

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Marija N. Vukšić Popović

**ANALIZA OTKAZA VUČNIH UREĐAJA
ŽELEZNIČKIH VOZILA KAO FAKTOR
BEZBEDNOSTI I RIZIKA OD RASKINUĆA
VOZA**

doktorska disertacija

Beograd, 2021

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Marija N. Vukšić Popović

**FAILURE ANALYSIS OF DRAW GEAR AND
SCREW COUPLING OF RAILWAY VEHICLES
AS A FACTOR OF SAFETY AND TRAINS
BREAK RISK**

doctoral dissertation

Belgrade, 2021

Mentor:

dr Jovan Tanasković, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Članovi Komisije za ocenu i odbranu:

dr Vojkan Lučanin, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Dragan Milković, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Vladimir Popović, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Nenad Radović, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Dejan Momčilović, naučni saradnik,
Institut IMS, Beograd

Datum odbrane:

Zahvalnica

Laboratorijska ispitivanja oštećenih vešalica, čiji su rezultati korišćeni u ovom doktoratu urađeni su u akreditovanoj laboratoriji Instituta IMW, Lužnice, Kragujevac. Na omogućenom eksperimentalnom radu zahvaljujem direktoru Instituta IMW Andreju Radovanoviću, Nikoli Marinkoviću i ostalim kolegama u Institutu IMW.

Ispitivanja metalografske strukture urađena su u laboratoriji Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Profesoru dr Nenadu Radoviću, koji mi je omogućio ova ispitivanja, kao i ispitivanja fraktografije na Vojno tehničkom institutu, se zahvaljujem na podršci, korisnim savetima i pomoći tokom izrade doktorske disertacije.

Najveću zahvalnost dugujem svom mentoru, profesoru dr Jovanu Tanaskoviću na ukazanom poverenju, nesebičnoj pomoći, savetima i ohrabrenjima bez kojih ne bih uspela da završim ovaj rad.

Ispitivanja vešalica magnetnim česticama i određivanje mehaničkih karakteristika istih urađeni su u laboratorijama Instituta IMS, Beograd. Veliku zahvalnost dugujem dr Dejanu Momčiloviću, na omogućenim ispitivanjima, prijateljskim savetima, razumevanju i stručnim sugestijama u izradi teze.

Takođe, bih se zahvalila rukovodstvu železničkog operatera „Srbija Kargo“ a.d. koji su mi omogućili pristup i uvid u slučajevne raskinuća, bez kojih ova analiza ne bi bila potpuna.

Kolegama iz nekadašnjeg Instituta „Kirilo Savić“ i kolegama iz Akademije tehničko-umetničkih strukovnih studija, odsek Visoka železnička škola, se zahvaljujem na pomoći i podršci tokom izrade disertacije.

mr Marija Vukšić Popović

ANALIZA OTKAZA VUČNIH UREĐAJA ŽELEZNIČKIH VOZILA KAO FAKTOR BEZBEDNOSTI I RIZIKA OD RASKINUĆA VOZA

Rezime

U cilju poboljšanja bezbednosti i efikasnosti železničkog saobraćaja u eksploataciji, potrebno je redukovati učestanost raskinuća vozova, kao jedne od vrsta nesreća i nezgoda koje se mogu javiti u železničkom saobraćaju. Istraživanju uzroka raskinuća se često daje mali značaj, što ima za posledicu ponavljanje pojava raskinuća i dovodi do povećanja neplaniranih troškova u eksploataciji, koji bi inače mogli biti izbegnuti. Kako u stručnoj literaturi, pored analize pojedinačnih slučajeva raskinuća, ne postoji sveobuhvatna i sistematska analiza uzroka raskinuća, ovo istraživanje je aktuelno u domaćim uslovima eksploatacije, gde je prosečan broj raskinuća teretnih vozova u prethodnih 15 godina oko 40 slučajeva godišnje.

Primenom metode konačnih elemenata (MKE) modela izabranih elemenata vučnih uređaja i opterećenja koja se mogu očekivati u eksploataciji verifikovano je stanje elemenata utvrđeno ispitivanjem. Utvrđivanjem glavnih uzroka raskinuća voza predložene su odgovarajuće preventivne mere radi smanjenja ove štetne pojave, čime se direktno utiče na povećanje bezbednosti i sigurnosti u železničkom saobraćaju, i na smanjenje troškova u slučaju raskinuća u eksploataciji.

Ovo istraživanje predstavlja značajan doprinos nauci s obzirom da ne postoji sistematsko istraživanje u ovoj oblasti. Naučni doprinos ovog istraživanja se ogleda u kvantifikaciji parametara koji utiču na pojavu raskinuća i procenu nastanka raskinuća pri poznatim uslovima eksploatacije i stanja vučnih uređaja. Praktični značaj ove disertacije ogleda se u mogućnosti da se u određenoj meri unaprede postojeći postupci dijagnostike i opravke vučnih uređaja, na osnovu saznanja dobijenih analizom otkaza, čime bi se unapredilo održavanje i smanjili otkazi vučnih uređaja.

Ključne reči: železnica, raskinuće, bezbednost, vučni uređaji, metoda konačnih elemenata, kvačilo, tegljenik

Naučna oblast: Mašinstvo

Uža naučna oblast: Šinska vozila

UDK broj: UDK 629.4.028.1(043.3)

FAILURE ANALYSIS OF DRAW GEAR AND SCREW COUPLING OF RAILWAY VEHICLES AS A FACTOR OF SAFETY AND TRAINS BREAK RISK

Abstract

In order to improve the safety and efficiency of railway traffic in operation, it is necessary to reduce the frequency of train breaking, as one of the types of accidents and incidents that can occur in railway traffic. Research the causes of breaking is often of little importance, resulting in recurrences of breaking and leading to an increase of unplanned operating costs, which could otherwise have been avoided. In the railway literature, despite the analysis of individual cases of breaking of train, there is no comprehensive and systematic analysis of the causes of breaking, this research is authentic in domestic operating conditions, where the average number of breaking of freight trains in the previous 15 years is about 40 cases per year.

By applying Finite Element Method (FEM) on coupling system and loads that can be expected in operation, the condition of the elements determined by testing was verified. By determining the main causes of breaking of train, appropriate preventive measures have been proposed in order to reduce this occurrence, which directly affects the safety and security in railway traffic, and the can lead to reduction of costs in case of breaking of train in operation.

This research represents a significant contribution to science as there is no systematic research in this area. The scientific contribution of this research is in the quantification of parameters that affect the breaking of train and the assessment of the breaking under known operating conditions and the condition of coupling system. The practical significance of this dissertation is in the possibility to improve, to some extent, the existing procedures for diagnostics and repair of coupling systems, based on the findings of failure analysis, that would improve the maintenance and reduce failures of coupling system.

Key words: railway, breaking of train, safety, coupling system, finite element method, draw gear, screw coupling

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Rail vehicle

UDC classification: UDK 629.4.028.1(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Opšti kontekst i analiza stanja u predmetnoj naučnoj oblasti	3
1.2. Cilj i metode istraživanja.....	4
1.3. Očekivani naučni doprinosi.....	5
2. POKAZATELJI BEZBEDNOSTI U ŽELEZNIČKOM SAOBRAĆAJU	7
3. ANALIZA SLUČAJEVA RASKINUĆA.....	15
3.1. Karakteristike raskinuća	16
3.1.1. Broj raskinuća u kompoziciji	20
3.1.1. Mesto i režim raskinuća	21
3.1.2. Brzina pri raskinuću	23
3.1.3. Karakteristike raskinutih vozova	25
3.1.4. Uzroci raskinuća	27
3.1.5. Posledica raskinuća	29
3.1.6. Otkazi elemenata vučnog uređaja i naknadna oštećenja vagona	30
3.1.7. Raspodela raskinuća po mesecima.....	34
3.2. Karakteristična raskinuća	35
4. ANALIZA OTKAZA VUČNIH UREĐAJA.....	42
4.1. Stanje u naučnoj oblasti.....	42
4.2. Izbor elemenata za analizu	46
4.3. Metodologija analize loma	47
5. ANALIZA OTKAZA VEŠALICA.....	54
5.2. Priprema uzoraka za ispitivanje	55
5.2. Ispitivanje hemijskog sastava	57
5.3. Metalografski i fraktografski pregled	58
5.4. Mehanička ispitivanja.....	64
5.5. Razvoj i verifikacija numeričkog modela vešalica.....	68
6. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE VEŠALICA IZ EKSPLOATACIJE.....	74
6.1. Vizuelan pregled i dimenziona kontrola	74
6.2. Ispitivanje metodama bez razaranja	78
6.3. Ispitivanje hemijskog sastava	80
6.4. Mehanička ispitivanja.....	81
7. ANALIZA UTICAJNIH FAKTORA NA RASKINUĆE VOZA	88
7.1. Sastav i karakteristike voza	91
7.2. Upravljanje vozom	93
7.2.1. Tehničke mogućnosti upravljanja vučnog vozila.....	93
7.2.2. Ljudski faktor.....	94
7.3. Ispravnost vozila.....	95

7.4. Materijal	104
7.5. Intenzitet i učestanost opterećenja.....	105
8. PROCENA RIZIKA OD RASKINUĆA	108
8.1. Primena FMECA metode	108
8.2. Primena eksploatacionih podataka	115
8.3. Preporuke za smanjenje broja raskinuća	117
9. ZAKLJUČAK	122
LITERATURA.....	125

1. UVOD

U železničkom saobraćaju za obezbeđenje transporta robe i putnika neophodno je obezbediti ispravnost vozila i pouzdan rad voza, odnosno kompozicije železničkih vozila, kao celine. To zahteva obezbeđenje adekvatnog spoja vozila u kompoziciji pri svim uslovima eksploatacije. Spoj železničkih vozila se ostvaruje pomoću vučno-odbojnih uređaja koji ostvaruju mehaničku vezu između vozila u kompoziciji i štite konstrukciju vagona, teret ili putnike od prevelikih uzdužnih udara. Ovi uređaji održavaju spojene vagona na odstojanju, omogućavaju relativna pomeranja dva vagona usled oscilacija pri kretanju, kao i pri prolasku kroz krivine, prenošenje vučnih sila od lokomotive do poslednjeg vagona u kompoziciji i prenošenje uzdužnih sila (pritisnih i zatežućih pri kočenju usled neravnomernog kočenja svih vagona u kompoziciji) [1]. Pri pokretanju, kočenju i ranžiranju, mogu nastati i uzdužni udari.

Vučno-odbojne uređaje čine kvačila, tegljenici i odbojnici, u varijanti razdvojenih vučno-odbojnih uređaje koja se primenjuje na evropskima, a time i srpskim železnicama. U ovoj varijanti vučne uređaje čine kvačila i tegljenici. U većini zemalja u svetu (USA, Rusija, Kina, Australija, Japan i dr.) prihvaćen je sistem spajanja vozila objedinjenim vučno-odbojnim uređajima, takozvanim centralnim automatskim kvačilima, još na samom početku razvoja železnice. Na evropskim železnicama se primenjuju različite varijante objedinjenih vučno-odbojnih uređaja samo kod motornih vozova i sastava koji se ne razdvajaju, uglavnom samo u putničkom saobraćaju. Kod razdvojenih vučno-odbojnih uređaje se u tegljenike i odbojnice ugrađuju elastično-prigušujuć elementi, koji ublažavaju udare i deo kinetičke energije pretvaraju u toplotu. Ovi elastično-prigušujuć elementi delimično štite konstrukciju železničkih vozila od prevelikih opterećenja i eventualnih oštećenja [1].

Uzdužne sile koje se javljaju između vagona u kompoziciji, pri kretanju, mogu biti pritisne i zatežuće. Promenljive su tokom kretanja pa ih nazivamo i uzdužne dinamičke sile. Uzdužne dinamičke sile se uvek javljaju u vožnji, a najizraženije su pri vuči i kočenju. Pri vuči, vučne sile su najveće između vučnog vozila i prvog vozila iza njega, odnosno veće su u prednjem delu kompozicije. Pri kočenju, svako zaostajanje pojedinih rasporednika u delovanju, nejednak razvoj sile pritiska u svim kočnim cilindrima na vagonima, kao i nepodešenost kočne sile opterećenju vagona, dovodi do uzdužnih poremećaja manjeg ili većeg intenziteta u kompoziciji [2], odnosno do pojave uzdužnih dinamičkih sila.

U ekstremnim slučajevima uzdužne dinamičke sile mogu biti toliko velike da dovodu do raskidanja voza. Budući da se raskidanje voza uvek dešava u eksploataciji, mogućnost da dođe do raskidanja smanjuje bezbednost železničkog saobraćaja. Kako su kočnice železničkih vozila automatske indirektna, pri svakom raskidanju voza dolazi do automatskog kočenja svih raskinutih delova voza. Osim direktne materijalne štete u vidu polomljenih ili oštećenih delova pri raskinuću vozova dolazi i do indirektnih troškova u vidu potrebe za dodatnim vučnim vozilom i troškova usled zastoja u saobraćaju svih vozova koji u tom trenutku saobraćaju na pruzi gde je nastupilo raskinuće.

Povećanje konkurencije na tržištu železničkog transporta, ulaskom novih operatera, dovodi do izraženog ekonomskog aspekta svake nesreće i nezgode (u koje se ubraja i raskinuće voza) na javnoj železničkoj infrastrukturi kojom upravlja Akcionarsko društvo „Infrastruktura železnice Srbije“, Beograd. To, pored prvenstvenog razloga očuvanja bezbednosti saobraćaja, dovodi do potrebe smanjenja broja nesreća i nezgoda, pa time i do smanjenja broja raskinuća.

U cilju poboljšanja bezbednosti i efikasnosti železničkog saobraćaja u eksploataciji, potrebno je najpre utvrditi učestanost raskinuća vozova, kao jedne od vrsta nesreća i nezgoda koje se mogu javiti u železničkom saobraćaju. Prosečan broj raskinuća teretnih vozova operatera „Železnice Srbije“ (ŽS)

iznosi 40 slučajeva godišnje u petogodišnjem periodu od 2007. do 2011. godine, što predstavlja prosečno 7,2% raskinuća vozova godišnje u odnosu na ukupan broj nesreća i nezgoda u navedenom periodu [3]. Na osnovu evidencije raskinuća teretnih vozova „Srbija Kargo“ a.d., najvećeg železničkog teretnog operatera u Republici Srbiji, u periodu od 2016. do 2019. godine [4-6] broj raskinuća je ostao približno isti, oko 40 slučajeva godišnje, ali je udeo raskinuća u tehničkim uzrocima nesreća i nezgoda sa 20% u periodu od 2007. do 2011. godine povećan na 40%.

Iako broj raskinuća nije toliko brojan u odnosu na druge vrste nesreća i nezgoda, trend porasta ovih pojava, u relativnim pokazateljima bezbednosti saobraćaja, pokazuje stalnu prisutnost uzroka koji dovode do raskinuća. Istraživanju uzroka raskinuća se često daje mali značaj, što ima za posledicu ponavljanje pojava raskinuća i dovodi do povećanja neplaniranih troškova u eksploataciji, koji bi inače mogli biti izbegnuti. Uzroci koji mogu da dovedu do raskinuća su pojava udara, odnosno velikih uzdužnih dinamičkih sila, zamor materijala usled stalne izloženosti uzdužnim dinamičkim silama manjeg intenziteta, greške u materijalu delova vučnih uređaja, istrošenost delova, ispravnost vozila i dr. Uzroci koji dovode do povećanja uzdužnih sila u vozu mogu biti različiti [7]: karakteristike sistema kočnice, stanje i tip vučno-odbojnih uređaja, sastav i dužina kompozicije, režim kočenja, način upravljanja, odnosno vožnje kompozicije i dr.

Iako su u svetu dosta razmatrana pitanja uzdužne dinamike voza, ona su pre svega uslovljena lokalnim karakteristikama opreme (vrstama vučno-odbojnih uređaja) i uslova eksploatacije. U većini zemalja u svetu primenjen je sistem zakvačivanja vozila automatskim kvačilima. U Evropi je bilo više pokušaja i postoje različita tehnička rešenja za prelazak na automatsko kvačilo. Primena automatskog kvačila u Evropi nije zaživela, pre svega iz ekonomskih razloga. Razna prelazna rešenja, koja su kompatibilna sa zavojnim kvačilom postoje, ali njihova cena nije konkurentna. Kako je životni vek šinskih vozila oko 40 godina, ne može se skoro očekivati neka bitnija promena u pogledu promene vučno-odbojnih uređaja. Stoga će u ovom radu biti razmatrani samo razdvojeni vučno-odbojni uređaji čeonog tipa, jer se koriste u teretnom saobraćaju na javnoj železničkoj mreži u Srbiji i na ostalim evropskim železnicama, u okviru koje postoji interoperabilnost vozila.

Praćenjem broja i vrste nesreća i nezgoda kao osnovnog pokazatelja bezbednosti železničkog saobraćaja moguće je ustanoviti rizik od raskinuća u železničkom saobraćaju na javnoj železničkoj infrastrukturi Republike Srbije. Utvrđivanjem glavnih uzroka raskinuća voza mogu se predložiti odgovarajuće preventivne mere i smanjiti ova štetna pojava, čime bi se direktno uticalo na povećanje bezbednosti i sigurnosti u železničkom saobraćaju i na smanjenje troškova u slučaju raskinuća u eksploataciji.

Veliki je broj značajnih elemenata koji utiču i definišu pojmove bezbednosti i sigurnosti železničkog saobraćaja, pa je veoma teško ove elemente izraziti potpuno jednoznačno i nedvosmisleno. Može se govoriti samo o veličinama pojedinih elemenata ili pokazatelja koji karakterišu bezbednost saobraćaja. Jedan od tih pokazatelja su nezgode i nesreće. Broj i vrsta nezgoda i nesreća, iskazanih kroz nominalni ili relativni iznos, predstavljaju osnovni pokazatelj bezbednosti železničkog saobraćaja [8]. Nesreća je neželjen ili neplaniran iznenadan događaj ili specifičan niz takvih događaja koji imaju štetne posledice, a nezgoda je događaj koji je povezan sa saobraćajem vozova i negativno utiče na bezbednost saobraćaja [9]. Raskinuće voza, iako negativno utiče na bezbednost saobraćaja, po pravilu, nema kao posledicu smrtni slučaj, niti veoma veliku materijalnu štetu, pa se svrstava u nezgode.

Prosečan broj nesreća i nezgoda pri železničkom saobraćaju operatera „Železnice Srbije“ u petogodišnjem periodu od 2007. do 2011. godine iznosio je 558,2 godišnje. U navedenom periodu je bilo ukupno 210 slučajeva raskinuća i na putničkim i na teretnim vozovima, što iznosi prosečno 42 slučaja raskinuća vozova godišnje. Teretni saobraćaj je dominantan što se tiče raskinuća, pa se od tog broja prosečno 40 slučajeva desilo na teretnim vozovima. Učešće raskinuća teretnih vozova u

ukupnom broju nesreća i nezgoda u navedenom periodu iznosi prosečno 7,2% godišnje, odnosno raskinuća teretnih vozova čine oko 20% nesreća i nezgoda koji su nastupili usled tehničkih uzroka.

Učešće raskinuća teretnih vozova u ukupnom broju nesreća i nezgoda u „Srbija Kargo“ a.d., kao najvećem teretnom prevozniku na javnoj železničkoj infrastrukturi Republike Srbije, u periodu od 2016. do 2019. godine je prosečno isto kao pre deset godina – oko 40 slučajeva raskinuća godišnje [4-6]. Međutim, kako je došlo do smanjenja ukupnog broja nesreća i nezgoda (i kako nisu uključene nesreće i nezgode u putničkom saobraćaju, kao u prethodnom periodu) učešće raskinuća teretnih vozova u ukupnom broju nesreća i nezgoda u navedenom periodu iznosi prosečno 14,1% godišnje. Raskinuća teretnih vozova u periodu od 2016. do 2019. godine čine oko 40% nesreća i nezgoda koji su nastupili usled tehničkih uzroka, što pokazuje da su raskinuća, odmah posle iskliznuća, najbrojniji tehnički uzroci nesreća i nezgoda.

Isti broj ili slična struktura nesreća i nezgoda ne mora značiti i isto stanje bezbednosti saobraćaja, obzirom na mogući različiti obim i strukturu saobraćaja, odnosno prevoza. Stoga se, kada su u pitanju nesreće i nezgode, sve više koriste relativni pokazatelji bezbednosti saobraćaja, koji u sebe uključuju tradicionalne apsolutne pokazatelje svedene na odgovarajuće pokazatelje obima rada (na primer, broj nesreća po milion netotonskim ili brutotonskim kilometrima).

Da bi utvrdili stanje bezbednosti u teretnom železničkom saobraćaju u Republici Srbiji u odnosu na druge zemlje u okruženju, najrelevantnije je uporediti odnos relativnih pokazatelja bezbednosti saobraćaja u Republici Srbiji i zemljama EU (Evropske unije). Broj nesreća po milion netotonskim kilometrima operatera „Železnice Srbije“ u periodu od 2007. do 2011. godine bio je oko 5 puta veći, u istom periodu, od broja nesreća po milion netotonskim kilometrima u EU. Na nivou Evropske unije Direktiva 2016/798, koja je zamenila Direktivu 2004/49/ES, uređuje evidenciju železničkog saobraćaja na jedinstveni način za zemlje članice. Kako evidencija o nezgodama (a time ni o raskinućima) nije vođena u EU, zastupljenost raskinuća vozova u EU nije poznata.

Od ukupnog broja raskinuća teretnih vozova u periodu od 2007. do 2011. godine, 80,6% slučajeva čine raskinuća kada voz saobraća samo sa vučnom lokomotivom, a 19,4% slučajeva kada voz saobraća sa vučnom lokomotivom i potiskivalicom. Osnovni uzrok raskinuća teretnih vozova koji saobraćaju sa vučnom lokomotivom i potiskivalicom je nepostojanje sinhronizacije rada vučne lokomotive i potiskivalice [3]. Pri raskinuću teretnih vozova koji saobraćaju samo sa vučnom lokomotivom, u periodu od 2007. do 2011. godine, najčešće je dolazilo do oštećenja vučnih uređaja [3]: kvačila u oko 30% slučajeva od ukupnih oštećenja i tegljeničkog uređaja u oko 46% slučajeva. Oštećenje ostalih delova bilo je u malom obimu. Na kvačilu je najčešće dolazilo do oštećenja na stremenu, vešalicama, vretenu, a ređe su se javljala oštećenja navrtke i svornjaka. Na tegljeničkom uređaju najčešće je dolazilo do oštećenja kuke, tegljenice, kao i vođica i klizača na delu noseće konstrukcije.

Direktna materijalna šteta po raskinuću, u periodu od 2007. do 2011. godine, procenjena je na oko 100.000 dinara, a zastoj saobraćaja na deonici trajao je prosečno oko 3 do 4 sata. Kao najčešći uzrok raskinuća, u periodu od 2007. do 2011. godine, navođen je uglavnom zamor materijala, dok su ostali uzroci neadekvatan sastav voza, neadekvatno stanje kvačila (labavo) i način vožnje [3]. Kao i u prethodnom periodu, pri raskinuću teretnih vozova od 2017. do 2019. godine dolazi do oštećenja elemenata vučnih uređaja.

1.1. Opšti kontekst i analiza stanja u predmetnoj naučnoj oblasti

Slučajevi raskinuća se kod nas, kao i u svetu, posmatraju svaki za sebe, kao posebni slučajevi, što je kod malog broja raskinuća (iskazanog kroz relativne pokazatelje bezbednosti saobraćaja) dobar pristup. Zbirna analiza vrši se u godišnjim izveštajima o bezbednosti pri čemu su analizirani: broj raskinuća, ravnomernost nastajanja, vreme i mesto raskinuća (na pruzi i u vozu), uslovi nastanka,

uzroci raskinuća i karakteristični slučajevi. Ova analiza je prevashodno sprovedena sa saobraćajnog aspekta, bez analize suštinskih uzroka raskinuća i bez konkretnih preporuka koje imaju za cilj smanjenje broja raskinuća. Periodični izveštaji o bezbednosti železničkih operatera i statistički izveštaj o nesrećama i nezgodama [9] zasnivaju se na izveštajima o istrazi pojedinačnih raskinuća, čiji je cilj utvrđivanje posledica nezgode, visine materijalne štete, smetnji u saobraćaju, neposrednog i očiglednog uzroka nezgode (bez dublje analize suštinskih uzroka) i utvrđivanja krivice i odgovornosti.

Parametri vezani za raskinuća vozova nisu jedinstveni za sve železničke sisteme i stanja železničkih vozila, a u velikoj meri zavise i od koncepcije i kvaliteta održavanja. U tom smislu, parametri vezani za raskinuća vozova su specifični za lokalne železničke sisteme i moraju se posebno definisati i kvantifikovati, što za železnički saobraćaj u Republici Srbiji nije učinjeno, pa su dalja istraživanja u ovoj oblasti potrebna i aktuelna.

Jedan od značajnih uzroka raskinuća vozova je stanje elemenata vučnih uređaja: zamor usled dinamičkog opterećenja uzdužnim silama u kompoziciji, grešaka u materijalu, istrošenost delova itd. Ovi uzroci utvrđeni su analizom otkaza vučnih uređaja u pojedinačnim slučajevima [11-14] za delove vučnog uređaja: vešalice, kuke tegljenika i dr. Primenom forenzičke analize polomljenih delova, koja obuhvata spektrometarsku analizu, metalografska ispitivanja i ispitivanja mehaničkih osobina, utvrđuje se da li postoji odstupanje materijala od koga su napravljeni delovi ili njegovih mehaničkih osobina. Takođe se mogu utvrditi primenjeni tehnološki procesi pri izradi i održavanju, kao i uslovi eksploatacije. Spektrometarskom analizom delova se vrši hemijska analiza radi provere hemijskog sastava materijala. Metalografskim ispitivanjima se vrši makroskopska i mikroskopska ispitivanja strukture, utvrđuje mikrostruktura elemenata i povezuje sa proizvodnim postupcima i osobinama ispitanih elemenata. Ispitivanja mehaničkih osobina na polomljenim delovima ili na ispitnim epruvetama utvrđuju se osobine materijala koje se porede sa osobinama datim u relevantnim propisima.

U svom eksperimentalnom radu Mohammadi i dr. [11] su pokazali uticaj promene dinamičkog opterećenja na životni vek kuke tegljenika. Na elementu kvačila - vešalicama je za utvrđen lom usled zamora materijala, prouzrokovan inicijalnom pukotinom, [12] analiziran uticaja izvora koncentracije napona u uslovima zamora. Nový i dr. [13] su utvrdili na osnovu izvršenih mehaničkih ispitivanja materijala nisku udarnu žilavost slomljene kuke tegljenika, i u daljoj analizi razmatrali uticaj smanjenja udarne žilavosti sa sniženjem temperature na oko -20°C , na dinamičku izdržljivost i pojavu krtog loma. Ulewicz i dr. [14] pri analizi loma kuke tegljenika razmatraju uticaj koncentracije napona na nastanak zamora materijala. Posebno se javlja problem odstupanja koaksijalnosti pravca dejstva uzdužnih sila od ose vučnog uređaja [13, 14] što dovodi do povećanja koncentracije napona.

Danas postoji veliki broj metoda razvijen za analizu pouzdanosti i ocenu rizika. U cilju povećanja pouzdanosti mehaničkih komponenti železničkih vozila u okviru evropskih propisa razvijen je standard EN 50126-1 [69] koji omogućava izračunavanje karakterističnih vrednosti pouzdanosti, dostupnost, održivost i sigurnost (RAMS), kako bi se utvrdila pouzdanost i sigurnost železničkog voznog parka. Odgovarajućom metodom moguće je ove postupke primeniti za analizu vučnih uređaja i na osnovu nje izvršiti ocenu rizika od raskinuća.

1.2. Cilj i metode istraživanja

Sveobuhvatni cilj istraživanja je analiza uticaja vučnih uređaja i drugih parametara na raskinuće kompozicije. Ovako postavljen cilj omogućava određivanje uzroka otkaza vučnih uređaja primenom različitih forenzičkih metoda. Na osnovu ovih saznanja može da se poboljša tehnologija održavanja železničkih vozila, što bi dovelo do smanjenja broja raskinuća, a time i do smanjenja troškova i prekida saobraćaja na železničkoj mreži. Time se povećava optimalno iskorišćenje železničkih vozila u saobraćaju i iskorišćenje železničke infrastrukture.

Sekundarni cilj istraživanja je određivanje uticajnih parametara koje mogu da dovedu do raskinuća i davanje preporuka koje mogu da smanje pojavu istih.

Specifični ciljevi istraživanja su:

- identifikacija uticajnih parametara na raskinuće voza,
- kvalitativna i kvantitativna ocena uticaja parametara koji dovode do raskinuća,
- analiza loma izabranih elemenata vučnih uređaja i utvrđivanje odstupanja izmerenih karakteristika materijala od propisanih,
- razvijanje numeričkog modela metodom konačnih elemenata (MKE) za praćenje naponskog i deformacionog stanja izabranih elemenata vučnih uređaja,
- eksperimentalna verifikacija numeričkih modela izabranih elemenata vučnih uređaja i moguća korekcija ili dopuna modela,
- kvantifikacija uticaja stanja vučnih uređaja na raskinuća.

Određenje predmeta i utvrđivanje ciljeva istraživanja predstavljenih hipotezom da bezbednost železničkog saobraćaja sa aspekta raskinuća zavisi od više parametara, od kojih je najvažniji stanje vučnih uređaja, uslovljavaju korišćenje sledećih naučno-istraživačkih metoda i tehnika istraživanja:

- analitičke metode - klasifikacije, kojima će se omogućiti sistematizacija postojećih saznanja o problemu istraživanja iz postojeće literature (rezultati, praktična, naučna, tehnička i druga dostignuća),
- metode indukcije, kojim se vrši rekonstrukcija nastanka događaja koji su prethodili otkazu,
- statistička metoda obrade prikupljenih podataka i informacija,
- metode generalizacije, kojim se utvrđuju najbitniji uzroci nastanka otkaza, a vrši na osnovu prikupljenih podataka (npr. vizuelna inspekcija oštećenja i mesta nastanka istog).
- eksperimentalne metode ispitivanja bez razaranja, kojima se vrše ispitivanja npr. penetranstkom metodom ili metodom magnetnih čestica (radi utvrđivanja postojanje oštećenja izabranih elemenata vučnih uređaja).
- eksperimentalne metode, kojima se vrše ispitivanja mehaničkih osobina materijala na ispitnim epruvetama ili izabranim elementima vučnih uređaja, a utvrđene osobine se porede sa osobinama datim u relevantnim propisima.
- spektrometerska ispitivanja, kojom se vrši hemijska analiza radi provere propisanih vrednosti,
- metalografska ispitivanja, kojima se vrši makroskopska i mikroskopska ispitivanja strukture, utvrđuje mikrostruktura elemenata i povezuje sa proizvodnim postupcima i osobinama ispitanih elemenata.
- metode konačnih elemenata (MKE), koja će se koristiti za proračun deformacija i naponskog stanja izabranih elemenata vučnih uređaja,
- metode komparacije, kojom će se omogućiti poređenje rezultata dobijenih primenom numeričke analize MKE sa vrednostima dobijenim pri ispitivanju izabranih elemenata vučnih uređaja.

1.3. Očekivani naučni doprinosi

Očekivani rezultat ovog istraživanja je utvrđivanje parametara koji utiču na pojavu raskinuća, kao i veličinu njihovog uticaja. Istraživanja su zasnovana na praćenju raskinuća u periodu preko 10 godina, pa podaci vezani za otkaze, koji dovode do raskinuća, predstavljaju adekvatnu osnovu za procenu nastanka raskinuća u narednom periodu. Kako su podaci zasnovani na stanju teretnih železničkih vozila i uslova eksploatacije i održavanja u prethodnom periodu, potrebno je stalno praćenje zbog mogućih promena njihovih vrednosti.

Primenom MKE modela izabranih elemenata vučnih uređaja i opterećenja koja se mogu očekivati u eksploataciji verifikovaće se njihovo stanje utvrđeno ispitivanjem.

Praktični značaj ove disertacije ogleda se u mogućnosti da se u određenoj meri unaprede postojeći postupci dijagnostike i opravke vučnih uređaja, na osnovu saznanja dobijenih analizom otkaza, čime bi se unapredilo održavanje i smanjili otkazi vučnih uređaja.

Navedeni cilj istraživanja predstavljaće značajan doprinos nauci s obzirom da ne postoji sistematsko istraživanje u ovoj oblasti. Slučajevi raskinuća se u svetu i kod nas posmatraju pojedinačno, ali u slučaju značajnog broja raskinuća, potrebno je izvršiti detaljnu i sveobuhvatnu sistematsku analizu, i dati preporuke za sprovođenje postupaka radi smanjenja broja raskinuća.

Metodologija istraživanja koja će biti primenjena u ovoj disertaciji biće korisna za buduća istraživanja pouzdanosti vučnih uređaja železničkih vozila i rizika od raskinuća železničkih kompozicija.

