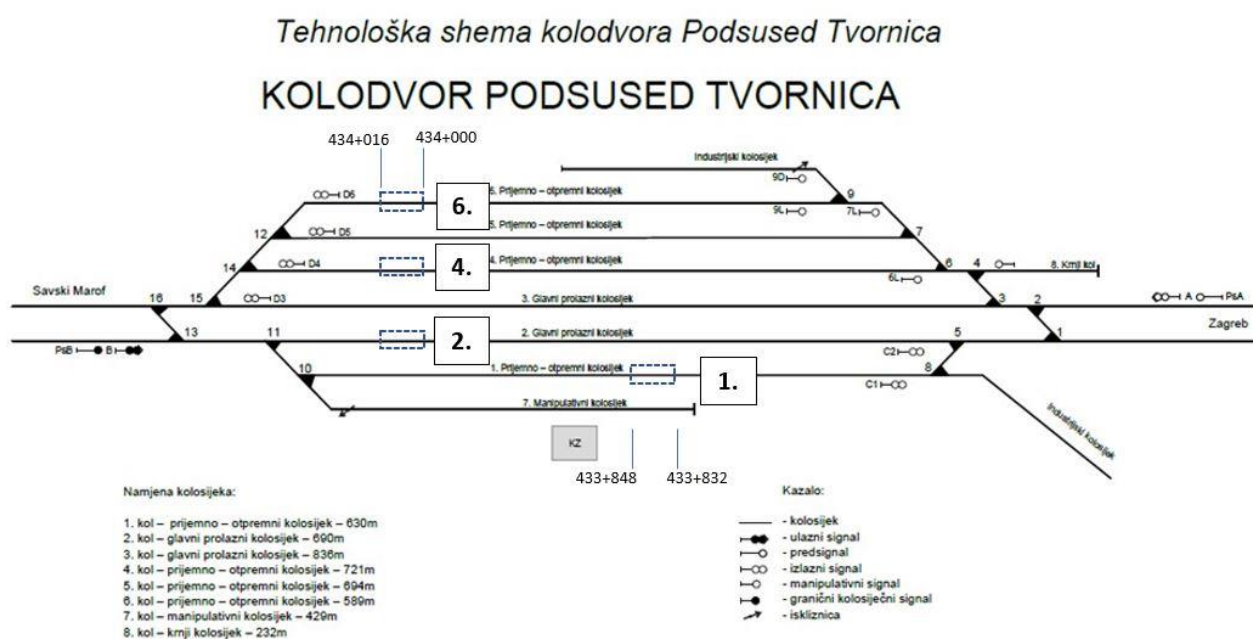
Slika 29. Skica željezničkog kolodvora Podsused [16]



Slika 30. Ortofoto snimak željezničkog kolodvora Podsused [17]

Dopuštena osovinska masa je 22.5 t/osovini i 8 t/m, odnosno kategorije D4. Novougrađeni tucanik za zastornu prizmu je kameni agregat veličine zrna 32/63mm.

Izvršena su 2 ispitivanja koja će u daljnjem radu biti prikazana, a to su termografsko ispitivanje zastorne prizme te ispitivanje granulometrijskog sastava zastorne prizme. Ispitivanje granulometrijskog sastava zastorne prizme izvedeno je kako bi se mogli usporediti rezultati s rezultatima termografskog ispitivanja, te kako bi se mogla, što točnije odrediti uspješnost takvog ispitivanja. Ispitivanja su provedena na kolosijecima 1, 2, 4 i 6, a svi kolosijeci su označeni na slici 31. Ovi kolosijeci odabrani su zbog raznolikosti stanja, odnosno različitog stupnja zblaćenja zastorne prizme.



Slika 31. Tehnološka shema kolodvora Podsused sa naznačenim dionicama analiziranim u narednim poglavljima, na kolosijecima 1, 2, 4 i 6 [17]

Opis analiziranih kolosijeka

Kako bi se što preciznije odabrali odgovarajući kolosijeci izvršen je vizualni pregled, a zatim i otkopavanje materijala do dna praga, odnosno vertikalno otkopavanje do dubine od 15 - 20 cm. Ciljano se odabralo kolosijeke 1, 2, 4 i 6 zbog raznolikog stanja zblaćenja zastora. Odabrani kolosijeci opisani su u tablici 1 te prikazani Slici 32.

Tablica 1. Opis odabranih kolosijeka

Oznaka kolosijeka	Opažanja zablacenosti na temelju vizualnog pregleda	Opis pragova	Početna / završna stacionaža	Deklarirani granulometrijski sastav	Otpornost na drobljenje LA	Godine ugradnje
1	Iznimno loše – vidljivo zablacenje i bez otkopa	Drveni prag	433+832 /433+848	32-63 mm	LA ≤ 24	1970.
2	Nepostojeće zablacenje - renovirano	Vibrobeton PB85	434+000 /434+016	32-63 mm	LA ≤ 16	2022.
4	Postojeće, tek pri dnu praga	Vibrobeton PB85	434+000 /434+016	32-63 mm	LA ≤ 16	2017.
6	Odmah ispod površinskog sloja	Drveni prag	434+000 /434+016	32-63 mm	LA ≤ 24	2021.

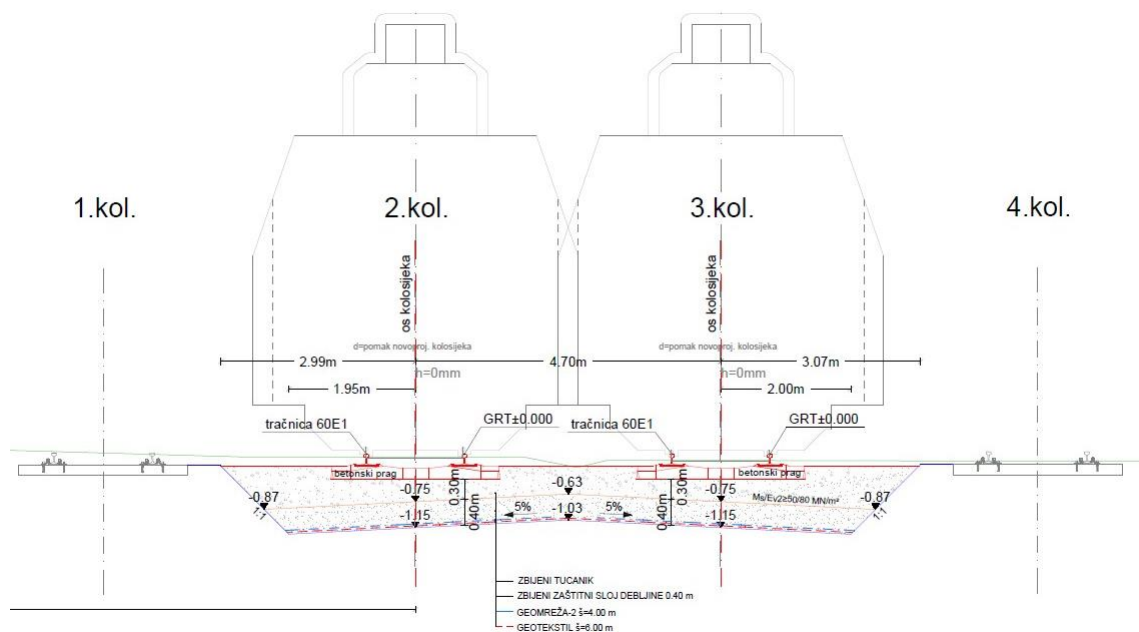


Slika 32. Prikaz otkopa i zablacenja promatranih kolosijeka

Deklarirani granulometrijski sastav svih kolosijeka promatranog kolodvora je u granicama od 32 do 63 mm. Otpornost na drobljenje do vrijednosti 24 postižu kolosijeci 1, 5, 6 i 7 dok kolosijeci 2, 3 i 4 imaju otpornost na drobljenje do vrijednosti 16. [17]

Kao najpovoljniji kolosiječni zastor, odnosno zastor s najmanjim udjelom sitnih čestica treba izdvojiti kolosijek pod oznakom 2. Kolosijek 2 je zajedno s kolosijekom 3 renoviran 2022. godine te za potrebe ovog rada nije potrebno obuhvatiti oba kolosijeka jer su gotovo identičnih karakteristika. Kolosiječni zastor broj 1 (renoviran 1970.) najnepovoljniji je zastor u kojem su prisutne sitne čestice i bez otkopavanja do dubine praga. Već vizualno moglo se utvrditi stanje ovog kolosijeka jer se jasno vidjelo zablacenje, kao i zatravnjena površina zastornog materijala. Uz navedena dva kolosijeka, za potrebe ispitivanja promatrana su još 2 kolosijeka (kolosijek 4 i 6). Površinski ta dva kolosijeka nemaju zablacenja, ali iskopom su se jasno uočavale sitne čestice te su za potrebe ovog rada korišteni kako bi se utvrdila mogućnost određivanja udjela sitnih čestica metodom termografskog snimanja [17].

Na slici 33 dan je karakteristični poprečni presjek kolosijeka 2 i 3 koji su temeljito rekonstruirani u sklopu remonta pruge na dionici Zagreb Zapadni kolodvor – Zaprešić 2022. godine. Na slici su označeni slobodni profili prolaznih kolosijeka 2 i 3. Također, prikazani su slojevi kolosiječne konstrukcije i podkonstrukcije.



Slika 33. Karakteristični poprečni presjek novo rekonstruiranih kolosijeka 2 i 3 u kolodvoru Podsused [17]

3.2. In-situ termografsko ispitivanje kolosijeka na kolodvoru Podsused

3.2.1. Opis postupka termografskog snimanja

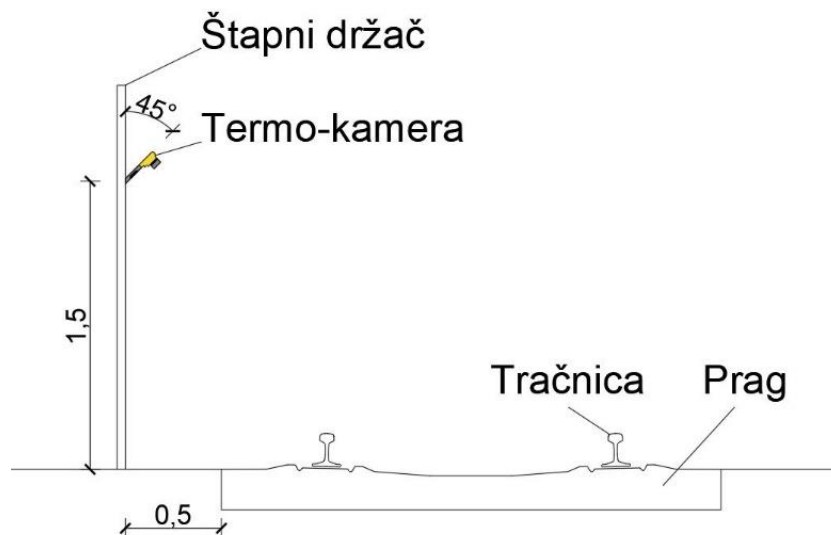
Sukladno prethodnim istraživanjima osobito [15] postavljeni su uvjeti za provođenje in-situ ispitivanja termovizijskom kamerom na kolodvoru Podsused. Na temelju prethodnih istraživanja određeni su osnovni parametri kao što su:

- provedba ispitivanja u uvjetima suhog i vlažnog kolosiječnog zastora,
- provedba ispitivanja u vremenskom periodu u danu kad su očekivane najveće temperaturne razlike između zablacenog i čistog kolosiječnog zastora,
- odabran preporučeni kut kamere u odnosu na površinu kolosiječnog zastora,
- utvrđeno je kako vlažnost tucanika nema utjecaj na koeficijent emisivnosti tucanika, čime je utvrđena fiksna vrijednost stupnja emisivnosti za sva provedena ispitivanja.

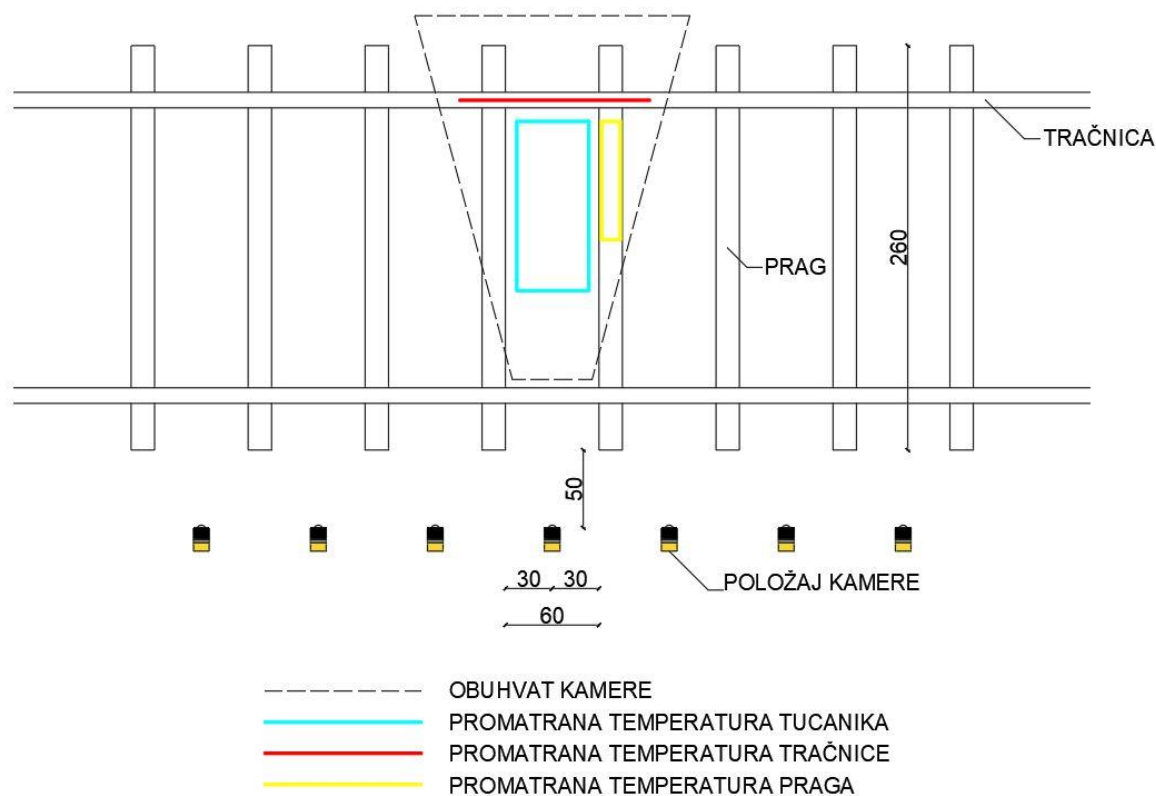
Termografsko snimanje na željezničkom kolodvoru Podsused izvršeno je u 4 navrata podijeljenih u 2 dana kako bi se mogli uspoređivati rezultati nakon suhog i kišnog perioda. Prvo

ispitivanje izvelo se 21.04.2022., dan nakon sunčanog i suhog dana te je podijeljeno na ispitivanje A1 i B1. Ispitivanje A1 izvedeno je od 12:00 do 13:00, a B1 od 16:00 do 17:00. Drugo ispitivanje provedeno je 23.04.2022., dan nakon kišnog i vlažnog dana i to s istom podjelom na A2 i B2 ispitivanje, kao i kod prvog ispitivanja, A2 izvršeno je od 12:00 do 13:00, a B2 od 16:00 do 17:00. Zbog toplinske osjetljivosti materijala bilo je važno provesti ispitivanja u kraćem vremenskom periodu. Odabran je vremenski period ispitivanja od jednog sata.

Ispitivanja su izvršena na način da se termalnom kamerom Fluke TiS45 postavljenom na visini od 1.5m, pod kutem od 45° te na udaljenosti od 0.5m od ruba praga snimao termograf (slika 34 i slika 35). Horizontalne pozicije termalne kamere su u središtu razmaka 2 praga, odnosno 0.3m od svakog praga. Obzirom da se snimao svaki razmak praga pojedinačno, takvih pozicija u jednoj promatranoj dionici ima između 28 i 30.



Slika 34. Položaj termo-kamere Fluke TiS45 u poprečnom presjeku



Slika 35. Položaj termo-kamere Fluke TiS45 u tlocrtu

Na slici 35 prikazan je položaj kamere te njen obuhvat koji zahvaća udaljeniju tračnicu, 2 susjedna praga i zastor između njih. Promatrane temperature su označene pravokutnicima za prag i zastor, dok se temperatura željeznice mjerila linijski i tako je označena. Tijek provedbe ispitivanja prikazan je na slici 36.



Slika 36. Provedba termografskog snimanja kolosijeka na kolodvoru Podsused

Također važno je naglasiti da je orijentacija kamere s obzirom na tračnicu zatvarala pravi kut. Vrijednost koeficijenta emisivnosti postavljena je na 0.95 te kasnije nije promijenjena.

Termogrami dobiveni na taj način kasnije su analizirani u software-u SmartView u kojem je, zbog jednostavnije analize, promijenjen raspon vidljivih temperatura i to za svaku dionicu posebno. Nakon toga, iskorištena je opcija koju nudi program za izražavanje minimalne, maksimalne i prosječne temperature. Na taj način dobivene su temperature tračnice, kolosiječnog zastora te pragova koje su onda u svrhu daljnje analize uvezeni u Microsoft Excel software.

Meteorološki uvjeti prilikom snimanja

Snimanja su se izvodila u 2 dana kako bi se uočilo različito ponašanje materijala prilikom različitih vremenskih uvjeta. Prvo snimanje (A1) se izvodilo nakon suhog dana 21.04. između 12:00 i 13:00 sati, pri oblačnim vremenskim uvjetima. Temperatura zraka je varirala između 10 i 13 °C, relativna vlažnost bila je između 53 i 59 %, te tlak zraka od 1013hPa. Na drugom snimanju, koje se odvijalo istog dana u terminu od 16:00 do 17:00 sati, pri poluoblačnim vremenskim uvjetima izmjerene su slijedeće vrijednosti: temperatura je bila 14°C, relativna vlažnost 50%, a tlak zraka 1011hPa.

Slijedeće snimanje odvijalo se nakon kišnog i vlažnog perioda, a količina oborina na dan 22.4. iznosila je 6mm. Dana 23.04. u oblačnim vremenskim uvjetima izmjerene vrijednosti u prvom terminu snimanja između 11:00 i 12:00 sati iznosile su: temperatura zraka 13°C, relativna vlažnost 79%, i tlak 1008hPa. U terminu snimanja od 16:00 do 17:00 sati temperatura zraka je bila 17°C, relativna vlažnost 61% te tlak zraka od 1007hPa. Izmjerene vrijednosti preuzete su sa hidrometeorološke postaje Maksimir, Zagreb. [18-19]

Specifikacije termografske kamere FLUKE TiS45

Termografska kamera FLUKE TiS45 pripada seriji naprednih kamera za tehničare i izvođače radova, kao i za ostale industrijske održavaoce, za čiji su rad potrebne infracrvene slike sa naprednim funkcijama za brz i jednostavan pregled.

Značajke i kontrole termografske kamere prikazane su u tablici 2, a glavne tehničke karakteristike u tablici 3. [20]

Tablica 2. Značajke i kontrole kamere [20]

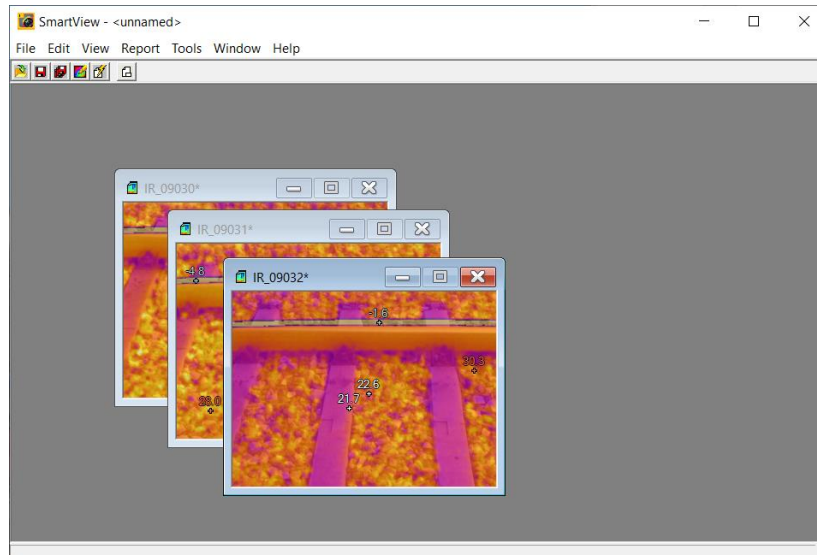
točka	opis
1	Tipke sa strelicama
2	Tipke funkcija (F1, F2 i F3)
3	Zaslon
4	Gumb za prikaz memorije
5	Uključivanje/isključivanje i kalibriranje
6	Sidro za traku za ruku
7	USB priključak
8	Utor za memorijsku karticu
9	AC adapter/vanjska naponska utičnica
10	Otvoreni lećasti pokrov
11	Objektiv infracrvene kamere
12	Objektiv fotoaparata s vizualnim svjetlom
13	Laserski pokazivač
14	Sekundarni okidač
15	Primarni okidač
16	Ručno upravljanje fokusom
17	Litij-ionska pametna baterija
18	AC napajanje sa mrežnim adapterima
19	Dvostruko postolje za punjenje baterije

Tablica 3. Glavne tehničke karakteristike [20]

Infracrveni detektor	
Rezolucija IR detektora/broj točaka u IC slici	160 x 120 (19 200)
Prostorna rezolucija	
Vidno polje senzora	3,9 mrad
Odnos udaljenosti/veličine vidne točke (D:S)	252:1
Termalna osjetljivost odnosno rezolucija temperature	≤0,09°C pri 30°C
Osnovne mjerne funkcije	
Temperaturno mjerno područje	-20°C do 350°C
Optika infracrvenog senzora	
Izoštavanje infracrvene (IC) slike (fokus)	Ručno
Minimalna udaljenost od objekta	15 cm
Digitalni fotoaparat	
Rezolucija	5 MP
Ekran	
Dijagonala	8,9 cm (3,5")
Razlučivost	320 x 240 točaka
Memorija	
Interna memorija	4 GB
Memorijska kartica	4 GB
Format zapisa	
Radiometrijski format memoriranja podataka	.is2
Standardni format memoriranja podataka	.jpg, .bmp
Zvučni komentar (Bluetooth opcija slušalice)	
Dužina zvučnog zapisa	60 s
Napajanje	
Životni vijek baterija (standardno)	4 sata
Vrijeme punjenja baterije (standardno)	2,5 sata

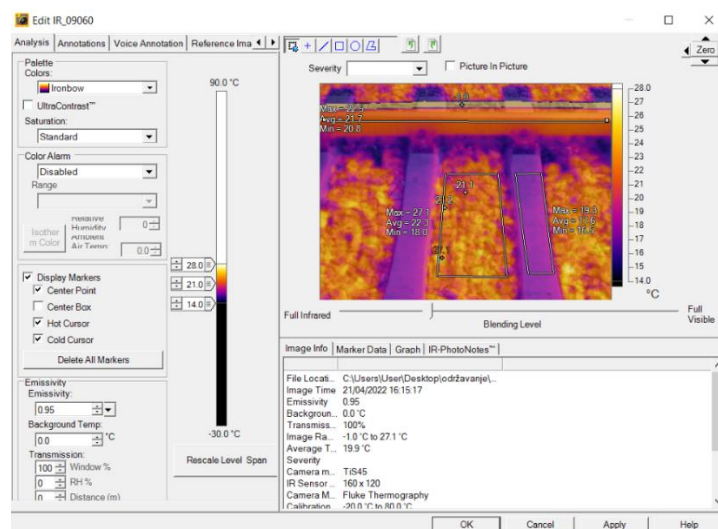
3.2.2. Obrada podataka prikupljenih termografskim snimanjem

Nakon prikupljenih podataka, ranije opisanom metodom, započeto je s obradom podataka. Termografske snimke obrađivane su u software-u SmartView (slika 37). U software-u je otvoren skup slika istog kolosijeka te istog ispitivanja koje su se potom obrađivale.



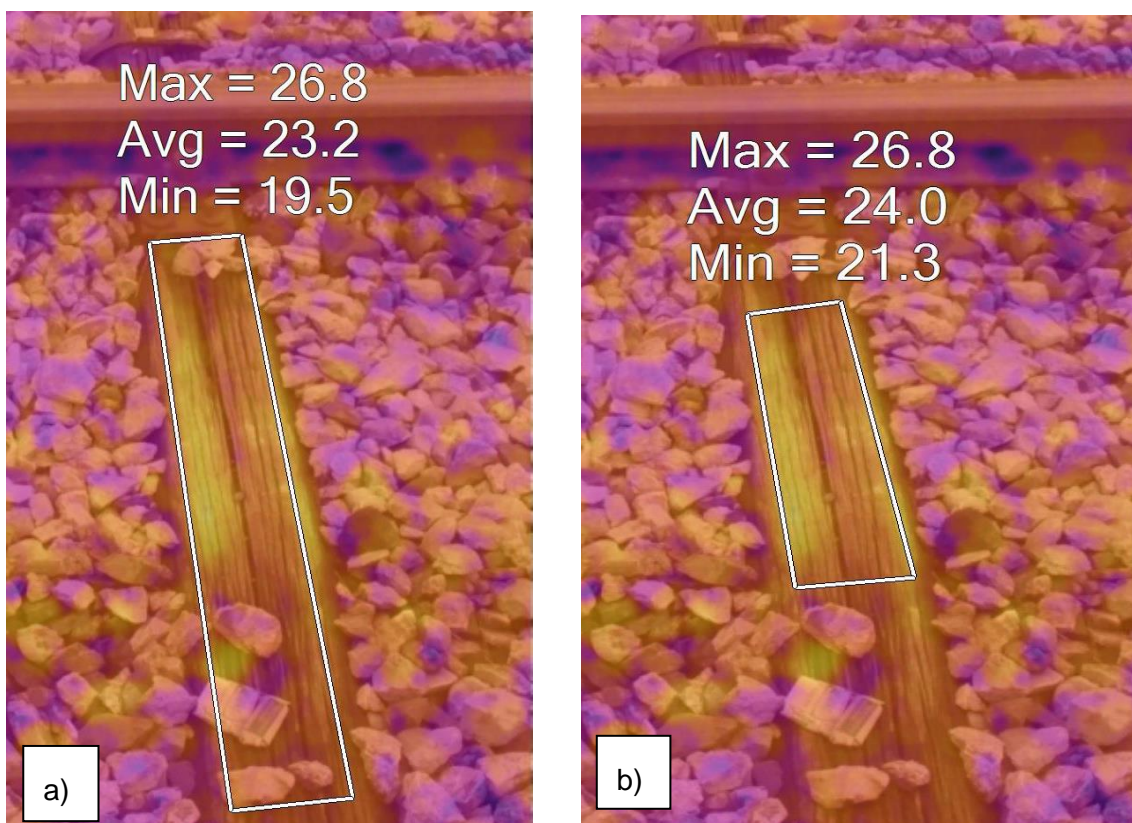
Slika 37. Prikaz računalnog programa SmartView

Prvo se prilagođava interval vidljivih temperatura kako bi se što bolje uočila hladnija područja (manji interval vidljivih temperatura podrazumijeva bolje uočavanje hladnijih zona), zatim su se određivale minimalne, srednje i maksimalne temperature prethodno određenih zona poligonom za tucanik i prag, dok su se temperature tračnice određivale linijski. Zone svakog pojedinog područja prikazane su na slici 38.



Slika 38. Prikaz označavanja promatranih zona

Prilikom određivanja zona bilo je važno unutar poligona obuhvatiti isključivo promatrane objekte (tračnicu, prag i tucanik). U slučaju pojave stranih predmeta na promatranom objektu ispitivanja od velike važnosti je bilo da nisu zahvaćeni unutar promatranih zona ispitivanja. Ukoliko bi se strani predmet zahvatio promatranom zonom dobivene vrijednosti temperature objekata ne bi bile u potpunosti točne. Kao primjer odabran je prag na kojem se nalazila papirnata kutija duhanskog proizvoda i kameni materijal zastora. Razlika u minimalnoj, srednjoj i maksimalnoj temperaturi je značajna i prikazana je na slikama 39a i 39b.



Slika 39. Temperature promatranog područja drvenog praga

a) sa stranim predmetima b) bez stranih predmeta

Nakon obrade svih termografskih slika u računalnom softveru SmartView pristupljeno je upisivanju vrijednosti temperatura u Excel tablice. Sve tablice su prikazane u prilogu 1, a za potrebe ovog rada naveden je primjer tablice 4. Vrijednosti temperatura za promatrani objekt podijeljene su po ispitivanjima (A1, B1, A2, B2) i po kolosijecima (1, 2, 4, 6). Vrijednost koja je bila potrebna za precizniju obradu podataka i donošenje zaključaka je relativna temperatura za prag i tucanik. Kao što je u ranijim poglavljima opisano, temperatura tračnice uzimana je kao mjerodavna temperatura okoline. Stoga se relativna temperatura praga i tucanika dobivala u odnosu na srednju temperaturu tračnice i to po formulama:

$$T_{rel,tucanik} = T_{ave,tucanik} - T_{ave,tračnica} \quad (2)$$

$$T_{rel,prag} = T_{ave,prag} - T_{ave,tračnica} \quad (3)$$

Tablica 4. Vrijednosti temperatura ispitivanja A1 za kolosijek 6

Datum	Vrijeme	Kolosije	Pozicija	Tračnica			Prag			T _{REL} =T _{AVE,PRA} G-T _{AVE,TRA} [C°]	Tucanik			T _{REL} =T _{AVE,TUC} -T _{AVE,TRA} [C°]
				T _{MAX} [C°]	T _{AVE} [C°]	T _{MIN} [C°]	T _{MAX} [C°]	T _{AVE} [C°]	T _{MIN} [C°]		T _{MAX} [C°]	T _{AVE} [C°]	T _{MIN} [C°]	
21.4.	12h	6	1	29	27.5	22.6	34.8	32.1	29.9	4.6	30.5	26	19.1	-1.5
21.4.	12h	6	2	29.3	28.3	23.5	33.7	31.3	28.7	3	31.7	26.5	21.3	-1.8
21.4.	12h	6	3	29.6	28.4	23.6	34.3	32.1	30	3.7	30.7	26.4	20.6	-2
21.4.	12h	6	4	29.7	28.6	25.7	35.3	33.6	28.2	5	30.5	27.1	22.2	-1.5
21.4.	12h	6	5	29.5	28.4	24.4	36.8	32.5	28.5	4.1	30.2	26.1	20.7	-2.3
21.4.	12h	6	6	30	28.3	23.8	33.3	30.8	28.1	2.5	30.2	25.4	19.7	-2.9
21.4.	12h	6	7	29.9	28.5	23.9	31.6	29.1	26.6	0.6	29.4	24.4	19.5	-4.1
21.4.	12h	6	8	30	28.8	24.6	33	31.4	26.7	2.6	29.6	24.8	19.2	-4
21.4.	12h	6	9	31	29.8	28.9	33.2	30.7	28.5	0.9	29.3	24.8	16.9	-5
21.4.	12h	6	10	30.8	29.7	26	31.8	30.4	28.8	0.7	28.7	25.2	16.6	-4.5
21.4.	12h	6	11	30.7	29.6	26.3	33	30.5	26.6	0.9	29.6	25.3	18.4	-4.3
21.4.	12h	6	12	30.7	29.1	23.4	35.7	32.3	27.7	3.2	31.1	26.3	20.5	-2.8
21.4.	12h	6	13	30	28.9	23.8	34.8	33	29.8	4.1	30.9	27	21.9	-1.9
21.4.	12h	6	14	29.7	28.5	24.2	33.7	32	29.9	3.5	29.4	26.5	20.7	-2
21.4.	12h	6	15	29.2	28	22.7	33.5	32.3	29	4.3	30.2	26.6	22.2	-1.4
21.4.	12h	6	16	28.5	27	22.8	31.8	29.8	25.3	2.8	28.7	25.2	18.8	-1.8
21.4.	12h	6	17	28.4	26.9	22.3	32.9	32	30.5	5.1	28.3	25.1	20	-1.8
21.4.	12h	6	18	28.4	26.9	22	31.4	29.7	27.9	2.8	28.8	25.7	21.2	-1.2
21.4.	12h	6	19	28.7	27.5	23.8	31.9	30.6	27.1	3.1	29.7	26.3	21.1	-1.2
21.4.	12h	6	20	29.1	27.6	23.2	31.8	30.6	27.9	3	28.2	25.6	30.6	-2
21.4.	12h	6	21	29	27.8	23.6	32	30.6	28.3	2.8	28.7	25.1	19.5	-2.7
21.4.	12h	6	22	29.2	28	24.1	30.9	29.6	28	1.6	29.3	26	21.8	-2
21.4.	12h	6	23	29.3	28.1	23.8	31.6	29.4	25.6	1.3	28.8	25.7	21.6	-2.4
21.4.	12h	6	24	29.1	27.9	24	31.4	29.3	27.9	1.4	29.5	25.7	22.2	-2.2
21.4.	12h	6	25	29.6	28.4	24.5	30.9	29.5	28.2	1.1	28.4	25.1	19.2	-3.3
21.4.	12h	6	26	29.2	27.7	23	27.7	25.1	21.3	-2.6	27.6	23.8	17.5	-3.9
21.4.	12h	6	27	29.5	28.2	23.3	27.4	26.1	24.3	-2.1	27.2	22.8	18.8	-5.4
21.4.	12h	6	28	28.3	25.9	20.8	27.7	26.5	23.5	0.6	24.2	21.4	17	-4.5
21.4.	12h	6	29	27.5	25.5	20.9	28.8	27.3	25.3	1.8	25.7	21.7	18.1	-3.8
PROSJEČNA VRIJEDNOST				29.4	28.1	23.8	32.3	30.4	27.5	2.3	29.1	25.3	20.2	-2.8
STANDARDNO ODSTUPANJE				0.8	1.0	1.6	2.3	2.1	2.1	1.9	1.6	1.4	2.6	1.2

Nakon popunjavanja tablica informacijama o temperaturama, pristupljeno je izradi dijagrama prosječnih i relativnih vrijednosti temperatura. Dijagrami će biti detaljno objašnjeni i prikazani u poglavlju 5.

3.3. Ispitivanje granulometrijskog sastava

Kako bi se dodatno utvrdila točnost prethodnih mjerenja metodom infracrvene termografije potrebno je provesti klasična ispitivanja za određivanje svojstava kolosiječnog zastora. Jedno od osnovnih svojstava svakog nekoherentnog materijala jest granulometrijskog sastav. Na temelju granulometrijskog sastava kategorizira se tucanik za ugradnju na željezničke pruge te je granulometrijski sastav izravno povezan sa zadržavanjem vode u kolosijeku, koeficijentom unutarnjeg trenja, te općenito kakvoćom kolosiječnog zastora.

Tucanik za željeznicu mora udovoljavati zahtjevima norme HRN EN 13450: 2003 „Agregati za željeznički tucanik“ [21]. Dodatno, materijal iz kolosijeka mora se uzorkovati sukladno HRN EN 932-1:1996 [22] te prosijati i odrediti granulometrijski sastav sukladno HRN EN 933-1:2012 [23].

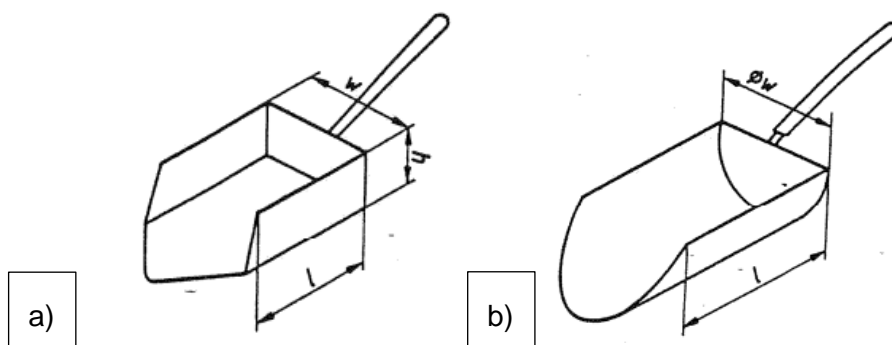
3.3.1. Uzorkovanje materijala

Kako bi se dodatno utvrdila točnost prethodnih mjerenja potrebno je provesti ispitivanje granulometrijskog sastava ispitanih kolosijeka. Ispravno i pažljivo uzorkovanje te korištenje odgovarajuće opreme preduvjet su za dobivanje pouzdanih rezultata. Različiti rezultati dobiveni uzorkovanjem (izazvani heterogenošću smjese) mogu se smanjiti na prihvatljivu razinu uzimanjem odgovarajućeg broja uzoraka. Ako je agregat homogen ispitivanje na jednom većem uzorku dati će preciznije rezultate za promatranu dionicu. Prije uzorkovanja potrebno je izraditi plan uzorkovanja, uzimajući u obzir veličinu agregata, prirodu i veličinu smjese te lokalne uvjete i svrhu uzorkovanja. Plan uzorkovanja uključuje vrstu agregata, cilj uzorkovanja uključujući popis svojstava koja se ispituju, identifikaciju točaka uzorkovanja, broj koraka i opremu za uzorkovanje te označavanje, pakiranje i otpremu uzoraka. Širina otvora opreme koja se koristi za uzorkovanje ne smije biti manja od trostruke veličine najvećeg zrna agregata (63 mm) odnosno minimalno 189 mm [22].

Oprema koja se najčešće koristi kod uzorkovanja tucaničkog materijala je:

1. Žlica

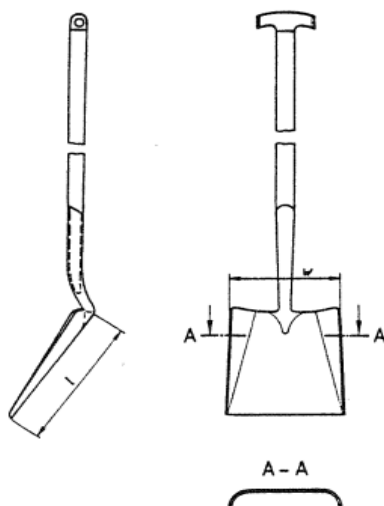
Na slici 40a i 40b prikazani su različiti poprečni presjeci žlica za uzorkovanje materijala. Širina žlice mora odgovarati trostrukoj veličini maksimalnog zrna agregata.