2. POKAZATELJI BEZBEDNOSTI U ŽELEZNIČKOM SAOBRAĆAJU

Prema Zakonu o bezbednosti u železničkom saobraćaju [20] bezbednost železnice „obuhvata uslove koje ispunjava železnički sistem i železnički radnici, kao i druge uslove od značaja za ostvarivanje bezbednog i nesmetanog odvijanja železničkog saobraćaja“ [20]. Zakon definiše posebne pokazatelje - Zajedničke pokazatelje bezbednosti (ZPB) na osnovu kojih se u železničkom saobraćaju sprovodi procena nivoa bezbednosti. Zajednički pokazatelji bezbednosti su definisani u Pravilniku o zajedničkim pokazateljima bezbednosti u železničkom saobraćaju [8]. Prema ovom pravilniku ZPB su različite vrste značajnih nesreća, pri čemu „nesreća je neželjen ili neplaniran iznenadan događaj ili specifičan niz takvih događaja koji ima štetne posledice (sudari, iskliznuća, nesreće na putnom prelazu u istom nivou, nesreće sa učesćem lica izazvane železničkim vozilima u pokretu, požari i sl.)“ [8].

Prema Pravilniku o istraživanju, evidentiranju, statističkom praćenju i objavljivanju podataka o nesrećama i nezgodama „nezgoda je događaj koji je povezan sa saobraćajem vozova i negativno utiče na bezbednost saobraćaja (izuzev nesreće)“ [9]. Prema ovom pravilniku u nezgode se pored izbegnutih sudara, prolaza voza pored signala itd., ubrajaju i raskinuća voza, i o njima se sprovodi istraga.

Zajednički pokazatelji bezbednosti (ZPB) se iskazuju u ukupnom i relativnom broju [8] koji se izražava u odnosu na broj voznih kilometara. Kada govorimo o bezbednosti železničkog saobraćaja ona nije jednoznačno određena jer je, prema navedenim propisima, definiše više parametara. Stoga se pri poređenju bezbednosti različitih železničkih uprava može vršiti samo poređenje odgovarajućih pokazatelja po ukupnom ili relativnom broju. Pre donošenja propisa [8] i [9], pokazatelj bezbednosti železničkog saobraćaja bile su broj i vrsta vanrednih događaja, koji su predstavljali „udes ili nezgoda u kome je jedno ili više lica poginulo ili povređeno ili je izazvana materijalna šteta, odnosno u kome je došlo do prekida, ugrožavanja ili otežavanja železničkog saobraćaja“ [21]. Pri tome je prema Pravilniku o načinu evidentiranja, statističkog praćenja i objavljivanja podataka o vanrednim događajima nastalim u železničkom saobraćaju i o drugim pojavama od značaja za bezbednost železničkog saobraćaja [21] „nezgoda, vanredni događaj u kome je jedno ili više lica lakše povređeno, u kome je nastala manja materijalna šteta ili u kome je nastao kraći prekid saobraćaja“. Prema odredbama tog Pravilnika svi vanredni događaji se dele na udese i nezgode u koje spada i raskinuće.

Da bi se sistematizovalo i komparativno sagledalo stanje bezbednosti različitih železničkih uprava, koje su imale različite pokazatelje bezbednosti, na nivou Evropske unije doneta je najpre Direktiva 2004/49/ES [26] o bezbednosti u železnici kojom se pojam i struktura nesreća uređuje na jedinstveni način. Danas ovu oblast uređuje Direktiva 2016/798 [27] o bezbednosti železnice kojom se definiše razvijanje zajedničkih bezbednosnih ciljeva (ZPB) i zajedničkih bezbednosnih metoda (ZPM) koji treba da zamene nacionalne propise. Sprovođenje zajedničkih bezbednosnih metoda (ZPM) definisano je u propisu 402/2013 [71]. Upravo na ovaj način se usklađuju organi i postupci kojima se obezbeđuje bezbednost u državama članicama kroz definisanje odgovornosti, principa sertifikacije svih elemenata bezbednosti i formiranjem nacionalnog organa za bezbednost, kao i organa za istragu nesreća i nezgoda. U Republici Srbiji nacionalni organ za bezbednost železničkog saobraćaja je Direkcija za železnice. Organ za istragu nesreća i nezgoda je Centar za istraživanje nesreća u saobraćaju (CINS) osnovan u skladu sa Zakonom o istraživanju nesreća u vazдушnom, železničkom i vodnom saobraćaju [25].

Zajednički pokazatelji bezbednosti (ZPB) kod nesreća su ukupan i relativni broj značajnih nesreća, kao što su sudari sa vozilima i preprekama unutar slobodnog profila, iskliznuća vozova, nesreće na putnim prelazima, nesreće u kojima su stradala lica izazvane železničkim vozilima, požari u

železničkim vozilima i ostale nesreće. Pored navedenih drugu grupu ZPB kod nesreća su ukupan i relativan broj teško povređenih i smrtno stradalih osoba prema vrsti nesreće [8].

Uvođenjem zajedničkih pokazatelja bezbednosti mogu se sistematizovati i porediti strukture nesreća i nezgoda (NIN) na železnicama koje primenjuju naveden sistem, što u prethodnom periodu nije bilo moguće. Na osnovu definisanih ZPB formirane su i baze podataka Centra za statistiku Evropske unije Eurostat, koje u saradnji sa nacionalnim telima za bezbednost evidentiraju značajne nesreće nastale u železničkom saobraćaju zemalja članica.

Isti broj ili slična struktura nesreća i nezgoda ne znači isto stanje bezbednosti saobraćaja, jer se obim i struktura saobraćaja mogu razlikovati. Stoga je za sagledavanje ZPB značajno upoređivati relativne pokazatelje bezbednosti saobraćaja, odnosno svesti broj nesreća i nezgoda na odgovarajući obima rada. Prema Pravilniku o zajedničkim pokazateljima bezbednosti u železničkom saobraćaju [8] relativni pokazatelji se izražavaju u odnosu na broj voznih kilometara, dok su se do 2015. godine u Izveštajima o bezbednosti i funkcionisanju železničkog saobraćaja na području "Železnice Srbije" relativni pokazatelji izražavali preko netotonskih kilometara, brutotonskih kilometara¹, voz kilometara itd.

Pri analizi bezbednosti teretnog saobraćaja, posebno raskinuća, najbitniji relativni pokazatelj je broj nesreća ili nezgoda u brutotonskim kilometrima. Iako se netotonski kilometri češće primenjuju u analizi, nesreće i nezgode se dešavaju i u kompozicijama sastavljenim od natovarenih vozila, kao i od praznih vozila, pa je tačnije vršiti upoređivanje u odnosu na bruto-tonske kilometre.

Ako posmatramo bezbednost železničkog saobraćaja u vremenskom periodu od poslednjih 10 godina možemo da uočimo promenu pokazatelja bezbednosti koji proističu iz promene propisa, ali i promenu vrednosti samih pokazatelja, odnosno bezbednosti železničkog saobraćaja (tabela 2.1). Sa restrukturiranjem „Železnica Srbije“ a. d. (ŽS) od 10.08.2015. godine formirana su četiri izdvojena društva: „Železnice Srbije“ a.d, društvo za upravljanje železničkom infrastrukturom „Infrastruktura železnice Srbije“, društvo za železnički prevoz robe „Srbija Kargo“ i društvo za železnički prevoz putnika „Srbija Voz“. Prosečan broj nesreća i nezgoda (tada definisanih kao vanredni događaji) na ŽS u petogodišnjem periodu od 2007. do 2011. godine iznosi 558,2 godišnje [10] (tabela 2.1), dok je broj NIN „Srbija Kargo“ u periodu od 2018. do 2020. [4-6] skoro upola manji. Pri tome se ove vrednosti ne mogu upoređivati, jer se „Srbija Kargo“ bavi samo prevozom tereta i evidentira NIN nastale na vozilima koja poseduje ili prevozi, dok je javno železničko preduzeće „Železnice Srbije“ do 2015. godine obavljalo i putnički i teretni saobraćaj i u svojim Izveštajima o bezbednosti obuhvatalo sve nesreće i nezgode na javnoj železničkoj mreži Srbije. Ukupan broj nesreća i nezgoda na celoj javnoj železničkoj mreži Srbije je veći od prikazanog u tabeli 2.1, jer uključuje i druge operatere.

Prosečan broj nesreća i nezgoda operatera „Železnice Srbije“ u periodu od 2007. do 2011. godine iznosi 558,2 godišnje. U navedenom periodu je bilo ukupno 210 slučajeva raskinuća na putničkim i na teretnim vozovima, što iznosi prosečno 42 slučaja raskinuća vozova godišnje (slika 2.1). Prosečno 95,8% raskinuća vozova operatera „Železnice Srbije“ u periodu od 2007. do 2011. godine (slika 2.1) desilo se na teretnim vozovima. Ostalih 4,2% slučajeva, odnosno manje od 2 slučaja godišnje, desilo se na putničkim vozovima. Stoga je dalje praćenje i analiza slučajeva raskinuća vršena u teretnom saobraćaju.

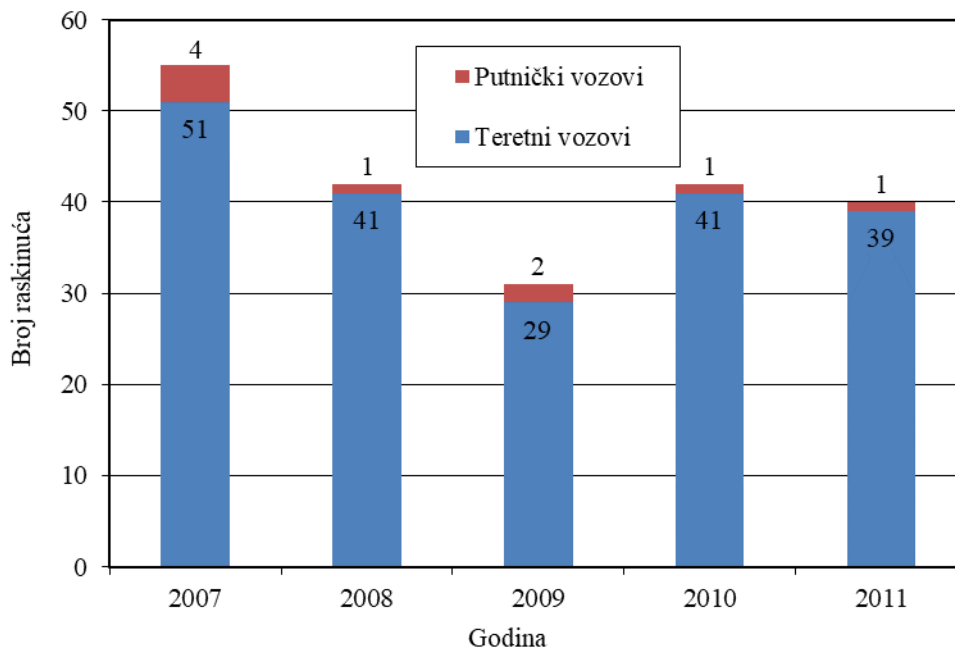
Učešće raskinuća teretnih vozova u ukupnom broju nesreća i nezgoda na „Srbija Kargo“ a.d. u periodu od 2016. do 2019. godine [4-6] pokazuje da je došlo do relativnog povećanja broja raskinuća u teretnom saobraćaju u odnosu na ukupan broj NIN na 13,9% (slika 2.2) sa prosečno 7,2% kod

¹ Netotonski kilometri predstavljaju proizvod neto mase voza u tonama pomnožen sa brojem pređenih kilometara tog voza. Brutoonski kilometri predstavljaju proizvod bruto mase voza u tonama sa pređenim kilometrima tog voza.

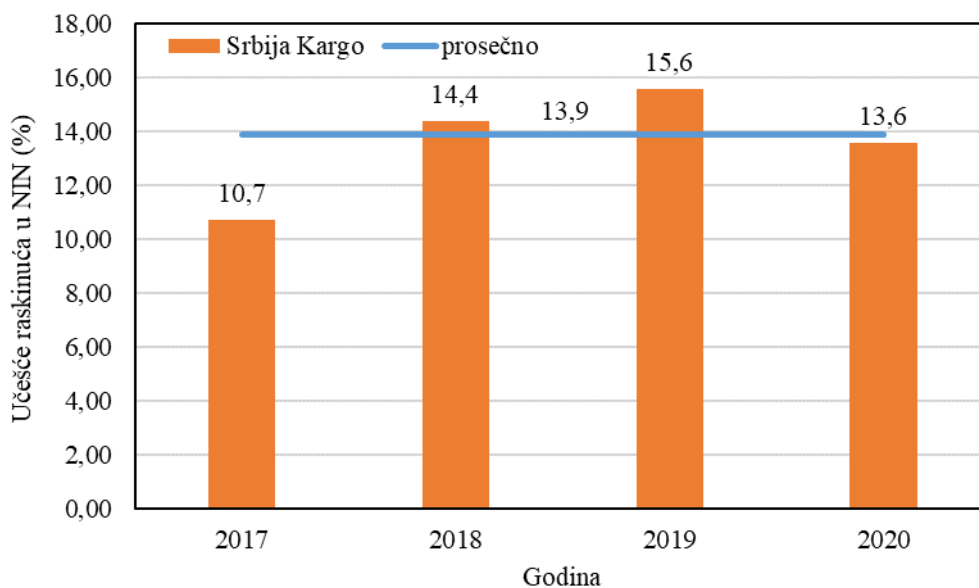
operatera „Železnice Srbije“ u periodu od 2007. do 2011. godine (tabela 2.1). Pri tome treba imati u vidu da su u evidenciji ukupnog broja nesreća i nezgoda operatera „Železnice Srbije“ uključeni slučajevi i za putničke i teretne vozove. Kako se u Izveštajima o bezbednosti nije vršila raspodela vanrednih događaja na one koje se dešavaju u putničkom i teretnom saobraćaju u tabeli 2.1 sveden je ukupan broj vanrednih događaja u periodu od 2007 do 2011. godine na javnoj železničkoj mreži Srbije na obim teretnog saobraćaja. Takođe treba imati u vidu i da je obim teretnog saobraćaja u tom periodu bio oko 30% veći nego sada.

Tabela 2.1. Bezbednost saobraćaja izražena preko ukupog i relativnog broja nesreća i nezgoda u periodu od 2007. do 2012. i od 2016. do 2020. godine

Godina	Broj nesreća i nezgoda (NIN)	Obim teretnog saobraćaja (milion brutotonskih kilometri)	Broj NIN u odnosu na obim teretnog saobraćaja (broj NIN/milion brutotonskih kilometara)	Broj raskinuća teretnih vozova	Učešće raskinuća vozova u NIN (%)
Ukupan saobraćaj (teretni i putnički) „Železnice Srbije“					
2007	653	8372	0,078	51	7,8
2008	541	8197	0,066	41	7,6
2009	528	5802	0,091	29	5,5
2010	574	6753	0,085	41	7,1
2011	495	6781	0,073	39	7,9
Prosečno 2007-2012.	558,2	7181	0,078	40,2	7,2
Teretni saobraćaj „Srbija Kargo“ a.d.					
2016	213	4979	0,043	37	17,4
2017	392	5501	0,071	42	10,7
2018	285	5.087	0,056	41	14,4
2019	244	4.565	0,053	38	15,6
2020	177	4.178	0,042	24	13,6
Prosečno 2016-2020.	262,2	4.862	0,054	36,4	13,9



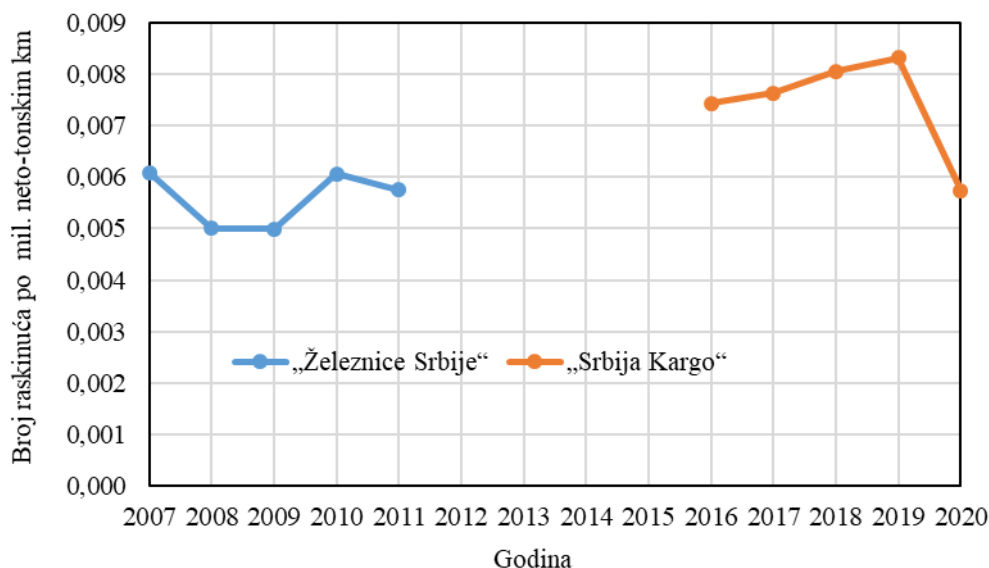
Slika 2.1. Učestalost raskinuća u putničkom i teretnom saobraćaju „Železnice Srbije“



Slika 2.2. Učestalost raskinuća u teretnom saobraćaju „Srbija Kargo“ a.d.

Učešće raskinuća teretnih vozova u broju nesreća i nezgoda u odnosu na obim teretnog saobraćaja u periodu 2007-2011. koji iznosi prosečno 7,2% godišnje obuhvata i NIN u putničkom saobraćaju ne može se porediti sa podacima „Srbija Kargo“ od 2016-2020.godine.

Relativan pokazatelj raskinuća vozova u teretnom saobraćaju u odnosu na obim teretnog saobraćaja pokazuje povećanje raskinuća u teretnom saobraćaju „Srbija Kargo“, posebno u periodu 2016-2019. godine u odnosu na raskinuća „Železnice Srbije“ u periodu 2007-2011. Godine 2020. postignuto je značajno smanjenje raskinuća u teretnom saobraćaju „Srbija Kargo“, čime je nivo raskinuća približno vraćen na period od 2007-2011 (slika 2.3).



Slika 2.3. Učestalost raskinuća u teretnom saobraćaju „Železnice Srbije“ i „Srbija Kargo“

Ako pogledamo teretni železnički saobraćaj u zemljama u Evropskoj uniji (EU), vidimo da se na nivou EU evidentiraju samo značajne nesreće u teretnom saobraćaju [22], ali ne i nezgode (tabela 2.2). Radi sagledavanja relativnih pokazatelja bezbednosti saobraćaja u Republici Srbiji i zemljama EU [28] potrebno je uporediti broj nesreća teretnih vozova po milion netotonskim kilometrima. U oba perioda 2007- 2011. i 2016-2019. godine broj nesreća po milion brutotonskim kilometrima operatera „Železnice Srbije“ i „Srbija Kargo“ bio je oko 5 puta veći u odnosu na odgovarajući pokazatelj bezbednosti teretnog saobraćaja u EU (tabele 2.2 i 2.3). Ovaj podatak treba uzeti sa rezervom jer kod operatera „Železnice Srbije“ pri evidenciji nesreća nije razdvajan putnički i teretni saobraćaj, kao i da su u EU evidentirane samo značajne nesreće. Prema direktivi 2016/798 [27] Železničkoj agenciji Evropske unije ERA (European Union Agency for Railways) se prijavljuju samo značajne nesreće koje imaju najmanje jednu poginulu ili najmanje pet teško povređenih osoba ili značajna oštećenja (u iznosu od najmanje dva miliona evra) vozila, infrastrukture ili životne sredine, kao i druge nesreće koje mogu da utiču na bezbednost saobraćaja.

Na nivou Evropske unije se, prema Direktivi 2016/798, evidencija o železničkom saobraćaju uređuje na jedinstveni način za zemlje članice. Kako evidencija o nezgodama nije vođena na EU, ne znamo koliko je bilo raskinuća vozova. Relativni pokazatelj bezbednosti teretnog železničkog saobraćaja u EU iskazan kroz odnos broja nesreća u odnosu na obim teretnog saobraćaja, pokazuje smanjenje u odnosu na vrednosti od pre 10 godina (tabela 2.2).

Učešće nezgoda u vanrednim događajima „Železnice Srbije“ u periodu 2007-2011. čini oko 76% (tabela 2.3). U periodu 2016-2019. kod operatera „Srbija Kargo“ uočava se znatno veće učešće nesreća u NIN oko 43%. U navedenim nezgodama uključeni su i slučajevi raskinuća. Učešće raskinuća teretnih vozova u nezgodama u periodu 2007-2011. manji je od 10%, dok u periodu 2016-2019. iznosi prosečno 32%, a dostiže i 40%. Ovo ukazuje, da iako je došlo do smanjenja brojčanih i relativnih zajedničkih pokazatelja bezbednosti (ZPB), nije došlo do smanjenja određenih vrsta nezgoda, kao što je raskinuće.

Tabela 2.2. Bezbednost saobraćaja izražen preko ukupog i relativnog broja značajnih nesreća u teretnom saobraćaju Evropske unije (EU)

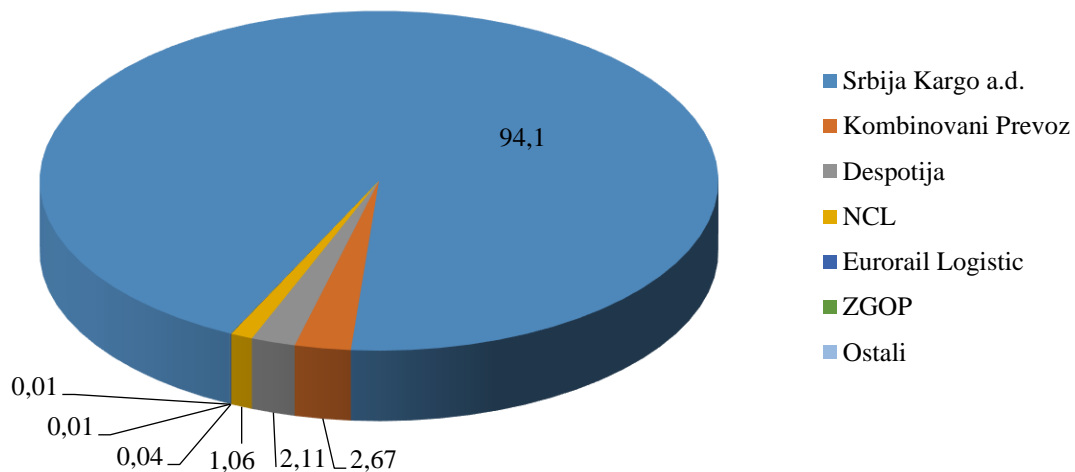
Godina	Broj značajnih nesreća u teretnom saobraćaju EU [22]	Obim teretnog saobraćaja EU [milion netotonskih kilometri] [28]	Broj značajnih nesreća u odnosu na obim teretnog saobraćaja EU [broj nesreća/milion netotonskih kilometara]
2007	3916	448414	0,0087
2008	3473	439451	0,0079
2009	3021	360900	0,0084
2010	2292	390911	0,0071
2011	2224	419659	0,0064
Prosečno 2007- 2011.	3177	411867	0,0077
2016	1795	380424	0,0047
2017	1848	392793	0,0047
2018	1721	405922	0,0042
2019	1552	396873	0,0039
2020	-	-	-
Prosečno 2016- 2019.	1729	394003	0,0044

Da bi sveobuhvatno sagledali pojavu i učestalost raskinuća u železničkom saobraćaju u Republici Srbiji (RS) moraju se uzeti u obzir i promene koje su nastupile od 2015. godine sa dolaskom drugih železničkih operatera osim nasleđenog „Srbija Kargo“ nastalog rekonstrukcijom „Železnica Srbije“. Udeo prevoznika na tržištu železničkog prevoza u Republici Srbiji može da se proceni prema brutotonskim kilometrima prevoznika, ali i netotonskim kilometrima i voznim kilometrima na godišnjem nivou. Prema Izveštaju o regulisanju tržišta železničkih usluga Direkcija za železnice u 2018. godini [23] udeo prevoznika „Srbija Kargo“ a.d. iznosio je 94,1% (slika 2.4) u odnosu na ostvarene brutotonske kilometre železničkog teretnog prevoza na javnoj železničkoj infrastrukturi RS. Tokom 2019. godine došlo je do primetne promene u udelu prevoznika, pa je udeo najvećeg domaćeg prevoznika „Srbija Kargo“ a.d. iznosio 85,4% (slika 2.5) u odnosu na ostvarene brutotonske kilometre. Porastao je udeo ostalih privatnih prevoznika sa 5,9 % na 14,5%, na primer udeo „Kombinovanog prevoza“ u 2019. godini iznosio je 7,8%, a prevoznika Neo Cargo Logistic (NCL) 3,8% [24]. Udeo prevoznika iskazan prema ostvarenim voznim kilometrima i netotonskim kilometrima pokazuje istu tendenciju kao i prema brutotonskim kilometrima, uz manja odstupanja. Stoga možemo za posmatrane godine uzeti da su pokazatelji vezani za bezbednost saobraćaja

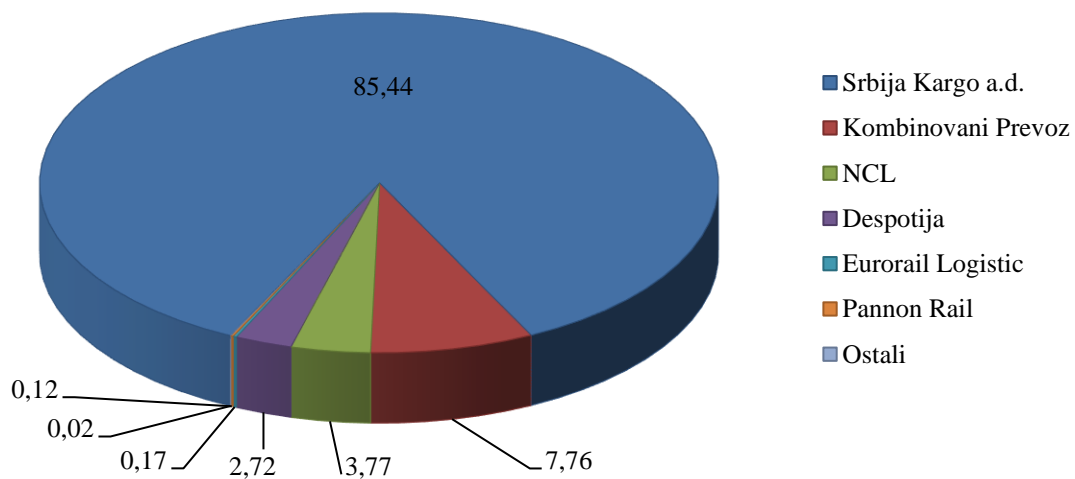
prevoznika „Srbija Kargo“ a.d. reprezentativni, jer je udeo ostalih prevoznika, iako u porastu, još uvek mali.

Tabela 2.3. Bezbednost saobraćaja izražen preko ukupnog i relativnog broja nesreća u periodu od 2007. do 2012. i od 2016. do 2020. godine

Godina	Broj nesreća i nezgoda (NIN)	Broj nesreća	Broj nesreća u odnosu na obim teretnog saobraćaja (broj nesreća/milion brutotonskih kilometara)	Udeo nezgoda u ukupnom broju NIN (%)	Učešće raskinuća teretnih vozova u nezgodama (%)
Ukupan saobraćaj (teretni i putnički) „Železnice Srbije“					
2007	653	158	0,019	75,8	10,3
2008	541	105	0,013	80,6	9,4
2009	528	112	0,019	78,8	7,0
2010	574	161	0,024	72,0	9,9
2011	495	130	0,019	73,7	10,7
Prosečno 2007- 2011.	558,2	133	0,019	76,1	9,5
Teretni saobraćaj „Srbija Kargo“ a.d.					
2016	213	119	0,024	44,1	39,4
2017	392	170	0,031	56,6	18,9
2018	285	161	0,032	43,5	33,1
2019	244	149	0,033	38,9	40,0
2020	177	-	-		
Prosečno 2016- 2019.	262,2	150	0,031	42,9	32,4



Slika 2.4. Procentualno učešće prevoznika u odnosu na ostvarene brutotonske kilometre u 2018. [23]



Slika 2.5. Procentualno učešće prevoznika u odnosu na ostvarene brutotonske kilometre u 2019. [24]

3. ANALIZA SLUČAJEVA RASKINUĆA

Analiza slučajeva raskinuća obuhvatila je ukupno 313 slučajeva, u dva perioda od nekoliko godina:

- od 2007. do 2011. godine analizirano je 210 slučajeva raskinuća železničkog operatera „Železnice Srbije“ [35] i
- od 2018-2020. analizirano je 103 slučajeva raskinuća teretnih vozova operatera „Srbija Kargo“ a.d [36].

Primenom metode indukcije, na osnovu izveštaja o istrazi i islednog materijala, kao i uvida u stanje na terenu i iskustva iz eksploatacije i održavanja, sagledane su okolnosti koje su prethodile raskinućima. Na osnovu toga definisani su faktori koji mogu da imaju uticaj na pojavu raskinuća. Prikupljeni podaci i informacije su obrađene statistički radi kvantifikacije faktora. Metodom generalizacije su utvrđeni najbitniji uzroci nastanka raskinuća i kritični delovi vučnog uređaja na kojima najčešće dolazi do raskinuća. Izvršena analiza slučajeva raskinuća treba da nam ukaže kada i gde treba da očekujemo pojavu raskinuća, da bi mogli da predložimo preventivne mere u cilju redukcije raskinuća.

Analiza slučajeva raskinuća koji su se desili u železničkom saobraćaju na javnoj železničkoj mreži RS ima za cilj:

- klasifikaciju slučajeva raskinuća, čime će se omogućiti sistematizacija postojećih informacija o uzrocima nastanka, okolnostima i faktorima, kao i posledicama raskinuća;
- kvantifikacija strukture, mesta, uslova i okolnosti nastanka raskinuća sa ciljem utvrđivanja zakonitosti koje mogu dovesti do povećanja verovatnoće otkaza;
- definisanje faktora koji utiču na pojavu raskinuća i njihovu kvantifikaciju;
- sagledavanje uticaja raskinuća na bezbednosti železničkog saobraćaja, uzimajući u obzir i ostale uslove funkcionisanja železničkog saobraćaja koji su karakteristični za javnu železničku mrežu RS i vozna sredstva koja saobraćaju na istoj;
- predviđanje pojave raskinuća pod sličnim okolnostima funkcionisanja železničkog saobraćaja i za slična vozna sredstva na osnovu kojih je analiza izvršena;
- predlaganje mera kojim bi se uticalo na faktore koji doprinose nastanku raskinuća radi smanjenja broja istih.

Železnički operater u teretnom saobraćaju „Srbija Kargo“ a.d. kao fizički naslednik materijalnih i ljudskih resursa dogodišnjeg i jedinog operatera „Železnice Srbije“ ima kontinuitet u radu i iskustvo u ljudskim resursima. Vozni park „Srbija Kargo“ a.d. zasnovan je na voznom parku „Železnice Srbije“ uz određene izmene, pri čemu je vozni park teretnih vagona smanjen sa oko 8500 u periodu 2007 -2011. godine na oko 4000 vozila 2020. godine. Od ovog broja, u eksploataciji se (zbog revizije, opravke i dr.) nalazi oko 1900 kola. Vučna vozila su takođe preuzeta od „Železnice Srbije“ ali ne u celosti, tako da su sa oko 330 vučnih vozila u periodu 2007 -2011. godine smanjena na oko 230 vozila 2020. godine. Vučna vozila su u proseku stara preko 40 i 50 godina, dok su jedino nove lokomotive 16 komada Vectron lokomotive nabavljene 2020. godine. Za potrebe ugovorenih poslova „Srbija Kargo“ a.d. iznajmljuje određen broj vozila od stranih železničkih operatera u Evropi. Određen broj stranih vozila, prema međunarodnim ugovorima, a od 2006. godine i prema Opštem ugovoru o korišćenju teretnih kola OUK (GCU- General Contract of Use for Wagons) [31] saobraća i na javnoj železničkoj mreži RS pod operaterom „Srbija Kargo“ a.d. Stoga svako razmatranje koje uključuje železnički vozni park nema isključivo nacionalni karakter i nije jednoznačno određeno.

Tačnost rezultata analize zasniva se na tačnosti podataka utvrđenih u istražnom postupku. Podaci navedeni u ovoj analizi zasnovani su na komisijским izveštajima o istrazi i islednom materijalu [35,

36], koji obuhvata: prijave raskinuća, teretnice (obrazac S-59), procene kolske štete (obrazac TK-37) podatke sa brzinomerne trake, zapisnike o saslušanju, izjave mašinovođa i drugih radnika ili izveštaje o nepravilnostima u radu, uverenja o zdravstvenoj sposobnosti i stručnoj osposobljenosti radnika, listove osoblja vučnog vozila (sa radnim opterećenjem mašinovođe pre nezgode), prethodni nalaz stanja na voznim sredstvima, a ukoliko se radi o stranim kolima i prijavu o isključenju stranih kola (obrazac TK-72) i drugo.