Slika 40. Prikaz žlice za uzorkovanje s: a) pravokutnim poprečnim presjekom, b) kružnim poprečnim presjekom [22]

2. Lopata

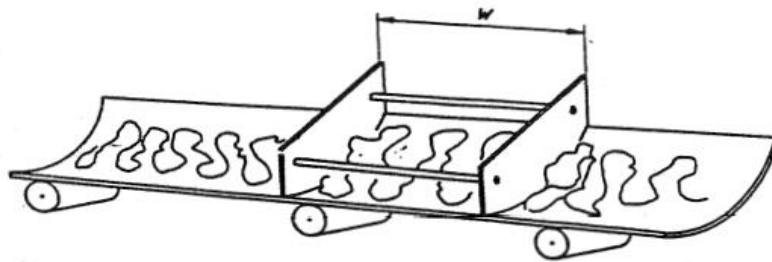
Na slici 41 prikazana je lopata za uzorkovanje materijala. Minimalna širina također mora odgovarati trostrukoj veličini najvećeg zrna agregata, odnosno minimalno 189 mm (zrno agregata veličine 63 mm).



Slika 41. Prikaz lopate za uzorkovanje [22]

3. Okvir za uzorkovanje

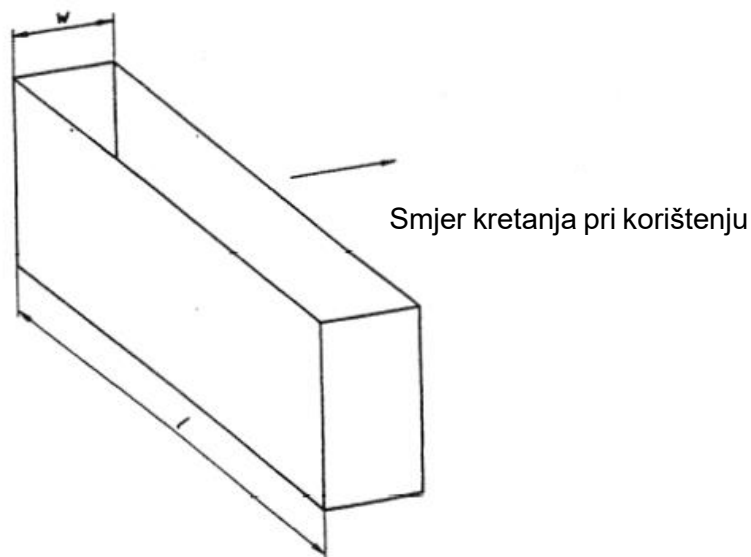
Stranice okvira za uzorkovanje su paralelne i oblikovane tako da odgovaraju pokretnoj traci dok njihova duljina odgovara širini trake (slika 42). Stranice okvira dovoljno su visoke te sprječavaju mogućnost ispadanja čestica uzorka preko vrha. Širina okvira mora odgovarati najmanje trostrukoj veličini maksimalnog zrna agregata (63 mm) odnosno 189 mm.



Slika 42. Prikaz okvira za uzorkovanje [22]

4. Kutija za uzorkovanje

Kutija za uzorkovanje (slika 43) ima oblik pravokutnika sa rubovima koji su oko vrha kutije zaobljeni. Kapacitet kutije za uzorkovanje je takav da materijal nikad ne smije ispuniti više od polovice kutije. Širina kutije w odgovara trostrukoj veličini maksimalnog zrna agregata odnosno minimalno 189 mm dok je duljina l dovoljne veličine da omogući nesmetani utovar materijala u kutiju. Dubina kutije mora biti projektirana da spriječi ispadanje zrna agregata iz kutije.



Slika 43. Kutija za uzorkovanje [22]

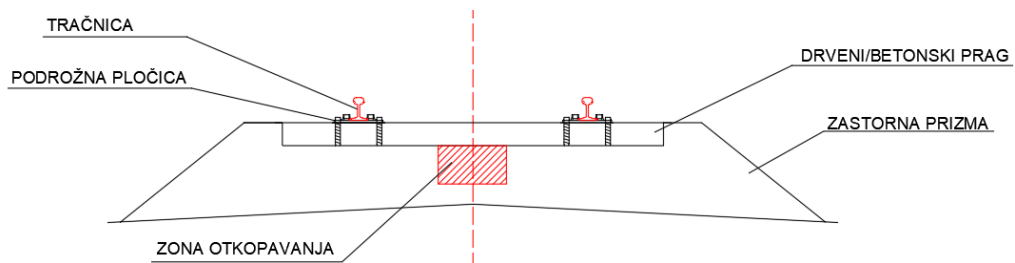
3.3.2. Opis postupka ispitivanja granulometrijskog sastava

U dogovoru sa Hrvatskim Željeznicama izvađeni su uzorci tucaničkog materijala na kolosijecima 1, 2, 4 i 6 kolodvora Podsused. Ciljano su uzimani uzorci težine od otprilike 10

kilograma na sljedeći način. Tucanički zastor se iskopavao do dubine praga te se za uzorak ispitivanja uzimao materijal ispod praga što je vidljivo na slici 44. Tucanički materijal je iskopavan na dubini praga zbog veće točnosti uzorkovanja odnosno većeg udjela sitnih čestica. Poprečni presjek s zonom otkopavanja na kojoj je uziman materijal za prosijavanje prikazan je na slici 45.



Slika 44. Prikaz dubine otkopavanja tucaničkog materijala



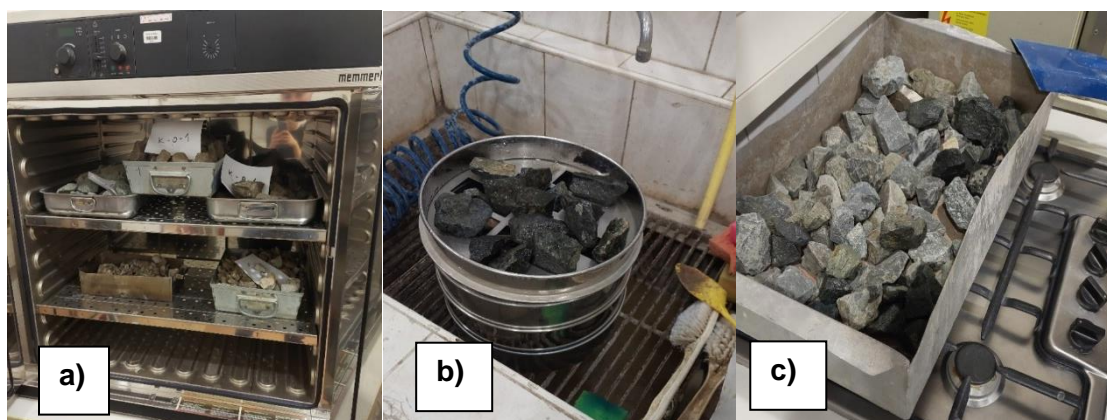
Slika 45. Prikaz zone uzimanja uzorka tucaničkog materijala

U navedenom postupku upotrebljavao se sav alat opisan u prethodnom poglavlju. Materijal se skladištio u plastične kutije te se u njima potom transportirao do laboratorija Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta Zagreb. Na slici 46 prikazani su uzorci tucaničkog materijala postavljeni u metalne posude prije zagrijavanja.



Slika 46. Uzorci materijala s promatranih kolosijeka Kolodvora Podused

Sukladno [23], u prethodno zagrijanoj peći na temperaturi od 105°C postavljeni su svi uzorci tucaničkog materijala te su u njoj sušeni do konstante mase odnosno 24 sata kako bi se u potpunosti uklonila vlaga iz pora i šupljina. Postupak zagrijavanja u peći prikazan je na slici 47a. Osušeni materijal potom je opran te su četkom i mlazom vode (slika 47b) uklonjene sve površinske nečistoće sa tucaničkog materijala kako bi došlo do odvajanja različitih veličina zrna agregata. Da bi ispitivanje bilo u potpunosti točno materijal je potrebno ponovno osušiti što se provodilo na plinskom štednjaku (slika 47c). Agregat je postavljen u željezne posude te je zagrijavan sve do potpune suhoće.



Slika 47. a) sušenje u peći, b) čišćenje, c) ponovno sušenje na plinskom štednjaku

Vaganje materijala obavljeno je prije i nakon ispiranja. Mjerene su dvije mase uzoraka: ukupna suha masa uzorka prije ispiranja (M_1) i suha masa uzorka nakon ispiranja (M_2). prikazano u Tablici 5.

Tablica 5. Izmjerene mase uzoraka

Kolosijeci	M ₁ [g]	M ₂ [g]
1	9245.8	9063.7
2	10467.0	10442.8
4	11014.2	10929.0
6	10267.7	10091.5

Zbog velike količine materijala svaki uzorak podijeljen je na tri jednaka dijela te je svaki dio prosijavan zasebno. Veličine otvora sita kroz koje je agregat prosijavan su: 80.00, 63.00, 31.50, 22.40, 16.00, 8.00, 4.00, 2.00 milimetra te sita za sitnije odnosno fine čestice otvora 500 i 63 mikrometara (slika 48). Bitno je napomenuti da se prosijavanje jednog dijela uzorka obavljalo u vremenu od 3 minute pri konstantnoj amplitudi trešnje. Nakon prosijavanja obavljeno je vaganje materijala po sitima.



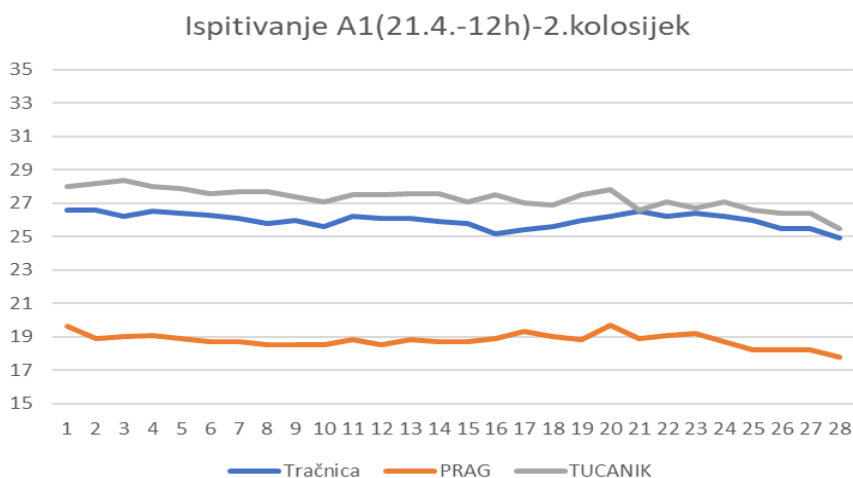
Slika 48. Uređaj za prosijavanje agregata

4. Analiza rezultata

4.1. Analiza podataka prikupljenih termografskim snimanjem

Nakon obrade podataka na prethodno opisan način započeto je s izradom dijagrama radi lakše vizualne interpretacije i analize rezultata. U početku su izvađeni dijagrami prosječnih temperatura praga, tračnica i tucanika za svaki kolosijek te za svako ispitivanje. Ispitivanje koje se provodilo 21.04. u 12:00 sati (nakon sunčanog dana) označeno je kao A1 ispitivanje dok je ispitivanje istog dana u 16:00 označeno kao B1 ispitivanje. Ispitivanje koje se provodilo 23.04. u 12:00 sati (nakon kišnog dana) označeno je kao A2 ispitivanje dok je ispitivanje istog dana u 16:00 označeno kao B2 ispitivanje.

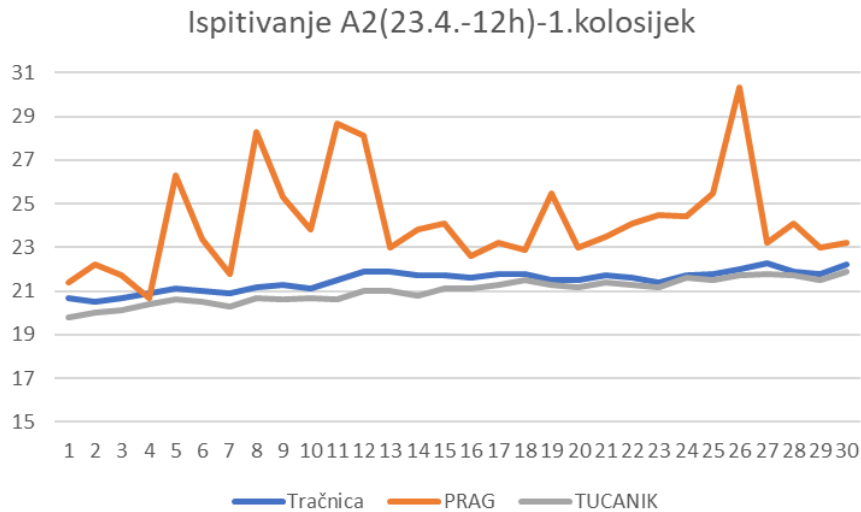
U prilogu 2. dani su dijagrami svih ispitivanja, a kao primjer 1. ispitivanja prikazano je ispitivanje A1 na 2. kolosijeku kao što je vidljivo na slici 49. Iz danog dijagrama jasno je uočljiva razlika u temperaturi između pojedinih promatranih zona. Najnižu temperaturu imaju betonski pragovi, čiji je prosjek temperature 18.8°C . Tračnica i tucanik približno su jednake temperature, odnosno razlika temperature ne prelazi 2°C . Prosječna vrijednost temperatura tračnice iznosi 26.0°C , a tucanika 27.3°C .



Slika 49. Kretanje prosječnih temperatura za tračnicu, prag i tucanik na 28 uzastopnih uzoraka (ispitivanje A1, 2. kol.)

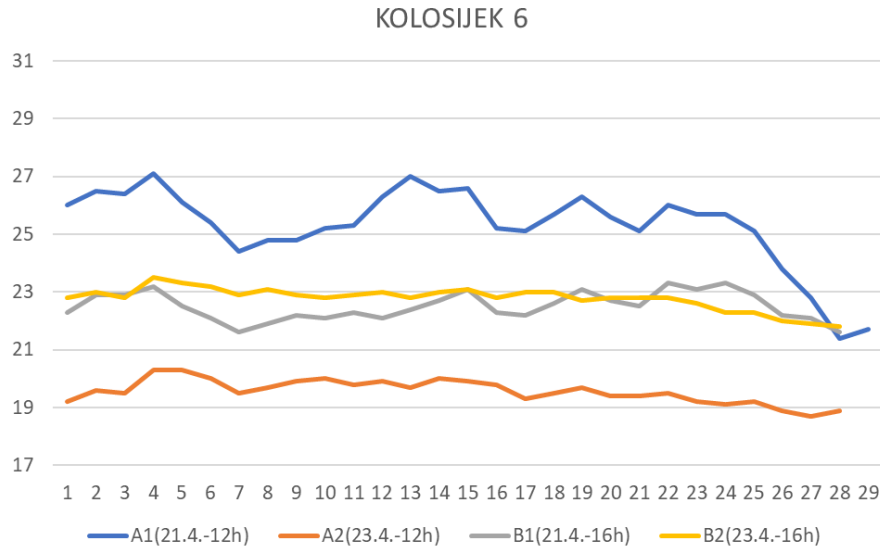
Primjer 2. ispitivanja je ispitivanje A2 za 1. kolosijek kao što je prikazano na slici 50. Iz dijagrama je jasno uočljivo da su prosječne temperature pragova više od prosječne temperature tucanika i tračnice što je bila i pretpostavka jer se radi o kolosijeku s drvenim pragovima. Prosječna temperatura drvenih pragova nije konstantna zbog lošeg stanja samih pragova, odnosno raspucalosti, dotrajalosti i sadržaja vlage u pragovima. Za potrebe kolodvora otprilike svaki 5 drveni prag je promijenjen zbog čega su na krivulji prosječnih

temperatura još izraženiji nagli skokovi. Detaljnija analiza usporedbe pragova biti će opisana u poglavlju 5.1.2. Prosječne temperature tračnice i tucanika su kao i u prethodnom primjeru otprilike konstantne te iznose za tračnicu 21.5°C, te za tucanički zastor 21.0°C.



Slika 50. Kretanje prosječnih temperatura za tračnicu, prag i tucanik na 28 uzastopnih uzoraka (ispitivanje A2, 1. kol.)

Nakon toga, izrađeni su i dijagrami usporedbe ispitivanja prosječne temperature tucanika za svaki kolosijek. Na slici 51. prikazana su sva 4 ispitivanja (odnosno prosječne temperature) koja su se provodila za jedan te isti kolosijek. U prosjeku najhladnije ispitivanje zabilježeno je u 12:00 sati nakon kišnog dana, odnosno ispitivanje A2 označeno narančastom linijom. U prosjeku najtoplije ispitivanje zabilježeno je u 12:00 sati nakon sunčanog dana, odnosno ispitivanje A1 označeno plavom linijom. Takav rezultat u potpunosti se poklapa sa pretpostavkom da će nakon suhog dana tucanik kolosiječnog zastora, koji je u lošijem stanju (veći udio sitnih čestica), biti topliji od istog materijala snimljenog termografskom kamerom nakon kišnog dana zbog zadržavanja vlage i zablacenja tucaničkog zastora.



Slika 51. Prikaz dijagrama prosječnih temperatura za kolosijek 6 (sva ispitivanja)

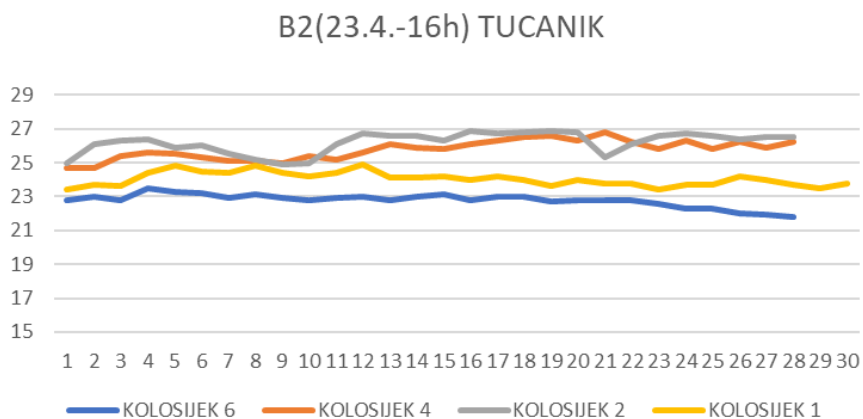
4.1.1. Analiza temperature ugrađenog tucaničkog materijala

Pri analizi tucaničkog materijala izrađivani su dijagrami apsolutnih i relativnih temperatura svih kolosijeka na kojima su se provodila ispitivanja i to za svako ispitivanje posebno. Za vrijednosti apsolutne temperature uzimane su prosječne temperature tucaničkog zastora izračunate za svako polje između dva praga, $T_{ave, tucanik}$, dok je relativna temperatura tucanika u odnosu na tračnicu izračunata po danoj formuli:

$$T_{rel,tucanik} = T_{ave,tucanik} - T_{ave,tračnica} \quad (2)$$

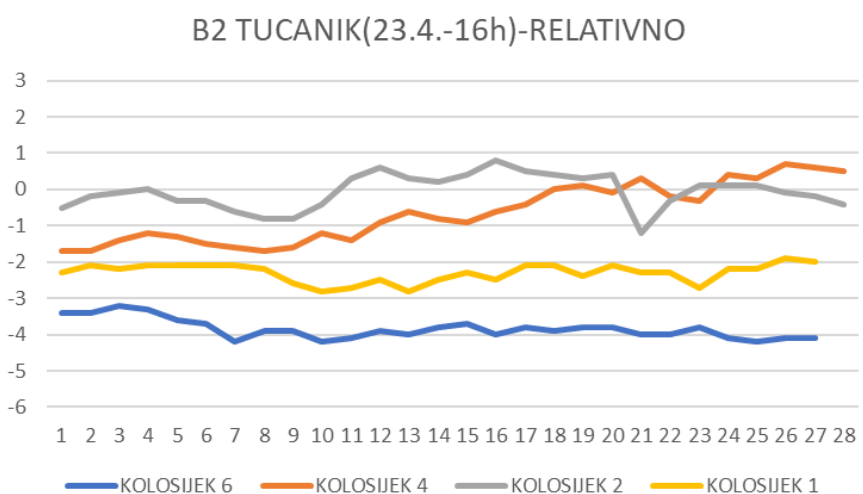
Naime, sukladno istraživanju [15] predloženo je korištenje relativne temperature u odnosu na temperaturu tračnice kako bi se smanjila temperaturna varijacija kroz vremenski period mjerenja.

Na slici 52. prikazan je dijagram s ispitivanja B2 (17:00 sati nakon kišnog dana) u kojem je jasno vidljivo da kolosijek 2, koji je renoviran 2022. godine, ima najviše vrijednosti temperatura što je i očekivano s obzirom da nema sitnih čestica, odnosno nema zadržavanja vode i zablacenja. Više vrijednosti temperatura ima i kolosijek 4, što je također očekivano s obzirom na vrlo dobro stanje kolosijeka. Kolosijeci 1 i 6 koji su pri vizualnom pregledu imali veći udio sitnih čestica, imaju niže temperature od kolosijeka 2 i 4, što je rezultat većeg zadržavanja vode odnosno veće vlažnosti.



Slika 52. Prikaz dijagrama apsolutnih temperatura tucanika za ispitivanje B2 za sve kolosijeke

Kako bi se što izraženije prikazala razlika u temperaturama između kolosijeka uzimane su temperature tucanika u odnosu na tračnicu, to jest relativne temperature tucanika. Na slici 53. prikazane su relativne temperature za ispitivanje B2 na tucaniku. Kolosijek 2 koji je pri vizualnom pregledu bio u najboljem stanju dao je najviše vrijednosti relativnih temperatura koje su u prosjeku iznosile -0.1°C , dakle može se zaključiti da je prosječna temperatura tračnice i tucanika kolosijeka 2 približno ista. Kolosijek 4, koji je zatečen u malo lošijem stanju od kolosijeka 2, ima manju prosječnu vrijednost relativnih temperatura te ona iznosi -0.6°C . Kolosijeci 6 i 1 za koje je vizualnim pregledom utvrđeno da je u njima veći postotak sitnih čestica dale su niže vrijednosti relativnih temperatura, odnosno veću razliku u odnosu na tračnicu. Prosječna relativna temperatura za kolosijek 6 je -3.8°C , a za kolosijek 1 je -2.3°C . Samim time dokazana je pretpostavka da je u tim tucaničkim zastorima veći postotak sitnih čestica, zbog toga što one dulje zadržavaju vodu pa samim time i hladniju temperaturu.



Slika 53. Prikaz dijagrama relativnih temperatura tucanika za ispitivanje B2 za sve kolosijeke

Svi ostali dijagrami relativnih temperatura za tucanik dani su u prilogu 2.

Iz ostalih dijagrama vidljivo je da meteorološki uvjeti (A1, A2 i B1) lošije odgovaraju provedbi termografskih ispitivanja tj. da je optimalni udio vode u zastoru i period prosušivanja postignut u uvjetima B2 – dan nakon kišnog dana, u poslijepodnevnim satima. Iz toga se predlaže optimalni period za provođenje daljnjih termografskih ispitivanja tucaničkog zastora upravo u takvim uvjetima.

4.1.2. Analiza usporedbe ispitivanja pragova

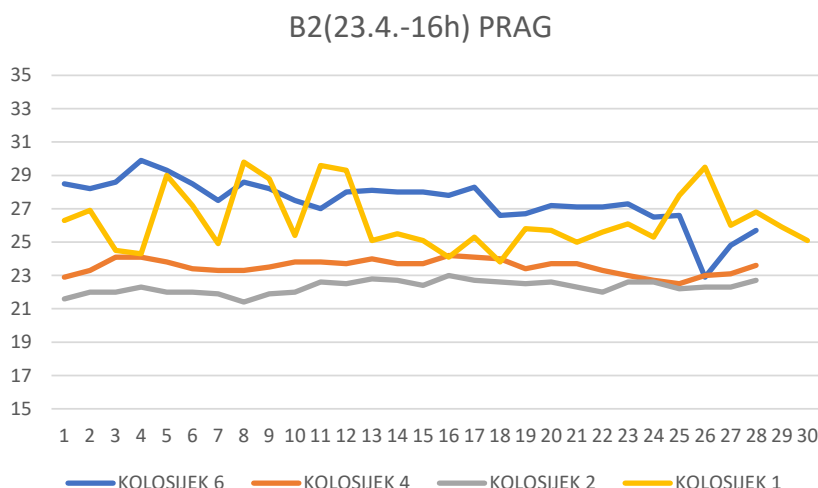
Prilikom vizualnog pregleda kolosijeka uočen je velik broj drvenih pragova u vrlo lošem stanju, značajno raspucalih i trulih. Dio takvih pragova nedavno je zamijenjen novijim, dobro impregniranim pragovima bez vidljivih mehaničkih oštećenja. Iz tog razloga izrađena je dodatna analiza termografskih snimaka s ciljem detekcije stanja trulosti pragova na temelju infracrvenih snimaka kolosiječne konstrukcije.

Pri analizi pragova izrađivani su dijagrami apsolutnih i relativnih temperatura svih kolosijeka na kojima su se provodila ispitivanja i to za svako ispitivanje posebno. Za apsolutne temperature uzimane su prosječne temperature pragova (prema slici 39), dok je relativna temperatura pragova u odnosu na tračnicu izračunata po danoj formuli:

$$T_{rel,prag} = T_{ave,prag} - T_{ave,tračnica} \quad (3)$$

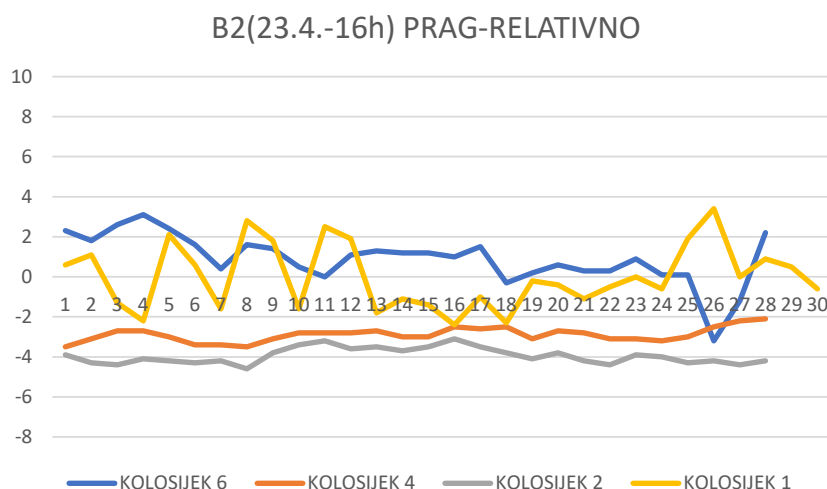
Prilikom ispitivanja promatrali su se različiti pragovi. Na kolosijecima 2 i 4 nalaze se betonski pragovi, a na kolosijecima 1 i 6 drveni pragovi.

Na slici 54 prikazane su apsolutne temperature pragova na svim promatranim kolosijecima prilikom ispitivanja B2 (16:00 sati, nakon kišnog dana). Betonski pragovi (kolosijek 2 i 4) imaju manje vrijednosti apsolutnih temperatura i one iznose 22.3°C za kolosijek 2 i 23.6°C za kolosijek 4. Drveni pragovi (kolosijek 6 i 1) imaju više vrijednosti temperatura, a njihova srednja vrijednost iznosi 27.4°C za kolosijek 6 i 26.3°C za kolosijek 1. Važno je uočiti neujednačenost temperature drvenih pragova zbog različitog stanja pojedinih pragova. Za potrebe kolodvora Podsused na tim je kolosijecima promijenjen otprilike svaki 5 prag što rezultira još izraženijim skokovima na krivulji.



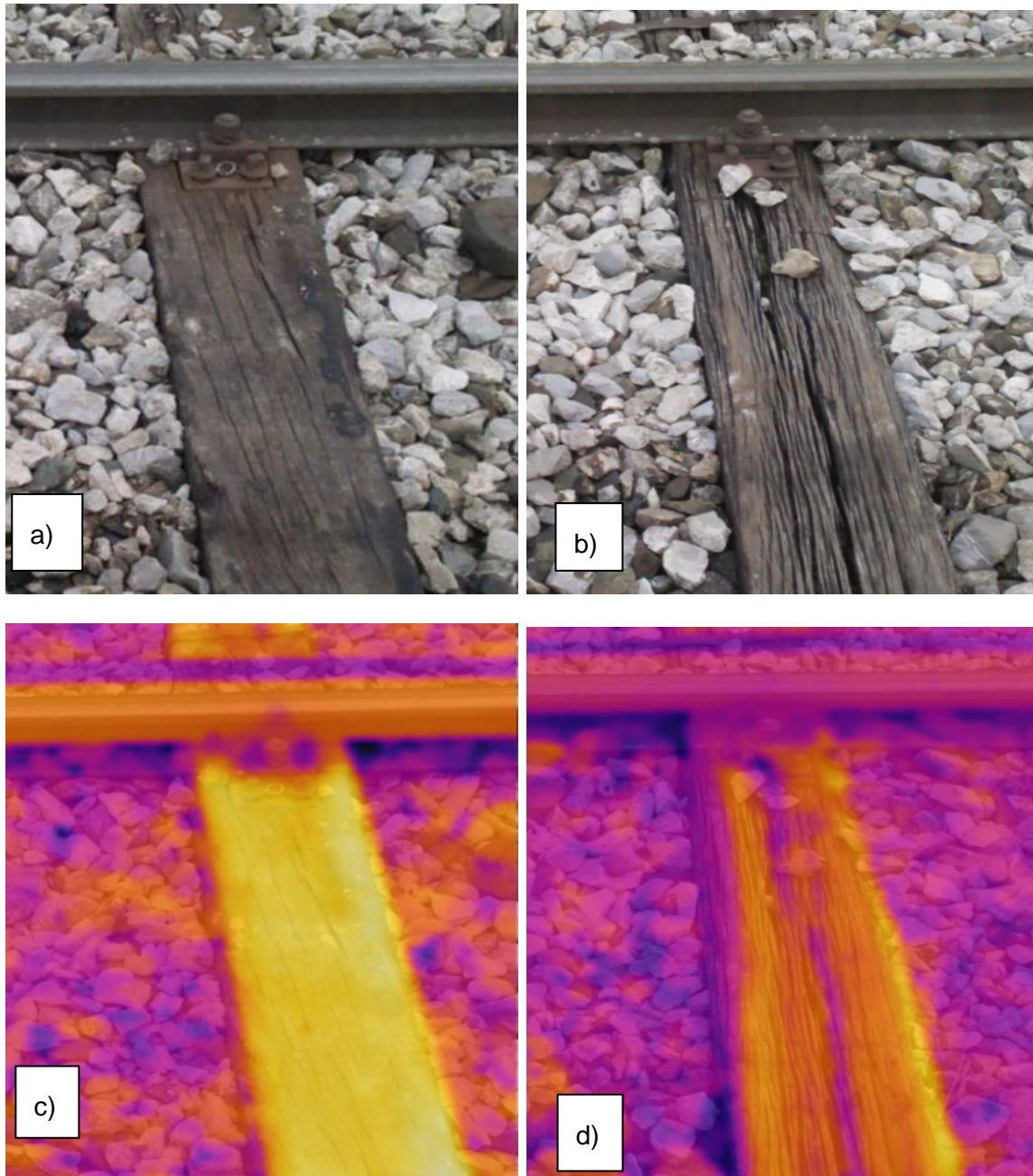
Slika 54. Prikaz apsolutnih temperatura pragova za ispitivanje B2 za sve kolosijeke

Kako bi se što izraženije prikazala razlika u temperaturama između kolosijeka uzimane su temperature praga u odnosu na tračnicu, to jest relativnu temperaturu praga. Na slici 55. prikazane su relativne temperature za ispitivanje B2 na pragovima. Kao i kod apsolutnih temperatura jasno je uočljiva razlika između betonskih i drvenih pragova. Betonski pragovi imali su manju temperaturu od tračnice. Srednja vrijednost relativnih temperatura pragova za 2. kolosijek je -4°C , a za 4. kolosijek -2.9°C . Za razliku od betonskih pragova, čije su vrijednosti približno slične na cijeloj promatranoj dionici, kod drvenih pragova to nije slučaj. Krivulja relativnih temperatura drvenih pragova ima česte i izražene skokove, zbog različitih stanja drvenih pragova. Srednja vrijednost relativnih temperatura za 1. kolosijek je 0°C , a za 6. kolosijek 0.9°C . Svi ostali dijagrami apsolutnih i relativnih temperatura pragova dani su u prilogu 2.



Slika 55. Prikaz relativnih temperatura pragova za ispitivanje B2 za sve kolosijeke

Relativna temperatura najtoplijeg praga (26.prag) na 1. kolosijeku iznosi 3.6°C , a najhladnijeg praga (16.prag) iznosi -2.4°C . Usporedbom ta dva praga do izražaja dolazi razlika od 6.0°C . Toliko primjetna razlika prisutna je zbog izrazito različitih stanja ta dva praga. Prag 26 je zadovoljavajućeg stanja sa vizualno manjom raspucanosti (slika 56a), dok kod praga 16 postoje velika oštećenja i raspucalost (slika 56b) zbog čega dolazi do nakupljanja vode i vlage unutar samog praga. Takav prag sporije se suši te stoga ima i znatno nižu temperaturu. Radi boljeg uočavanja temperaturnih razlika dani su i termogrami na slikama 56c i 56d.



Slika 56. a) zadovoljavajući prag b) nezadovoljavajući prag c) termogram zadovoljavajućeg praga d) termogram nezadovoljavajućeg praga

Svi ostali dijagrami relativnih temperatura za pragove dane su u prilogu 2.

Iz prikazanih ali i ostalih dijagrama vidljivo je da meteorološki uvjeti A1 i A2 te B2 najbolje prikazuju različito stanje pragova, dok ispitivanje B2 lošije odgovaraju provedbi termografske analize stanja pragova tj. optimalno vrijeme za provođenje termografskog snimanja je dan nakon sunčanog ili kišnog dana u popodnevnim satima. Iz toga se predlaže optimalni period za provođenje daljnjih termografskih ispitivanja kolosiječnih pragova upravo u takvim uvjetima.

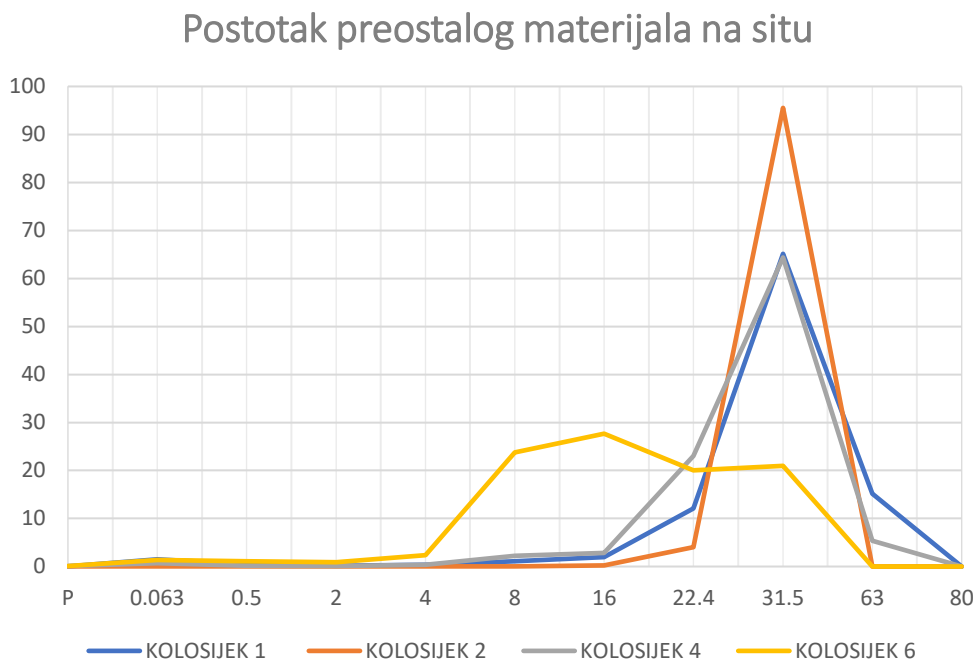
4.2. Analiza podataka prikupljenih prosijavanjem materijala

Nakon izvršenog prosijavanja tucaničkog materijala za sva 4 kolosijeka pristupilo se je upisivanju dobivenih podataka u Excel tablice. Vrijednosti mase agregata na svakom pojedinom situ su izmjerene i upisane u tablicu. Prikaz tablice dobivenih vrijednosti prosijavanja materijala za sve kolosijeke Kolodvora Podsused dan je u tablici 6.