Pri analizama pojedinačnih slučajeva raskinuća u nekim slučajevima nije bilo moguće utvrditi sve karakteristike od značaja za analizu usled nedostataka ili nedovoljno preciznih podataka (na primer pogrešni nazivi oštećenih delova, nedostatak dokumentacije itd.). Na tačnost podataka uticali su i subjektivni faktori, kao što je stručna osposobljenost u oblasti loma za utvrđivanje uzroka raskinuća, kao i strukovna i službena pozicija članova komisije.

Pri analizi su uzeti samo relevantni slučajevi raskinuća, što znači da nisu uzimani u obzir raskinuća koji su prouzrokovani raskvačivanjem poluautomatskih kvačila, kao i ostali specijalni slučajevi koji čine 3,3% slučajeva. Broj raskinuća vozova usled raskvačivanja poluautomatskih kvačila je veoma mali, budući da se radi o stranim kolima koja saobraćaju na prugama ŽS, i oni nisu detaljno razmatrani.

3.1. Karakteristike raskinuća

Kako se samo jedan do dva slučaja raskinuća godišnje desi se na putničkim vozovima, analiza slučajeva raskinuća vršena je u samo za teretni saobraćaj. U periodu od 2007. do 2011. godine prosečan broj raskinuća teretnih vozova „Železnice Srbije“ iznosio je 40,2 slučaja godišnje, dok je u periodu od 2016. do 2020. godine prosečan broj raskinuća teretnih vozova „Srbija Kargo“ a.d. nešto manji i iznosi 36,4 slučaja godišnje (tabela 3.1) [4-6]. Smanjenje ukupnog broja nesreća i nezgoda u periodu 2016-2020. povećava udeo raskinuća teretnih vozova u NIN na prosečno 13,9% godišnje.

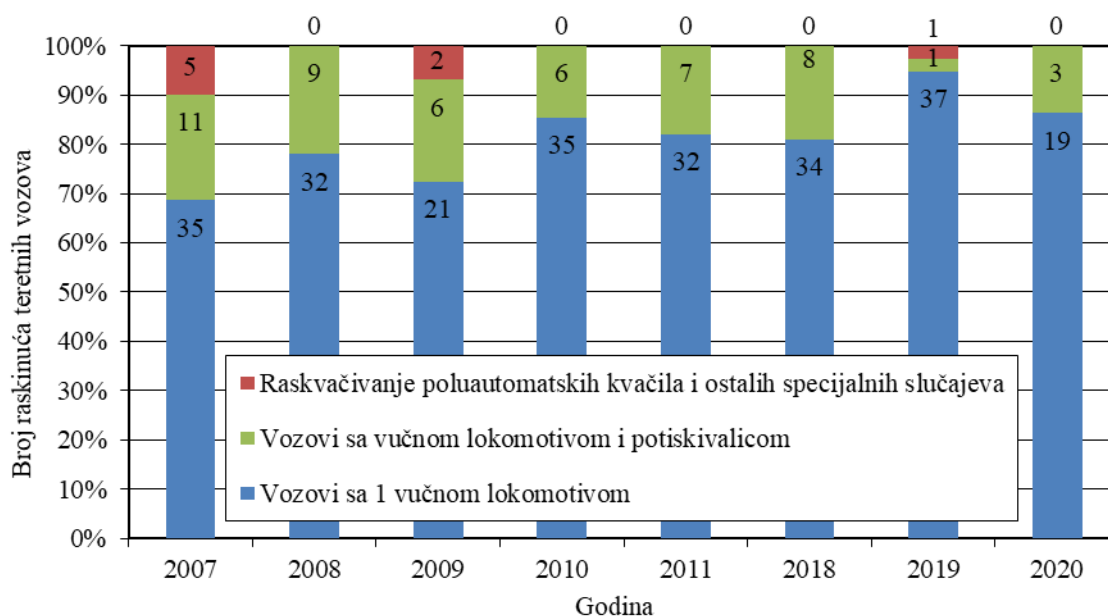
Pri analizi raskinuća teretnih vozova jasno se izdvajaju dve vrste raskinuća prema uzroku nastanka ali i posledicama:

- kada teretni voz saobraća samo sa vučnom lokomotivom i
- kada teretni voz saobraća sa vučnom lokomotivom i potiskivalicom.

Od ukupnog broja raskinuća teretnih vozova u periodu od 2007. do 2011. godina 80,6% slučajeva čine raskinuća kada voz saobraća samo sa vučnom lokomotivom, a 19,4% slučajeva kada voz saobraća sa vučnom lokomotivom i potiskivalicom. U periodu 2018-2020. broj raskinuća kada voz saobraća sa vučnom lokomotivom i potiskivalicom je smanjen na 11,7%, što može da bude i posledica smanjenja broja vozova koji saobraćaju u ovom režimu (tabela 3.1 i slike 3.1 i 3.2). Osnovni uzrok raskinuća teretnih vozova koji saobraćaju sa vučnom lokomotivom i potiskivalicom je nepostojanje sinhronizacije rada vučnih vozila. Stoga slučajevi raskinuća vozova koji saobraćaju sa vučnom lokomotivom i potiskivalicom neće biti predmet ove analize, u pogledu karakteristika i uzroka raskinuća. Kod raskinuća vozova koji saobraćaju sa vučnom lokomotivom i potiskivalicom u trećini slučajeva dolazi do raskidanja voza na dva ili tri mesta. Kao uzrok raskinuća u oko 65% slučajeva se u periodu od 2007. do 2011. godine konstatuje neadekvatno upravljanje vučnim vozilima i to u vidu neposluživanja auto-stop uređaja i budnika (46%), nepravilnog potiskivanja voza, odnosno neusaglašene vožnje vučnog vozila i potiskivalice, nepravilnog rukovanja kočnikom i drugo.

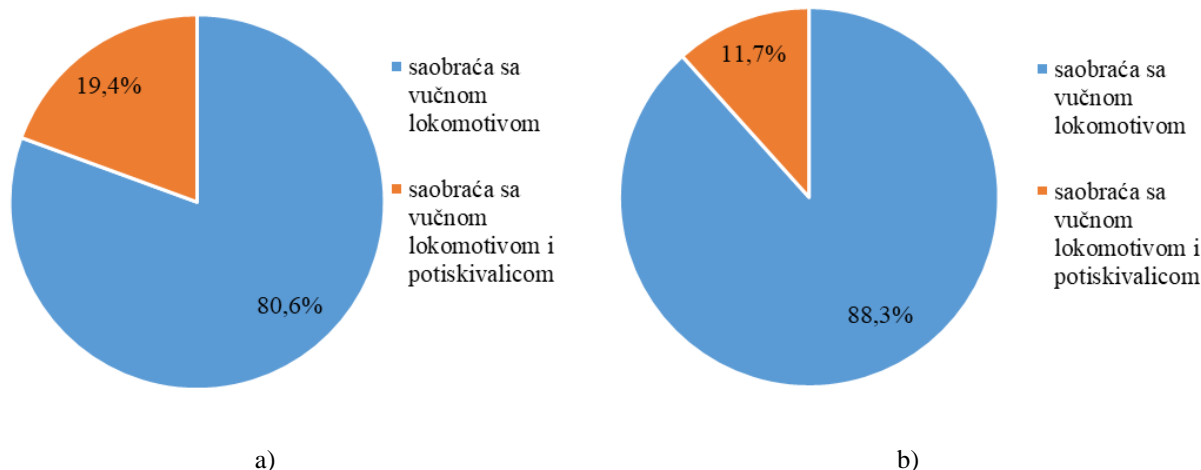
Tabela 3.1. Karakteristične vrste raskinuća teretnih vozova u periodu od 2007. do 2011. i od 2018. do 2020. godine

Godina	Broj raskinuća	Broj raskinuća kada voz saobraća samo sa vučnom lokomotivom ²	Broj raskinuća pri manevarisanju	Broj raskinuća pri kojima su oštećena strana vozila	Broj raskinuća pri kojima su oštećene lokomotive
Teretni saobraćaj „Železnice Srbije“					
2007	51	35	4	10	7
2008	41	32	1	20	6
2009	29	21	1	8	8
2010	41	35	4	12	11
2011	39	32	1	14	8
Prosečno	40,2	31	2,2	12,8	8,0
Teretni saobraćaj „Srbija Kargo“ a.d.					
2018	41	33	6	19	5
2019	38	37	15	17	8
2020	24	21	4	12	2
Prosečno	36,4	30,3	8,3	16,0	5,0



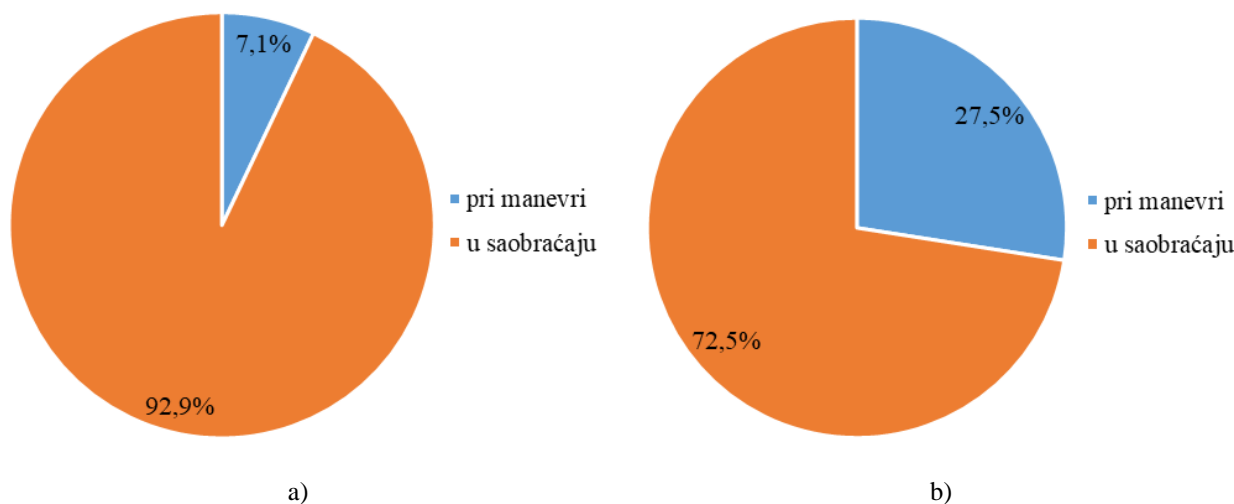
Slika 3.1. Broj raskinuća teretnih vozova bez i sa potiskivalicom operatera „Železnice Srbije“ i „Srbija Kargo“ a.d.

² U ovaj broj raskinuća, takođe, nisu uzeti u obzir slučajevi raskvačivanja poluautomatskih kvačila i ostali specijalni slučajevi raskinuća, kojih je, na primer, bilo pet tokom 2007. godine.



Slika 3.2. Učestanost raskinuća teretnih vozova bez i sa potiskivalicom, a) od 2007. do 2011. godine, b) od 2018. do 2020. godine

Pri analizi raskinuća teretnih vozova koji saobraćaju samo sa vučnom lokomotivom mogu se uočiti slučajevi raskinuća koji se dešavaju u saobraćaju i oni koji se dešavaju pri manevrisanju, pri čemu se po pravilu, radi o guranju manevarskog sastava. Povećan broj raskinuća pri manevrisanju (27,5%) u periodu od 2018. do 2020. (slika 3.3 b) je posledica toga što se u prethodnom periodu (slika 3.3 a) deo slučajeva raskinuća pri manevrisanju nije ubrajao u nezgode u saobraćaju, nego se vodio kao vanredni događaji pri manevrisanju.

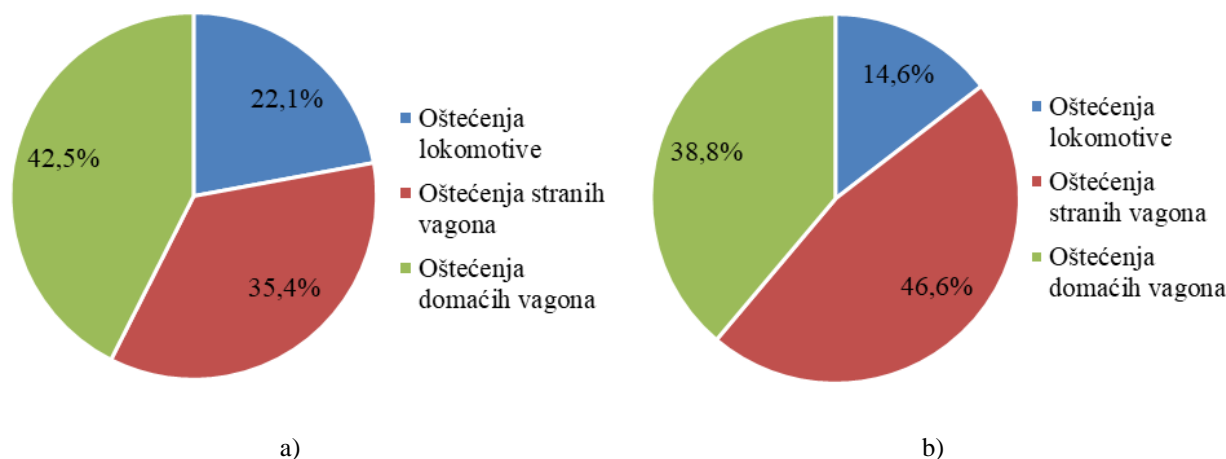


Slika 3.3. Učestanost raskinuća teretnih vozova pri manevri i u saobraćaju, a) od 2007. do 2011. godine, b) od 2018. do 2020. godine

U poslednje tri godine uočava se porast broja stranih vagona koji su oštećeni pri raskinuću sa 35,4% na 46,6% u odnosu na period 2007-2011. godine (slika 3.4). Ovo je pre svega posledica većeg broja stranih kola koja saobraćaju na javnoj železničkoj infrastrukturi RS. Kako se teretni vozni park operatera „Srbija Kargo“ smanjio u odnosu na park „Železnica Srbije“, za potrebe ostvarenja ugovorenih obaveza određen broj kola je iznajmljen od stranih operatera.

Teretni železnički saobraćaj se usled razvoja privrede, već duži niz decenija odvija kroz različite zemlje, vozovima koji u sastavu imaju železnička teretna kola različitih operatera iz više zemalja. Za obezbeđenje ovakvog međunarodnog teretnog železničkog saobraćaja na teritoriji Evrope, bilo je potrebno uvesti odgovarajuće zakonske i tehničke preduslove. To je ostvareno 2006. godine uvođenjem Opšteg ugovora za korišćenje teretnih kola OUK (GCU) [31], koji danas ima više od 600 potpisnica u 20 zemalja, sa preko 600000 vagona koji saobraćaju u skladu sa njim [32]. OUK

propisuje postupanje sa teretnim kolima između korisnika prevoza i imaoaca (vlasnika) kola, i definiše upotrebu, korišćenje i nadzor nad teretnim kolima. Uslovi tehničkog pregleda i nivo tehničkog kvaliteta kola pri razmeni između železničkih uprava su definisani u prilogu 9 ovog ugovora, a katalog tehničkih neispravnosti teretnih kola dat je u prilogu 12 [31]. Njime su sva oštećenja nastala usled nezgode (a ne habanjem), sa skorašnjim lomom, bez tragova zamora, pripisuju neadekvatnom rukovanju teretnim kolima od strane železničkog preduzeća (ŽP) korisnika vozila. Tako se i svi lomovi pri raskinućima, u kojima nema jasnih tragova zamora ili habanja na slomljenim delovima, smatraju odgovornošću železničkog operatera korisnika.

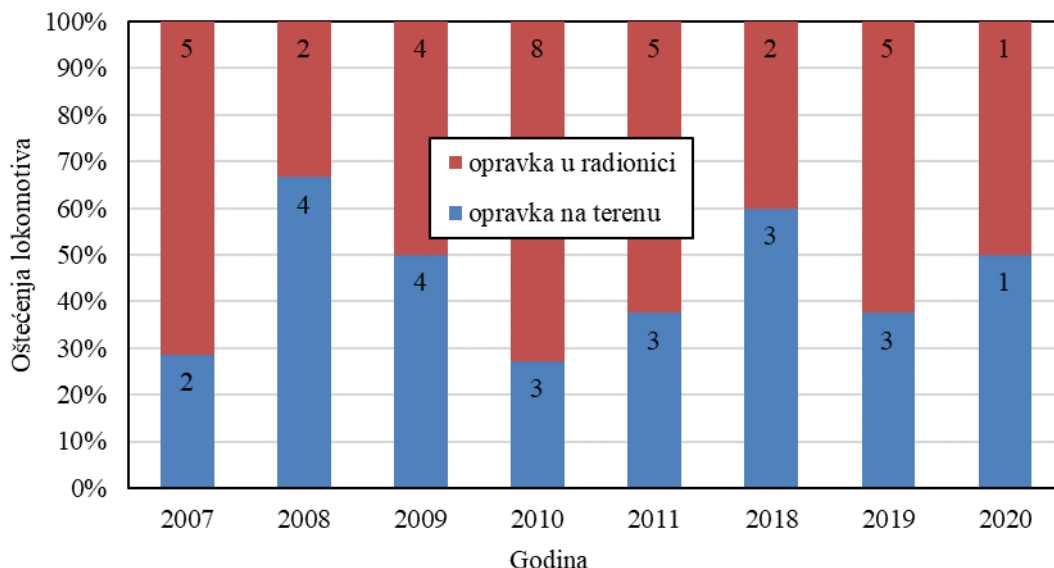


Slika 3.4. Učestanost oštećenih lokomotiva, stranih i domaćih vagona pri raskinućima, a) od 2007. do 2011. godine, b) od 2018. do 2020. godine

Pri raskinuću teretnih vozova može doći do oštećenja železničkih vozila, kako vučenih, tako i vučnih. Procenat oštećenja vučnih uređaja na lokomotivama je smanjen sa 22,1% u periodu od 2007. do 2011. na 14,6% u poslednje tri godine. Ovaj podatak pokazuje da se veliki broj raskinuća dešava upravo između lokomotive i prvih kola u vozu. Pri tome preko 50% oštećenih lokomotiva mora biti upućeno u radionicu (slika 3.5), jer je došlo do otkaza vučnih uređaja na tegljeniku (najčešće na kuki tegljenika ili viljuškastoj tegljenici), što dodatno otežava uspostavljanje saobraćaja posle raskinuća.

U daljoj analizi razmatraće se relevantni slučajevi raskinuća teretnih vozova, odnosno kada teretni voz saobraća samo sa vučnom lokomotivom. Analiza relevantnih slučajeva raskinuća teretnih vozova izvršen je sa više aspekata:

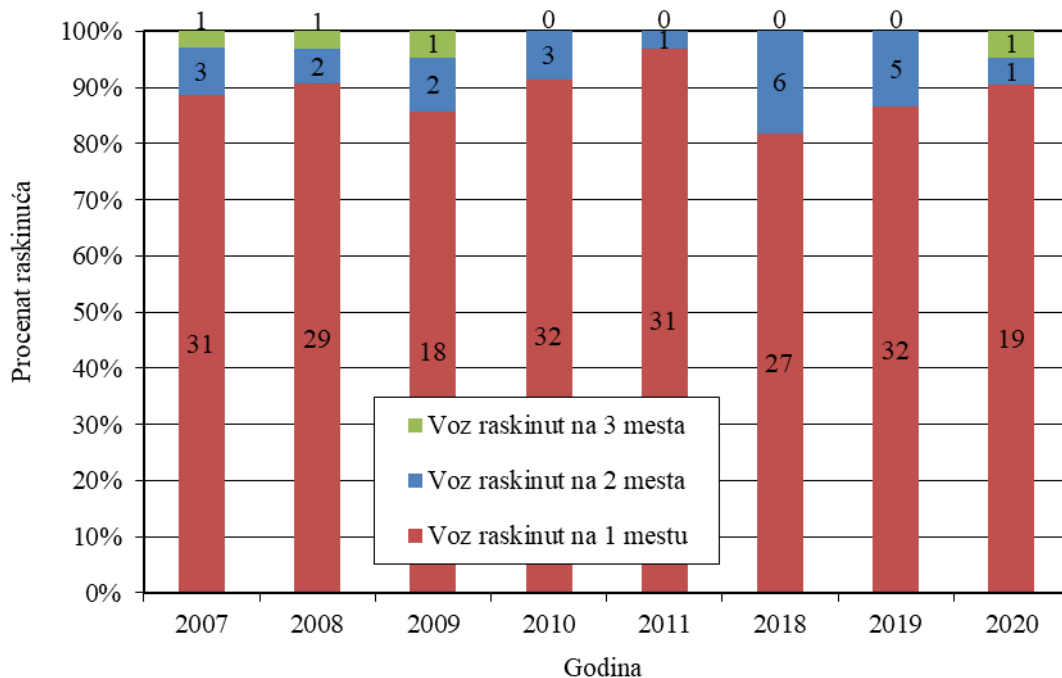
- broja raskinutih mesta u kompoziciji,
- mesta raskinuća u odnosu na dužinu kompozicije,
- režima vožnje pre raskinuća,
- brzine pre raskinuća,
- karakteristika raskinutih vozova (broj vagona, dužina i masa voza i drugo),
- uzroka raskinuća,
- posledica raskinuća,
- nastalih oštećenja i drugih.



Slika 3.5. Oštećenja lokomotiva pri raskinućima

3.1.1. Broj raskinuća u kompoziciji

Pri raskinuću voza može doći do raskidanja na jednom ili više mesta u kompoziciji. Broj raskinuća teretnih voza koji saobraćaju samo sa vučnom lokomotivom u posmatranom periodu (slika 3.6) na više od dva mesta kreće se od 9% do 14%. Raskinuća na tri mesta retko se dešavaju.



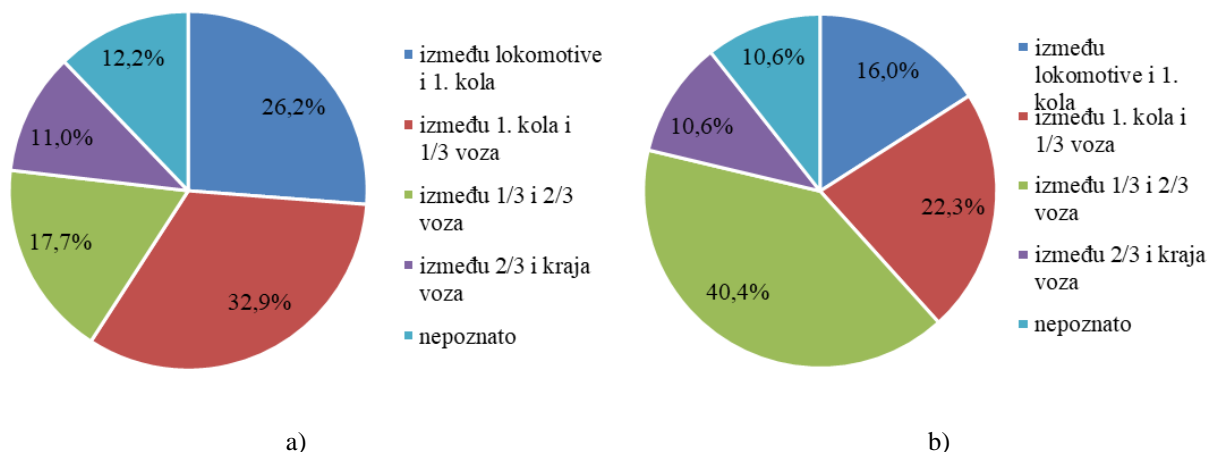
Slika 3.6. Broj raskinuća na teretnim vozovima

Pojava raskinuća na više od jednog mesta u kompoziciji uslovljena je podužnim oscilacijama uzdužnih dinamičkih sila u vozu, a obično je izazvana diskonuitetom u karakteristikama vozila u

kompoziciji. Najčešće je to različita kočna masa, odnosno sila kočnja, jednog ili grupe vagona u vozu.

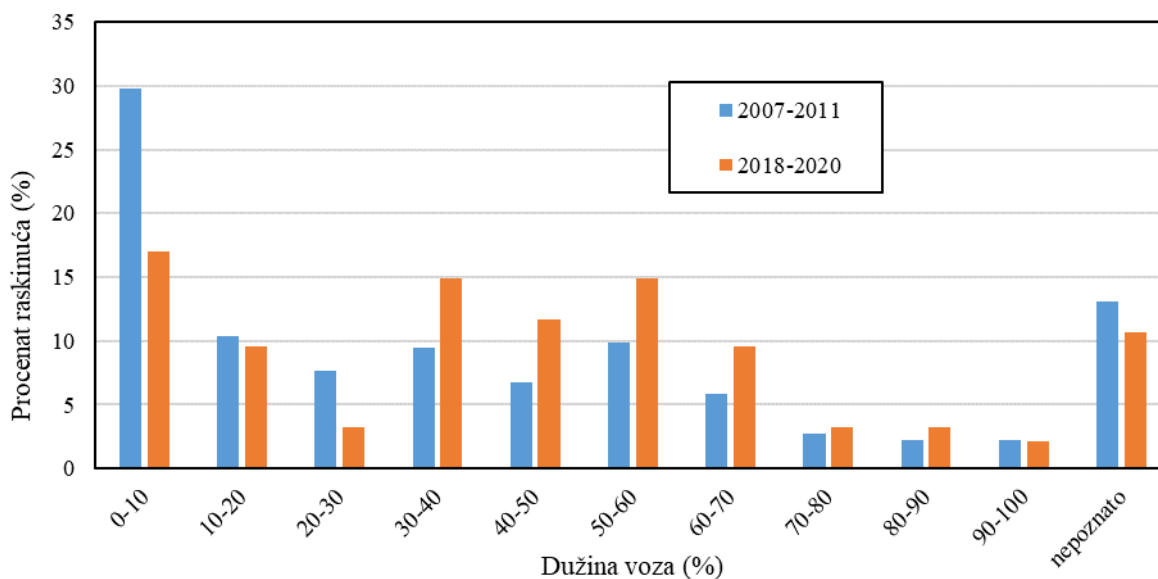
3.1.1. Mesto i režim raskinuća

Podaci o raskinućima teretnih vozova u periodu od 2007. do 2011. godine, pokazuju da se u 59,1% slučajeva raskinuće desi na prvoj trećini dužine voza, od čega 26,2% čine raskinuća između vučne lokomotive i prvog vagona (slika 3.7a), a između prvog vagona i prve trećine dužine voza 32,9%. Oko 17,7% raskinuća u vozu dešavaju između prve i druge trećine dužine voza. Malo drugačija raspodela mesta raskinuća javlja se u periodu od 2018. do 2020. godine, gde se u 38,3% slučajeva raskinuće desi na prvoj trećini dužine voza, od čega 16,0% čine raskinuća između vučne lokomotive i prvog vagona (slika 3.7b). Na drugoj trećini dužine voza dešava se 40,4% raskinuća, a na zadnjoj trećini voza 10,6% raskinuća.



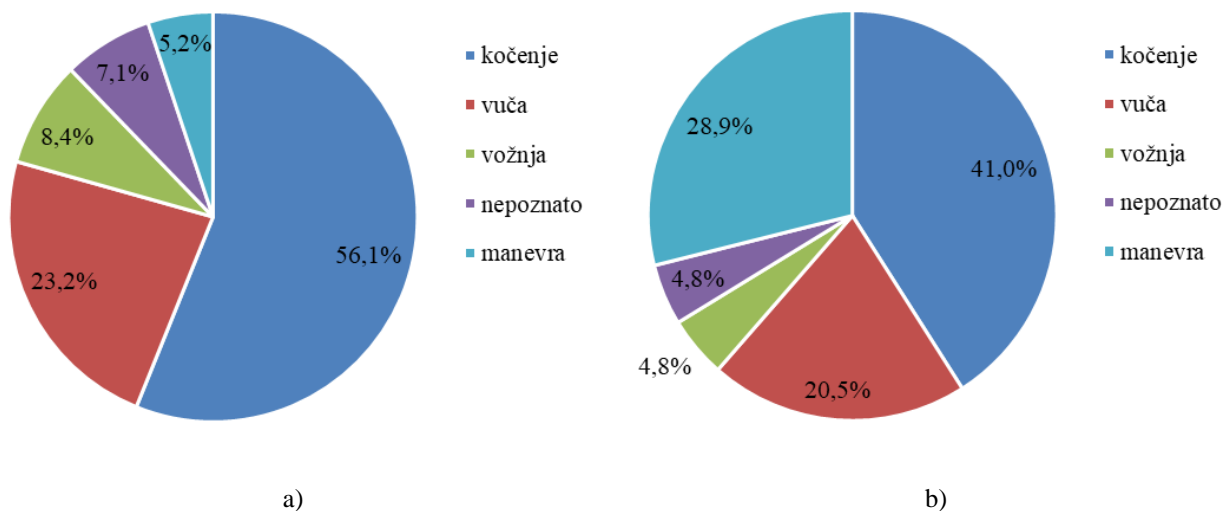
Slika 3.7. Mesto raskinuća u kompoziciji, a) od 2007. do 2011. godine, b) od 2018. do 2020. godine

Raskinuća između vučne lokomotive i prvog vagona većinom se javljaju pri vuči, dok se ostala raskinuća uglavnom dešavaju pri kočenju ili pri promeni režima kretanja. U poslednje tri godine uočava se manji broj raskinuća na prednjem delu voza, a veći u sredini voza (slika 3.8), što je delom posledica većeg broja raskinuća pri manevri (prilikom guranja), pri kojoj se raskinuće dešava najčešće na sredini kompozicije.

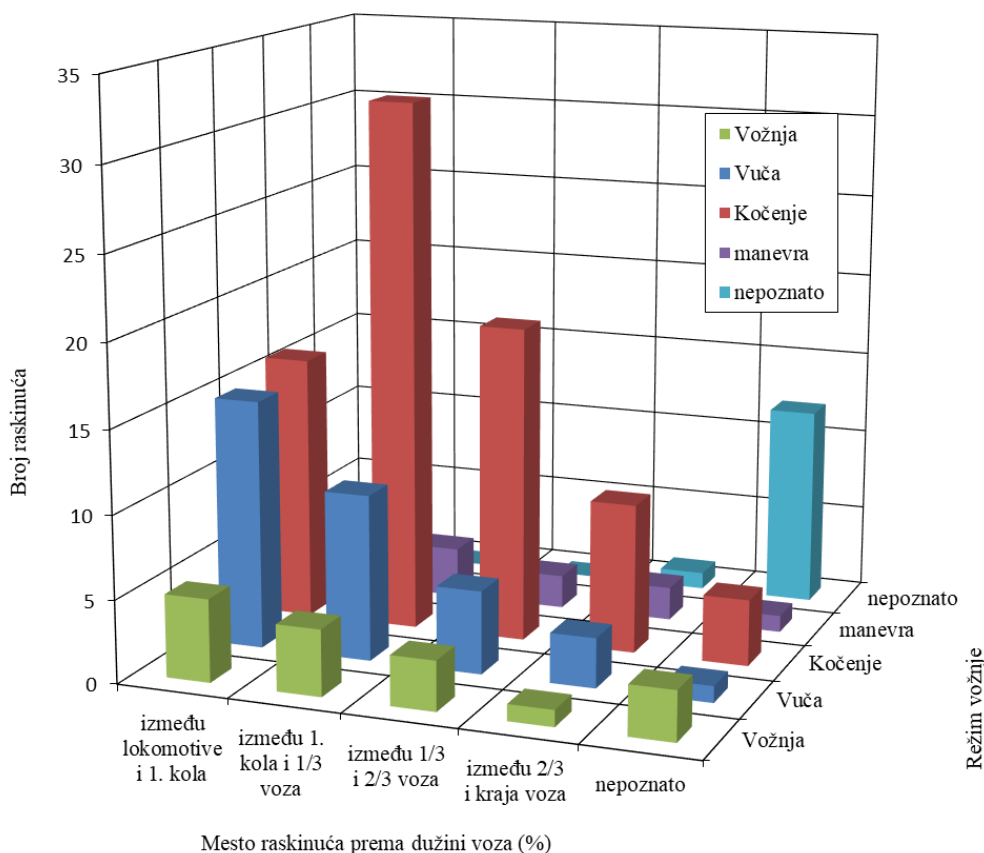


Slika 3.8. Učestanost raskinuća u odnosu na mesto raskinuća u vozu

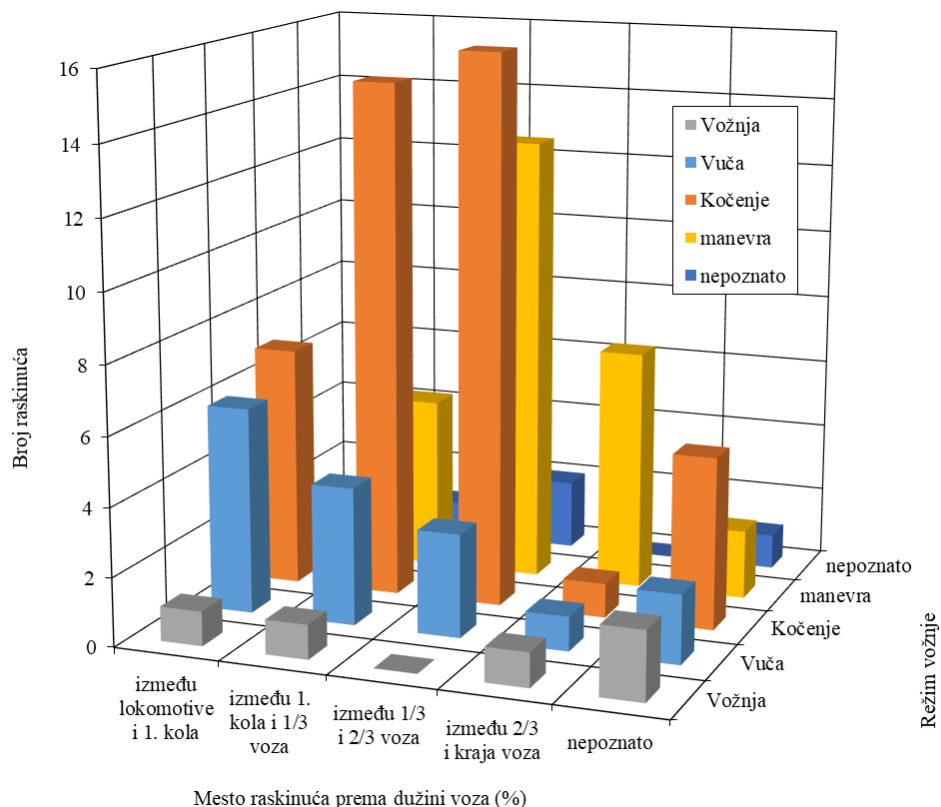
Sile koje se javljaju između vagona u kompoziciji veće su pri pokretanju i zaustavljanju voza nego pri ravnomernom kretanju, odnosno vožnji. Tako da se najviše raskinuća desi pri kočenju, 56,1% u periodu 2007-2011., odnosno 41,0% u periodu 2018-2020. godine (slika 3.9). Tokom vuče desi manje raskinuća 20%-23% u oba perioda, dok se pri manevrisanju, kojih je bilo znatno više u periodu 2018-2020. uočava 28,9% raskinuća. Ovo je očljivo i u pregledu broja raskinuća u u funkciji mesta raskinuća i režima vožnje u periodu 2007-2011. (slika 3.10 i 3.12) i periodu 2018-2020. (slika 3.11 i 3.12).



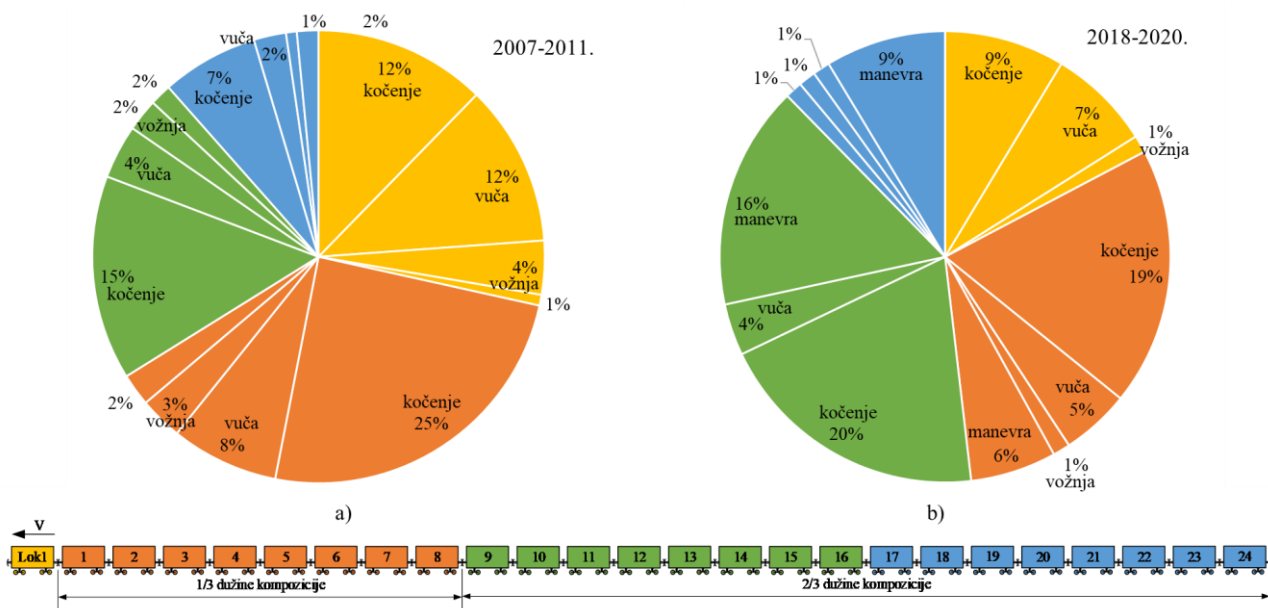
Slika 3.9. Režim vožnje neposredno pre raskinuća, a) od 2007. do 2011. godine, b) od 2018. do 2020. godine



Slika 3.10. Raskinuća u funkciji mesta raskinuća i režima vožnje u periodu 2007-2011. godine



Slika 3.11. Raskinuća u funkciji mesta raskinuća i režima vožnje u periodu 2018-2020. godine



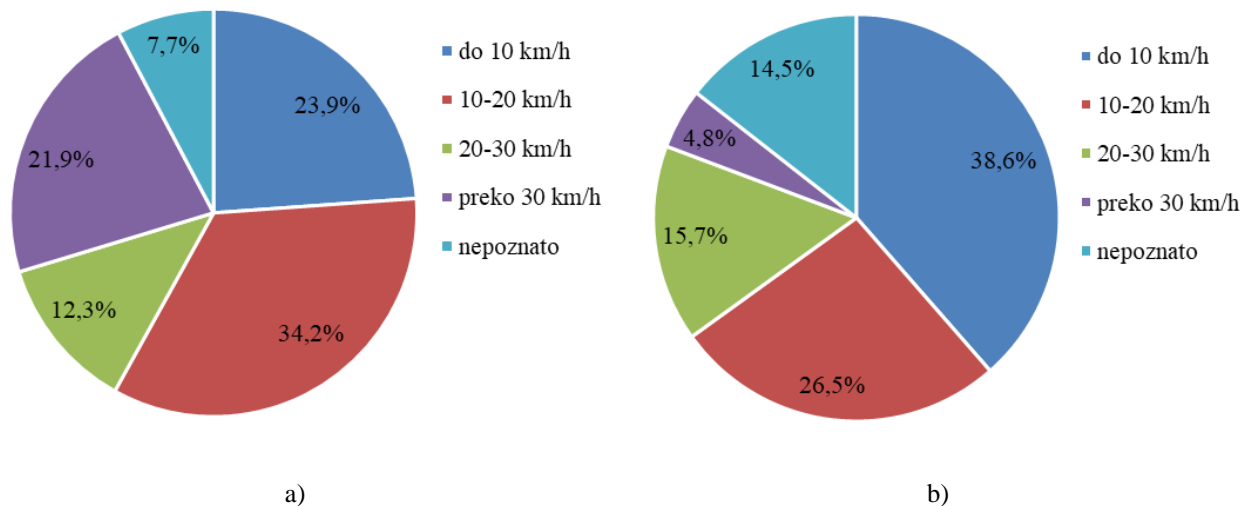
Slika 3.12. Učestanost raskinuća u funkciji mesta raskinuća u kompoziciji, a) od 2007. do 2011. godine, b) od 2018. do 2020. godine

3.1.2. Brzina pri raskinuću

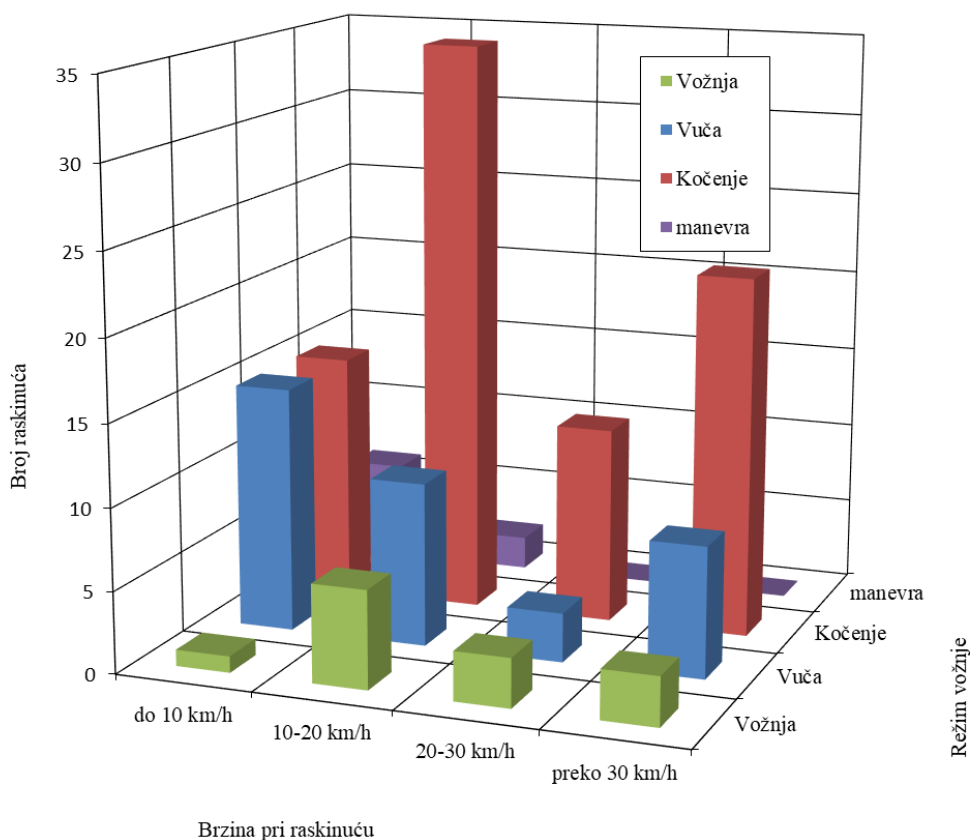
Sa aspekta brzine pri kojima je došlo do raskinuća vidi se je u najvećem broju slučajeva 34,2% do raskinuća došlo pri brzinama između 10 i 20 km/h u periodu od 2007-2011. godine, dok se u periodu 2018-2020. najviše raskinuća 38,6% desilo pri brzinama do 10 km/h. Jasno se uočava da broj

raskinuća opada sa porastom brzine, pa se tako čak 58÷65% slučajeva raskinuća desi pri brzinama manjim od 20 km/h (slika 3.13).

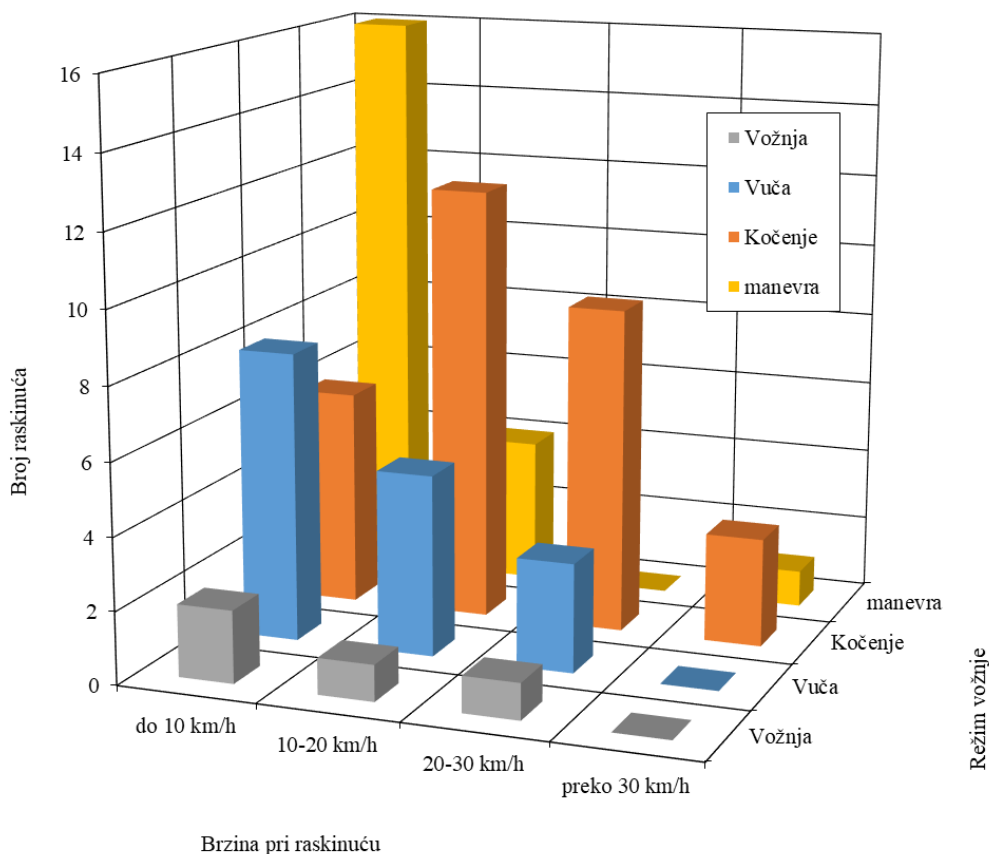
Kako su male brzine i broj pokretanja i zaustavljanja (vuče i kočenja) učestaliji u stanicama i blizu njih, od 50% do 70% raskinuća vozova događa se na staničnom području ili rasputnicama. Ovo je pogotovo izraženo u periodu od 2018. do 2020. godine kada je bilo više raskinuća pri manevrisanju, odnosno pri brzinama do 10 km/h (slika 3.15) u odnosu na period 2007-2011. (slika 3.14).



Slika 3.13. Učestalost brzina pre raskinuća, a) od 2007. do 2011. godine, b) od 2018. do 2020. godine



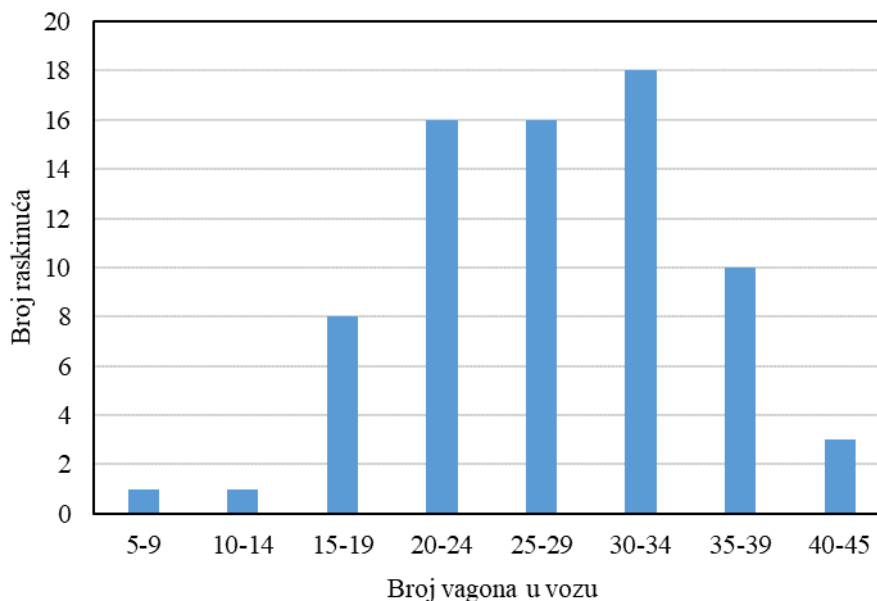
Slika 3.14. Brzine pri kojima je došlo do raskinuća u periodu od 2007. do 2011. godine



Slika 3.15. Brzine pri kojima je došlo do raskinuća u periodu od 2018. do 2020. godine

3.1.3. Karakteristike raskinutih vozova

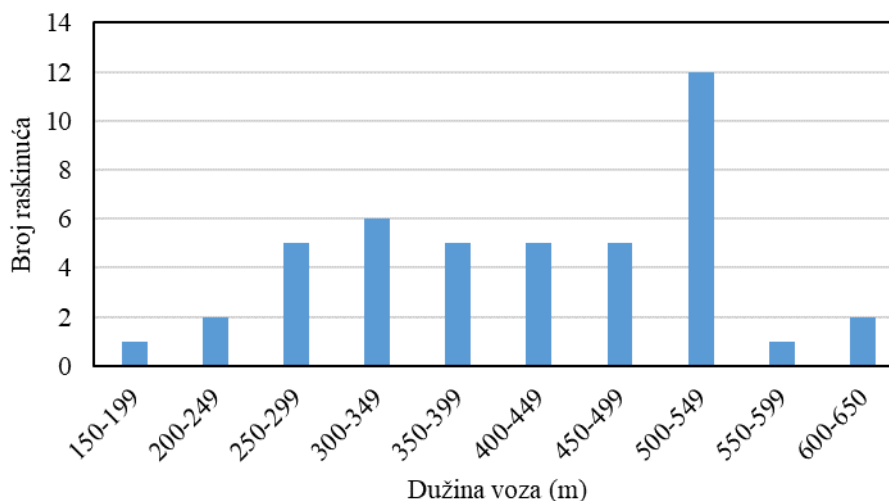
Karakteristika raskinutih vozova su broj vagona, dužina i masa voza, stanje tovarnosti, raspored natovarenih i praznih vagona u vozu i drugo. Na posmatranom uzorku nije se mogla izvući jasna zavisnost slučajeva raskinuća od sastava voza, jer su se slučajevi raskinuća dešavali i pri sastavu voza koji je u skladu sa propisom [29, 33] i preporukama iz eksploatacije (npr. natovareni vagoni do lokomotive, položaj vagona sa isključenom kočnicom, položaj dvoosovaca u vozi i sl.) i kada to nije bio slučaj.



Slika 3.16. Broj vagona u raskinutih vozovima u periodu od 2018. do 2020. godine

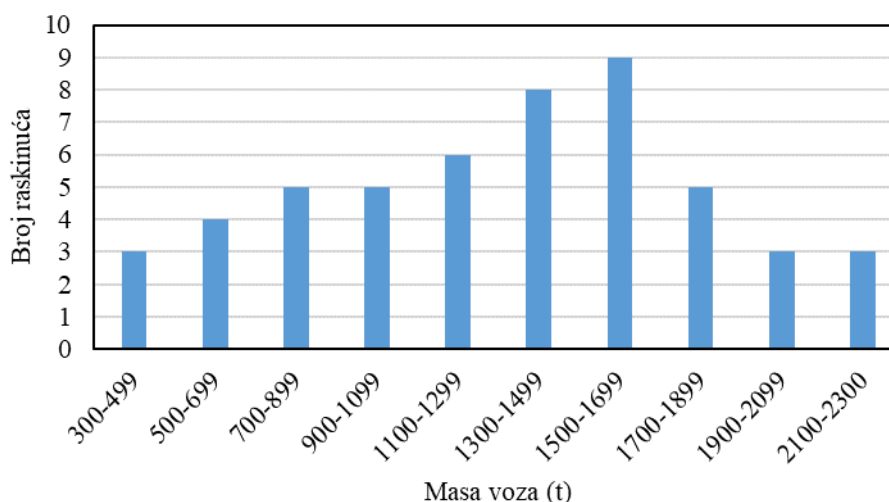
Najmanji broj vagona na teretnim vozovima pri kojima je došlo do raskinuća u periodu od 2007. do 2011. godine iznosi 15, a najveći broj vagona je 51, dok je u posljednje tri godine taj broj bio između 9 i 43 vagona (slika 3.16). Pri tome treba imati u vidu da je prosečan teretni voz u poslednjih deset godina imao 26 do 27 vagona [10].

Zavisnost broja raskinuća od dužine voza nije jednoznačna, jer se dužina raskinutih vozova kretala od 152 m do 720 m u periodu od 2007. do 2011. godine, a od 155 m do 620 m u periodu od 2018. do 2020. godine. Srednja dužina raskinutih vozova iznosila je oko 400 m u oba perioda. Može se zaključiti da učestalost raskinuća raste sa dužinom voza preko 500 m (slika 3.17), ali da bi se utvrdilo u kojoj meri mora se znati tačan broj takvih vozova u saobraćaju.



Slika 3.17. Dužina raskinutih vozova u periodu od 2018. do 2020. godine

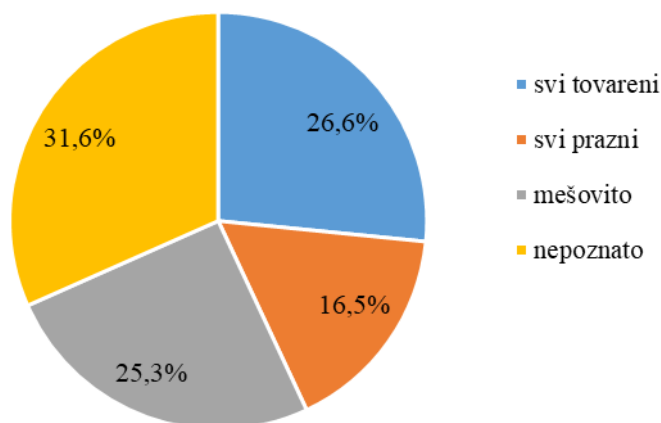
Mase raskinutih vozova kreću se od 527 t do 2333 t bruto u periodu od 2007. do 2011. godine, odnosno od 336 t do 2260 t u periodu od 2018. do 2020. (slika 3.18). Prosečna bruto masa jednog voza u 2009. godini bila je 926 t [10], a raskinutog voza 1354 t, slično kao poslednjih nekoliko godina.



Slika 3.18. Bruto masa raskinutih vozova u periodu od 2018. do 2020. godine

Ne postoji direktna zavisnost broja raskinuća od stanja natovarenosti. Kako se u saobraćaju nalaze vozovi sa svim natovarenim ili svim praznim vagonima i mešovitoj sastava (sa natovarenim i praznim vagonima), to se slučajevi raskinuća javljaju na vozovima različitih stanja natovarenosti. Broj raskinuća je nešto veći kod vozova sa svim natovarenim vagonim i iznosi 26,6% slučajeva

raskinuća i kod vozova sa mešovitim sastavom 25,3% (slika 3.19), iako bi se moglo očekivati da ovaj procent bude značajno veći. Čak u 31,6% raskinuća stanje natovarenosti vozila u vozu nije poznato.



Slika 3.19. Stanje natovarenosti raskinutih vozova u periodu od 2018. do 2020. godine

Karakteristike raskinutih vozova kao što su broj vagona, dužina i masa voza, stanje tovarnosti, raspored natovarenih i praznih vagona nemaju izrazitu funkciju zavisnosti sa brojem raskinuća, pa u daljoj analizi nisu uzeti kao faktor uticaj na pojavu raskinuća.

3.1.4. Uzroci raskinuća

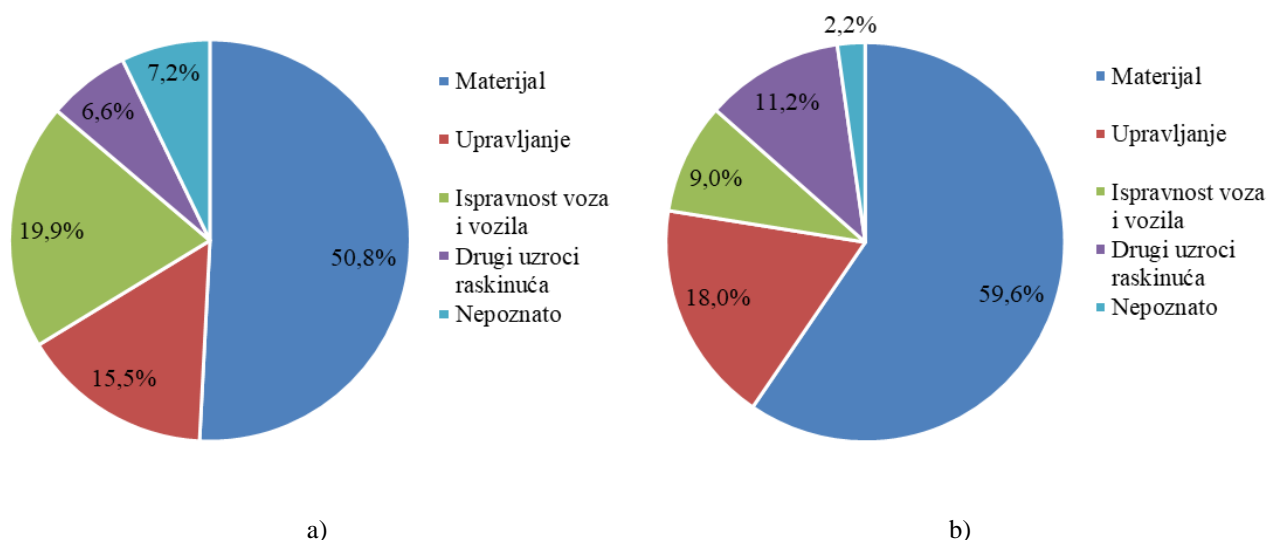
Broj raskinuća vozova u teretnom saobraćaju RS u poslednjih deset godina iznosi oko 40 slučajeva godišnje, a u relativnim pokazateljima bezbednosti saobraćaja, pokazuje trend povećanja, što znači da su uzroci koji dovode do raskinuća stalno prisutni. Istraživanje uzroka raskinuća se sprovodi preko istražnih komisija, pri čemu se kao rezultat, osim pojedinačnih mera za nepravilno upravljanje vozom, ne donose preporuke za smanjenje broja ovih slučajeva. To ima za posledicu ponavljanja pojava raskinuća.

Pošto pri raskinuću dolazi do raskidanja mehaničke veze koja spaja vagone u vozu, to zači da dolazi do otkaza (loma ili rastavljanja) nekog od elemenata veze vučnog uređaja. Lom ili rastavljanje elemenata mogu biti izazvani različitim uzrocima: opterećenjem većim od predviđenog, dinamičkim opterećenjem koji sa vremenom dovodi do zamora materijala, greškom u materijalu ili termičkoj obradi, istrošenošću delova i dr. Opterećenja veća od predviđenih u vučnim uređajima mogu se javiti kao posledica prevelikih vučnih sila i naglih prelazaka iz nezavršenog procesa otkočivanja u vuču, neujednačenosti kočnih masa vagona u vozu, neujednačenosti procesa kočenja, nedovoljne pritegnutosti vučno-odbojnih uređaja, prevelike mase i dužine kompozicije i dr. Uzroci raskinuća, koji se navode u izveštajima raskinuća, mogu se sistematizovati u nekoliko kategorija:

1. Materijal oštećenog dela:
 - zamor materijala,
 - struktura materijala,
 - inicijalne prskotine,
 - istrošenost delova,
 - ispadanje delova veze (osigurača, svornjaka, vijaka itd.),
 - prekidanje glavnog vazdušnog voda ili kočničke spojnice;
2. Upravljanje vožnjom i manevrom:
 - nepravilno rukovanje kočnikom,
 - neposluživanje AS uređaja,
 - neposluživanje budnika,

- nepravilna manevra,
 - nepravilno potiskivanje voza,
 - neusaglašena vožnja vučnog vozila i potiskivalice;
3. Sastav i zakvačivanje (kuplovanje) voza i ispravnost vozila:
- nepravilan sastav voza (raspored kola),
 - loše kuplovanje (razmak između odbojničkih tanjira pri zategnutom kvačilu)
 - pritvrdna kočnica vozila delimično aktivna,
 - stanje zakočenosti tj. neotkočene kočnice na vozilu,
 - razlike u sili kočenja između 2 grupe kola,
 - menjač sile kočenja neispravno postavljen,
 - menjač sile tovarenosti neispravno postavljen,
 - masa voza veća od dozvoljene;
4. Drugi uzroci raskinuća:
- problemi ili greške u infrastrukturi (npr. neispravna baliza),
 - zloupotreba od strane trećih lica (npr. presecanje kablova balize ili zatvaranje slavine GV),
 - loše tehničko rešenje,
 - tehnička mana,
 - ostalo;
5. Nepoznat uzrok raskinuća:
- nije naveden uzrok raskinuća,
 - navedeni uzrok ne može biti uzrok raskinuća.

Istrage slučajeva raskinuća, kao uzrok raskinuća navode, u preko 50% svih slučajeva, zamor materijala (slika 3.20), promenjenu strukturu materijala, ispadanje delova veze i druge nepravilnosti vezane za materijal delova koji su otkazali. Nepravilnosti u upravljanju su navedene u 15% do 18% slučajeva kao uzrok raskinuća, a značajno utiču još i ispravnost sastavljanja kompozicije i kvačenja kao i ispravnost vozila sa 9% do 20%. Povećanje slučajeva u kojima su uzroci raskinuća bili vezani za materijal vučnih uređaja sa 50,8% na 59,6% u poslednjih desetak godina ukazuje da je došlo do smanjenja kvaliteta dijagnostike u održavanju vučnih uređaja. Značajano je da se učestalost raskinuća usled nepravilnosti upravljanja vozom nisu smanjile, i da je ovaj problem koji nije vezan za tehničke uslove stalno prisutan.



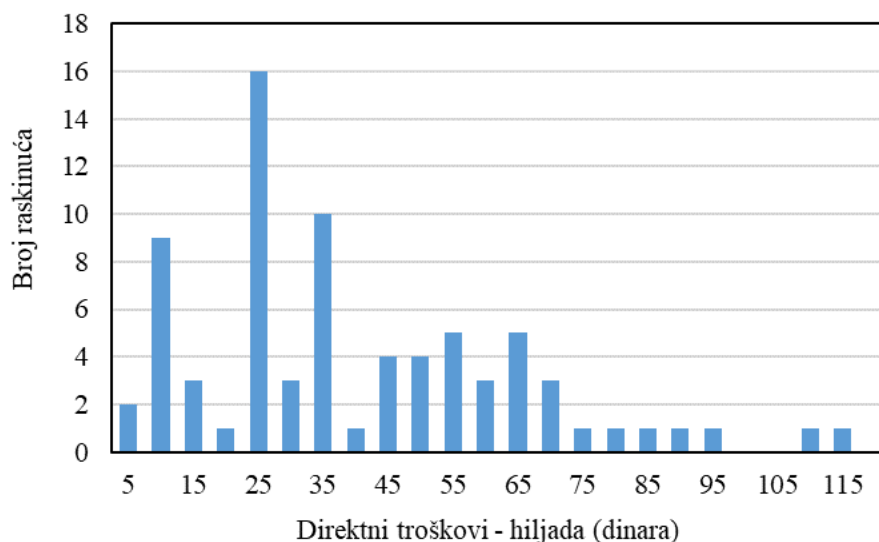
Slika 3.20. Uzroci raskinuća, a) u periodu od 2007. do 2011. godine, b) u periodu od 2018. do 2020. godine

Vučni uređaji koji se koriste na evropskim, pa i srpskim železnicama su standardne konstrukcije, koja je definisana železničkim i međunarodnim propisima. Ovi delovi se, takođe, kontrolišu pri prijemu, periodičnim pregledima i redovnom održavanju u eksploataciji. Stoga je utvrđeni procenat raskinuća čiji je uzrok materijal, prevelik i mora se proveriti eksperimentalno i numerički.

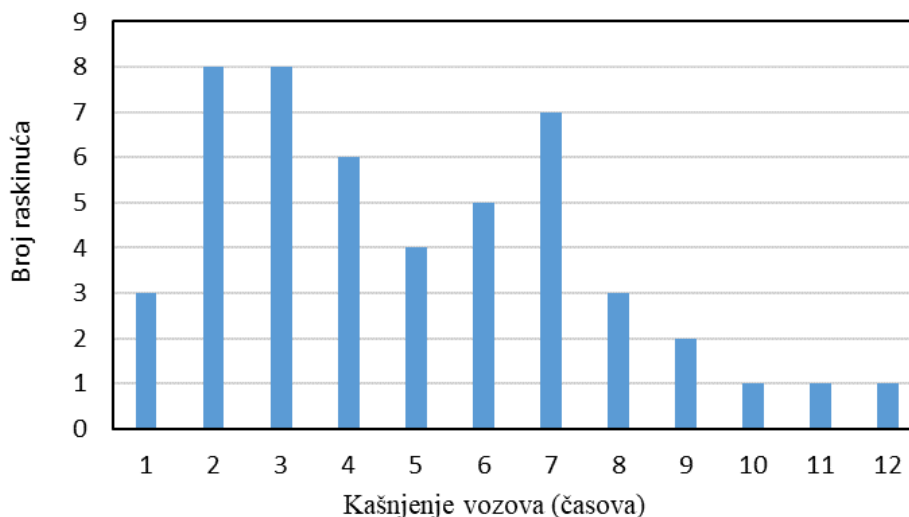
3.1.5. Posledica raskinuća

Posledice raskinuća mogu de budu ekonomske i organizacione. Pored direktnih materijalnih troškova: cene rezervnog dela i cene popravke, obuhvataju i indirektno troškove kao što je kašnjenje voza koji je raskinut, ali i drugih vozova koji saobraćaju na istoj trasi. Takođe obuhvataju troškove vezane za prekid saobraćaja i promenu u organizaciji izazvanoj prekidom saobraćaja.