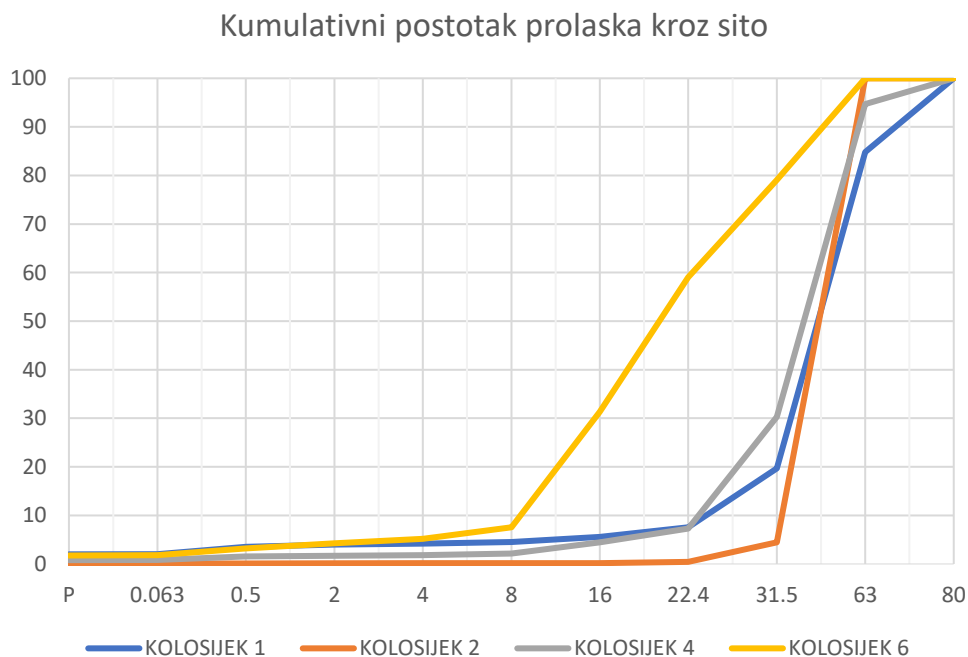
Tablica 6. Dobivene vrijednosti prosijavanja materijala za kolosijeke Kolodvora Podsused

Veličina otvora sita (mm)	Masa preostalog materijala na situ Ri (g)				Postotak preostalog materijala na situ (Ri/M1)x100 (%)				Kumulativni postotak prolaska kroz sito 100 - \sum (Ri/M1)x100 (%)			
	KOL. 1	KOL. 2	KOL. 4	KOL. 6	KOL. 1	KOL. 2	KOL. 4	KOL. 6	KOL. 1	KOL. 2	KOL. 4	KOL. 6
80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0
63	1402.7	0.0	587.4	0.0	15.2	0.0	5.3	0.0	84.8	100.0	94.7	100.0
31.5	6022.3	9999.6	7090.2	2152.7	65.1	95.5	64.4	21.0	19.7	4.5	30.3	79.0
22.4	1121.3	424.0	2534.4	2057.2	12.1	4.1	23.0	20.0	7.6	0.4	7.3	59.0
16	181.6	26.4	314.5	2841.0	2.0	0.3	2.9	27.7	5.6	0.2	4.4	31.3
8	98.0	0.9	248.7	2443.0	1.1	0.0	2.3	23.8	4.5	0.2	2.2	7.5
4	32.1	1.2	38.9	245.6	0.3	0.0	0.4	2.4	4.2	0.1	1.8	5.1
2	17.4	0.3	11.3	90.5	0.2	0.0	0.1	0.9	4.0	0.1	1.7	4.3
0.5	44.7	1.0	18.6	111.9	0.5	0.0	0.2	1.1	3.5	0.1	1.5	3.2
0.063	136.9	4.8	77.0	137.6	1.5	0.0	0.7	1.3	2.0	0.1	0.8	1.8
P	5.4	1.1	6.8	9.0	0.1	0.0	0.1	0.1	2.0	0.1	0.8	1.7

Na temelju svih izmjerenih masa prosijavanog materijala na situ izračunati su postotci preostalog materijala te kumulativni postotci prolaska agregata kroz sito. Iz dobivenih vrijednosti izvedeni su dijagrami postotaka preostalog materijala na situ (slika 57) te kumulativnih postotaka prolaska materijala kroz sito (slika 58).



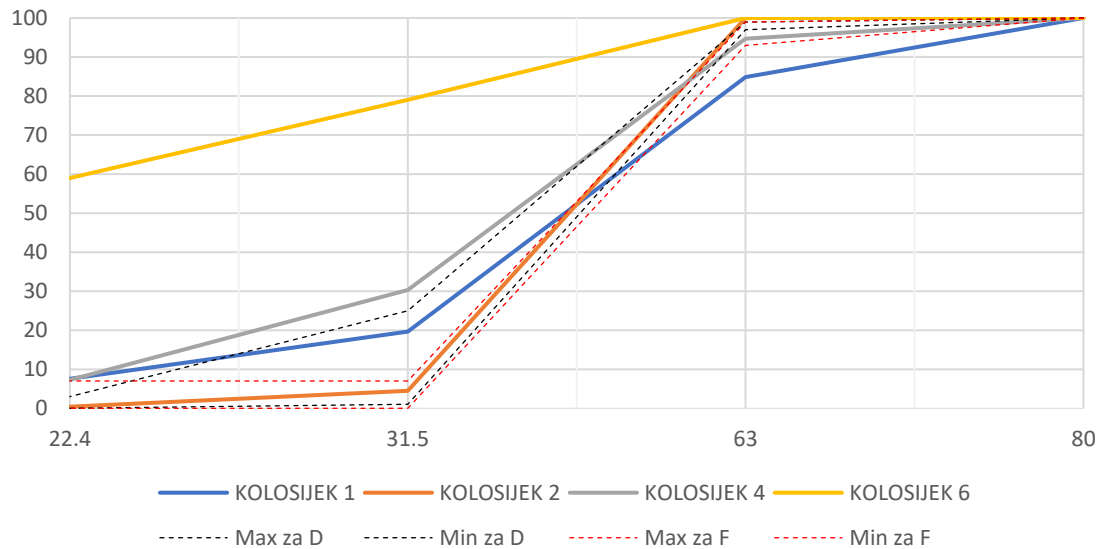
Slika 57. Dijagram postotka preostalog materijala na situ



Slika 58. Dijagram kumulativnih postotaka prolaska materijala kroz sito

Sukladno normi za Agregat za željeznički tucanik [21] određene su granične vrijednosti za svaku kategoriju granulacije. Minimalne i maksimalne vrijednosti postotka prolaska zrna kroz sita za kategorije D i F označene su na slici 59.

Kumulativni postotak prolaska kroz sito s granicama kategorija D i F



Slika 59. Dijagram kumulativnih postotaka prolaska materijala kroz sito sa granicama kategorija D i F

Na temelju dijagrama danih slikama 57, 58 i 59 mogu se usporediti materijali kolosiječnih zastora te udio sitnih i finih čestica u njima. Postotak preostalog materijala u rasponu od 31.5 do 63 mm čini optimalnu veličinu zrna za tucanik za željeznički kolosijek. Njega je 95.5% u slučaju kolosijeka 2 (novo izgrađeni kolosijek), 59.1% na kolosijeku 4, zatim 49.9% na kolosijeku 1 i svega 21% na kolosijeku 6. Dodatno se analizira udio sitnih i finih čestica u granulometrijskom sastavu tucanika. Udio finih čestica (f) koje prolaze kroz sito veličine otvora 0.063 milimetara izračunava se po formuli (4):

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100 \quad (4)$$

U formuli (4) oznaka M_1 predstavlja ukupnu suhu masu uzorka u gramima, M_2 suhu masu uzorka nakon ispiranja u gramima, dok oznaka P predstavlja preostali materijal u posudi, također u gramima.

Po navedenoj formuli (4) postotak sitnih čestica koje prolaze kroz sito od 0.063 milimetara iznosi:

- za kolosijek 1: $f=2.0\%$

- za kolosijek 2: $f=0.2\%$
- za kolosijek 4: $f=0.8\%$
- za kolosijek 6: $f=1.8\%$

Prosijavanjem materijala dobiveni rezultati pokazuju da je kolosijek 2 u najboljem stanju od promatranih kolosijeka s obzirom na najniži udio sitnih čestica dok je ispitivanje granulometrijskog sastava na kolosijeku 1 očekivano dalo najlošije rezultate u vidu najvećeg udjela sitnih čestica.

Prema normi EN 13450:2003 [23] određene su kategorije granulometrijskog sastava u odnosu na sadržaj sitnih i finih čestica, odnosno čestica manjih od 0.5mm i 0.063mm. U tablici 7. prikazane su kategorije ispitanih kolosiječnih zastora za sitne čestice ($< 0.5\text{mm}$), a u tablici 8. za fine čestice ($< 0.063\text{mm}$).

Tablica 7. Kategorije ispitanih kolosiječnih zastora u odnosu na udio sitnih čestica

Otvor sita [mm]	Postotak prolaska kroz sito				Maksimalni postotak prolaska kroz sito		
	Oznaka kolosijeka				Kategorija prema HRN EN 13450		
	1	2	4	6	A	B	C
0.5	3.5	0.1	1.6	3.2	0.6	1.0	Nema zahtjeva

Tablica 8. Kategorije ispitanih kolosiječnih zastora u odnosu na udio finih čestica

Otvor sita [mm]	Postotak prolaska kroz sito				Maksimalni postotak prolaska kroz sito			
	Oznaka kolosijeka				Kategorija prema HRN EN 13450			
	1	2	4	6	A	B	C	D
0.063	2.0	0.2	0.8	1.8	0.5	1.0	1.5	Nema zahtjeva

Prikazanim tablicama jasno je uočljivo da novo rekonstruirani kolosijek 2 spada u kategoriju A prema sadržaju sitnih i finih čestica. Kolosijek 4 spada u kategoriju C po udjelu sitnih čestica, ali u kategoriju B po udjelu finih čestica. Za razliku od kolosijeka 4, kolosijeci 1 i 6 spadaju u kategoriju C po udjelu sitnih čestica, a u kategoriju D po udjelu finih čestica. Njihove vrijednosti znatno su veće od kolosijeka 4, a naročito od kolosijeka 2. Izrazito visoki postotci udjela sitnih i finih čestica dokazuju visoki stupanj zablacenosti tih kolosiječnih zastora.

4.3. Usporedba rezultata termografske analize i prosijavanja agregata

Usporedbom rezultata termografske analize i prosijavanja materijala možemo uočiti korelaciju između ta dva ispitivanja. Srednja vrijednost relativne temperature tucanika pri ispitivanju B2 (nakon kišnog dana u 16 sati) može se povezati s udjelom sitnih i finih čestica. Uz veću srednju vrijednost relativne temperature dobivene ICT mjerenjem pripada i veća kategorija granulometrijskog sastava određenog po udjelu sitnih i finih čestica prosijavanjem materijala. Na tablici 9 prikazana je usporedba svih srednjih vrijednosti relativne temperature, postotka zrna optimalne veličine i udjela sitnih i finih čestica.

Tablica 9. Usporedba rezultata termografske analize i prosijavanja agregata

	KOL 2	KOL 4	KOL 1	KOL 6
Srednja vrijednost relativne temp. tucanika (B2) [°C]	-0.1	-0.6	-2.3	-3.8
Stadnardno odstupanje vrijednosti relativne temperature tucanika (B2) [°C]	0.47	0.80	0.26	0.48
Udio zrna optimalne veličine (31.5-63 mm) [%]	95.5	59.1	49.9	21.0
Udio sitnih čestica (kategorija) [%]	0.1 (A)	1.6 (C)	3.5 (C)	3.2 (C)
Udio finih čestica (kategorija) [%]	0.2 (A)	0.8 (B)	2.0 (D)	1.8 (D)

Ovim ispitivanjima dobiveno je vrlo dobro podudaranje rezultata laboratorijskog ispitivanja granulometrijskog sastava i mjerenja prosječne temperature tucaničkog materijala metodom ICT. Kolosiječni zastori koji su prosijavanjem materijala imali veći postotak zrna optimalne veličine i manje udjele sitnih i finih čestica postižu veće relativne temperature dobivene ICT mjerenjem od relativnih temperatura materijala kolosiječnih zastora s manjim udjelom optimalnih zrna i većim udjelom sitnih i finih čestica. Razlika u relativnoj temperaturi od najboljeg i najgoreg kolosijeka po granulometrijskom sastavu, odnosno kolosijeka 2 i 6 je 3.7 °C. što je značajno veće od standardnog odstupanja vrijednosti u jednom setu mjerenja i od greške mjernog uređaja. Finija gradacija kvalitete materijala također vrlo dobro opisuje dobivene rezultate granulometrijskog sastava te se postotak udjela optimalnih zrna u potpunosti poklapa sa vrijednostima dobivenih relativnih temperatura dobivenih metodom infracrvene termografije.

5. Rasprava

U području termografskog ispitivanja kolosiječnog zastora postoji niz laboratorijskih i teoretskih ispitivanja te istraživanja, ali uočen je nedostatak ispitivanja u stvarnim uvjetima, odnosno na realnom kolosijeku (in situ). Iz toga razloga izvedena su termografska ispitivanja u ovom radu na realnim ugrađenim kolosijecima. Kao kontrola točnosti termografskog snimanja izvedeno je i granulometrijsko prosijavanje istih kolosijeka kako bi se utvrdio točan udio sitnih i finih čestica i kako bi se mogao odrediti točan stupanj zblaćenosti.

Na temelju prethodnih laboratorijskih istraživanja doneseni su zaključci o najpovoljnijim uvjetima (meteorološkim i vremenskim) za termografsko ispitivanje. Tako donesene zaključke bilo je potrebno provjeriti, utvrditi njihovu točnost i prilagoditi ih stvarnom stanju na terenu. Najpovoljnije vrijeme za termografsko snimanje kolosiječnog zastora utvrđeno ovim radom je nakon kišnog i vlažnog dana u 16 sati, odnosno u periodu dana kada temperatura počinje opadati. Analiza rezultata pokazala je vrlo dobro podudaranje oba ispitivanja. Kolosiječni zastori koji su prosijavanjem materijala imali manje udjele sitnih i finih čestica postižu veće relativne temperature dobivene ICT mjerenjem od relativnih temperatura materijala kolosiječnih zastora s većim udjelom sitnih i finih čestica. Treba napomenuti da su ispitivanja provedena u proljeće pri srednjim dnevnim temperaturama zraka od 15°C ta da bi u narednim ispitivanjima trebalo u različitim dobima godine također provjeriti optimalno doba dana i atmosferske prilike za provođenje ovakvog ispitivanja zbog bržeg prosušivanja tla ljeti i sporijeg prosušivanja, leda i snijega zimi.

Iako termografsko snimanje mjeri samo površinske temperature one su usko vezane uz temperature dubljih slojeva. Zastorni materijali koji u dubljim slojevima imaju veći udio sitnih i finih čestica zadržavaju znatno više vode kroz duži vremenski period. Stoga, i površinske temperature u dodiru s dubljim slojevima ne postižu razine koje postižu kolosiječni materijali bez sitnih čestica u dubljim slojevima. Konkretni primjer je kolosijek 6 koji je saniran 2021. nadopunom novog tucaničkog materijala dobre kakvoće, ali samo do razine donjeg ruba praga. Vizualno takav kolosijek izgleda potpuno zadovoljavajuće, no uzimanjem uzorka ispod praga ustanovljeno je da niži slojevi tucanika nisu zamijenjeni, nego imaju vrlo nepovoljni granulometrijski sastav. Rezultat snimanja termografskom kamerom ovaj kolosijek je okarakterizirao najlošijim, što se podudara sa rezultatima granulometrijskog sastava. Ovo dokazuje robusnost metode koja nije osjetljiva isključivo na površinski sastav tucanika (koji je često ispran djelovanjem kiše i znatno boljeg stanja od tucanika u nižim slojevima).

Vizualnim pregledom kolosijeka detektiran je značajan broj drvenih pragova u izrazito lošem, raspucalom i trulom stanju. Dio takvih pragova nedavno je zamijenjen novijim, dobro

impregniranim bez vidljivih mehaničkih oštećenja. Osim toga, nedovoljan broj istraživanja u području drvenih pragova i njihovog termografskog snimanja još je jedan razlog dodatnog provođenja njihovog analiziranja termografskih snimaka s ciljem detekcije stanja trulosti pragova na temelju infracrvenih snimaka kolosiječne konstrukcije. Analizom termografskih snimaka pragova utvrđeno je da raspucali i truli pragovi imaju znatno niže temperature od novo ugrađenih i dobro impregniranih pragova. To je posljedica lakšeg i dužeg zadržavanja vode u pukotinama drvenih pragova.

Na temelju ovog rada omogućen je nastavak istraživanja kroz primjenu bespilotnih letjelica (UAV) za daljinsku analizu stanja pragova i zastorne prizme. Određeni su optimalni početni uvjeti, vremenski i meteorološki, kut snimanja i udaljenost od kolosijeka, a u budućim istraživanjima predviđa se i provođenje snimanja i obrade podataka dobivenih bespilotnim letjelicama opremljenim termografskom kamerom na promatranoj ispitnoj dionici. Treba napomenuti da je udaljenost od kolosijeka moguće postići na neelektrificiranim prugama, dok je na elektrificiranim prugama potrebno snimati sa veće udaljenosti od kolosijeka, što zahtjeva veću rezoluciju infracrvenog senzora, što je za očekivati na temelju vrlo intenzivnog razvoja tehnologije daljinskih snimanja bespilotnim letjelicama.

6. Zaključak

Stanje željezničke infrastrukture potrebno je kontinuirano pratiti kako bi se optimizirao proces održavanja, a time ostvarilo sigurno i pouzdano prometovanje željezničkih vozila. U uvodu rada indentificirana je nerazorna metoda infracrvene termografije kao potencijalno vrlo praktična metoda za određivanje stanja pojedinih elemenata kolosiječnog gradiva. Nadalje je promatrano ponašanje tucaničkog materijala ovisno o sastavu i stupnju zablacenja te mogućnost detekcije nepravilnosti infracrvenom termografijom. Uočen je značajan broj istraživanja u laboratorijskim uvjetima, no nedostatak relevantnih istraživanja u uvjetima in-situ na realnim željezničkim kolosijecima.

Ovo znanstveno istraživanje provedeno je s ciljem određivanja stanja kolosiječnog zastora u in-situ uvjetima metodom infracrvene termografije. S tim u vezi postavljena je i glavna hipoteza rada koja glasi „Nerazornom metodom infracrvene termografije moguće je odrediti stanje zablacenosti kolosiječnog zastora u in-situ uvjetima na klasičnoj kolosiječnoj konstrukciji“.

Termografsko snimanje izvršeno je na području kolodvora Podsused na četiri kolosijeka različitih karakteristika kako bi se utvrdila i usporedila različita stanja zastorne prizme i pragova, ali i odredilo optimalno vrijeme snimanja te ostali parametri koji utječu na provedbu i pouzdanost ove metode mjerenja. Odabrani kolosijeci razlikovali su se po vrsti pragova

(betonski i drveni) i stanju zastorne prizme. Nakon termografskih snimanja u računalnom software-u Smartview određene su minimalne, prosječne i maksimalne temperature koje su potom grafički i statistički analizirane.

Iz promatrane literature izvedene su pretpostavke o ponašanju tucaničkog materijala sa i bez sitnih čestica za različite meteorološke uvjete. Očekivanja su bila da će temperaturne razlike nakon sunčanog i suhog dana, za različite kolosiječne zastore (sa i bez sitnih čestica), biti manje u odnosu na temperaturne razlike nakon kišnog i vlažnog dana. Provođenjem 4 ispitivanja u različitim dobima dana i nakon dužeg suhog ili vlažnog perioda (A1, A2, B1 i B2) potvrđeno je da je za optimalne rezultate potrebno mjerenja provoditi na suhi dan u poslijepodnevnim satima, nakon kišnog dana.

Kako bi se utvrdila točnost ove metode ispitivanja bilo je potrebno provesti prosijavanje zastornog materijala, odnosno provjeru granulometrijskog sastava, iz je određen udio zrna optimalne veličine (31.5 – 63 mm), udio sitnih čestica i udio finih čestica za pojedini zastorni materijal.

Iz dobivenih dijagrama usporedbe temperature tucanika zaključeno je da su kolosijeci u lošijem stanju, odnosno sa većim udjelom sitnih čestica (kolosijeci 6 i 1), znatno nižih temperatura što je posljedica sporijeg zagrijavanja uslijed zadržavanja vlage u tucaničkom materijalu. Zbog manjeg udjela sitnih čestica kolosijeci 2 i 4 imaju tendenciju manjeg zadržavanja vlage, te stoga postižu veće površinske temperature u kraćem vremenskom periodu od kolosijeka 6 i 1. Taj podatak najizraženije je vidljiv u ispitivanju B2, odnosno ispitivanje nakon vlažnog dana u vremenskom periodu od 16:00 do 17:00 sati što je također bilo očekivano, zbog dužeg zadržavanja vlage u zastornom materijalu s većim udjelom sitnih čestica. Rezultati su potvrđeni provedenim ispitivanjem granulometrijskog sastava te je uspostavljena čvrsta korelacija prosječne relativne temperature tucanika i udjela zrna optimalne veličine. Ovim rezultatima je dokazana hipoteza rada.