Na osnovu dokumentacije, u periodu od 2007. do 2011. godine, direktna materijalna šteta po raskinuću može da iznosi do 100.000 dinara, a zastoj saobraćaja na deonici trajao je prosečno oko 3 do 4 sata. U periodu od 2018. do 2020. godine, direktna materijalna šteta po raskinuću iznosi između 50.000 i 100.000 dinara (slika 3.21), a zastoj saobraćaja na deonici trajao je između 4 i 5 sati (slika 3.22). U ove posledice nisu uračunati ukupni troškovi zadržavanja vozova i angažovane trase vozova, koji se ne dešavaju pri svakom raskinuću, ali mogu da iznose oko 300.000 dinara.



Slika 3.21. Direktni troškovi po raskinuću u periodu od 2018. do 2020. godine

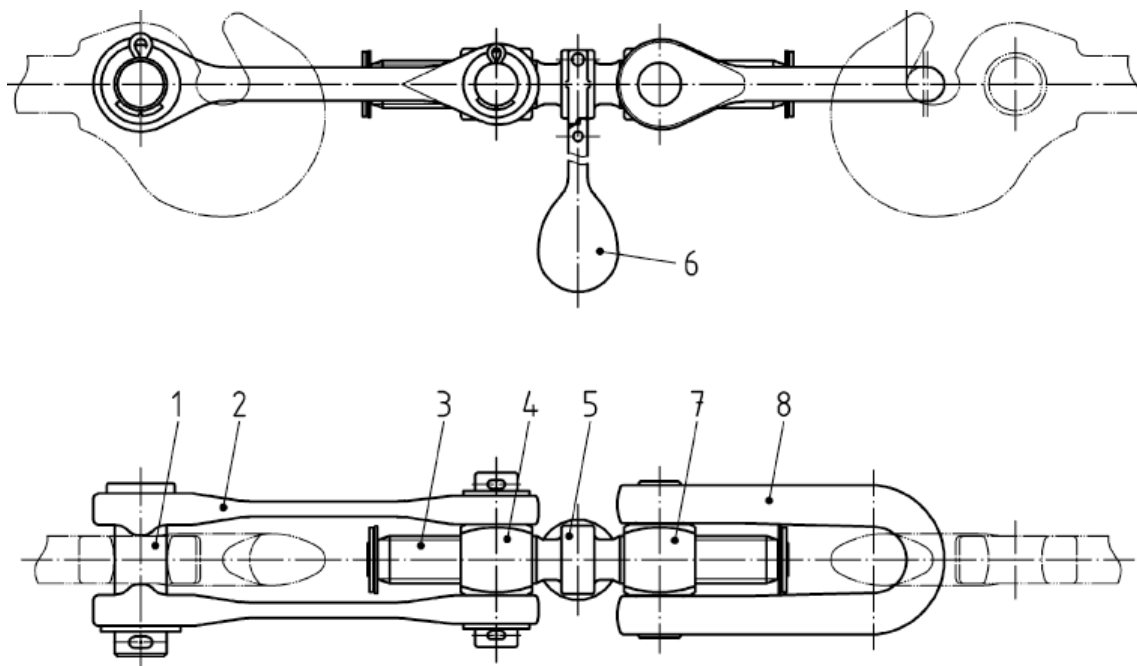


Slika 3.22. Kašnjenje vozova po raskinuću u periodu od 2018. do 2020. godine

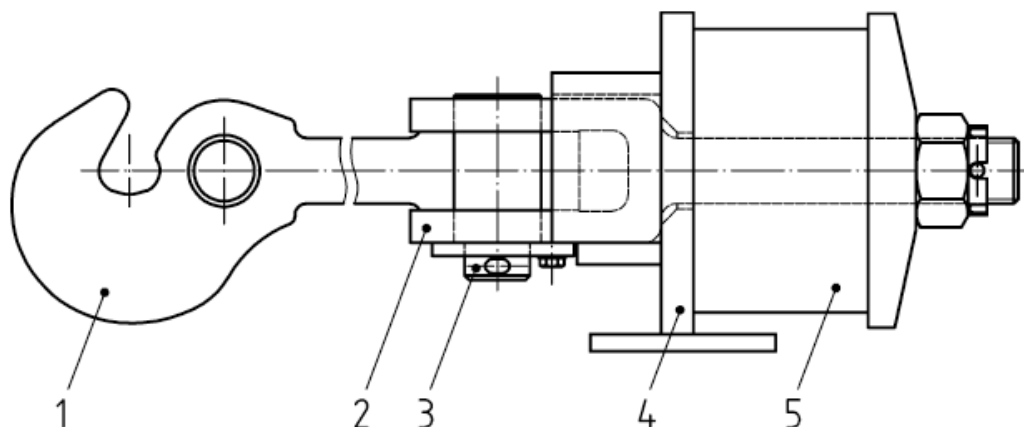
3.1.6. Otkazi elemenata vučnog uređaja i naknadna oštećenja vagona

Raskinuće voza nastupa uvek kada dođe do otkaza (loma ili rastavljanja) nekog od elemenata veze vučnog uređaja, ali može da nastupi pri otkazu (lomu ili rastavljanju) elemenata vazdušne kočnice kao što su kočnička spojnica, čeona slavina ili vazdušna instalacija i njeni spojevi. Pri otkazu navedenih elemenata može da dođe i do dodatnog oštećenja drugih elemenata, kao što su vođica kuke (na grudnoj gredi), potporne ploče tegljenika i dr. Ova oštećenja nastaju naknadno, kao posledica otkaza. Elementi vučnih uređaja i vazdušne kočnice kod kojih, pri raskinuću, dolazi do otkaza su:

1. Kvačilo (slika 3.23):
 - stremen,
 - vešalica,
 - svornjak,
 - navrtke,
 - vreteno,
 - rascepke;
2. Tegljenički uređaj (slika 3.24):
 - kuka,
 - svornjak,
 - viljuškasta tegljenica (vučna motka),
 - vijak i navrtka kod svornjaka,
 - navrtka tegljenice,
 - elastični element (prstenasta opruga, spiralna opruga i dr.)
3. Vazdušna kočnica:
 - kočnička spojnica,
 - čeona slavina,
 - vazdušni vod.

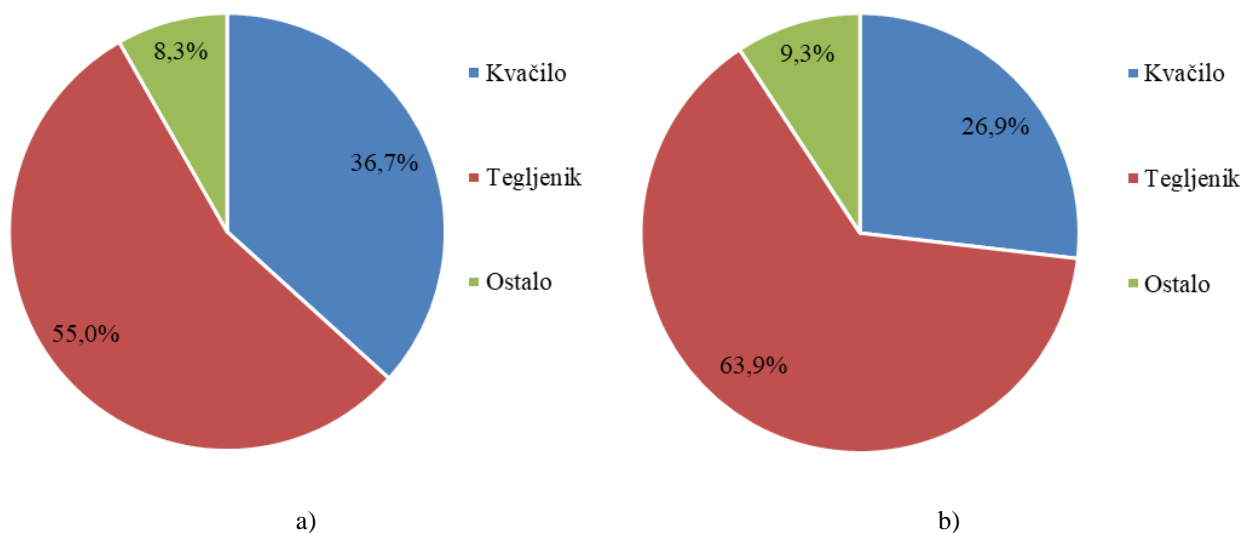


Slika 3.23. Kvačilo, 1. svornjak kvačila, 2. vešalica, 3. zavojno vreteno, 4. navrtka uz vešalicu, 5. svornjak ručice, 6. ručica, 7. navrtka uz stremen, 8. stremen [56]



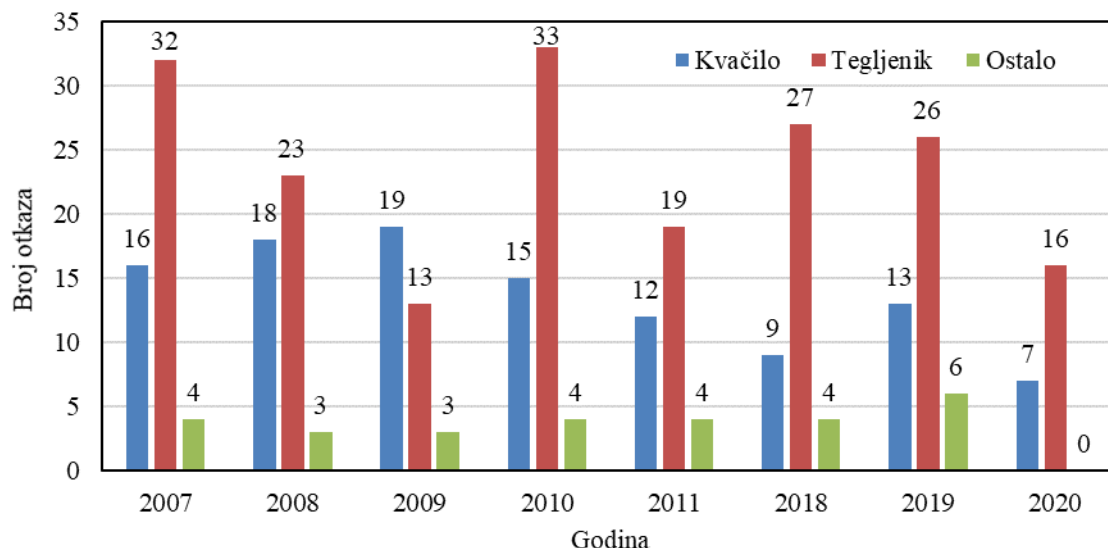
Slika 3.24. Tegljenik, 1. kuka tegljenika, 2. viljuškasta tegljenica, 3. svornjak, 4. potporna ploča, 5. elastični element [56]

Pri raskinuću vozova u periodu od 2007. do 2011. godine najčešće je dolazilo do otkaza elemenata tegljenika u 55,0% slučajeva i kvačila u 36,7% slučajeva (slika 3.25 a). Otkaz ostalih delova (kočničke spojnice, čone slavine, vazdušnog voda i dr.), kao i kada nije evidentirano koji je element otkazao, bilo je manje - oko 8,3%. Uglavnom je dolazilo do otkaza ili elemenata kvačila ili tegljeničkog uređaja, a ređe je bilo prisutno istovremeno oštećenje elemenata i kvačila i tegljenika. U poslednje tri godine povećao se otkaz elemenata tegljenika na čak 63,9%, pri čemu je došlo do smanjenja otkaza elemenata kvačila na 26,9% (slika 3.25 b). Promena broja otkaza vučnih uređaja po godinama dat je na slici 3.26. Kao posledica navedenih otkaza, javljaju se često naknadna oštećenja drugih elemenata kao što je vođica kuke, potporna ploča i drugo.

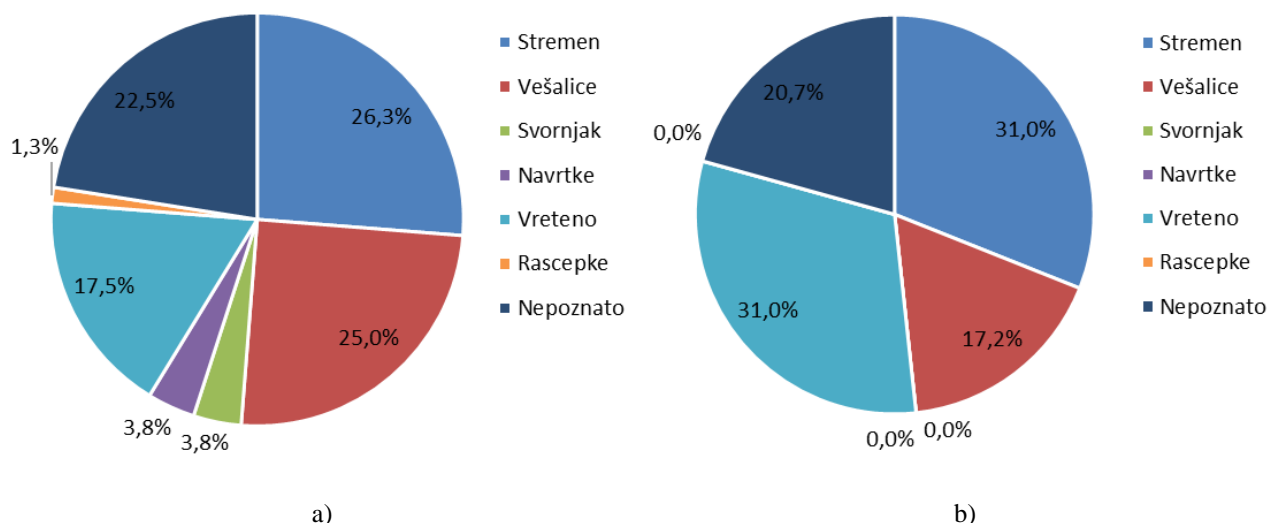


Slika 3.25. Otkaz vučnih uređaja, a) u periodu od 2007. do 2011. godine, b) u periodu od 2018. do 2020. godine

Broj otkaza vučnih uređaja po godinama dat je na slici 3.26. Na kvačilu je najčešće dolazilo do loma stremena, vešalice, vretena, a ređe su se javljali otkazi navrtke i svornjaka u periodu od 2007. do 2011. godine (slika 3.27 a). U periodu od 2018. do 2020. godine došlo je do porasta broja otkaza stremena i zavojnog vretena, ali i do smanjenja broja otkaza vešalica (slika 3.27 b). Kako su vratilo i vešalice sigurnosni elementi kvačila koji treba da otkazu pre drugih, broj njihovih otkaza trebao bi biti veći.



Slika 3.26. Broj otkaza vučnih uređaja po godinama



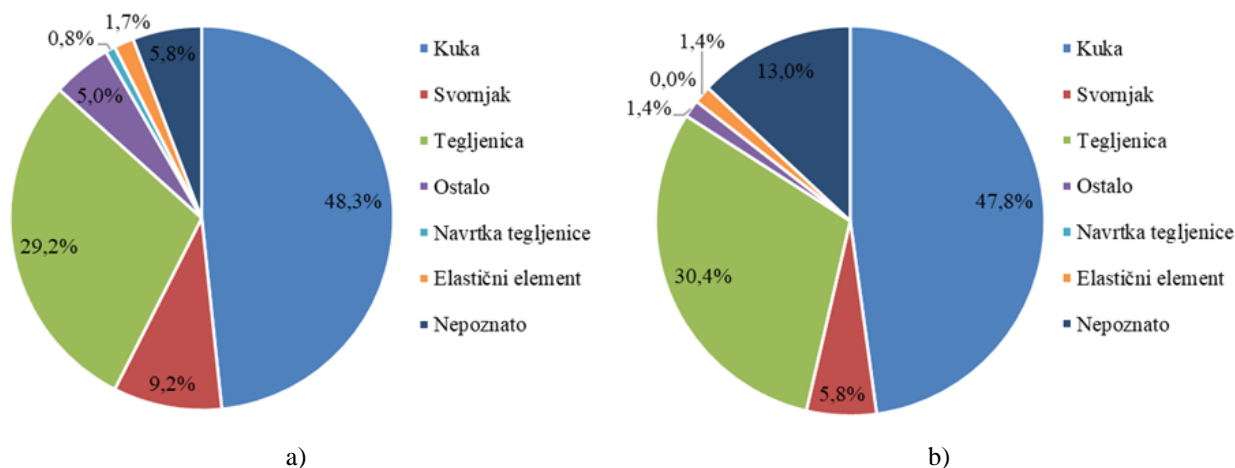
Slika 3.27. Otkaz elemenata kvačila, a) u periodu od 2007. do 2011. godine, b) u periodu od 2018. do 2020. godine

Na tegljeničkom uređaju najčešće je dolazilo do oštećenja kuke, a u nešto manjem broju tegljenice u oba posmatrana perioda (slika 3.28). U manjem broju slučajeva dolazilo je do raskinuća zbog ispadanja svornjaka koji povezuje kuku i tegljenicu usled ispadanja osigurača.

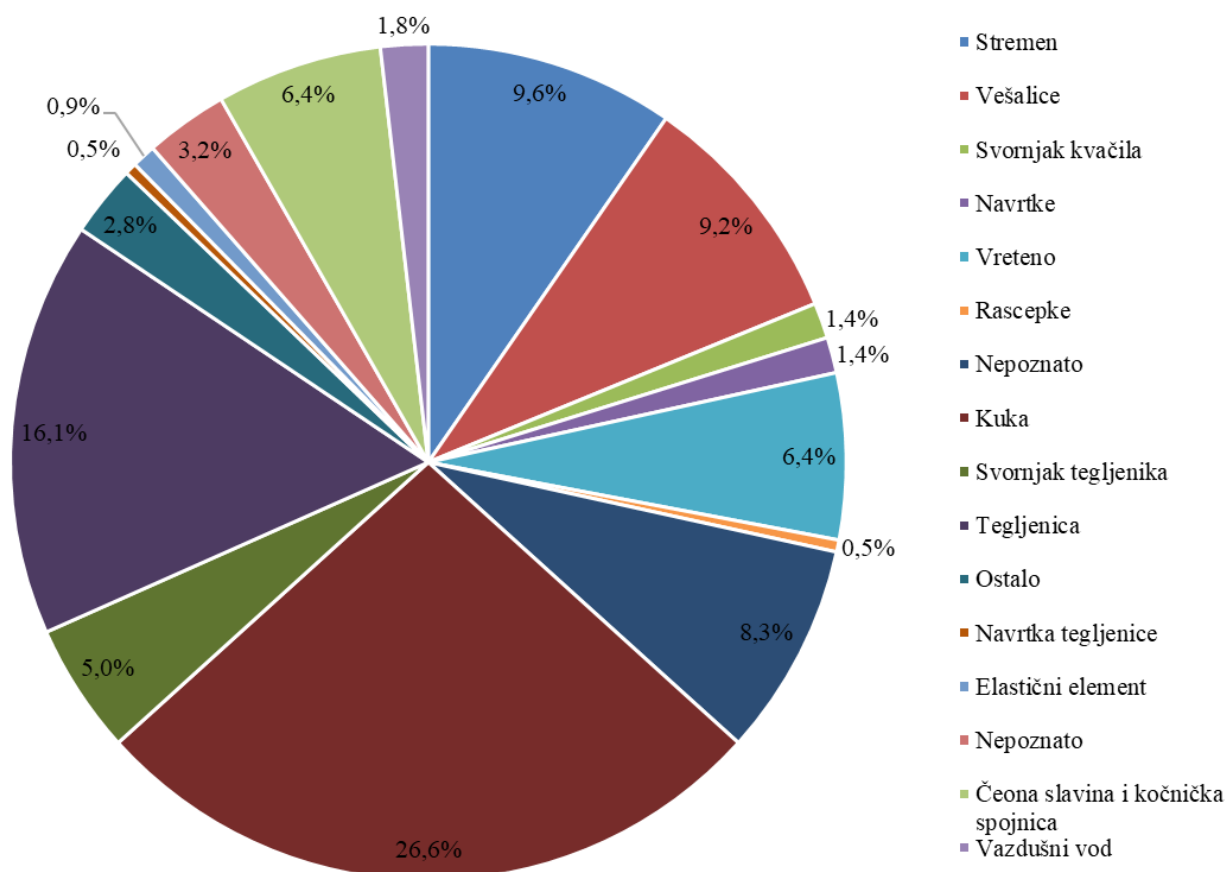
Iz zbirnog pregleda elemenata vučnih uređaja koji su otkazali u periodu od 2007. do 2011. godine (slika 3.29) u odnosu na 2018-2020. (slika 3.30) vidi se da je najčešće dolazilo do otkaza:

- kuke tegljenika, pri čemu je došlo do porasta otkaza sa 26,6% na 30,6%,
- tegljenice (vučne motke), pri čemu je došlo do porasta otkaza sa 16,1% na 19,4%,
- stremena, pri čemu je došlo do smanjenja otkaza sa 9,6% na 8,3%,
- vešalice, pri čemu je došlo do smanjenja otkaza sa 9,2% na 4,6%,
- vreteno, pri čemu je došlo do porasta otkaza sa 6,4% na 8,3%,

Pri otkazu elemenata tegljenika uglavnom je dolazilo i do oštećenja vođice kuke ili potporne ploče, pri čemu je njihov procenat oštećenja u periodu od 2007. do 2011. godine sa 27% smanjen na 14% u odnosu na 2018-2020.



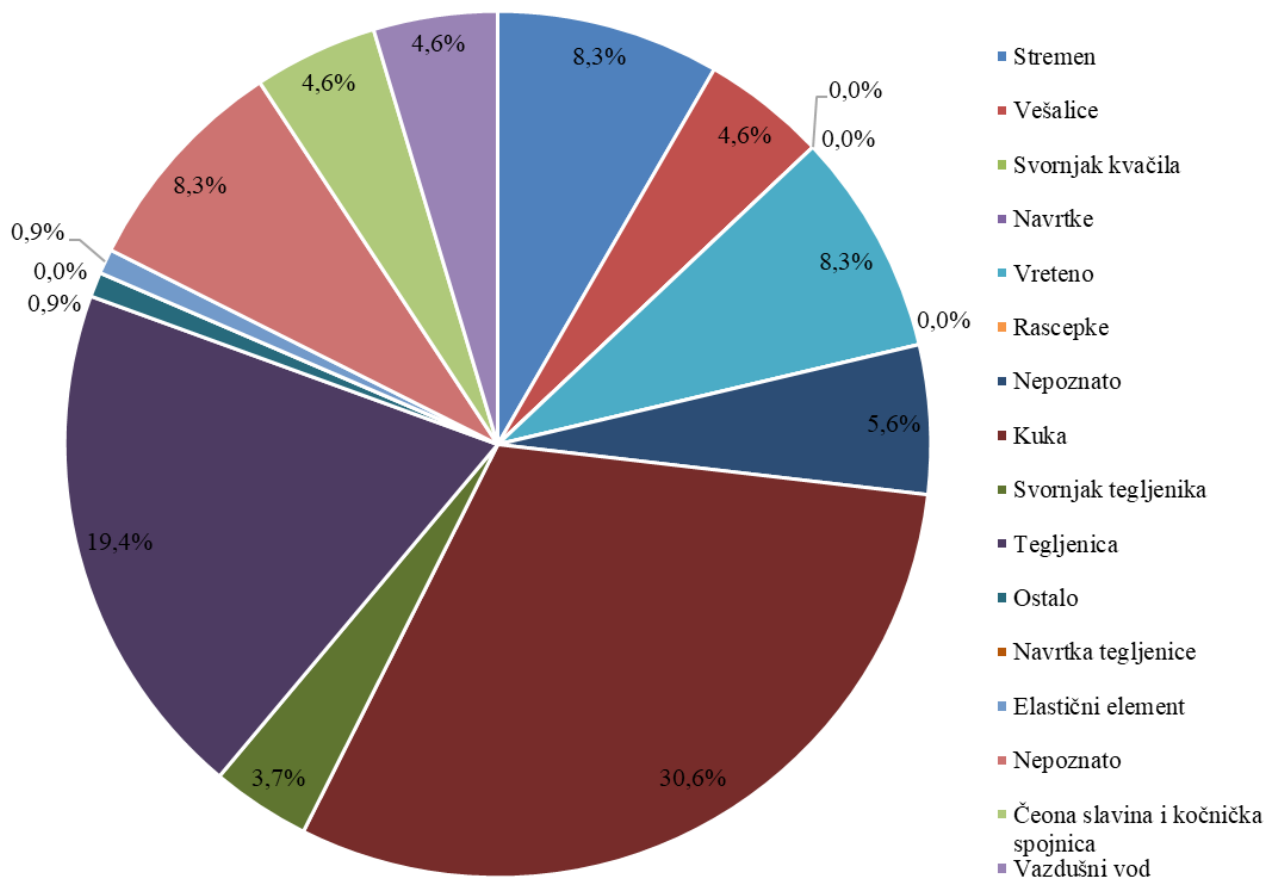
Slika 3.28. Otkaz elemenata tegljenika, a) u periodu od 2007. do 2011. godine, b) u periodu od 2018. do 2020. godine



Slika 3.29. Otkaz elemenata u periodu od 2007. do 2011. godine

Smanjenje otkaza delova, koji su kao sigurnosni elementi trebali da otkazu u eksploataciji pri porastu sile, kao što su vešalice, pokazuju da ima i drugih uticaja na otkaz elemenata vučnih uređaja. Potrebno je utvrditi razloge zbog kojih dolazi do otkaza delova koji nisu elementi sigurnosti.

Otkaza ostalih delova kao što je čeona slavina, kočnička spojnica i vazdušni vodovi bilo je u malom obimu, ukupno oko 8÷9% (slika 3.29 i 3.30).

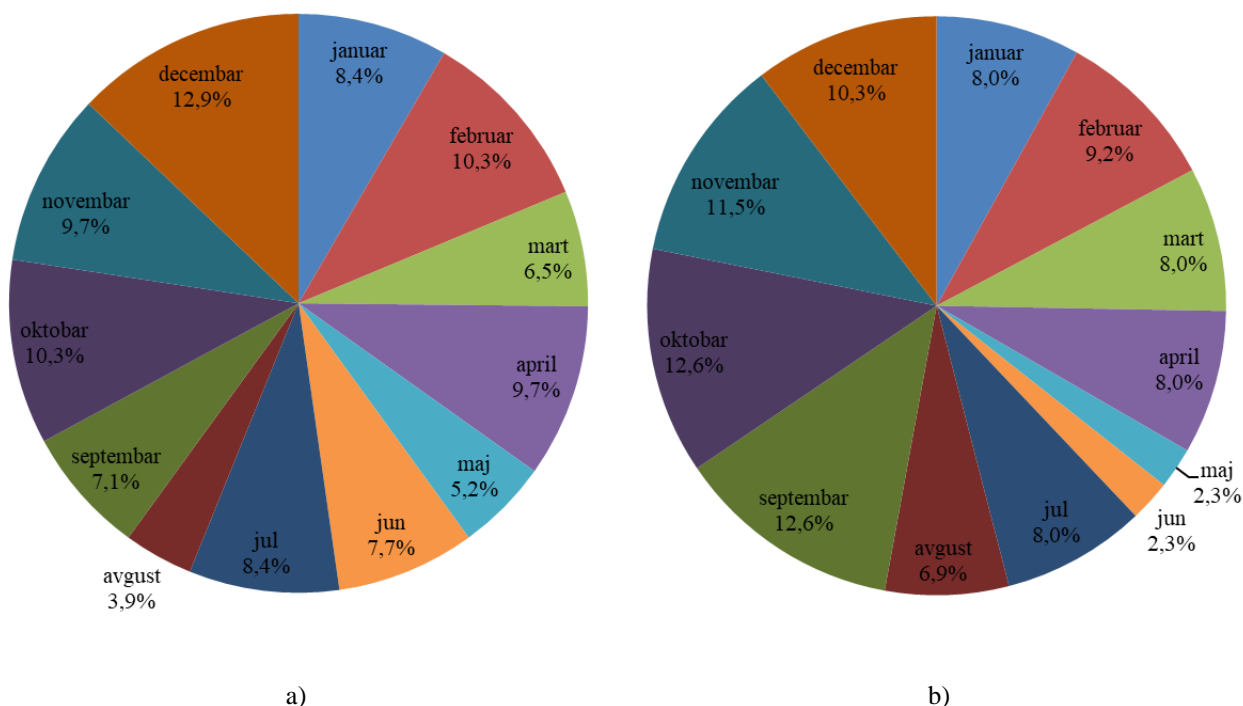


Slika 3.30. Otkaz elemenata u periodu od 2018. do 2020. godine

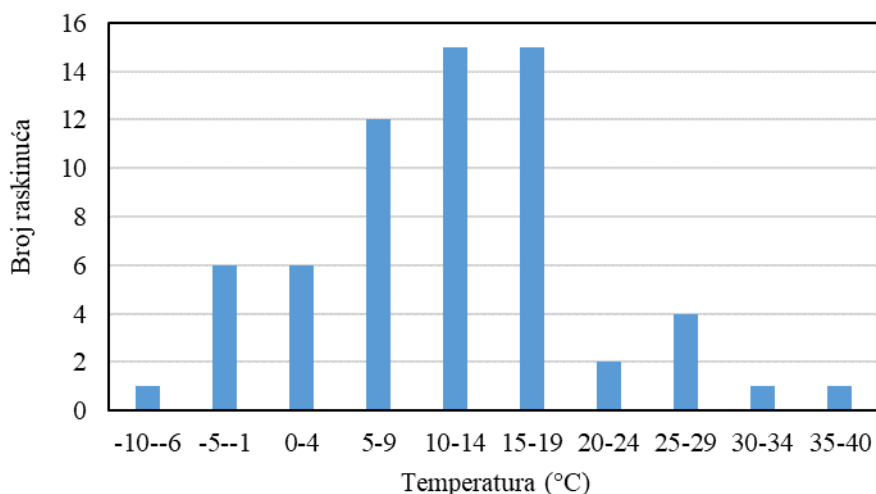
3.1.7. Raspodela raskinuća po mesecima

Da bi sagledali uticaj spoljašnjih uslova na broj raskinuća, posmatrana je učestalost raskinuća teretnih vozova po mesecima. Prosečan broj raskinuća teretnih vozova, koji saobraćaju samo sa vučnom lokomotivom je oko 2,5 slučaja mesečno. Veći broj raskinuća dešava se oktobru, novembru i decembru od 10% do 13%, što je posledica većeg obima saobraćaja. Najmanje raskinuća dešava se u letnjim mesecima (maj, jun, avgust) od 2% do 5%, kada je manji obim teretnog saobraćaja. Mala odstupanja raspodele učestanosti raskinuća po mesecima u periodu 2007-2011. i 2018-2020. godine (slika 3.31) pokazuju da godišnja doba nemaju većeg uticaja na broj raskinuća.

Uvidom u podatke o spoljašnjim uslovima pri raskinućima, posebno temperature vazduha, vidi se da se najveći broj raskinuća dešava pri temperaturama od 10°C do 20°C (slika 3.32) i da nema povećanja broja raskinuća sa smanjenjem temperature. Stoga se može zaključiti da uzrok neravnomerne raspodele broja raskinuća po mesecima nisu promene temperature već obim saobraćaja.



Slika 3.31. Učestalost raskinuća na po mesecima, a) u periodu od 2007. do 2011. godine, b) u periodu od 2018. do 2020. godine



Slika 3.32. Temperature vazduha pri raskinuću vozova u periodu od 2018. do 2020. godine

3.2. Karakteristična raskinuća

U okviru ove analize obuhvaćeno je preko 300 slučajeva raskinuća, pri čemu je ustanovljeno da se javlja veliki broj sličnih slučajeva. Karakteristični primeri raskinuća su:

- raskinuća prilikom manevrisanja, gde gotovo uvek dolazi do raskinuća pri kočenju guranog manevarskog sastava, a vrlo često se ova raskinuća i ne primete odmah, već naknadno kada se formira i pokreće voz, pa je dokumentacija o uzrocima ovakvih slučajeva nedovoljna,
- raskinuća u stanicama pri zaustavljanju i pokretanju,
- raskinuća potpuno natovarenih vozova jednobraznog sastava (sastavljenih od istih tipova kola, slične tovarnosti),
- raskinuća potpuno praznih vozova jednobraznog sastava (sastavljenih od istih tipova kola),
- raskinuća prilikom brzog kočenja usled dejstva auto-stop uređaja ili uređaja budnosti,

- raskinuća kada vučno vozilo saobraća sa potiskivalicom, usled neusaglašenosti dejstva vučnih vozila i dr.

Specifični slučajevi raskinuća, koji se dešavaju vrlo retko, su raskinuća usled pucanja creva kočničke spojnice ili razdvajanja cevnih spojeva glavnog vazdušnog voda, razdvajanja poluautomatskih kvačila, raskinuća usled delovanja trećih lica i dr.

Pri uvidu u slučajeve raskinuća uočava se da češće dolazi do loma određenih elemenata vučnih uređaja. Ovo može da zavisi i od toga koja je oprema ugrađena na teretnim vagonima, odnosno od imaoća vozila. U različitim zemljama propisi se mogu razlikovati (ili su se razlikovali u prethodnom periodu), a pošto je predviđeni životni vek vučnih uređaja 30 godina, u eksploataciji se mogu naći elementi različitih proizvođača i karakteristika. Pored toga, postoje i specifičnosti u eksploataciji i razlika u veličini i učestanosti opterećenja u toku životnog veka.

Na osnovu sistematizacije podataka o raskinućima za teretne vagone karakteristični su slučajevi:

- lom viljuškaste tegljenice, koji se javlja najčešće na mestu početka navoja, pri čemu dolazi do izvlačenja dela tegljeničkog uređaja: kuke tegljenika i viljuškaste tegljenice i do oštećenja vođica i potporne ploče na donjem postolju vagona (slike 3.33 i 3.34),
- lom i ispadanje rascepke i odvijanje ili lom navrtke viljuškaste tegljenice elastičnog sklopa čeonog tegljenika sa prstenastom oprugom, pri čemu dolazi do izvlačenja dela tegljeničkog uređaja: kuke tegljenika i viljuškaste tegljenice i do oštećenja vođica i potporne ploče na donjem postolju vagona (slika 3.35),
- lom vešalice, koji se javlja najčešće na sredini dužine vešalice (slika 3.36),
- lom kuke tegljenika na mestu promene poprečnog preseka (slika 3.37), na mestu prelaska vrata u glavu (slika 3.38) ili na mestu veze sa svornjakom kvačila (slika 3.41),
- ispadanje svornjaka (usled ispadanja ili loma rascepke) koji spaja kuku tegljenika i tegljenicu pri čemu dolazi do izvlačenja kuke tegljenika (slika 3.42),
- lom zavojnog vretena, lom stremena, lom navrtke (slika 3.39) i lomovi drugih elemenata vučnih uređaja na karakterističnim ili specifičnim mestima, kao što je lom vešalice na uskama usled greške u materijalu na mestu loma (slika 3.40).

Lomovi elemenata vučnog uređaja mogu biti posledica zamora materijala, obično na izvorima koncentracije napona, ali i izražene korozije i grešaka u materijalu nastalih tokom proizvodnje, kao i inicijalnih naprslina ili spoljašnjih oštećenja, nastalih u eksploataciji, koja se ponašaju kao izvori koncentracije napona. Pri navedenim lomovima javljaju se slučajevi kada je u pitanju krt lom sa ili bez znakova korozije ili zamora materijala, sa malim brojem slučajeva gde je dominantan lom usled zamora.



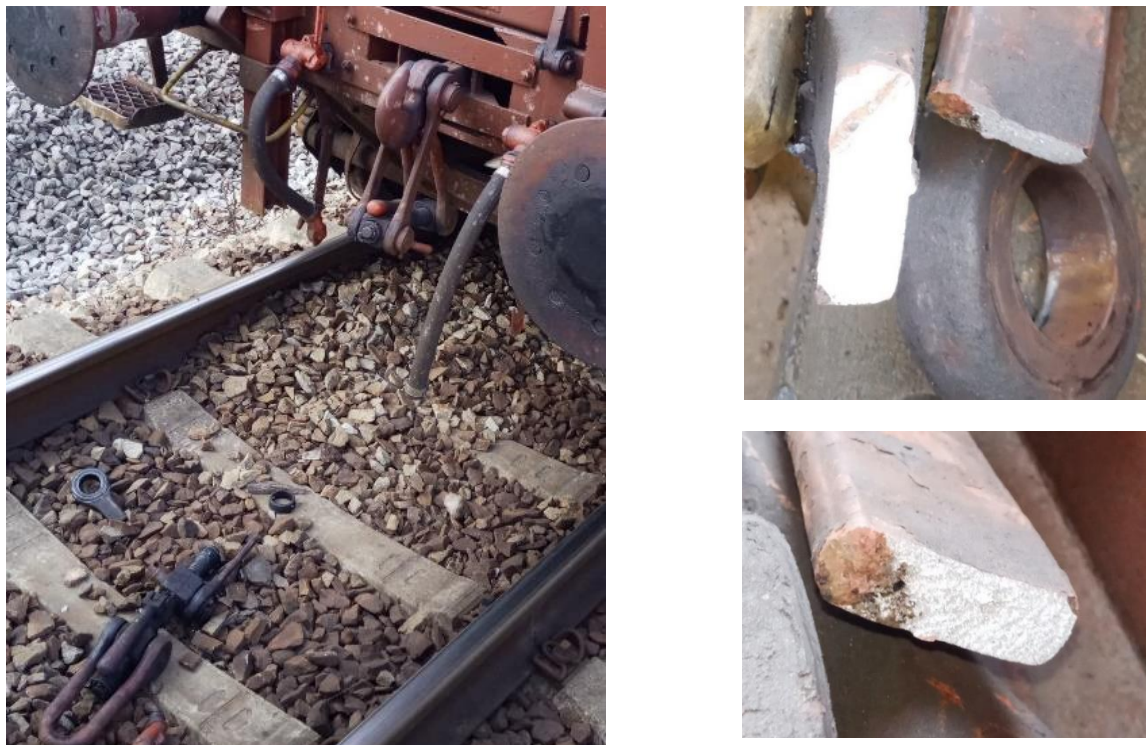
Slika 3.33. Lom tegljenice i prstenaste opruge tegljenika [73]



Slika 3.34. Lom viljuškaste tegljenice, pri raskinuću 21.8.2020. kod Velike Plane na Eas vagonu broj 31505970018-9 (Bosna i Hercegovina) [36]



Slika 3.35. Izvlačenje viljuškaste tegljenice, pri raskinuću 23.10.2020 kod Rakovice na Zaes-z vagonu broj 82726596048-0 (RS) [36]



Slika 3.36. Lom vešalice pri raskinuću 21.02.2021. kod Stare Pazove



Slika 3.37. Lom kuke tegljenika pri raskinuću 6.9.2020. kod stanice Bor teretna na lokomotivi 661-249 (RS) [36]



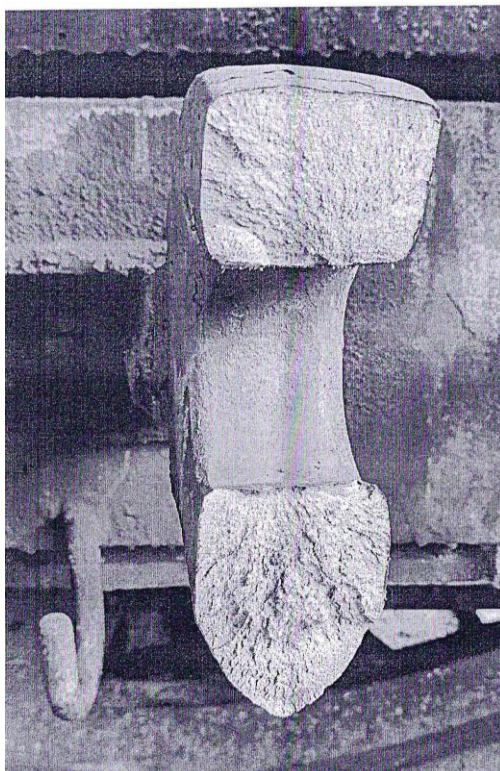
Slika 3.38. Lom kuke tegljenika pri raskinuću 04.03.2021. kod Ovče na vagonu broj 33874769158-6 (Francuska)



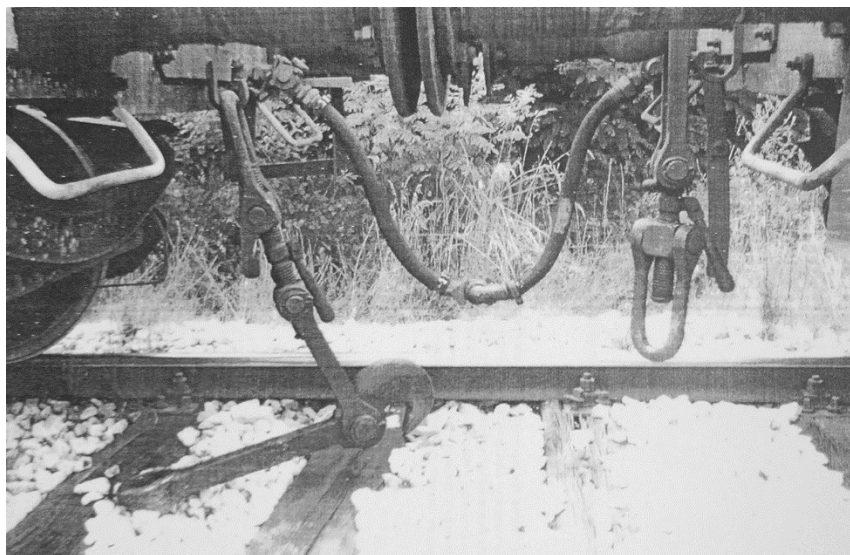
Slika 3.39. Lom navrtke uz vešalicu pri raskinuću 08.07.2011. kod Užica na vagonu broj 21782900038-9 (Republika Hrvatska) [35]



Slika 3.40. Lom vešalice pri raskinuću 17.12.2020. kod Paraćina, vagon Eas-z broj 31655980050-3 (Republika Makedonija) [36]



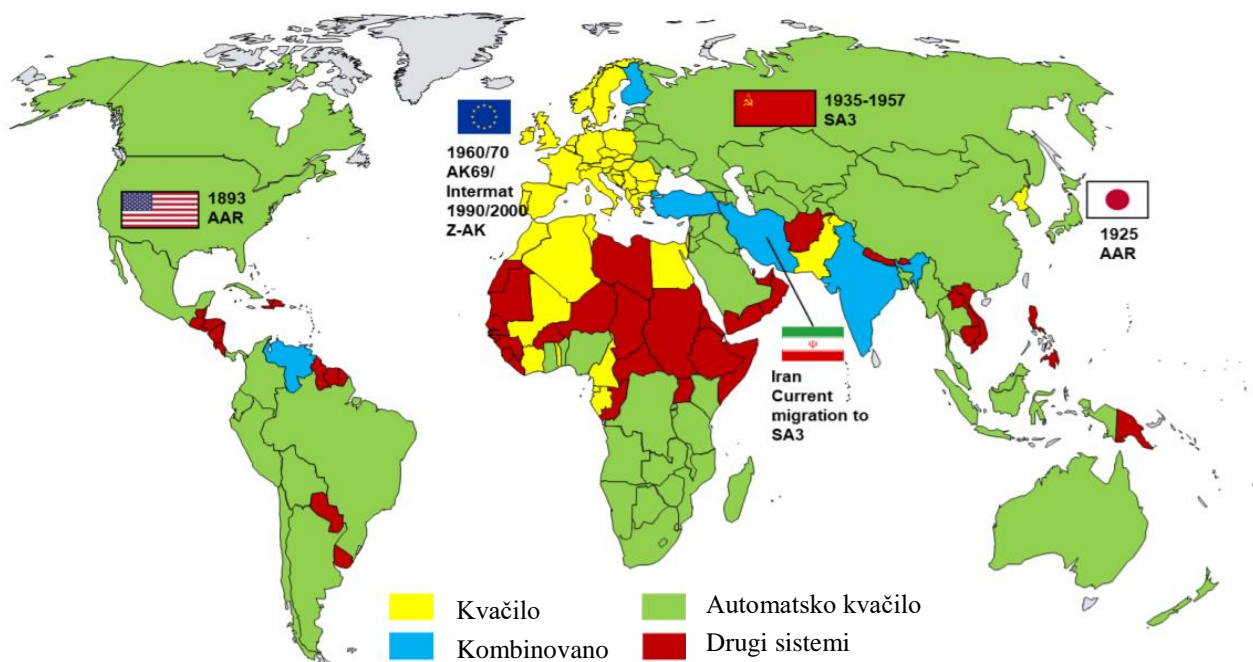
Slika 3.41. Lom kuke tegljenika pri raskinuću 22.12.2019. u stanici Novi Sad ranžirna pri guranju vagona 31545969042-8 (Češka Republika) [36]



Slika 3.42. Ispadanje svornjaka kuke tegljenika pri raskinuću 24.6.2018. kod Knjaževca na vagonu Zacs broj 33727867502-6 (RS) [36]

4. ANALIZA OTKAZA VUČNIH UREĐAJA

U većini zemalja u svetu (slika 4.1) prihvaćen je sistem mehaničkog povezivanja vagona automatskim kvačilima. U Evropi je bilo više pokušaja uvođenja automatskog kvačila 60-ih i 90-ih godina prošlog veka i napravljeno je više tehničkih rešenja za prelazak na automatsko kvačilo. UIC je definisao uslove za buduća automatska kvačila, a evropski vagoni se od 1965. godine grade tako da su prilagođeni za ugradnju budućeg automatskog kvačila [32]. Prelazak na automatsko kvačilo zahteva izuzetno velike investicije i predstavlja ogroman organizacioni problem i zbog toga je njegovo uvođenje, za sada, neizvesno. Imajući to u vidu, u ovom radu razmatrani su samo razdvojeni vučno-odbojni uređaji čeonog tipa, koji se koriste na javnoj železničkoj mreži u RS i Evropi.



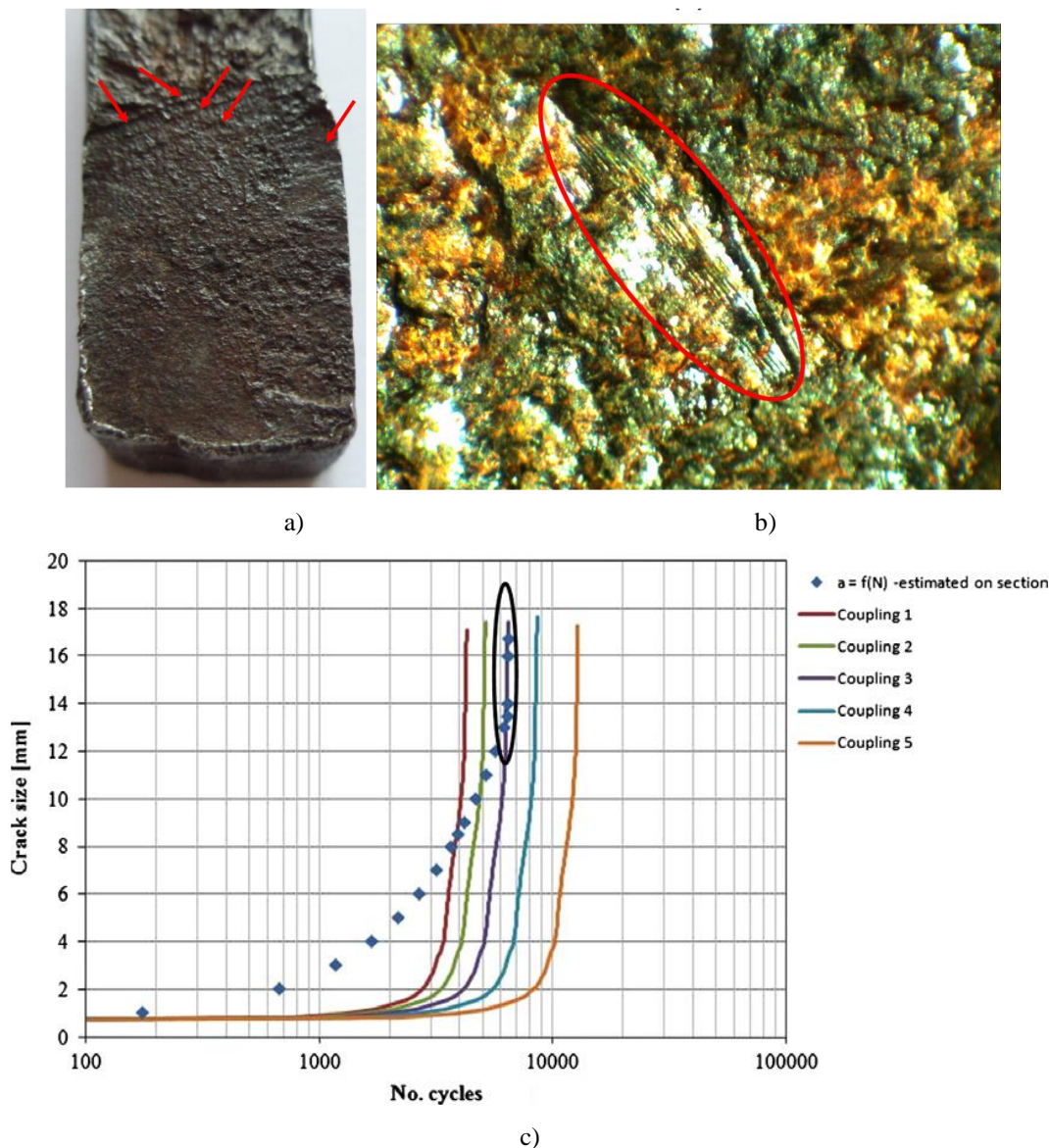
Slika 4.1. Sistemi kvačenja u svetu [40]

4.1. Stanje u naučnoj oblasti

Kako se samo u Evropi i malom broju drugih zemalja još koriste razdvojeni vučno-odbojni uređaji čeonog tipa, u naučnim krugovima nema mnogo radova posvećenih proučavanju problematike otkaza istih. Primena preporučenih UIC objava, koje su postavile oštre zahteve u pogledu konstrukcije, kontrole i tehničkih uslova isporuke vučnih uređaja, kao i stalno preispitivanje objava, mogla bi sugerisati da u eksploataciji ovi sistemi nema učestalih otkaza. Dugogodišnja evidencija vanrednih događaja vođena u nacionalnom prevozniku „Železnice Srbije“ do 2015. godine, kao i evidencija nezgoda i nesreća koju od 2016. vodi najveći domaći operater u teretnom saobraćaju „Srbija Kargo“ a.d. pokazuju drugačije. Takođe, nekoliko objavljenih radova iz ove oblasti poslednjih godina, ukazuju da i drugi železnički operateri u Evropi imaju primetan broj otkaza elemenata vučnih uređaja.

U analizi otkaza vešalice kvačila Cernescu i dr. [12] su utvrdili defekat materijala koji je doveo do pojava inicijalne naprsline, a na osnovu eksperimentalno određenih karakteristika materijala modeliran je sistem veze vučnih uređaja u vozu. Na površini loma vešalice uočljive su linije zamora materijala (slika 4.2.a, b) na osnovu čega je procenjeno širenje inicijalne naprsline usled zamora materijala. Sistemom diferencijalnih jednačina kojim je modelirana veza vagona izračunate su

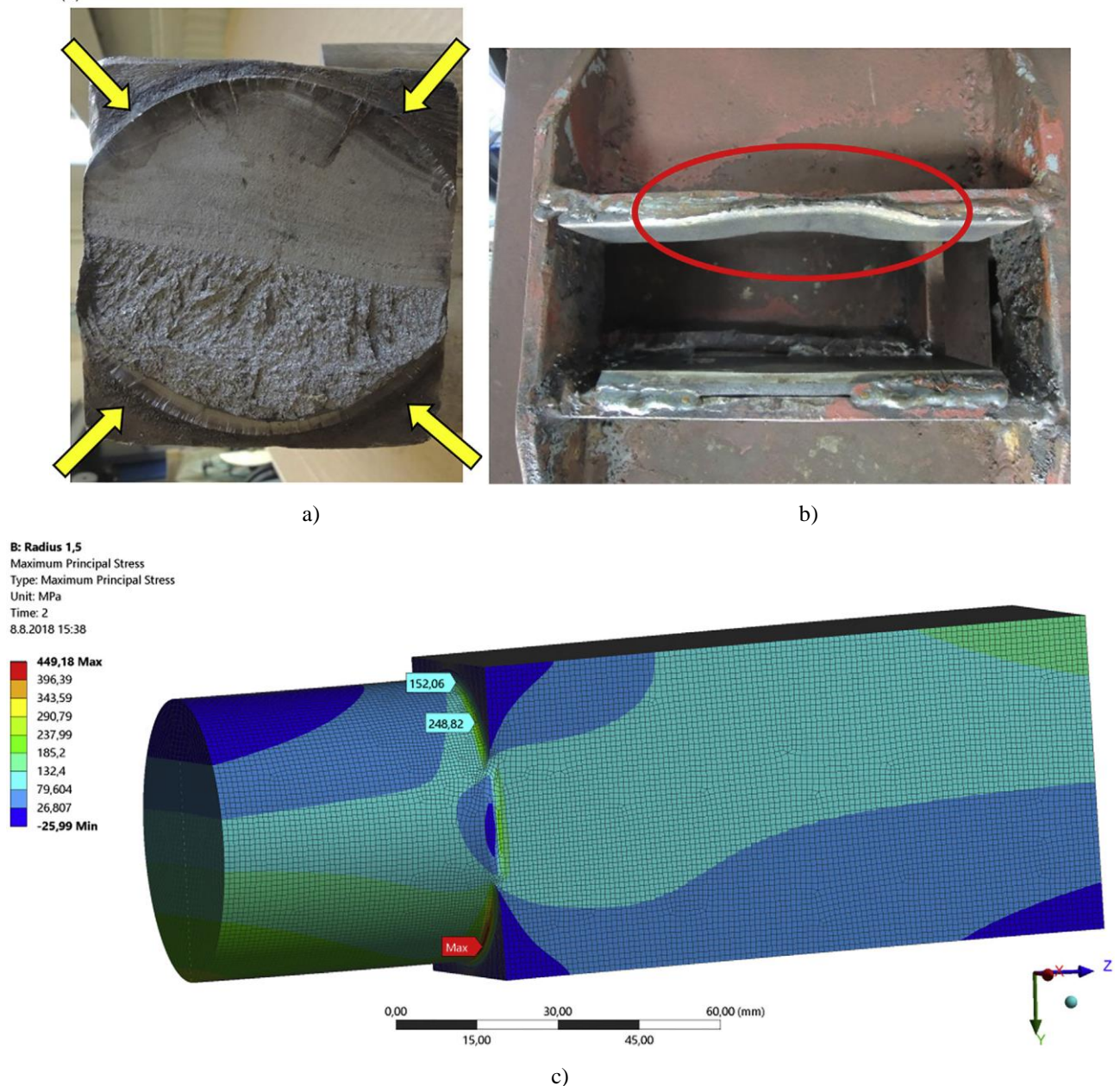
vrednosti za vučne sile na kvačilima duž kompozicije voza, koje odgovaraju usvojenom reprezentativnom ubrzanju od 0 do 60 km/h. Na osnovu ovako utvrđenog opterećenja (oko 229 kN) vešalica je numerički modelirana putem MKE. Korišćenjem programskog paketa Franc 3D za procenu porasta naprsline, procenjen je da je broj ciklusa koji je doveo do loma vešalice oko 6474 ciklusa (slika 4.2.c), što za analizirane uslove odgovara eksploataciji vozila od jednog meseca. Kao preporuku autori predlažu promenu metode kontrole vučnih uređaja i verifikaciju sistema za veća opterećenja vučnih uređaja.



Slika 4.2. a) Površina loma sa linijama zamora materijala, b) linije zamora - 5x uvećanje, c) kriva širenja pukotine koja odgovara opterećenju prvih pet vagona procenjena na mestu loma [12]

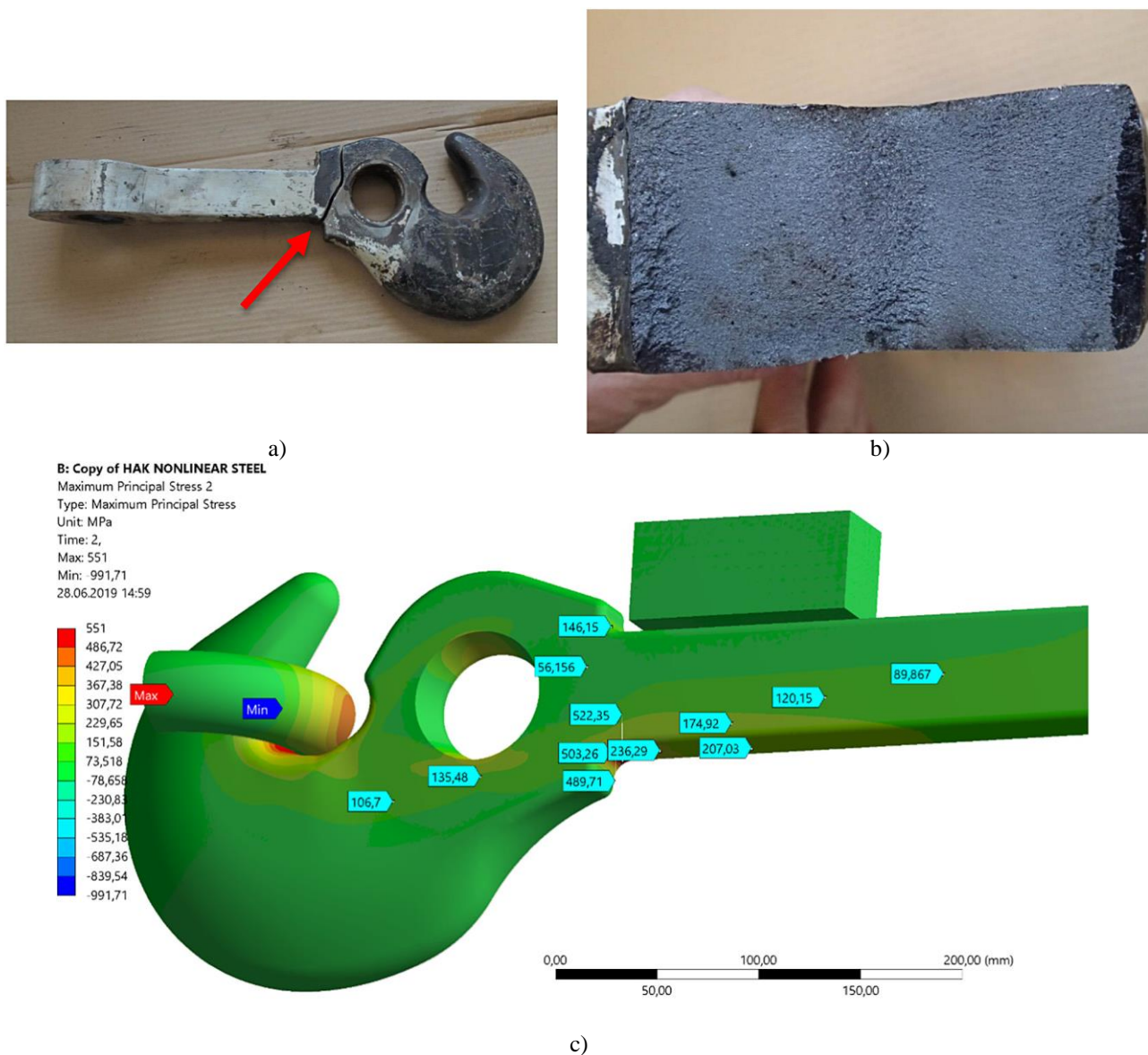
Primetan je i problem otkaza kuke tegljenika u nekoliko istraživanja. Analiza otkaza kuke tegljenika Slovačkih železnica, autora Ulewicza i dr. [14] pokazala je da je zamor materijala glavni uzrok otkaza i primenom metode konačnih elemenata (MKE) utvrdila da je otkaz nastao pod dejstvom više faktora: eksploatacionih uslova, odstupanje geometrije kuke od propisane i dodatnog nepredviđeno opterećenja u eksploataciji. Manja dimenzija prelaznog radijusa vrata kuke tipa B, uslovlila je koncentraciju napona, koja je dovela do pojave inicijalne pukotine i zamora materijala (slika 4.3.a).

Velike razlike u prečnicima točkova susjednih vagona dovele su do nesaosnosti i oslanjanja kuke na vođicu (slika 4.3.b), što je prouzrokovalo dodatno opterećenje savijanjem (slika 4.3.c).

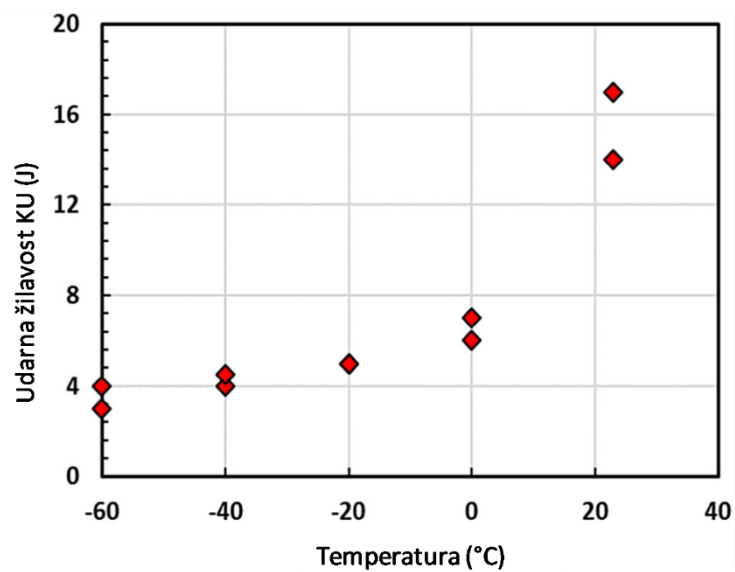


Slika 4.3. a) Vidljivi tragovi zamora materijala na lomu kuke tegljenika, b) mesto oslanjanja kuke na vođicu, c) naponi na mestu loma [14]

Pri analizi krtog loma kuke tegljenika (slika 4.4.b) lokomotive Slovačkih železnica [13] kao glavni uzroci identifikovani su nedovoljna žilavost materijala, greške u termičkoj obradi i nekoaksijalno postavljanje ose kuke tegljenika, što je iniciralo dodatno opterećenje. Promena poprečnog preseka kuke na mestu prelaska sa vrata u glavu kuke (slika 4.4.a) uslovala je porast koncentracije napona (slika 4.4.c). Uticaj krupnozrnaste strukture, ustanovljene ispitivanjem mikrostrukture, uslovalo je nedovoljne mehaničke karakteristike materijala, i smanjenje žilavosti na nižim temperaturama (slika 4.5).



Slika 4.4. a) Slomljena kuka tegljenika tipa B (mesto nastanka inicijalne pukotine je označeno strelicom), b) izgled površine loma, c) naponi na kritičnom mestu nastanka inicijalne naprsline [13]



Slika 4.5. Rezultati ispitivanja udarne žilavosti KU kuke za različite temperature [13]

Analiza nedestruktivnim metodama kuke tegljenika, autora Mohammadi i dr. [11], je pokazala inicijalne naprsline na kritičnim mestima gde se postavlja stremen kvačila, i utvrdila zamor materijala kao primarni faktor loma kuke. Ispitivanje je izvršeno na umanjenom modelu kuke. Simulacijom je određen životni vek kuke u zavisnosti od mesta unosa opterećenja u eksploataciji, koja je razmatrana u dva karakteristična slučaja: kada je kuka zakvačena za susedni vagon preko klasičnog ili centralnog kvačila.

Brojni radovi vezani za druge delove železničkih vozila, najviše osovinske sklopove, bave se istraživanjem zamora materijala u uslovima koncentracije napona, najviše zareza i oštećenja koja se mogu pojaviti u eksploataciji i različitim postupcima njihovog modeliranja.

4.2. Izbor elemenata za analizu

Na osnovu analize slučajeva raskinuća železničkih vozila operatera „Železnice Srbije“ u periodu 2007-2011. godine, uočeni su karakteristični otkazi delova vučnih uređaja sa učestanošću: kuka tegljenika 26,6%, viljuškasta tegljenica (vučna motka) 16,1%, stremen 9,6%, vešalica 9,2%, svornjak tegljenika 5,0% i vreteno 6,4%. Navedeni delovi su zbog svoje učestanosti otkaza primereni za analizu. Međutim, jedini delovi koji imaju sigurnosnu funkciju među elementima vučnog uređaja, a njihova učestanost otkaza ne odgovara predviđenoj (morala bi da bude maksimalna) su vešalice i zavojno vreteno.

Do raskinuća voza usled kidanja vučnih uređaja može doći u ekstremnim slučajevima u eksploataciji. Stoga propisi SRPS EN 15566 [56] i UIC 826 [58] definišu kao sigurnosni element vučnog uređaja onaj, koji se može najlakše zameniti. U ranijim izdanjima propisa, kao najslabiji element bilo je definisano zavojno vreteno, a od 1995. godine vešalice su rekonstruisane tako da one budu najslabiji element. Danas standard SRPS EN 15566 dopušta da najslabiji element bude zavojno vreteno i/ili vešalice. I jedan i drugi element se relativno lako mogu zameniti bez isključenja vozila iz saobraćaja.

U objavama UIC 520 [52] iz 2003. i UIC 826 iz 2004. godine standardno kvačilo je definisano sa minimalnom (zateznom) silom kidanja 850 kN. Standard SRPS EN 15566 iz 2011. definiše tri vrste vučnih uređaja prema mehaničkim karakteristikama: 1 MN, 1,2 MN i 1,5 MN (tabela 4.1). Standardni UIC vučni uređaj je označen kao 1MN, prema minimalnoj sili kidanja sklopa. Vučni uređaji 1,2 MN i 1,5 MN su predviđena za teže teretne kompozicije.