Metoda je također pokazala značajnu robusnost na primjeru kolosijeka 6 gdje je površinski sloj izrađen od kvalitetnog tucanika no niži slojevi (ispod praga) koji su uzorkovani otkrivaju vrlo lošu granulometriju i udio sitnih čestica, što korelira i najlošijim rezultatom u pogledu termografskog snimanja. Na taj način uočeno je da na temperaturu ne utječe samo površinski sloj tucanika nego i slojevi ispod praga koji su i najkritičniji za prijenos opterećenja i odvodnju.

Pri analizi rezultata dodatno je uočena značajna korelacija prosječne temperature drvenih pragova i dotrajalost pragova. Betonski pragovi su, s obzirom na kratak vijek uporabe, dali približno konstantne temperaturne krivulje što je bilo pretpostavljeno iz vizualnog pregleda.

Kod drvenih pragova veličine temperaturnih razlika su varirale o stupnju dotrajlosti i starosti samih pragova. Značajni skokovi u temperaturnom dijagramu uočeni su na kolosijeku 1 na kojem je zamijenjen otprilike svaki 5. dotrajali prag novime, što je rezultiralo temperaturnom razlikom između novog i dotrajalog praga i do 6°C. Taj podatak najizraženije je vidljiv pri ispitivanju nakon kišnog i vlažnog dana zbog dužeg zadržavanja vlage u pukotinama drvenih pragova.

Pozitivnim ishodom ovog istraživanja nazire se mogućnost praktične primjene ove metode u inženjerskoj praksi pri kontroli stanja kolosijeka zbog jednostavnosti primjene i niza prednosti koju pruža u vidu nerazornog ispitivanja, sigurnosti za ispitivača, nezaposjedanja pruge i financijske isplativosti.

Rezultati istraživanja daju vrlo optimistične pokazatelje i za mogućnost primjene ovakve metode daljinskim snimanjem s bespilotnih letjelica. Uz prethodno navedeno dodatna korist bila bi znatno veća brzina provođenja ispitivanja te dodatna sigurnost za ispitivača. Kao nastavak istraživanja u narednom periodu predviđa se provođenje snimanja i obrade podataka dobivenih bespilotnim letjelicama opremljenim termografskom kamerom na promatranoj ispitnoj dionici.

Literatura

- [1] Esveld C. (2001) 'Modern Railway Track', Second edi. Delft: TU Delft, [Online]. Dostupno: <https://doi.org/10.1111/0031-868X.t01-2-00006>. (Pristupljeno 15.05.2022.)
- [2] HŽ Infrastruktura, (1989) 'Pravilnik 314 o održavanju pruga i pružnih postrojenja'
- [3] Jovanović S., Božović D., Tomičić-Torlaković M. (2014) 'Railway Infrastructure Maintenance Planning Based on Condition Measurements and Analysis', *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers* 66: 347–58. [Online]. Dostupno: <https://doi.org/10.14256/JCE.959.2013> (Pristupljeno 15.05.2022.)
- [4] Kovacevic M. S., Gavin K., Stipanovic Oslakovic I., Bacic M. (2016) 'A New Methodology for Assessment of Railway Infrastructure Condition.', *Transportation Research Procedia* 14: 1930–39. [Online]. Dostupno: <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2016.05.160> (Pristupljeno 15.05.2022.)
- [5] Pašagić V. (2008) 'Primjena termografije u građevinarstvu', *Građevinar*, vol. 60, br. 12, str. 1055-1064. [Online]. Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/file/51570> (Pristupljeno 10.05.2022.)
- [6] Kontrol biro, (2020) 'IC Termografija', *Kontrol biro*, [Online]. Dostupno: <https://kontrolbiro.hr/usluge/ic-termografija/> (Pristupljeno 15.05.2022.)
- [7] Švaić S., Boras I. (2006) 'IC Termografija – primjena kod očuvanja kulturne baštine', Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [8] Zai-Wei L., Xiao-Zhou L., Hong-Yao L., Yue-Lei H., Yun-Lai Z. (2020) 'Surface Crack Detection in Precasted Slab Track in High-Speed Rail via Infrared Thermography', *Materials*, vol. 13, br. 21, str. 1-16 [Online]. Dostupno: <https://doi.org/10.3390/ma13214837> (Pristupljeno 20.05.2022.)
- [9] Stypułkowski K., Gołda P., Lewczuk K., Tomaszewska J. (2021) 'Monitoring System for Railway Infrastructure Elements Based on Thermal Imaging Analysis', *Sensors*, vol. 21, br. 13, str. 1-21 [Online]. Dostupno: <https://doi.org/10.3390/s21113819> (Pristupljeno 20.05.2022.)

- [10] Flammini F., Pragliola C., Smarra G. (2016) 'Railway infrastructure monitoring by drones', International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), str. 1-6 [Online]. Dostupno: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7841398> (Pristupljeno 18.05.2022.)
- [11] Jurić-Kaćunić D., Librić L., Car M. (2015) 'Primjena bespilotnih letjelica na prometnoj infrastruktornoj mreži', *Građevinar*, vol. 68, br. 4, str. 287-300 [Online]. Dostupno <https://doi.org/10.14256/JCE.1382.2015> (Pristupljeno: 20.05.2022)
- [12] Clark M., McCann D. M., Forde M.C. (2002) 'Infrared thermographic investigation of railway track ballast', *NDT&T International*, vol. 35, str. 83-94 [Online]. Dostupno [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00032-9) (Pristupljeno: 20.05.2022)
- [13] Galić B. (2018) 'Ispitivanje stanja zastorne prizme željezničkog kolosijeka primjenom infracrvene termografije', Seminarski rad, Građevinski fakultet, Zagreb
- [14] Tan Y., Ahmadian M., Chen Y. (2019) 'Monitoring and Detecting Fouled Ballast Using Forward-Looking Infrared Radiometer (FLIR) Aerial Technology: Possibilities and Limitations', *ASME*, str. 1-7 [Online]. Dostupno <https://doi.org/10.1115/JRC2019-1327> (Pristupljeno: 20.05.2022)
- [15] Hosseini S.M., Tan Y., Ahmadian M. (2020) 'Forward-Looking Infrared Radiometry (FLIR) Application for Detecting Ballast Fouling' *ASME*, str. 1-7 [Online]. Dostupno <https://doi.org/10.1115/JRC2020-8032> (Pristupljeno: 20.05.2022)
- [16] OPENRAILMAPS, (2022), Kolodvor Podsused, [Online]. Dostupno: <https://www.openrailwaymap.org/> (Pristupljeno 10.05.2022.)
- [17] OSOBNA KOMUNIKACIJA – Ivan Zovkić, voditelj projekta rekonstrukcije pruge Zagreb Zapadni kolodvor – Zaprešić, HŽ Infrastruktura, 15. svibnja 2022.
- [18] Pljusak, (2022) 'Zagreb Gajnice izmjerene vrijednosti', *Pljusak*, [Online]. Dostupno: <https://pljusak.com/meteo.php?stanica=gajnice#https://api.met.no/weatherapi/locationforecast/2.0/compact?lat=45.8153&lon=15.8647&altitude=122> (Pristupljeno 25.04.2022.)

- [19] DHMZ, (2022) 'Zagreb Maksimir - trodnevna prognoza', DHMZ, [Online]. Dostupno: https://meteo.hr/prognoze.php?section=prognoze_model¶m=3d (Pristupljeno 19.05.2022.)
- [20] Fluke Corporation, (2015) 'TiS45 Performance Seires Thermal Imagers – Users Manual', *Instrumart*, [Online]. Dostupno: <https://www.instrumart.com/assets/Fluke-Tis75-man.pdf> (Pristupljeno 14.04.2022.)
- [21] Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo (2006) 'Agregati za željeznički tucanik (EN 13450:2003/AC:2006)'
- [22] Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo (2003) 'Ispitivanje općih svojstava agregata-1.dio: Metode uzorkovanja (EN 932-1:1996)', Narodne Novine br. 55/96
- [23] Hrvatski zavod za norme (2012) 'Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – metode sijanja (EN 933 – 1: 2012)'

Zahvala

Osobito se zahvaljujemo mentoru doc. dr. sc. Ivo Haladinu na stručnoj pomoći i korisnim savjetima koji su nas vodili tijekom izrade ovog rada.

Hvala i djelatnicima laboratorija Zavoda za materijale i laborantu Zdeslavu Adamiću na pruženoj pomoći tijekom ispitivanja granulometrijskog sastava.

Također, zahvaljujemo se inženjeru Ivanu Zovkiću, voditelju projekta rekonstrukcije pruge Zagreb Zapadni kolodvor – Zaprešić, te Hrvatskim Željeznicama na ustupljenim informacijama i uzorcima materijala.

Sažetak

TONI PAHLJINA I MARIN PULJAR-MATIĆ

Primjena metode infracrvene termografije za ocjenu stanja kolosiječnog zastora u in-situ uvjetima

Tračnička infrastruktura zahtjeva kontinuirano praćenje stanja s ciljem osiguranja potrebne kvalitete i sigurnosti odvijanja prometa. Infracrvena termografija je postupak snimanja tijela koja emitiraju energiju. Često je upotrebljavana u područjima očuvanja energije, elektrotehnike, strojarstva, medicine ali i u građevinarstvu. Za potrebe ovog rada korištena je u svrhu uočavanja nedostataka na zastornoj prizmi i pragovima željezničkog kolosijeka. Izvedena su ispitivanja termografskog snimanja zastornog materijala i pragova na 4 kolosijeka različitog stanja Kolodvora Podsused. U radu je, osim infracrvene termografije, izvedeno i ispitivanje granulometrijskog sastava materijala zastorne prizme. Rezultati ispitivanja su uspoređeni i dovedeni u korelaciju kako bi se odredila točnost metode infracrvenog termografskog snimanja. Određeni su optimalni uvjeti za snimanje (vremenski i meteorološki) te su stvoreni preduvjeti za daljinsku analizu primjenom bespilotnih letjelica

Ključne riječi: Infracrvena termografija, kolosiječni zastor, tucanik, pragovi, granulometrijski sastav

Summary

TONI PAHLJINA I MARIN PULJAR-MATIĆ

In-situ railway ballast condition assessment based on infrared thermography

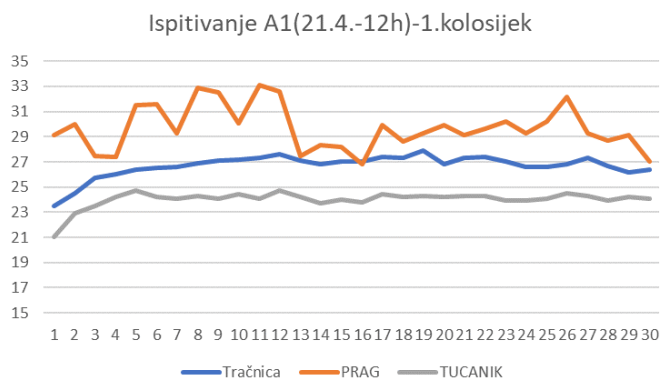
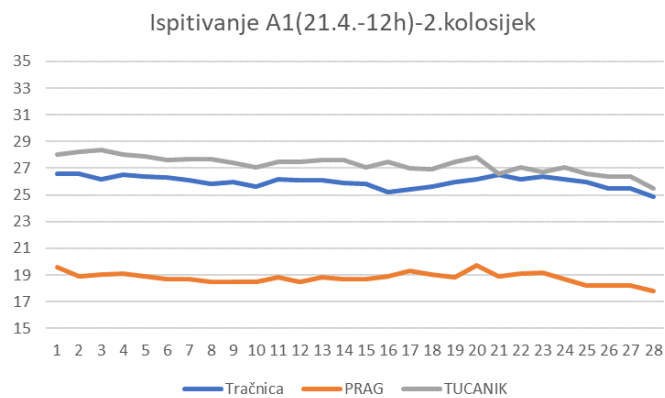
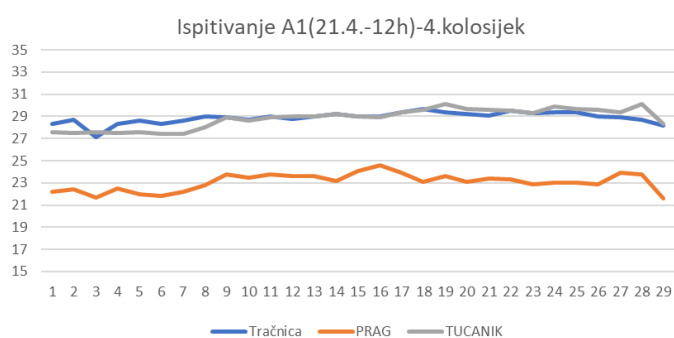
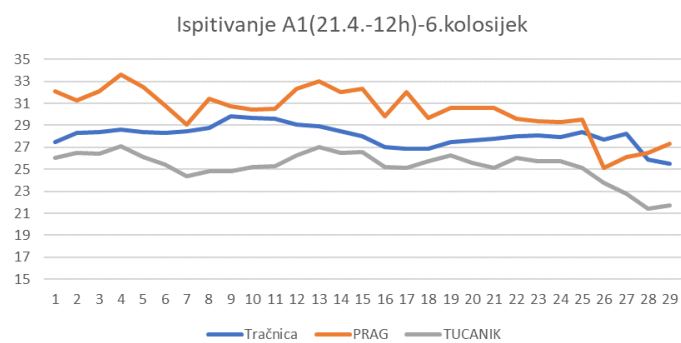
Railway infrastructure needs frequent condition assessment in order to ensure track quality and safety of railway traffic. Infrared thermography is the process of recording bodies that emit energy. It is often used in the fields of energy conservation, electrical engineering, mechanical engineering, medicine, but also in construction. For the purposes of this paper, it was used for assessment of railway ballast and sleepers condition of the railway track in-situ. Tests of thermographic recording of the ballast material and sleepers were performed on 4 tracks of different condition of Podsused Station. In addition to infrared thermography, the granulometric composition of the ballast material was examined. The test results were compared and correlated to determine the accuracy of the infrared thermographic imaging method. Optimal conditions for recording (weather and meteorological) were determined and all preconditions for recording with a UAV are proposed.

Keywords: Infrared thermography, railway ballast, sleepers, granulometric composition

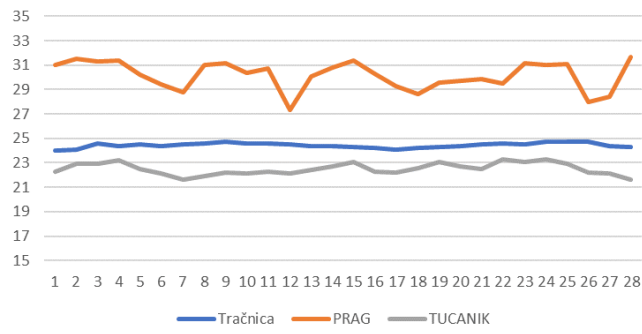
PRILOG 1 Tabelarni prikaz vrijednosti temperatura