Tabela 4.1. Klasifikacija vučnih uređaja prema minimalnoj sili kidanja [56]

Oznaka vučnog uređaja	Minimalna sila kidanja kvačila (MN)	Maksimalna sila kidanja kvačila (MN)	Minimalna sila kidanja kuke tegljenika i tegljenice (MN)
1 MN	0,85	0,98	1
1,2 MN	1,02	1,18	1,2
1,5 MN	1,35	1,48	1,5

Kvačila su konstruisana, u svakoj varijanti, tako da je maksimalna sila kidanja 20 kN manja od minimalne sile kidanja elemenata tegljenika: kuke tegljenika i viljuškaste tegljenice. Predviđeno je da elementi standardnog kvačila 1 MN moraju da se pokidaju pri dejstvu sile između 850 kN i 980 kN. Ako bi vešalice ili zavojno vreteno imali bolje mehanički osobine, pa ne dođe do njihovog kidanja pri prekoračenju propisanog opterećenja, drugi elementi kvačila ili tegljenika bi mogli otkazati.

Stoga je najpre potrebno ustanoviti ispitivanjem vešalica ili zavojnog kvačila, da li se njihove mehaničke karakteristike nalaze u propisanim granicama. Kako su vešalice tek od 1995. godine predviđene da budu sigurnosni elementi, izabrane su kao element čije je karakteristike potrebno proveriti. Pri tome treba imati u vidu da se u eksploataciji nalaze vučni uređaji koji su i preko 30

godina stari i koji nisu građeni prema standardu EN 15566, i da su svi delovi standardnog kvačila prema UIC 826 iz 2004. godine predviđeni za opterećenje 850 kN. Vagoni u međunarodnom saobraćaju posle 1985. godine, nezavisno od njihove godine proizvodnje, moraju da imaju tegljenik sa minimalnom silom kidanja $850 \div 1000$ kN.

Pri sistematizaciji slučajeva raskinuća u periodu 2007-2011. i 2018-2020. godine rezultati u potpoglavlju 3.1.6 pokazuju da najčešće dolazi do loma kuke tegljenika (26,6% ÷ 30,6%), tegljenice (16,1% ÷ 19,4%), a znatno manje do loma vešalice (4,6% ÷ 9,2%) i zavojnog vretena (6,4% ÷ 8,3%) slučajeva. U znatno većem broju raskinuća je dolazilo do loma i drugih elemenata kvačila kao što je stremen (8,3% ÷ 9,6%). Takođe uočeno je da je u poslednjih 10 godina došlo do povećanja ionako velikog broja otkaza elemenata tegljenika, dok se broj otkaza elemenata kvačila, koji je inače mali, dodatno smanjio. Posebno se smanjio broj otkaza vešalica sa 9,2% na 4,6%, iako vešalice kao sigurnosni element treba da imaju najveći broj otkaza. Stoga je, ispitivanjem vešalica, potrebno ustanoviti da li se njihove mehaničke karakteristike nalaze u propisanim granicama ili su iznad propisanih, što uslovljava otkaz drugih elemenata kvačila i tegljenika. Utvrđivanje karakteristika vešalica je izvršeno:

- analizom vešalica kod kojih je u eksploataciji došlo do loma (poglavlje 5) i
- eksperimentalnim ispitivanjem vešalica posle 30 i više godina u eksploataciji (poglavlje 6).

Na javnoj železničkoj mreži RS saobraćaju teretna vozila različitih imaoaca i operatera: „Srbija Kargo“ a.d., SI – Cargo Logistics d.o.o od 2015. godine, „Standard logistic“ d.o.o. od 2014 godine a.d., „Kombinovani prevoz“, „Trans cargo logistic“ d.o.o., „Rail Transport Logistic“ d.o.o. od 2017. godine [51] i drugih. Bez obzira da li se radi o domaćim operaterima ili stranim, u sastavu njihovih kompozicija mogu se naći teretna vozila različitih imaoaca vozila. Takođe operater „Srbija Kargo“ a.d. za potrebe izvršenja ugovorenih obaveza, iznajmljuje određen broj teretnih vagona stranih operatera ili imaoaca vozila. Da bi se koristila u međunarodnom saobraćaju teretni vagoni moraju da ispunjavaju uslove Opšteg ugovora za korišćenje teretnih kola (OUK) [31]. Ovo znači da se pojava raskinuća može dogoditi i na teretnim vagonima, opremljenim sa delovima vučnog uređaja različitog proizvođača i različitog načina održavanja. Stoga se pri izboru elemenata za ispitivanja izbor nije ograničio samo na elemente vučnih uređaja teretnih vagona operatera „Srbija Kargo“ a.d., nego su korišćeni i elementi vučnih uređaja drugih operatera.

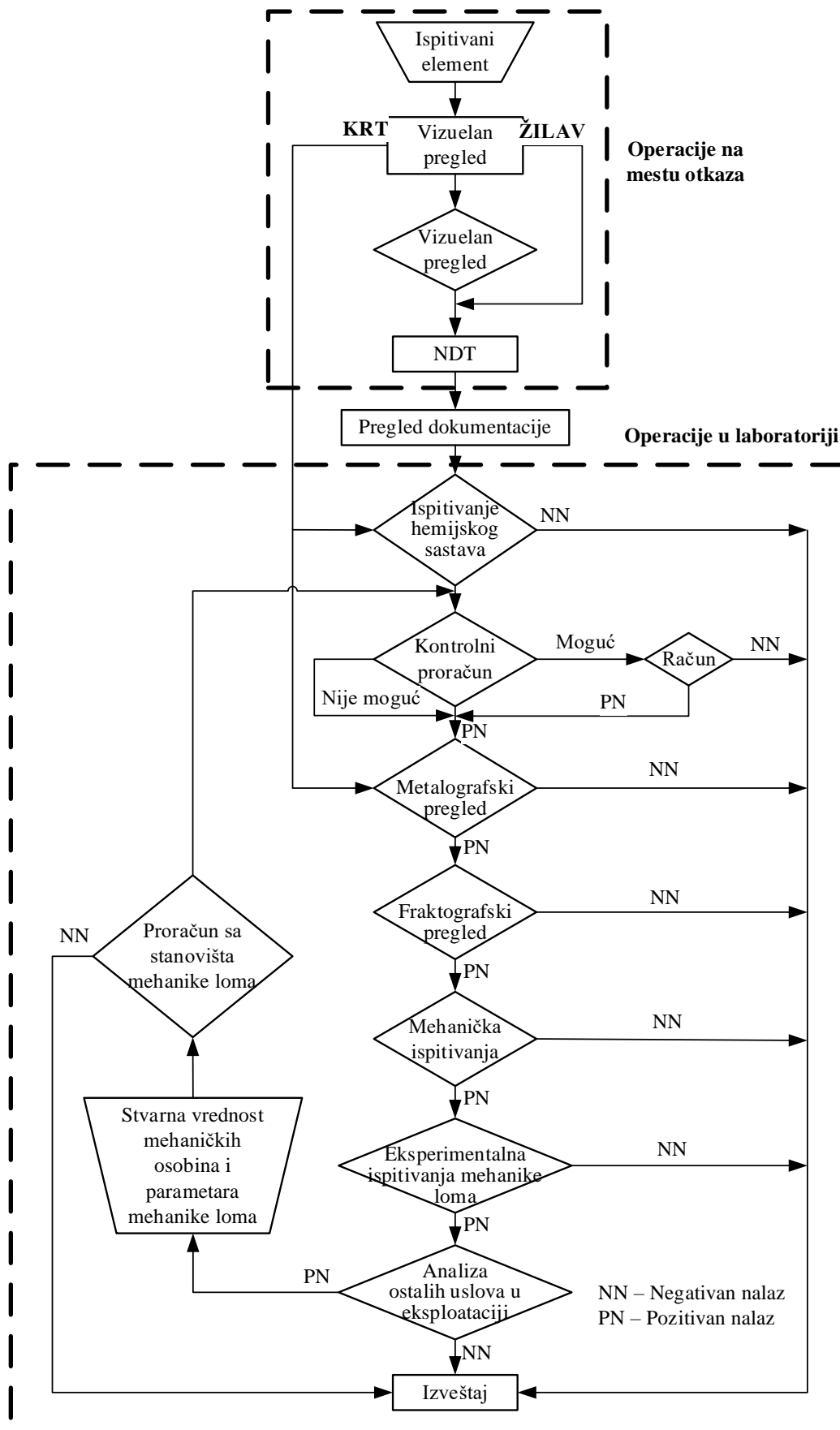
4.3. Metodologija analize loma

Analiza loma se sprovodi radi utvrđivanja uzroka i okolnosti loma, uz primenu metoda za određivanje rasta i širenja pukotina kada je to potrebno. Pri analizi loma materijala koristi se odgovarajuća metodologija koja uključuje procenu opterećenja, proveru materija i tehnologije izrade, proveru tehničkih i fizičkih karakteristika loma [42]. Postupci utvrđivanja stanja kroz ispitivanja i kontrolu obuhvataju:

- vizuelan pregled,
- izgled površine loma,
- utvrđivanje prelazne temperature iz duktilnog u kruti lom (nil-ductility temperature - NDT)
- ispitivanje hemijskog sastava,
- metalografski pregled,
- fraktografski pregled,
- mehanička ispitivanja,
- i druga eksperimentalna ispitivanja po potrebi.

Potrebno je navedene postupke primeniti odgovarajućim redosledom, da se ne bi uništili dokazi ili došlo do pogrešnih zaključaka. Redosled postupaka pri analizi loma prikazan je na slici 4.6 [41], a na njega utiče i vrsta otkaza. Poželjno je pri analizi loma prikupiti dokumentaciju vezanu za materijal,

proračun, upotrebu elemenata ili sistema. Ponovni proračun dela je potreban radi provere dimenzija i oblika, i izbora materijala.



Slika 4.6. Opšti model kvaliteta za utvrđivanje otkaza [41]

Pri vizuelnom pregledu slomljenog dela pažljivim rukovanjem treba sprečiti uništavanje potencijalnih dokaza. Vizuelni pregled se može izvršiti i uz pomoć lupe ili mikroskopa malog uvećanja.

Veoma bitan deo analize čine metalografski i fraktografski pregled, pre kojih je potrebno izvršiti hemijsku analizu materijala. Metalografski pregled predstavlja utvrđivanje mikrostrukture materijala koji nam ukazuje na mehaničke osobine materijala i daje potrebne informacije za utvrđivanje termičke obrade materijala. Vršiti se putem optičkog ili elektronskog mikroskopa sa različitim uvećanjem. Optički mikroskop ima ograničenu rezoluciju (do 200 puta uvećanje) i dubinu polja (površina koja se posmatra mora biti ravna).

Priprema uzoraka za utvrđivanje mikrostrukture materijala vrši se sečenjem uzorka, pri čemu ne sme da dođe do promena u strukturi materijala. Isečeni uzorak se dalje priprema brušenjem, radi dobijanja ravne površine. Pri mašinskom brušenju uzorak se može zagrejati do visokih temperatura pa treba obezbediti njegovo hlađenje. Posle brušenja se vrši poliranje koje treba da sa površine ukloni tragove brušenja. Pri poliranju se koriste suspenzija glinice (Al_2O_3) ili magnezijum oksida (MgO) ili, za tvrde materijale, dijamantska pasta u kombinaciji sa filcom. Pri poliranju se mora vršiti kvašenje uz stalno kretanje uzorka po disku čime se mehanički smanjuju neravnine. Posle završenog poliranja uzorak se pere vodom, pa alkoholom i suši toplim vazduhom. Uzorak se nagrizava različitim hemijskim sredstvima i posmatra pod mikroskopom sa različitim uvećanjem radi utvrđivanja mikrostrukture. Sredstva koja se koriste za nagrizanje su rastvori na primer nital ($2-4\text{ cm}^3$ azotne kiseline u 100 cm^3 etil alkohola), koji se koristi kada se pretpostavlja feritna, perlitna ili martenzitna struktura.

Fraktografski pregled je ispitivanje prelomljenih površina optičkim i skenirajućem elektronskim mikroskopom (SEM) i daje informacije o mehanizmu loma. Pri korišćenju SEM nije potrebna posebna priprema uzorka, a veličina uzorka može biti veća.

Mehaničkim ispitivanjima se proveravaju mehaničke karakteristike materijala, najčešće tvrdoća, jer ne oštećuje uzorak, a potom napon tečenja i zatezna čvrstoća, žilavost i dr.

Poseban deo analize je utvrđivanje prelazne temperature iz duktilnog u kruti lom (nil-ductility temperature - NDT) koji se vrši ispitivanjem na Šarpijevom klatnu.

Analizirajući slučajeve otkaza elemenata vučnog uređaja sa aspekta osnovnog uzroka nastanka loma, možemo ih grupisati nekoliko kategorija:

- lomove nastale usled zamora materijala – to su lomovi nastali na mestima koncentracije napona (na kojima može postojati i tragova korozije koji su sekundarni, nastali kao posledica naknadne oksidacije), kao što su promena poprečnog preseka kuke tegljenika tipa B (slika 3.37),
- krte lomove, nastale kao posledica korozije, gde se kao posledica površinskih oštećenja u uslovima istovremenog dejstva korozije i promenljivog cikličnog opterećenja javlja širenje korozije u poprečnom preseku, bez vidljivih znakova koncentracije napona, kao što je kidanje vešalice (slika 3.36),
- krte lomove, nastale kao posledica inicijalnih pukotina ili površinskih oštećenja na mestu iniciranja loma (odakle se lom širi makroskopski vidljivim linijama), kao što je lom viljuškaste tegljenice (slika 3.33 i 3.34), lom kuke tegljenika na promeni poprečnog preseka (slika 3.38 i 3.41), lom navrtke uz vešalicu (slika 3.39) i lom vešalice (slika 3.40),
- duktilne lomove, gde je jasno vidljivo suženje poprečnog preseka pre loma, kao kod loma vešalice (slika 5.1 a i b).

Ovakva raznorodnost lomova ukazuje da ne postoji jedan dominantan faktor koji prouzrokuje lomove elemenata vučnih uređaja, već se radi o više različitih uzroka koji ne moraju uvek biti podjednako prisutni. Koji uzroci će biti dominantni zavisi od mnogo faktora:

- hemijskog sastava matrajala,
- primenjene termičke obrade, a time i strukture materijala,
- postojanja grešaka u materijalu ili obradi,
- pojave zarezova ili površinskih oštećenja u eksploataciji,
- veličine i intenziteta opterećenja,
- brzina unošenja opterećenja i drugog.

Sa obzirom da se u postupku istraživanja raskinuća ne sačuva mnogo informacija o samom lomu, nije moguće sa sigurnošću utvrditi kakva je raspodela tipova loma. Poznavanje učestalosti pojave različitih vrsta lomova omogućilo bi preciznije utvrđivanje najvažnijih osnovnih faktora raskinuća i omogućilo predlaganje najefikasnijih mera za smanjenje njihovog uticaja.

Pored klasičnog pristupa proračunu mašinskih elemenata baziranog na naponu tečenja i stepenu sigurnosti, razvijaju se u poslednjih 150 godina i metode procene veka usled zamora materijala. One proučavaju zamor materijala na mestima sa izvorom koncentracije napona. Prema autorima Momčilović i dr. [45] „...savremene metode ili algoritmi za proučavanje fenomena zamora na elementima ili konstrukcijama sa izvorom koncentracije napona mogu se grupisati u:

- metode zasnovane na naponu,
- metode zasnovane na deformaciji i
- metode koje koriste mehaniku loma.“

Proračun mašinskih delova ranije se zasnivao isključivo na naponu tečenja i stepenu sigurnosti. Počevši od prvih ispitivanja koja su povezala koncentraciju napona sa zamorom ova oblast se razvija i danas predstavlja zasebnu oblast mehanike loma. Mehanici loma proučava rast makro prslina koje dovode do loma linearno-elastičnom mehanikom loma (LEML) i nelinearnom mehanikom loma (NML). Prve izraze koji definišu faktor koncentracije napona K_t (4.3) je dao Kirsch, a faktora koncentracije napona na zamor K_f je uveo Thum (4.4) [45]:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (4.3)$$

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_k} \quad (4.4)$$

gde je:

σ_{max} – najveći napon u izvoru koncentracije napona, odnosno trajna dinamička čvrstoća epruvete sa zarezom,

σ_n – nazivni napon u elementu bez izvora koncentracije napona,

σ_k - trajna dinamička čvrstoća epruvete bez zareza.

Zbog osetljivosti metala visokih mehaničkih karakteristika na inicijalne prsline dolazi do iznenadnih lomova, čak i kada su radni naponi niži od dozvoljenih, posebno u uslovima ravanskog stanja deformacija. Zbog toga je značajno poznavanje žilavosti materijala, koji se odnosi na otpor širenju prsline. Napon koji dovodi do porasta prsline, odnosno prag rasta zamorne prsline, pri trajnoj dinamičkoj čvrstoći zavisi od veličine prsline prema izrazu 4.5 [45]:

$$\Delta\sigma_{th}(a_{0,H}) = \frac{\Delta K_{th,lc}}{Y \cdot \sqrt{\pi \cdot (a + a_{0,H})}} \quad (4.5)$$

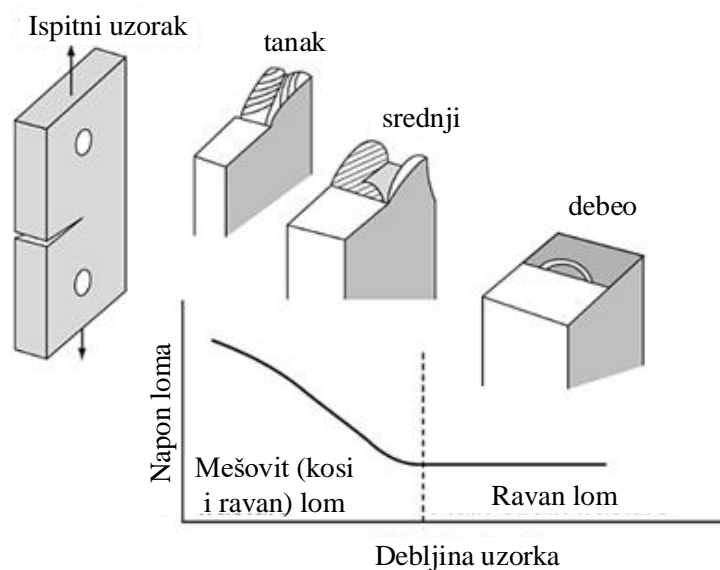
gde je:

$\Delta K_{th,lc}$ - prag rasta zamorne prsline,

Y – geometrijski faktor prsline,

$a_{0,H}$ – dužina prsline.

Pri analizi loma elemenata vučnih uređaja treba imati u vidu da debljina materijala takođe utiče na vrstu loma (slika 4.7). Ravansko stanje deformacija izazivaju naponi koji dovode do pojave deformacija u dva međusobno upravna pravca, dok je treća komponenta deformacije, upravna na ravan jednaka nuli.



Slika 4.7. Uticaj debljine materijala na vrstu loma

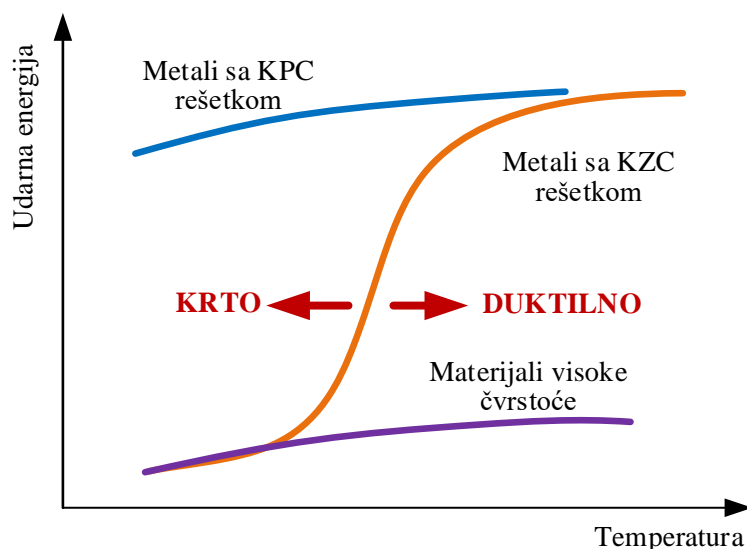
Pri analizi raskinuća, od strane istražne komisije se navodi da je uzrok raskinuća, u preko 50% svih slučajeva, materijal elemenata vučnih uređaja koji su otkazali. Kako se sa slika 3.33 ÷ 3.42 vidi, u najvećem broju otkaza elemenata vučnih uređaja prisutan je krti lom, a ne lom usled zamora materijala (slika 3.37). Krti lom se javlja pod uticajem brojnih faktora, a uglavnom je prouzrokovan postojanjem koncentracije napona usled inicijalne pukotine ili oštećenja, korozije i dr. Stoga će se u daljem istraživanju najveća pažnja posvetiti krtim lomovima, a ne istraživanju loma usled zamora materijala elemenata vučnih uređaja.

Poznato je da i duktilni materijali mogu da se lome krto ako su izloženi:

- (relativno) niskim temperaturama,
- velikim brzinama deformacije ili
- koncentraciji napona (promena poprečnog preseka, inicijalna pukotina i dr.),
- korozionoj sredini i dr.

Sniženje temperature utiče na energiju loma (energiju udara), a prelaz iz duktilnog loma u krti se ne odvija na jednoj temperaturi, već u temperaturnom intervalu (slika 4.8). Prelaznu temperaturu imaju materijali sa kubnom zapreminski centriranom kristalnom rešetkom (KZC), kao što su čelici sa perlitnom i feritnom strukturom. Materijali sa kubnom površinski centriranom rešetkom (KPC) sa promenom temperature ne menjaju svoje mehaničke karakteristike, odnosno kod ovih materijala ne dolazi do prelaza iz duktilnog u krti lom [43].

Iako na krti lom utiču niske temperature, pri analizi raskinuća po mesecima (potpoglavlje 3.17) nije utvrđeno značajno povećanje raskinuća na niskim temperaturama u zimskim mesecima, već se naprotiv, najveći broj raskinuća dešava na temperaturama od 10°C do 20°C. Ovi rezultati pokazuju da se krti lom na elementima vučnih uređaja ne dešava usled visoke prelazne temperature materijala iz duktilnog u krti lom (NDT), pa se u daljem istraživanju ova pojava nije detaljno proučavala.



Slika 4.8. Uticaj temperature na energiju udara u zavisnosti od tipa kristalne rešetke [43]

Krti lom može da bude prouzrokovan i velikim brzinama deformacije. Pri dinamičkom udarnom opterećenju dolazi do prostiranja napona i deformacije u obliku talasa kroz metal, jer se brzo uneto opterećenje ne može trenutno preneti na sve delove elementa. Ako deo izložimo udarnom zatezanju kritična brzina koja dovodi do loma nestaje odmah po lomu. Prostiranje plastičnih talasa pri dejstvu udara, ustvari, najčešće dovode do razaranja materijala [46].

Ako kriva napon-deformacija ne zavisi od brzine deformacije, brzina prostranja plastičnih talasa se može odrediti izrazom:

$$c_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon}} \quad (4.1)$$

gde je $d\sigma/d\varepsilon$ nagib krive napon-deformacija. Kritična brzina unosa opterećenja pri kojoj dolazi do loma može da se izračuna iz izraza:

$$v_u = \int_0^{\varepsilon_u} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon \quad (4.2)$$

gde je:

v_u - kritična brzina

ε_u - deformacijapri zatezanju

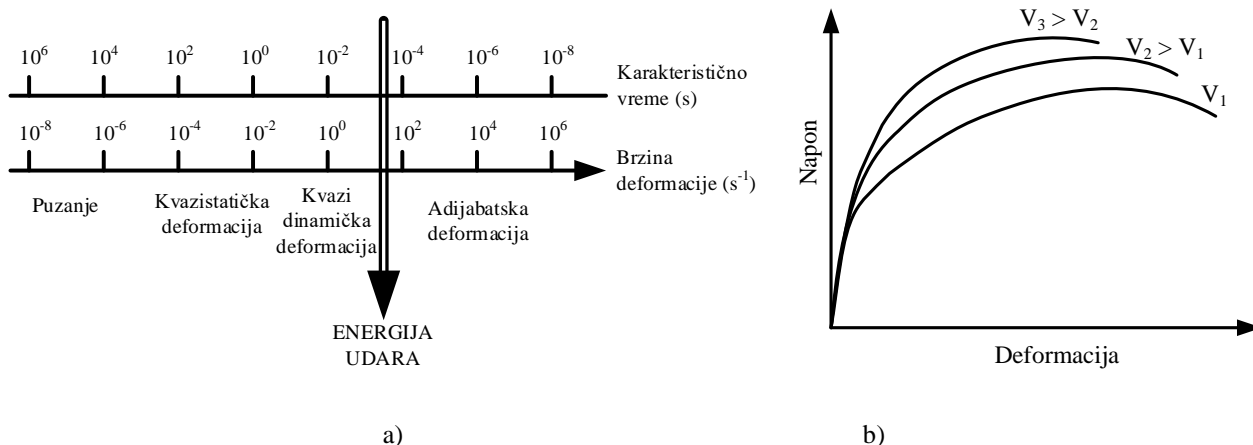
$d\sigma, d\varepsilon$ – promena napona i deformacije.

Vrednost kritične brzine za većinu metala kreće se u granicama od 30 do 150 m/s (108 ÷ 540 km/h).

Procena je da će usled udarnog opterećenja, odnosno trzaja doći do povećanja napona za 10-20% u odnosu na napone dobijen pri statičkom ili kvazistatičkom opterećenju. Usled udara povećana je energija konstrukcije do loma, pri čemu se postiže kritična brzina. Pošto pri brzom unosu opterećenja nema vremena da se deformacija prenese u celom elementu, može doći do preloma u jednom delu nezavisno od toga šta se dešava u drugom delu elementa. Brzina širenja talasa napona u čvrstim telima kreće se oko 900 m/s, a brzina širenja pukotine je oko 1800 m/s. Kod impulsnih opterećenja pukotine koje se jave nemaju vremena da se prošire pre loma.

Brzine deformacija materijala koje se javljaju u eksploataciji i, shodno tome, koriste pri ispitivanju, prikazan je na slici 4.9 a. Za materijale koji su izloženi brzim opterećenjima primenjuje se ispitivanje udarom, odnosno ispitivanje energije udara na Šarpijevom klatnu pri čemu se dobija udarna žilavost

materijala KU ili KV u zavisnosti od zarez na epruveti (U ili V) koja je korišćena pri ispitivanju. Porast brzine deformacije od kvazistatičke do kvazidinamičke kod čelika, dovodi do porasta napona tečenja i zatezne čvrstoće, a smanjenja izduženja (slika 4.9.b) [47].



Slika 4.9. a) Brzina deformacije i karakteristično vreme pri ispitivanju, b) uticaj brzine deformacije na dijagram napon – deformacija [47]

Pri ispitivanju zatezanjem u uzorku se javlja toplota, odnosno porast temperature koji se može zanemariti, pa je proces ispitivanja izotermalni. Pri ispitivanju udarom Šarpijevim klatnomu deformacija na vrhu zarez je adijabatska, jer toplota koja se stvara deformacionim radom nema vremena za prostiranje u okolinu. Stoga se uticaj porasta temperature na napon tečenja mora uzeti u obzir pri poređenju svojstva materijala u zavisnosti od brzine deformacije [47].

Kako se pri analizi brzina pri kojima dolazi do raskinuća (potpoglavlje 3.12) pokazalo da broj raskinuća opada sa porastom brzine, pa se tako čak 58÷65% slučajeva raskinuća desi pri brzinama manjim od 20 km/h, jasno je da brzina kretanja voza ne može uticati na pojavu krtog loma elemenata vučnih uređaja. Međutim, pojava trzaja kao posledica upravljanja vozom pri promeni režima kretanja (npr. iz kočenja u vuču i obrnuto) i relativno kretanje vozila u kompoziciji usled uzdužnih dinamičkih sila može imati za posledicu postizanje kritične brzine i pojavu krtog loma.

Poznato je da pod dejstvom korozione sredine, duktilni materijali počinju da se lome krto, jer se tokom procesa korozije odvija nastanak i rast prsline do loma zbog kombinovanog dejstva zateznog napona i korozione sredine. Prelom usled kombinovanog dejstva korozije i zateznog napona se pojavljuje pri naponima koji imaju nižu vrednost od napona tečenja, i mogu poticati od spoljašnjih opterećenja ili od zaostalih napona [43].

5. ANALIZA OTKAZA VEŠALICA

Imajući u vidu prethodno razmatranje u potpoglavlju 4.2, gde su kao sigurnosni element od preopterećenja propisom [56] definisane vešalice, u daljem radu izvršeno je njihovo ispitivanje radi utvrđivanja uzroka njihovog otkaza, odnosno loma u eksploataciji. Ako vešalice imaju mehaničke karakteristike veće od propisanih, pri opterećenju silama većim od propisanih [56] ne bi došlo do njihovog kidanja, već bi drugi elementi kvačila ili tegljenika mogli otkazati. Na ovu mogućnost ukazuju rezultati u potpoglavlju 3.1.6, gde je utvrđeno da je do otkaza, odnosno loma vešalice, pri raskinuću došlo samo u 4,6% ÷ 9,2% slučajeva. U znatno većem broju raskinuća je dolazilo do loma kuke tegljenika (26,6% ÷ 30,6%), tegljenice (16,1% na 19,4%) i drugih elemenata kvačila kao što je stremen (8,3% ÷ 9,6%). Stoga je potrebno ustanoviti ispitivanjem vešalica da li se njihove mehaničke karakteristike nalaze u propisanim granicama ili su iznad propisanih, što uslovljava otkaz drugih elemenata kvačila i tegljenika. Utvrđivanje karakteristika vešalica je izvršeno:

- analizom vešalica kod kojih je u eksploataciji došlo do loma i
- eksperimentalnim ispitivanjem vešalica posle 30 i više godina u eksploataciji.

Vešalice kod kojih je u eksploataciji došlo do loma su analizirane modelom za utvrđivanje otkaza opisanom u potpoglavlju 4.3, pri čemu su izvršena sledeća ispitivanja i pregledi:

- vizuelan pregled uzorka i površine loma,
- ispitivanje hemijskog sastava,
- metalografski i fraktografski pregled i
- mehanička ispitivanja tvrdoće i čvrstoće uzoraka.

Radi utvrđivanja uzroka loma vešalica ispitana su dva karakteristična slučaja loma vešalica pri raskinuću voza:

- duktilan lom (slika 5.1 a, b) i
- krti lom (slika 5.1 c, d).