Datum	Vrijeme	Kolosijek	Pozicija	Tračnica			PRAG			TUČANIK				
				Tmax [C]	Tave [C]	Tmin [C]	Tmax [C]	Tave [C]	Tmin [C]	Tmax [C]	Tave [C]	Tmin [C]	Trel=TavePRAG-TaveTRA [C]	Trel=TaveTUC-TaveTRA [C]
21.4.	12h	6	1	29	27.5	22.6	34.8	32.1	29.9	4.6	30.5	26	19.1	-1.5
21.4.	12h	6	2	29.3	28.3	23.5	33.7	31.3	28.7	3	31.7	26.5	21.3	-1.8
21.4.	12h	6	3	29.6	28.4	23.6	34.3	32.1	30	3.7	30.7	26.4	20.6	-2
21.4.	12h	6	4	29.7	28.6	25.7	35.3	33.6	28.2	5	30.5	27.1	22.2	-1.5
21.4.	12h	6	5	29.5	28.4	24.4	36.8	32.5	28.5	4.1	30.2	26.1	20.7	-2.3
21.4.	12h	6	6	30	28.3	23.8	33.3	30.8	29.1	2.5	30.2	25.4	19.7	-2.9
21.4.	12h	6	7	29.9	28.5	23.9	33.6	29.1	26.6	0.6	29.4	24.4	19.5	-4.1
21.4.	12h	6	8	30	28.8	24.6	33	31.4	26.7	2.6	29.6	24.8	19.2	-4
21.4.	12h	6	9	31	29.8	28.9	33.2	30.7	28.5	0.9	29.3	24.8	16.9	-5
21.4.	12h	6	10	30.8	29.7	26	31.8	30.4	28.8	0.7	28.7	25.2	16.6	-4.5
21.4.	12h	6	11	30.7	29.6	26.3	33	30.5	26.6	0.9	29.6	25.3	18.4	-4.3
21.4.	12h	6	12	30.7	29.1	23.4	35.7	32.3	27.7	3.2	31.1	26.3	20.5	-2.8
21.4.	12h	6	13	30	28.9	23.8	34.8	33	29.8	4.1	30.9	27	21.9	-1.9
21.4.	12h	6	14	29.7	28.5	24.2	33.7	32	29.9	3.5	29.4	26.5	20.7	-4.2
21.4.	12h	6	15	29.2	28	22.7	33.5	32.3	29	4.3	30.2	26.6	22.2	-1.4
21.4.	12h	6	16	28.5	27	22.8	31.8	29.8	25.3	2.8	28.7	25.2	18.8	-1.8
21.4.	12h	6	17	28.4	26.9	22.3	32.9	32	30.5	5.1	28.3	25.1	20	-1.8
21.4.	12h	6	18	28.4	26.9	22	31.4	29.7	27.9	2.8	28.8	25.7	21.2	-1.2
21.4.	12h	6	19	28.7	27.5	23.8	31.9	30.6	27.1	3.1	29.7	26.3	21.1	-1.2
21.4.	12h	6	20	29.1	27.6	23.2	31.8	30.6	27.9	3	28.2	25.6	30.6	-2.7
21.4.	12h	6	21	29	27.8	23.6	32	30.6	28.3	2.8	28.2	25.6	19.7	-2.7
21.4.	12h	6	22	29.2	28	24.1	30.9	29.6	28	1.6	29.3	26	21.8	-2
21.4.	12h	6	23	29.3	28.1	23.8	31.6	29.4	25.6	1.3	28.8	25.7	21.6	-2.4
21.4.	12h	6	24	29.1	27.9	24	31.4	29.3	27.9	1.4	29.5	25.7	22.2	-2.2
21.4.	12h	6	25	29.6	28.4	24.5	30.9	29.5	28.2	1.1	28.4	25.1	19.2	-3.3
21.4.	12h	6	26	29.2	27.7	23	27.7	25.1	21.3	-2.6	27.6	23.8	17.5	-3.9
21.4.	12h	6	27	29.5	28.2	23.3	27.4	26.1	24.3	-2.1	27.2	22.8	18.8	-5.4
21.4.	12h	6	28	28.3	25.9	20.8	27.7	26.5	24.7	0.6	24.2	21.4	17	-4.7
21.4.	12h	6	29	27.5	25.5	20.9	28.8	27.3	25.3	1.8	25.7	21.7	18.1	-3.8
			AVER	29.4	28.1	23.8	32.3	30.4	27.5	2.3	29.1	25.3	20.2	-2.8
Datum	Vrijeme	Kolosijek	Pozicija	Tračnica			PRAG			TUČANIK				
21.4.	12h	4	1	29.3	28.3	27.1	26	22.2	21.1	-6.1	33.1	27.6	20.4	-0.7
21.4.	12h	4	2	29.3	28.7	27.7	23.9	22.4	20.6	-6.3	32.9	27.5	20.9	-1.2
21.4.	12h	4	3	28.6	27.1	24	22.7	21.7	20.9	-5.4	32.1	27.6	21.4	0.5
21.4.	12h	4	4	29	28.3	27.4	23.3	22.5	21.7	-5.8	34.1	27.5	20	-0.8
21.4.	12h	4	5	29.2	28.6	27.7	23.2	22.1	21.1	-6	32.8	27.6	20.6	-1
21.4.	12h	4	6	29.3	28.3	27.2	23.3	21.8	20.8	-6.5	33.6	27.4	20	-0.9
21.4.	12h	4	7	29.3	28.6	27.5	23	22.2	21.1	-6.4	32.7	27.4	19.5	-1.9
21.4.	12h	4	8	29.7	29	28.1	25	22.8	21.6	-6.2	33.7	28	19	-1
21.4.	12h	4	9	29.8	28.9	27.8	25.4	23.8	22.5	-5.1	35.9	28.9	20.7	0
21.4.	12h	4	10	29.7	28.7	27.3	24.4	23.5	22.5	-5.2	33.4	28.6	21.5	-0.1
21.4.	12h	4	11	29.8	29	27.8	29.9	23.8	22.1	-5.2	33.9	28.9	21.3	-0.1
21.4.	12h	4	12	29.9	28.6	27.6	25.4	23.6	22.2	-5.6	35.2	29	21.8	0.7
21.4.	12h	4	13	29.9	29	27.7	24.7	23.6	22.6	-5.4	36.1	29	21.5	0
21.4.	12h	4	14	30.1	29.2	27.8	24.3	23.2	22.1	-6	35.4	29.2	22.3	0
21.4.	12h	4	15	30.3	29	27.8	27.6	24.1	22.8	-4.9	34.5	29	20	0
21.4.	12h	4	16	29.9	29	27.9	30.9	24.6	22	-4.4	34.7	28.9	22.2	-0.1
21.4.	12h	4	17	30.2	29.4	28.2	25.8	23.9	22.5	-5.5	35.4	29.4	19.9	0
21.4.	12h	4	18	30.3	29.7	28.9	24.3	23.1	21.8	-6.6	35.6	29.6	22.6	-0.1
21.4.	12h	4	19	30.3	29.4	28.1	25.4	23.6	21.4	-5.8	35.2	30.1	21.9	0.7
21.4.	12h	4	20	30.1	29.2	27.9	24.2	23.1	21.7	-6.1	35.9	29.7	21.6	0.5
21.4.	12h	4	21	30.1	29.1	27.8	31	23.4	21.6	-5.7	35.8	29.6	23.1	0.5
21.4.	12h	4	22	30.3	29.5	28.6	25.3	23.3	22.2	-6.2	34.7	29.5	22	0
21.4.	12h	4	23	30	29.3	27.9	27.3	22.9	21.2	-6.4	36.4	29.3	20.4	0
21.4.	12h	4	24	30.2	29.4	28.1	25.9	23	21.5	-6.4	36.3	29.9	21.4	0.5
21.4.	12h	4	25	30.1	29.4	28.5	25.9	23	21.2	-6.4	35.2	29.7	23.7	0.3
21.4.	12h	4	26	30.1	29	27	24.2	22	21	-6.1	36.1	29.6	21.9	0.6
21.4.	12h	4	27	30.1	28.9	26.9	25.5	23.8	22.8	-5.8	34.9	29.4	21.9	0.6
21.4.	12h	4	28	29.9	28.7	26.9	25.4	23.8	22.3	-4.9	36.4	30.1	22.3	1.4
21.4.	12h	4	29	29.6	28.2	26.2	23.5	21.6	19.9	-6.6	34.3	28.3	22.1	0.1
			AVER	29.8	28.9	27.6	25.4	23.1	21.8	-5.8	34.7	28.8	21.3	-0.05
Datum	Vrijeme	Kolosijek	Pozicija	Tračnica			PRAG			TUČANIK				
21.4.	12h	2	1	27.4	26.6	25.4	23.7	19.6	17.5	-7	33	28	20.3	1.4
21.4.	12h	2	2	27.5	26.6	25.4	20.1	18.9	17.5	-7.7	33.6	28.2	20.1	1.6
21.4.	12h	2	3	27.1	26.2	24.9	21.3	19	17.1	-7.2	34	28.4	20.7	2.2
21.4.	12h	2	4	27.2	26.5	25.4	21.1	19.1	17.4	-7.4	32.4	28	20.6	1.5
21.4.	12h	2	5	27.2	26.4	25.3	20.7	18.9	17.3	-7.5	33.2	27.9	20.7	1.7
21.4.	12h	2	6	27.1	26.3	25.2	20.1	18.7	17.3	-7.6	32	27.6	20.8	1.6
21.4.	12h	2	7	27	26.1	24.9	20.6	18.7	17.1	-7.4	31.6	27.7	20.3	1.3
21.4.	12h	2	8	26.6	25.8	24.7	19.8	18.5	17.2	-7.3	32.3	27.7	19.6	1.9
21.4.	12h	2	9	26.9	26	24.8	19.8	18.5	17	-7.5	32.6	27.4	19.6	1.4
21.4.	12h	2	10	26.6	25.6	24.5	19.8	18.5	17.2	-7.1	31.3	27.1	18.1	1.5
21.4.	12h	2	11	27	26.2	25.1	20.9	18.8	17.4	-7.4	31.9	27.5	20	1.3
21.4.	12h	2	12	27	26.1	25.1	19.8	18.5	17.2	-7.6	32.1	27.5	19.8	1.4
21.4.	12h	2	13	27.1	26.1	25	20.3	18.8	17.5	-7.3	32.9	27.6	18.3	1.5
21.4.	12h	2	14	26.8	25.9	24.8	22.4	18.7	17.5	-7.2	32.7	27.6	21.1	1.7
21.4.	12h	2	15	26.8	25.8	24.7	20	18.7	17.5	-7.1	33.1	27.1	17.1	1.3
21.4.	12h	2	16	26.6	25.2	20.8	21.2	18.9	17.4	-6.3	31.9	27.5	20.3	2.3
21.4.	12h	2	17	26.7	25.4	21.5	20.9	19.3	17.6	-6.1	31.8	27	17.8	1.6
21.4.	12h	2	18	26.8	25.6	21.1	21.1	19	17.7	-6.6	31.5	26.9	19	1.3
21.4.	12h	2	19	27	26	24.8	20	18.8	17.6	-7.2	31.9	27.5	17.5	1.5
21.4.	12h	2	20	27.4	26.2	25	21	19.7	18.5	-6.5	31.8	27.8	17.4	1.6
21.4.	12h	2	21	27.6	26.5	25.5	20.6	18.9	18	-7.6	31.1	26.6	21.4	0.1
21.4.	12h	2	22	27.1	26.2	24.9	20.3	19.1	17.8	-7.1	32.7	27.1	20	0.9
21.4.	12h	2	23	27.3	26.4	25.5	20.9	19.2	17.7	-7.2	31.3	26.7	19.9	0.3
21.4.	12h	2	24	27	26.2	25.2	20	18.7	17.8	-7.5	32	27.1	19.8	0.9
21.4.	12h	2	25	26.8	26	24.9	19.3							

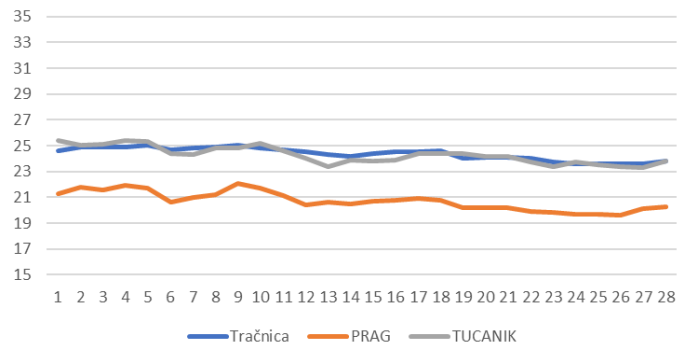
PRILOG 2 Prikaz temperaturnih dijagrama



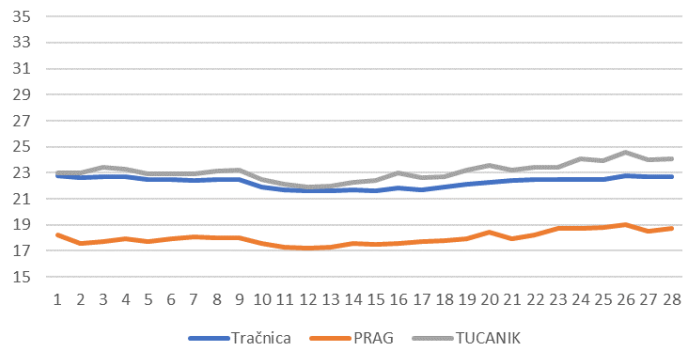
Ispitivanje B1(21.4.-16h)-6.kolosijek



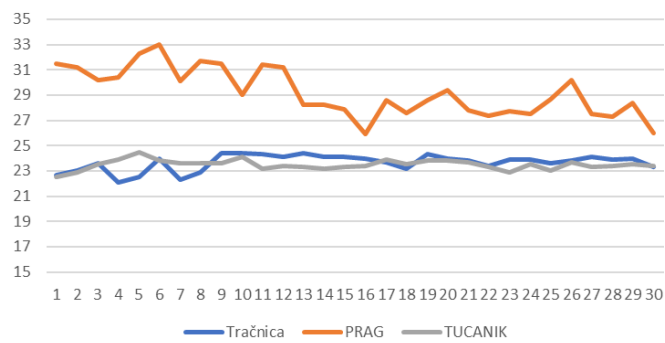
Ispitivanje B1(21.4.-16h)-4.kolosijek



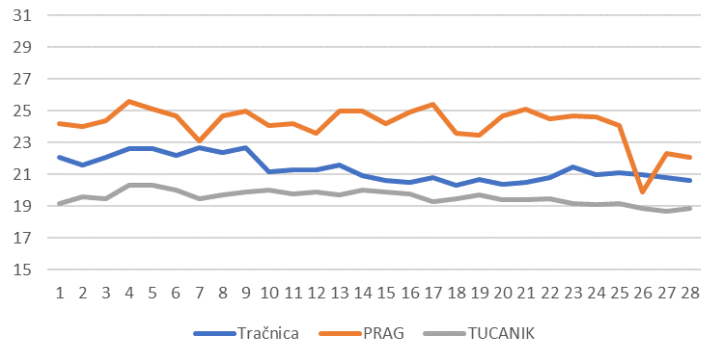
Ispitivanje B1(21.4.-16h)-2.kolosijek



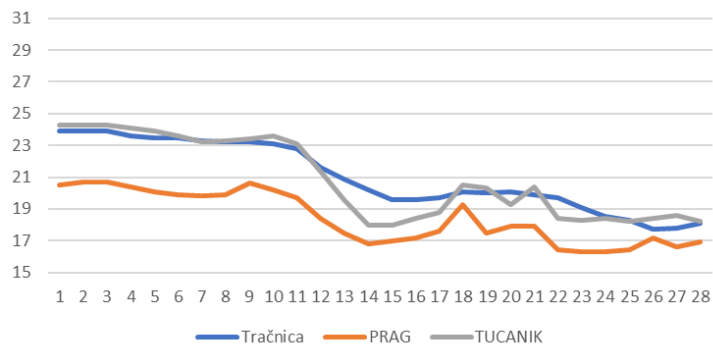
Ispitivanje B1(21.4.-16h)-1.kolosijek



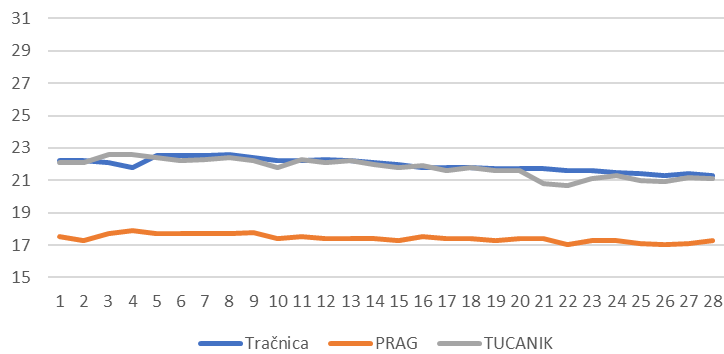
Ispitivanje A2(23.4.-12h)-6.kolosijek



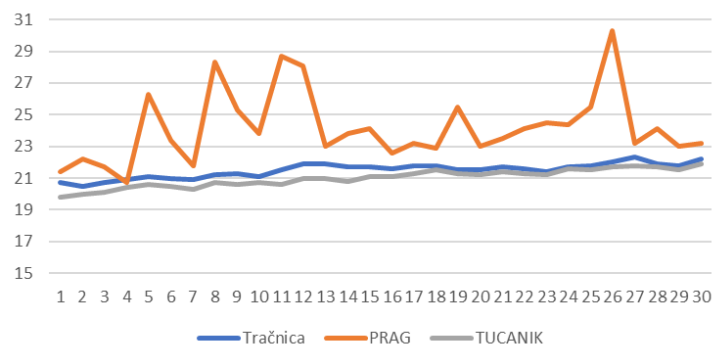
Ispitivanje A2(23.4.-12h)-4.kolosijek



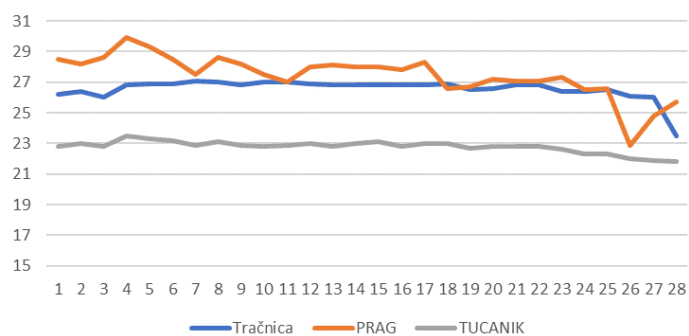
Ispitivanje A2(23.4.-12h)-2.kolosijek



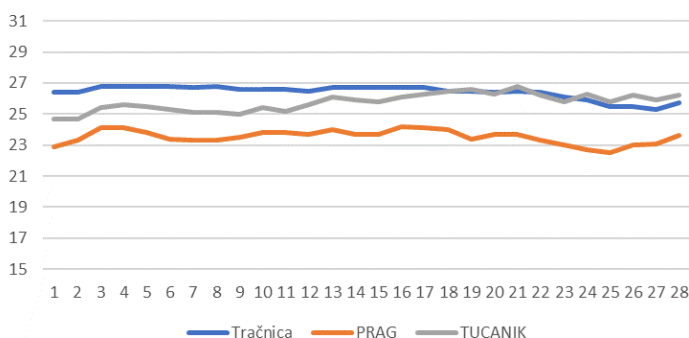
Ispitivanje A2(23.4.-12h)-1.kolosijek



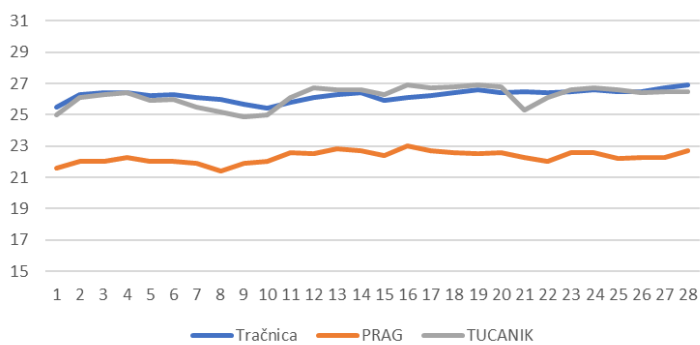
Ispitivanje B2(23.4.-16h)-6.kolosijek



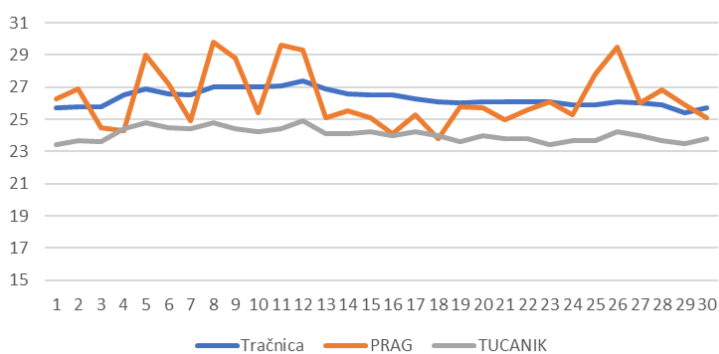
Ispitivanje B2(23.4.-16h)-4.kolosijek



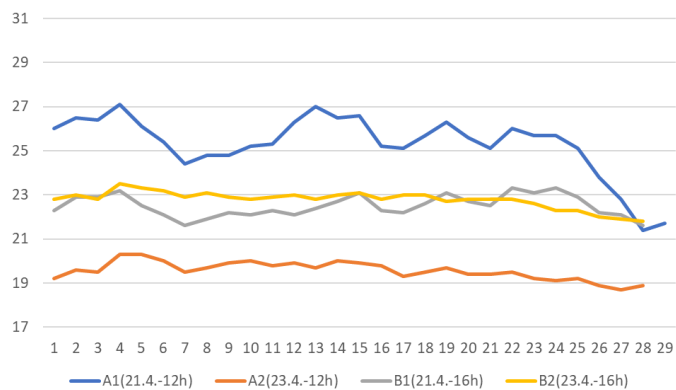
Ispitivanje B2(23.4.-16h)-2.kolosijek



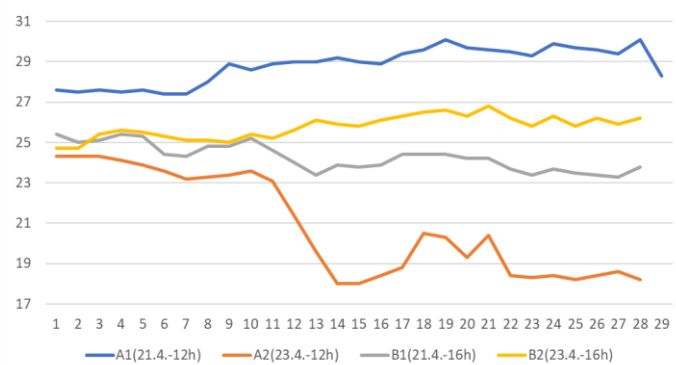
Ispitivanje B2(23.4.-16h)-1.kolosijek



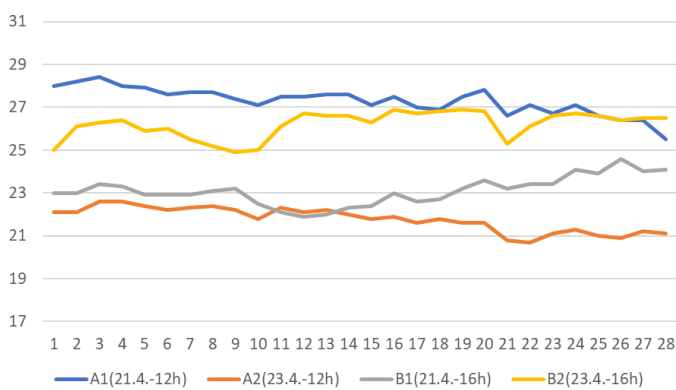
KOLOSIIJEK 6



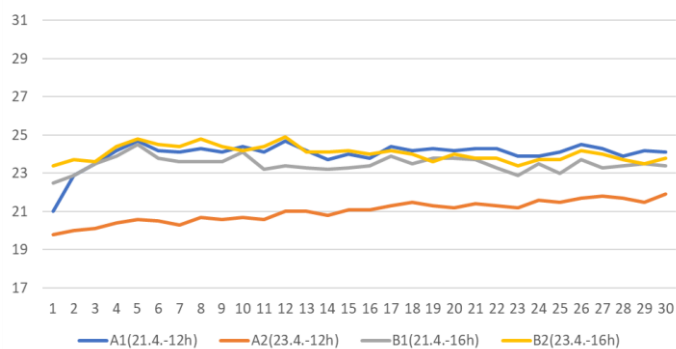
KOLOSIIJEK 4



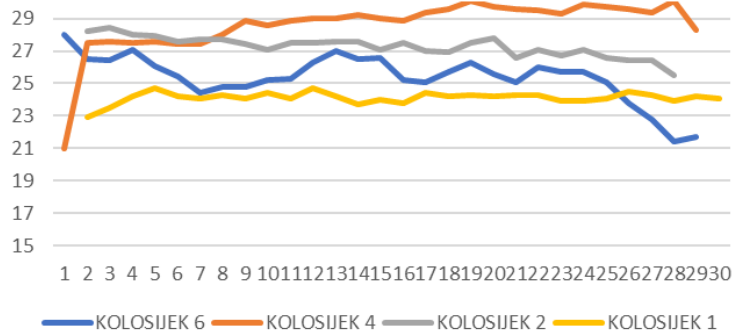
KOLOSIIJEK 2



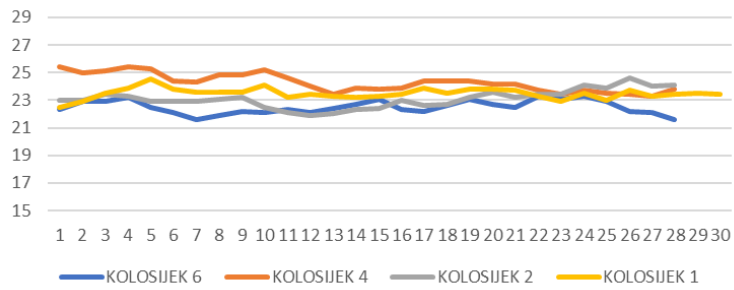
KOLOSIIJEK 1



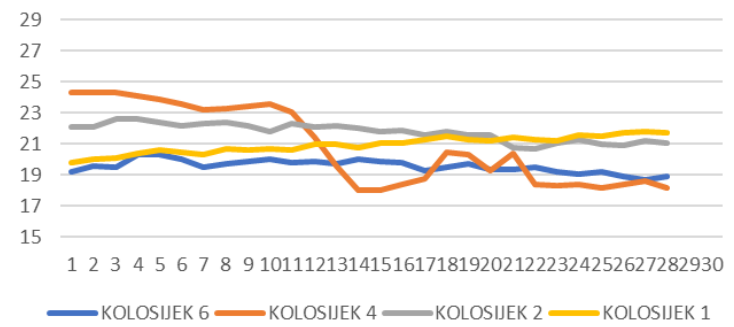
A1(21.4.-12h) TUCANIK



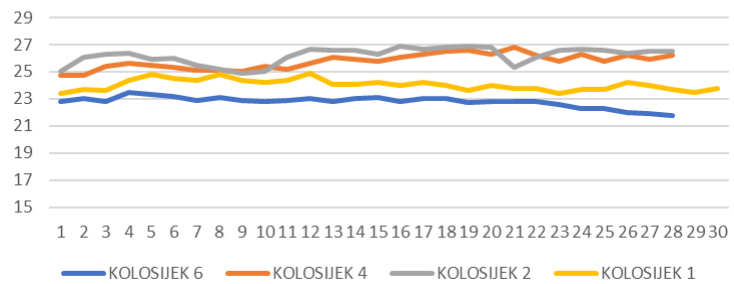
B1(21.4.-16h) TUCANIK



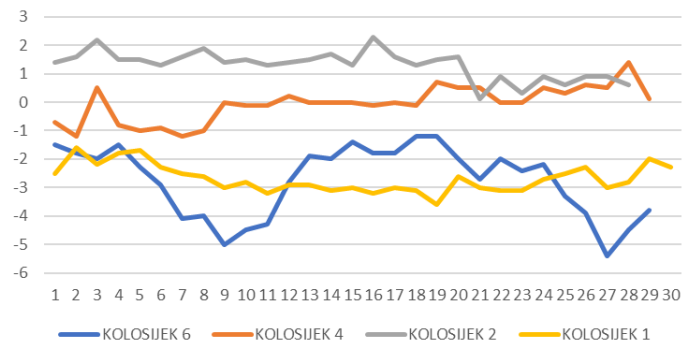
A2(23.4.-12h) TUCANIK



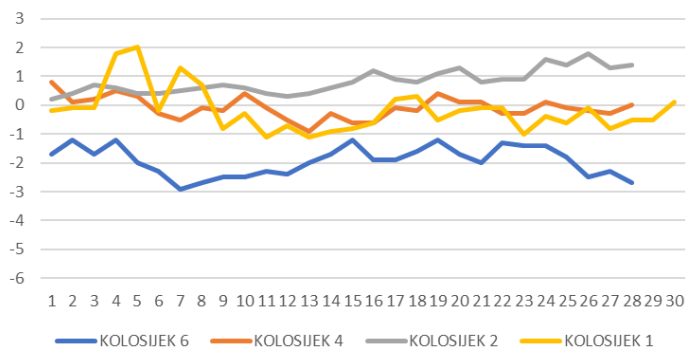
B2(23.4.-16h) TUCANIK



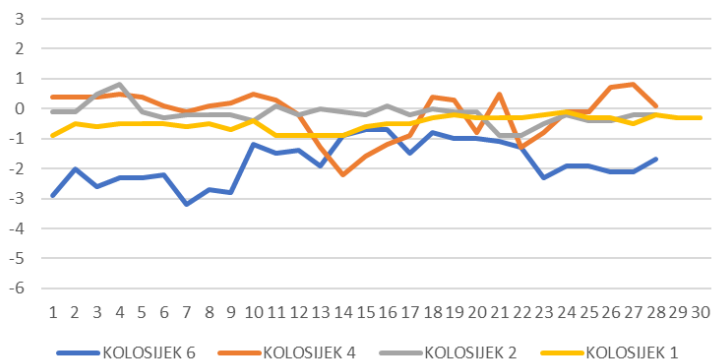
A1 TUCANIK(21.4.-12h)-RELATIVNO



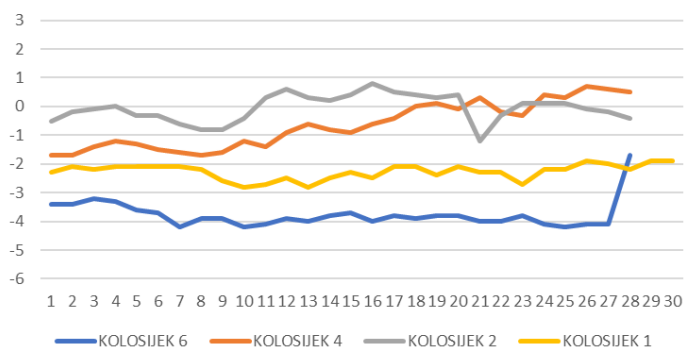
B1(21.4.-16h) TUCANIK-RELATIVNO



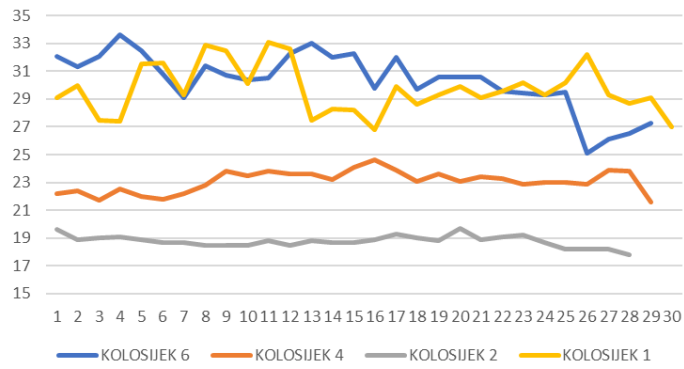
A2(23.4.-12h) TUCANIK-RELATIVNO



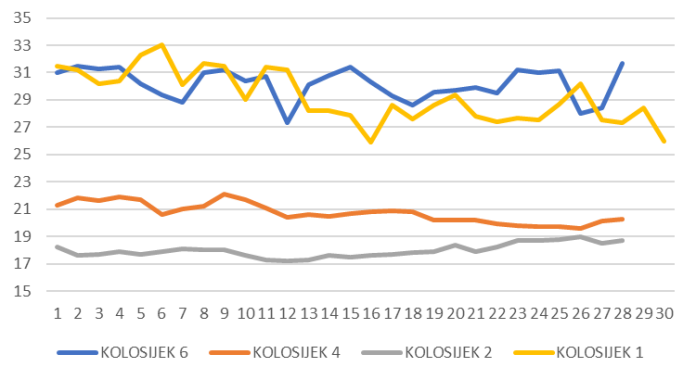
B2 TUCANIK(23.4.-16h)-RELATIVNO



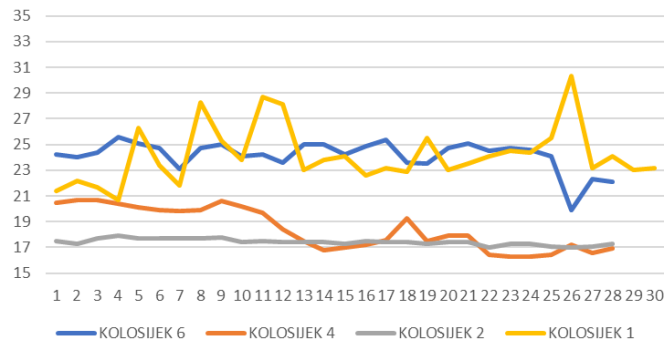
A1(21.4.-12h) PRAG



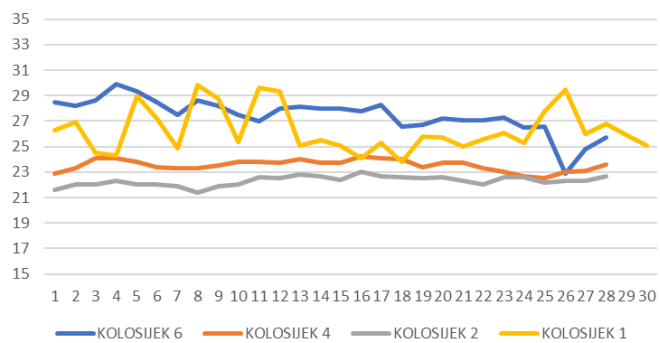
B1(21.4.-16h) PRAG



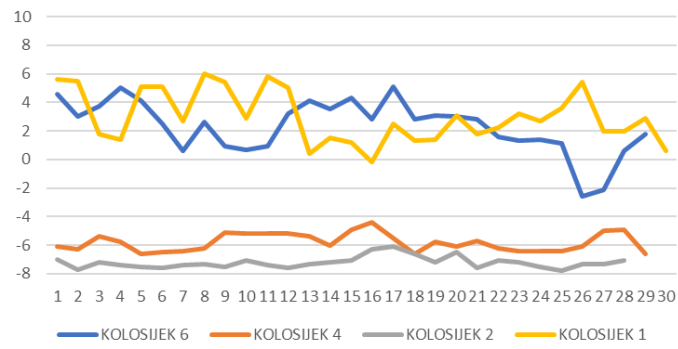
A2(23.4.-12h) PRAG



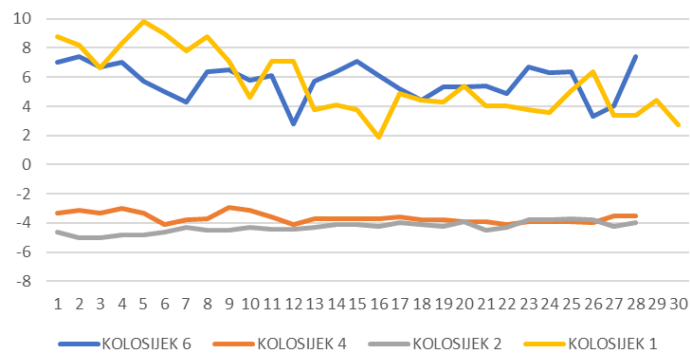
B2(23.4.-16h) PRAG



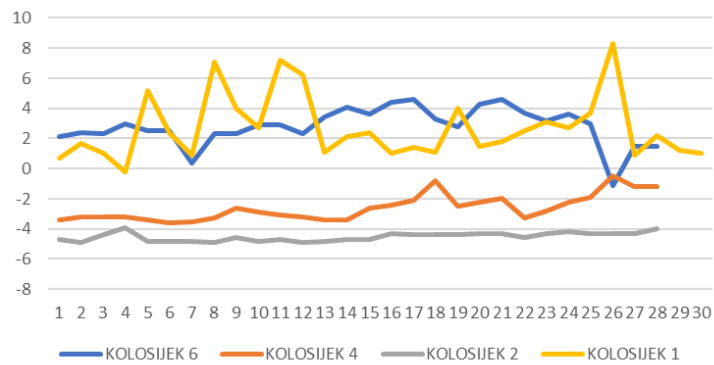
A1(21.4.-12h) PRAG-RELATIVNO



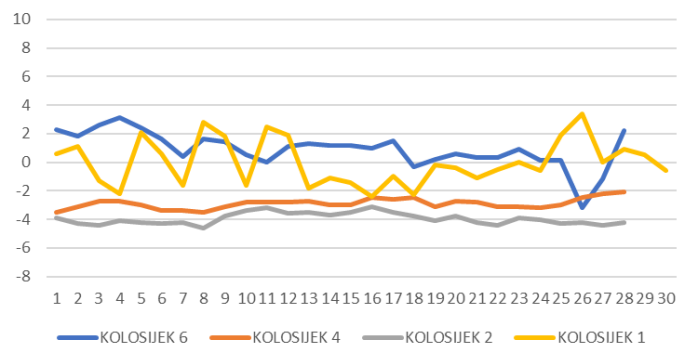
B1(21.4.-16h) PRAG-RELATIVNO



A2(23.4.-12h) PRAG-RELATIVNO



B2(23.4.-16h) PRAG-RELATIVNO

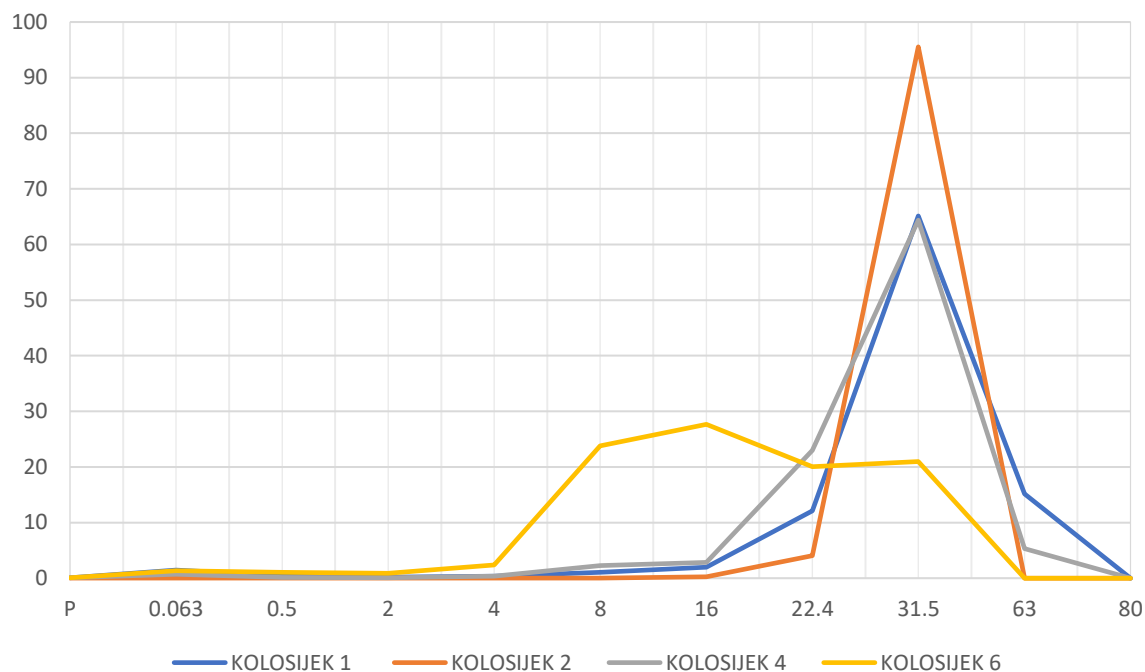


PRILOG 3 Prikaz rezultata prosijavanja

Veličina otvora sita (mm)	Masa preostalog materijala na situ Ri (g)				Postotak preostalog materijala na situ (Ri/M1)x100 (%)				Kumulativni postotak prolaska kroz sito 100 - $\sum (Ri/M1) \times 100$ (%)			
	KOL. 1	KOL. 2	KOL. 4	KOL. 6	KOL. 1	KOL. 2	KOL. 4	KOL. 6	KOL. 1	KOL. 2	KOL. 4	KOL. 6
80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0
63	1402.7	0.0	587.4	0.0	15.2	0.0	5.3	0.0	84.8	100.0	94.7	100.0
31.5	6022.3	9999.6	7090.2	2152.7	65.1	95.5	64.4	21.0	19.7	4.5	30.3	79.0
22.4	1121.3	424.0	2534.4	2057.2	12.1	4.1	23.0	20.0	7.6	0.4	7.3	59.0
16	181.6	26.4	314.5	2841.0	2.0	0.3	2.9	27.7	5.6	0.2	4.4	31.3
8	98.0	0.9	248.7	2443.0	1.1	0.0	2.3	23.8	4.5	0.2	2.2	7.5
4	32.1	1.2	38.9	245.6	0.3	0.0	0.4	2.4	4.2	0.1	1.8	5.1
2	17.4	0.3	11.3	90.5	0.2	0.0	0.1	0.9	4.0	0.1	1.7	4.3
0.5	44.7	1.0	18.6	111.9	0.5	0.0	0.2	1.1	3.5	0.1	1.5	3.2
0.063	136.9	4.8	77.0	137.6	1.5	0.0	0.7	1.3	2.0	0.1	0.8	1.8
P	5.4	1.1	6.8	9.0	0.1	0.0	0.1	0.1	2.0	0.1	0.8	1.7

PRILOG 4 Dijagrami rezultata prosijavanja

Postotak preostalog materijala na situ



Kumulativni postotak prolaska kroz sito