Slika 5.1 Lom vešalice, a) duktilan lom (uzorak 1), b) detalj duktilnog loma, c) krti lom (uzorak 2), d) detalj krtog loma

Pri raskinuću voza broj 46830 koje se desilo u stanici Pančevo glavna, dana 28.11.2020.godine, došlo je do pucanja vešalice na teretnom vagonu koji je bio 11 u kompoziciji od lokomotive. Kompozicija se sastojala od 20 Eaos kola natovarenih rudom koja su saobraćala od Dimitrovgrada u Suboticu, dužina voza je bila 280 m, tara 438 t, neto masa 1116 t, a kočna masa voza 1049 t. Vagon na kome je došlo do loma vešalice je tipa Eaos, broj 31 55 5331 154-1, operatera RCH Mađarskih železnica (slika 5.2 a). Raskinuće je nastupilo usled krtog loma vešalice (slika 5.1 b). Temperatura pri raskinuću je bila $+1^{\circ}\text{C}$, što isključuje uticaj niskih temperatura na povećanje krtosti materijala. Okolnosti raskinuća nisu jasne, pošto je voz stajao na stanici Pančevo glavna i pre pokretanja je ustanovljeno raskinuće što može da znači da je raskinut pri pokušaju pokretanja ili u dolasku u stanicu pri kočenju, što je bilo 2 dana ranije. Na slici loma, slikanoj pri uviđaju, vidi se na lomu deo poprečnog preseka sa promenjenom bojom koja ukazuje na koroziju (slika 5.2 b), ali ne i znakovi zamora materijala. Susnežica koja je trajala za vreme uviđaja ubrzala je proces korozije, tako da je u vreme ispitivanja površine loma, na celom poprečnom preseku bilo prisutno znakova korozije. Zaključak isledne komisije je da se radi o starom lomu, odnosno lomu usled zamora materijala, jer su na poprečnom preseku vidljive dve boje, jedna je siva (sveže pucanje čelika), dok je drugi deo narandžast što, po islednoj komisiji, ukazuje na koroziju i smatraju da je nastao znatno ranije [44].



a)



b)

Slika 5.2. Raskinuće voza broj 46830, Pančevo, 28.11.2020. godine, a) slika sa mesta raskinuća, b) raskinuti deo kvačila

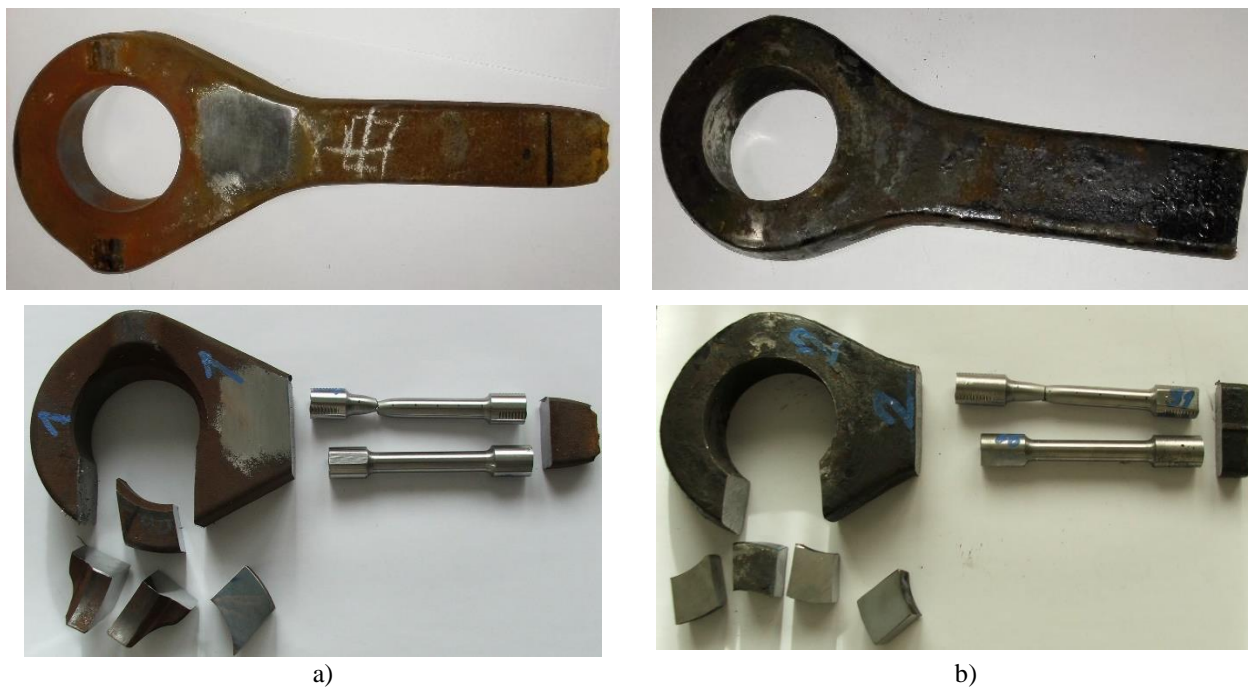
Okolnosti duktilnog loma vešalice, koje je dovelo do raskinuća nisu utvrđene.

Vešalica sa duktilnim lomom označena je u daljem tekstu kao uzorak 1, a vešalica sa krtim lomom kao uzorak 2. Vizelan pregled i provera dimenzija su pokazale da su oba uzorka u predviđenim granicama propisanim UIC 520 [52], osim delova na kojima je nastupio lom.

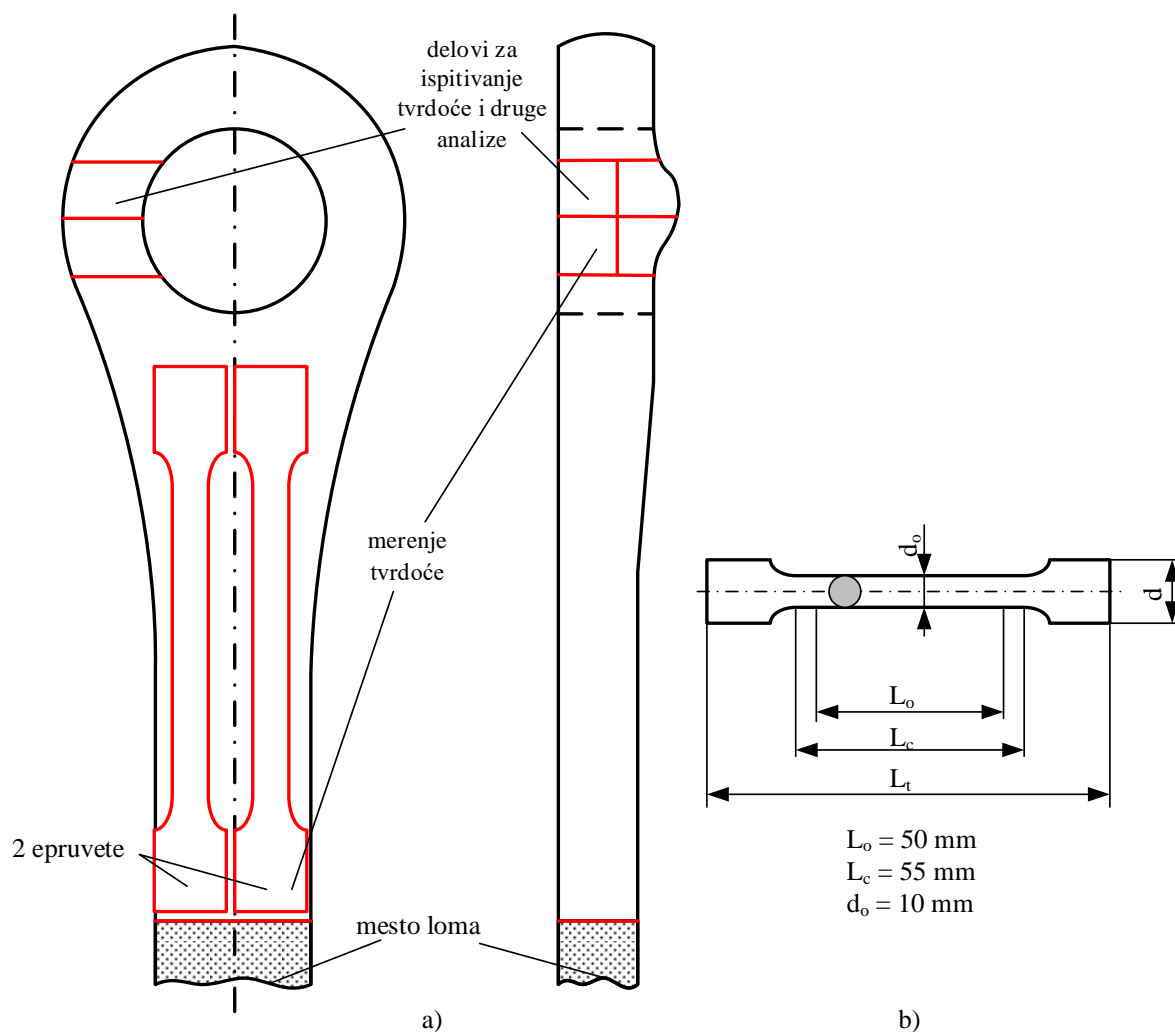
5.2. Priprema uzoraka za ispitivanje

Od oba uzorka vešalica su isečeni delovi i epruvete za dalju analizu i ispitivanja. Izmerena je tvrdoća na 2 mesta na oba uzorka (slika 5.2). Jedno mesto merenja tvrdoće je iznad mesta preloma, a drugo je na delovima spoja vešalice sa svornjakom kvačila.

Iz naznačenih delova uzoraka isečene su po 2 epruvete (slika 5.4.a), prema standardu ISO 6892-1 [80], kružnog poprečnog preseka standardnih dimenzija prema mogućnostima uzorka: $L_0 = 50$ mm, $L_c = 55$ mm, $d_0 = 9,86$ mm (slika 5.4.b).



Slika 5.3. Uzorci slomljenih vešalica, a) uzorak 1 (pre i posle isecanja), b) uzorak 2 (pre i posle isecanja)

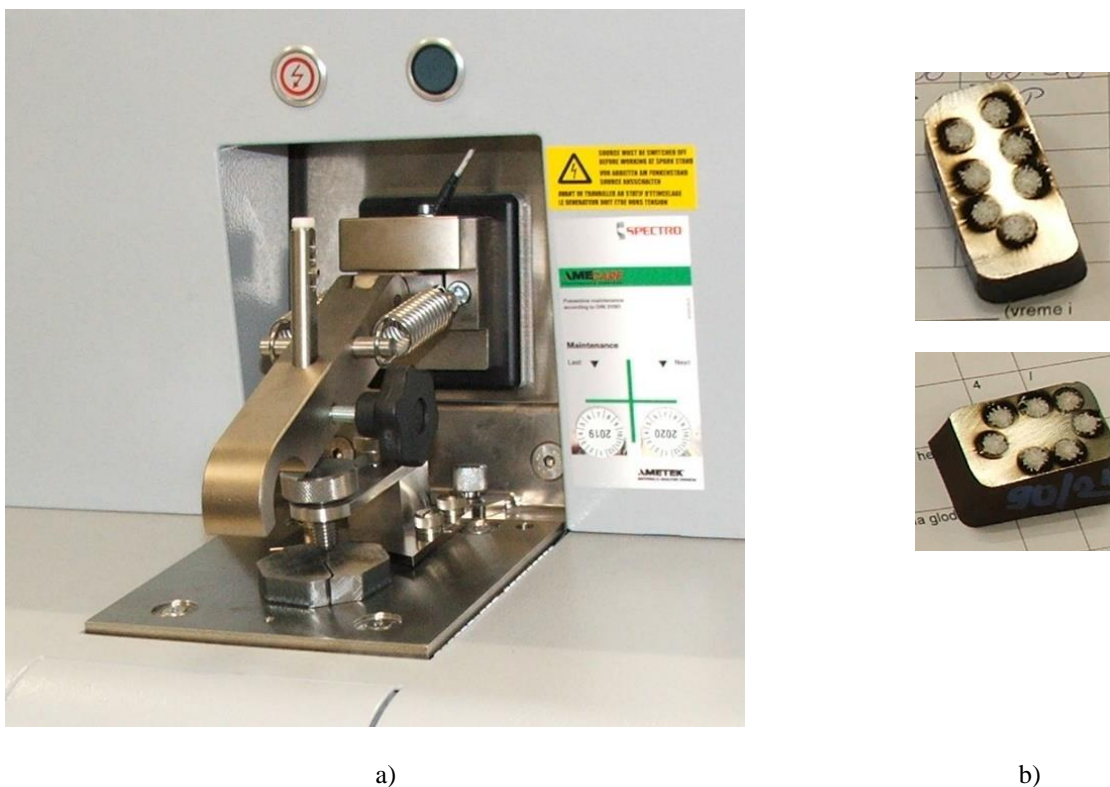


Slika 5.4. Plan pripreme uzoraka slomljenih vešalica, a) plan sečenja uzoraka, b) standardna epruveta kružnog poprečnog preseka

5.2. Ispitivanje hemijskog sastava

Ispitivanje hemijskog sastava je izvršeno na spektrometru Spectrolab LACM12 metodom OES, proizvođača Ametek Materials Analysis Division (slika 5.5.a) u hemijskoj laboratoriji Instituta IMW u Lužicama, Kragujevac. Delovi za hemijsku analizu su isečeni iz uzoraka 1 i 2 na mestu spajanja vešalica sa svornjakom kvačila. U laboratoriji Instituta IMW izvršena je tehnička i tehnološka priprema uzoraka za hemijsku analizu isecanjem i brušenjem, kao i za dalja ispitivanja.

Optičko emisioni spektrometar (OES) vrši kvantitativnu hemijsku analizu čvrstih uzoraka koje su od metalnih legura (slika 5.4.b). OES spektrometar je fabrički kalibrisan, a rezultati ispitivanja se upoređuju (komparativna tehnika) sa sertifikovanim referentnim materijalima čiji se podaci nalaze u memoriji [38]. Hemijski elementi koji se nalaze u uzorku se detektuju po talasnim dužinama karakterističnog zračenja prema intenzitetu zračenja i količini sadržaja, tako što vrši njihovo upoređivanje sa poznatim intenzitetima karakterističnog zračenja [38].



Slika 5.5. Ispitivanje uzoraka na spektrometru Spectrolab LACM12, a) spektrometar Spectrolab LACM12, b) uzorci posle ispitivanja

Rezultati ispitivanja hemijskog sastava

Utvrđen hemijski sastav uzoraka 1 i 2 vešalica, kao i propisane vrednosti za materijal vešalica prema objavi UIC 826 [58] i standardu SRPS EN 15566 [56] dat je u tabeli 5.1. Upoređivanjem sa propisanim vrednostima definisanim u objavi UIC 826 koja propisuje tehničke uslove za isporuku kvačila vučnih i vučenih vozila, vidi se da se hemijski sastav oba uzorka nalazi u propisanim granicama. Uočljivo je međutim da uzorak 1 ima znatno veću sadržaj hroma od uzorka 2, kod koga je sadržaj hroma veoma mali. Materijal uzorka 1 je nisko legirani čelik sa sadržajem hroma 1,15% i ugljenika 0,41%, što odgovara čeliku oznake 41Cr4. Hemijski sastav uzorka 2 odgovara nelegiranom srednjeugljeničnom čeliku sa sadržajem ugljenika 0,47%, što odgovara čeliku oznake C45.

Materijal uzorka 1 odgovara preporučenom materijalu za vešalice, niskolegiranom čeliku oznake 41Cr4 prema objavi UIC 826, prilog B za standardna kvačila za minimalnom silom kidanja 850 kN

iz 2004. godine. Kako su obe vešalice, prema oznakama, proizvedene posle ove godine (uzorak 1 - 2009. godine, a uzorak 2 - 2012.) morale su za upotrebu u međunarodnom saobraćaju ispuniti zahteve objave UIC 826 iz 2004. godine kao i SRPS EN 15566 iz 2009. Prema objavi UIC 826 [58] kao minimalne vrednosti hemijskog sastava vešalica dozvoljeni su srednjeugljenični čelici, što odgovara uzorku 2, a preporučeni je niskolegirani čelik 41Cr4, što odgovara uzorku 1. Prema standardu SRPS EN 15566, ako nije drugačije definisano tehničkim uslovima, materijali i termička obrada elemenata kvačila bira se iz standarda EN 10083 serije (standard EN10083-2 [82] za srednjeugljenične čelike i EN10083-3 [83] za niskolegirane čelike).

Tabela 5.1. Hemijski sastav vešalica

Vešalica	Termička obrada	Sadržaj elemenata					
		C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	S (%)	P (%)
Minimalno propisano [58]	Normalizovane	≤ 0,50	0,40÷0,80	≤ 0,40	nije propisan	≤ 0,045	≤ 0,045
	Kaljene i otpuštane	0,57÷0,65	0,60÷0,90	0,15÷0,40	nije propisan	≤ 0,045	≤ 0,045
41Cr4 [83]	-	0,38÷0,45	0,60÷0,90	≤ 0,40	0,90÷1,20	≤ 0,035	≤ 0,025
C45 [82]	-	0,42÷0,50	0,50÷0,80	≤ 0,40	nije propisan	≤ 0,045	≤ 0,045
Izmereno – uzorak 1	Kaljena i otpuššana ili normalizovana	0,41	0,82	0,31	1,15	0,032	0,014
Izmereno – uzorak 2	Kaljena i otpuššana ili normalizovana	0,47	0,69	0,18	0,07	0,009	0,005

Niskolegirani i ugljenični (nelegirani) čelici imaju istu strukturu i slične osobine. Legirajući elementi poboljšavaju neke osobine čelika što zavisi od vrste i količine legirajućih elemenata. Niskolegirani čelici imaju veću žilavost i napon tečenja pri istoj čvrstoći nego ugljenični čelici. Takođe imaju veću čvrstoću na povišenim temperaturama i manje je verovatnoća stvaranja prslina [39]. Niskolegirani čelik sa sadržajem do 5% hroma povećava zateznu čvrstoću, napon tečenja i sposobnost deformisanja. Sadržaj hroma veći od 1% smanjuje žilavost. Povećanjem sadržaja hroma raste otpornost prema oksidaciji na povišenim temperaturama i otpornost prema koroziji [39].

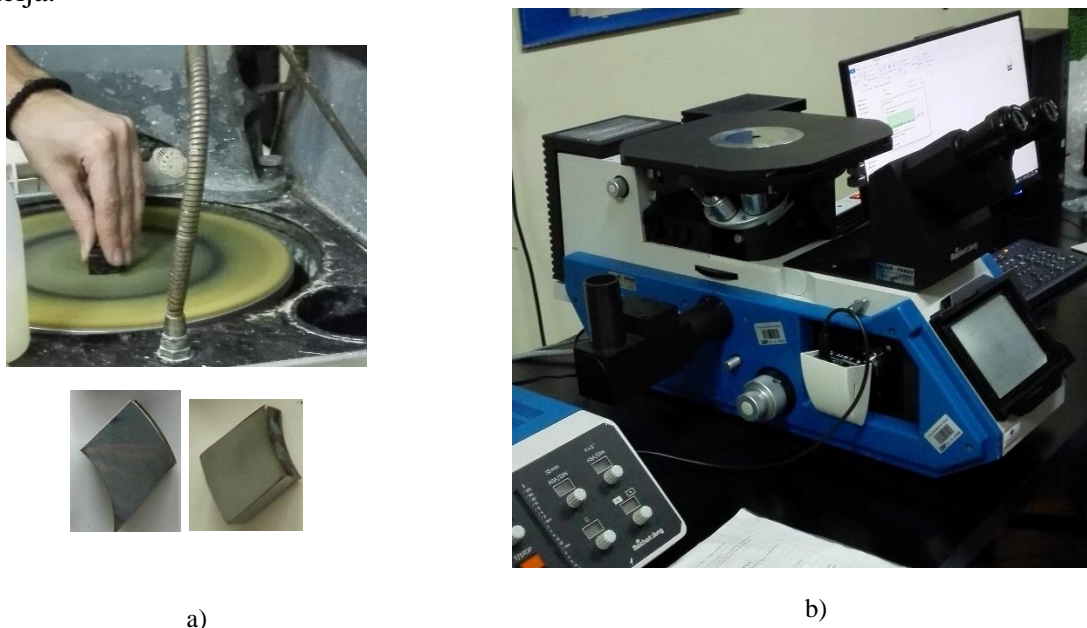
Ispitivani delovi su napravljeni od čelika za poboljšanje, koji posle predviđene termičke obrade (koja je najčešće kaljenje i visoko otpuštanje) imaju visok napon tečenja i zatezne čvrstoće, dobru plastičnost, nisu mnogo osetljivi na koncentraciju napona, imaju visoku dinamičku čvrstoću i dobru žilavost [39].

5.3. Metalografski i fraktografski pregled

Uzorci za metalografski pregled su uzeti na mestu spajanja vešalica sa svornjakom kvačila. Uzorci su posle brušenja pripremljeni najpre poliranjem sa glicom i dijamantskom pastom (slika 5.6.a), pa nagrizanjem 2% nitalom (rastvorom azotne kiseline u alkoholu) u trajanju od 5 s. Mikroskopski metalografski pregled uzoraka izvršen je na mikroskopu tipa Reichert Jung MEF3 (slika 5.6.b) sa uvećanjem 200x i 500x, u laboratoriji Tehnološko metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

Mikroskop tipa Reichert Jung MEF3 je invertni optički mikroskop, koji se koristi za proučavanje makro i mikro strukture keramike, metalnih uzoraka i dr. Ima mogućnost snimanja digitalnom kamerom. Okulari imaju uvećanje 10x, a optička sočiva uvećanje od 2x do 100x. Uzorak se osvetljava

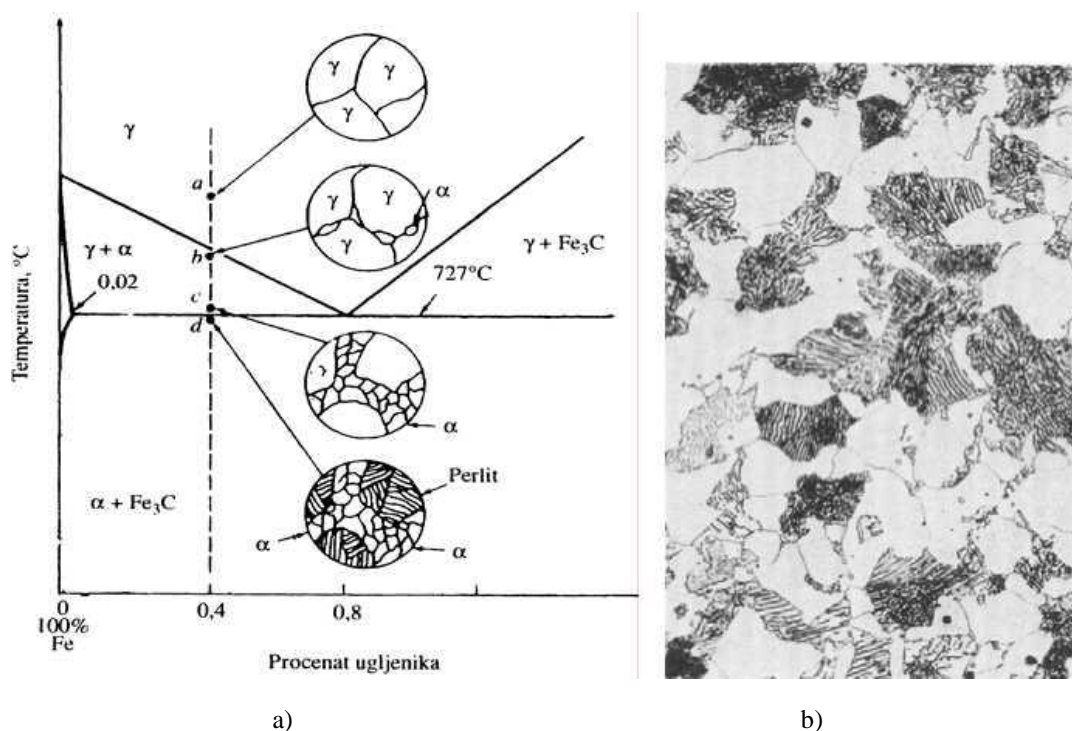
volframovom halogenom lampom. Metode analize uključuju svjetlo polje, tamno polje, polarizovano (sa kompenzatorskim modulima) i diferencijalno interferenciono kontrastno slikanje. Mikroskopski pregled uzoraka je izvršen pod povećanjem 200x i 500x. Pri analizi je uzet u obzir i poznat hemijski sastav uzorka, kao i propisane termičke obrade uzorka, koje mogu da budu ili kaljenje i otpuštanje ili normalizacija.



Slika 5.6. Mikroskopski metalografski pregled uzoraka, a) priprema za metalografski pregled (poliranje), b) pregled uzoraka pod mikroskopom

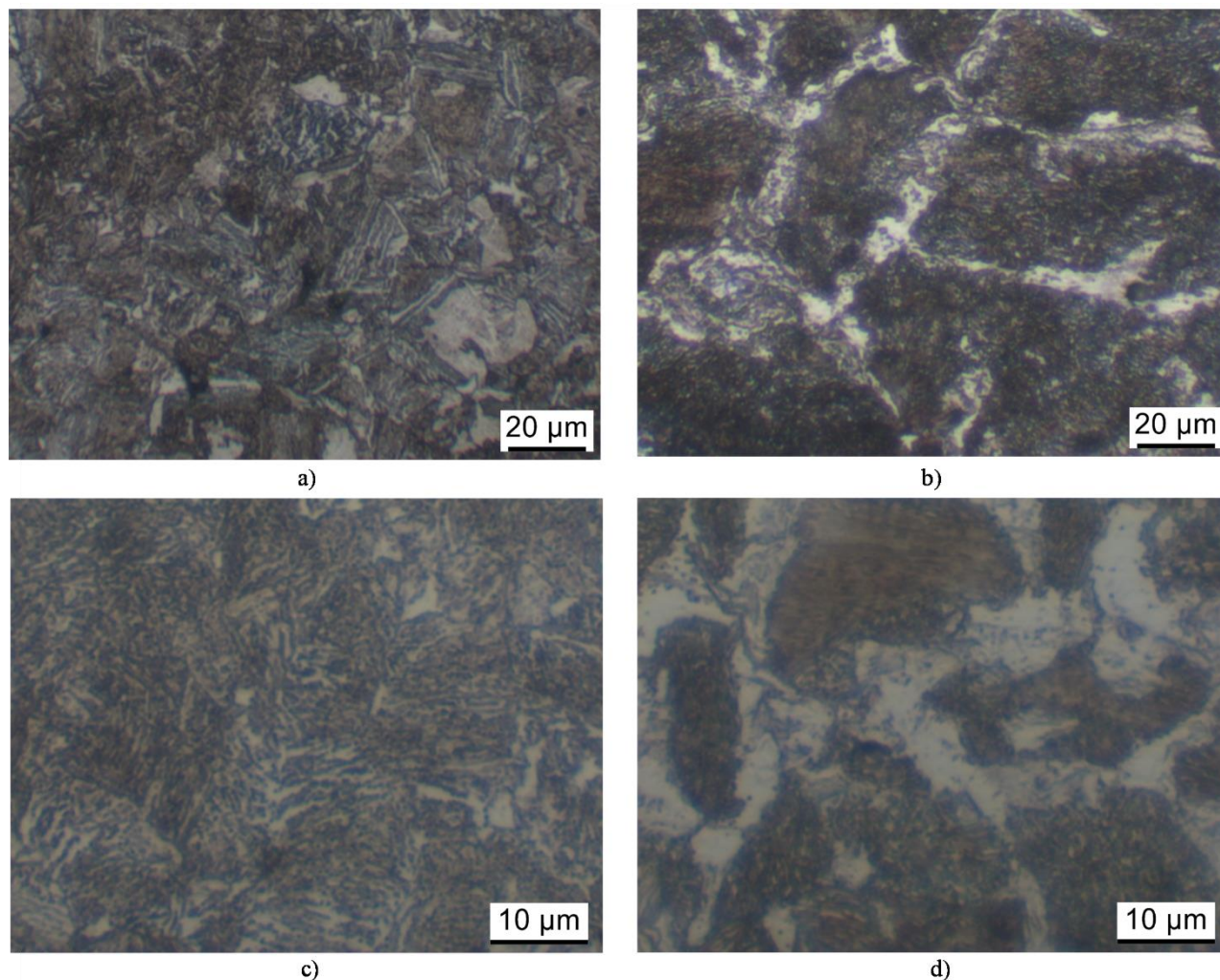
Rezultati metalografskog i fraktografskog pregleda

Sa obzirom da sadržaj ugljenika kod oba uzorka iznosi ispod 0,8% radi se o podeutektoidnim čelicima (slika 5.7.a), čija bi mikrostruktura bez poboljšanja bila ferit i eutektoid perlit - mehanička smeša ferita i cementita (slika 5.7.b).



Slika 5.7. Podeutektoidni čelik a) šematski prikaz obrazovanja strukture podeutektoidnog čelika; b) mikrostruktura: svetlo - ferit, tamno – perlit (uvećanje 500x) [39]

Mikrostrukture oba uzorka prikazane su na slici 5.8. Mikrostruktura uzorka 1 je tipičan kaljeni martenzit, kod koga zrna imaju oblik igle sa vrlo finim karbidima (slika 5.8 a, c). Ova mikrostruktura pruža dobru kombinaciju čvrstoće i plastičnosti, što znači da je prethodna termička obrada (očvršćavanje i kaljenje) pravilno izvedena. Mikrostruktura uzorka 2 je tipična feritno-perlitna mikrostruktura (slika 5.8 b, d). Feritna zrna (bela površina) su prekrila prethodne granice austenitnih zrna, ukazujući da je čelik normalizovan. Tamne površine su perlit, koji je smešten u unutrašnjosti zrna prethodnog austenita.

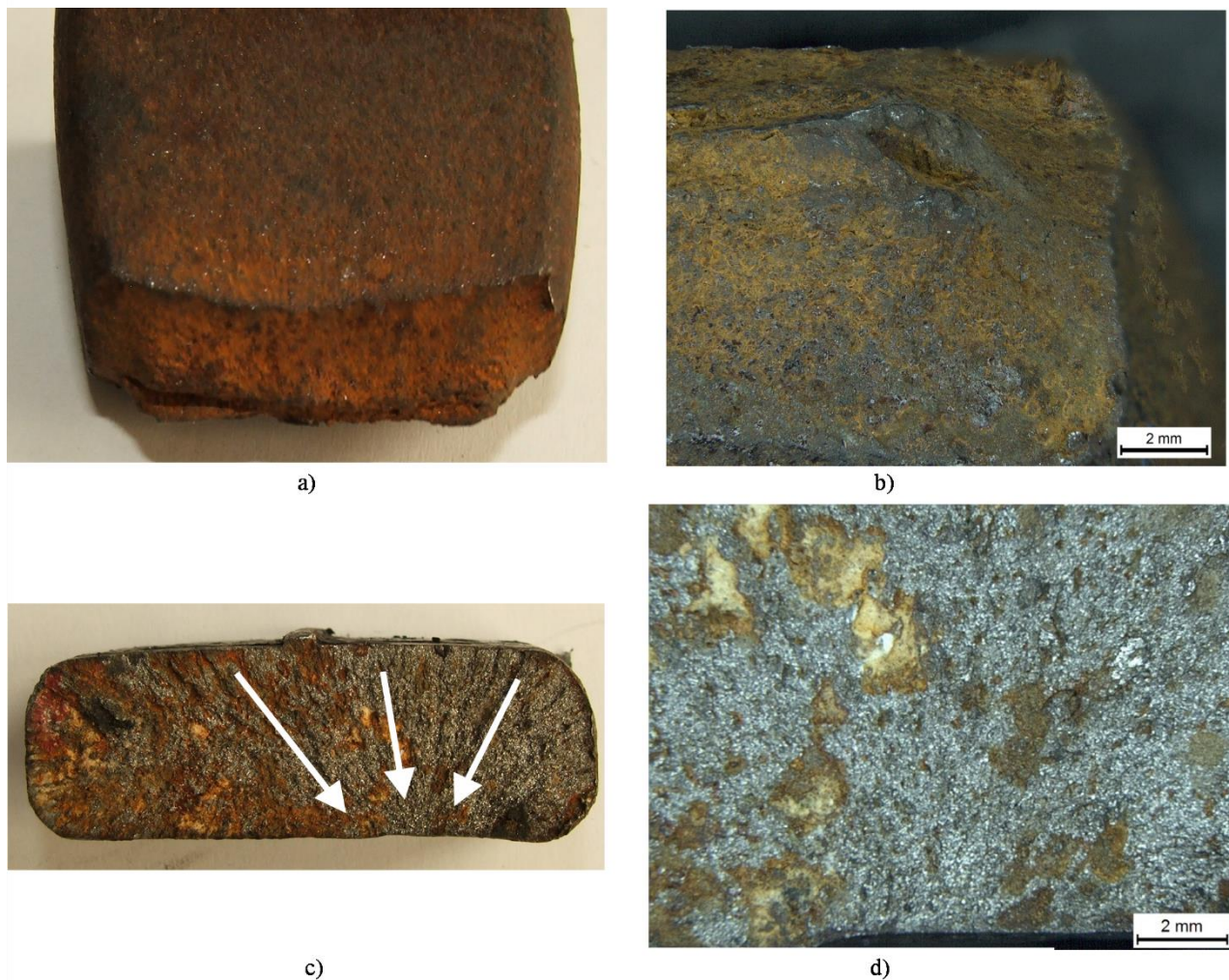


Slika 5.8. Mikrostruktura uzoraka, a) kaljena martenzitna mikrostruktura uzorka 1, uvećanje 200x, b) feritno-perlitna mikrostruktura uzorka 2, uvećanje 200x, c) kaljena martenzitna mikrostruktura uzorka 1, uvećanje 500x, d) feritno-perlitna mikrostruktura uzorka 2, uvećanje 500x

Kako su oba uzorka velikim delom zahvaćena korozijom, detaljna analiza površine loma izvršen je na stereo mikroskopu u laboratoriji Vojno tehničkog instituta u Beogradu. Vizuelnim pregledom površine loma jasno se uočava da je na uzorku 1 došlo je do pojave izduženja vešalice, suženja poprečnog preseka i formiranja vrata pre loma (slika 5.9 a) što je tipično za duktilan lom. Vidljivo smanjenje poprečnog preseka ukazuje na visoke plastične deformacije, kao rezultat preopterećenja zatezanjem, dok simetrični oblik preloma ukazuje da nije bilo koncentracije napona. Uzorak 1 je jako korodiran (slika 5.9 b), ali sama korozija na površini preloma ukazuje da se oksidacija pojavila kasnije, nakon preloma.

Makroskopsko ispitivanje površine preloma uzorka 2 svetlosnim stereo mikroskopom (slika 5.9 c, d) otkriva ravnu površinu preloma, bez makroskopski vidljive plastične deformacije, a na površini loma postoje vrlo uočljivi tragovi rasta pukotine u obliku dobro poznatih ševronskih linija koje upućuju na

mesto nastanka pukotine, tipično za krt transkristalni lom [48]. Detaljniji prikaz uzorka 2 (slika 5.9 d) pokazuje da makroskopske površinske oznake ukazuju da je uzrok loma, odnosno mesto nastanka pukotine, smešten u blizini površine.

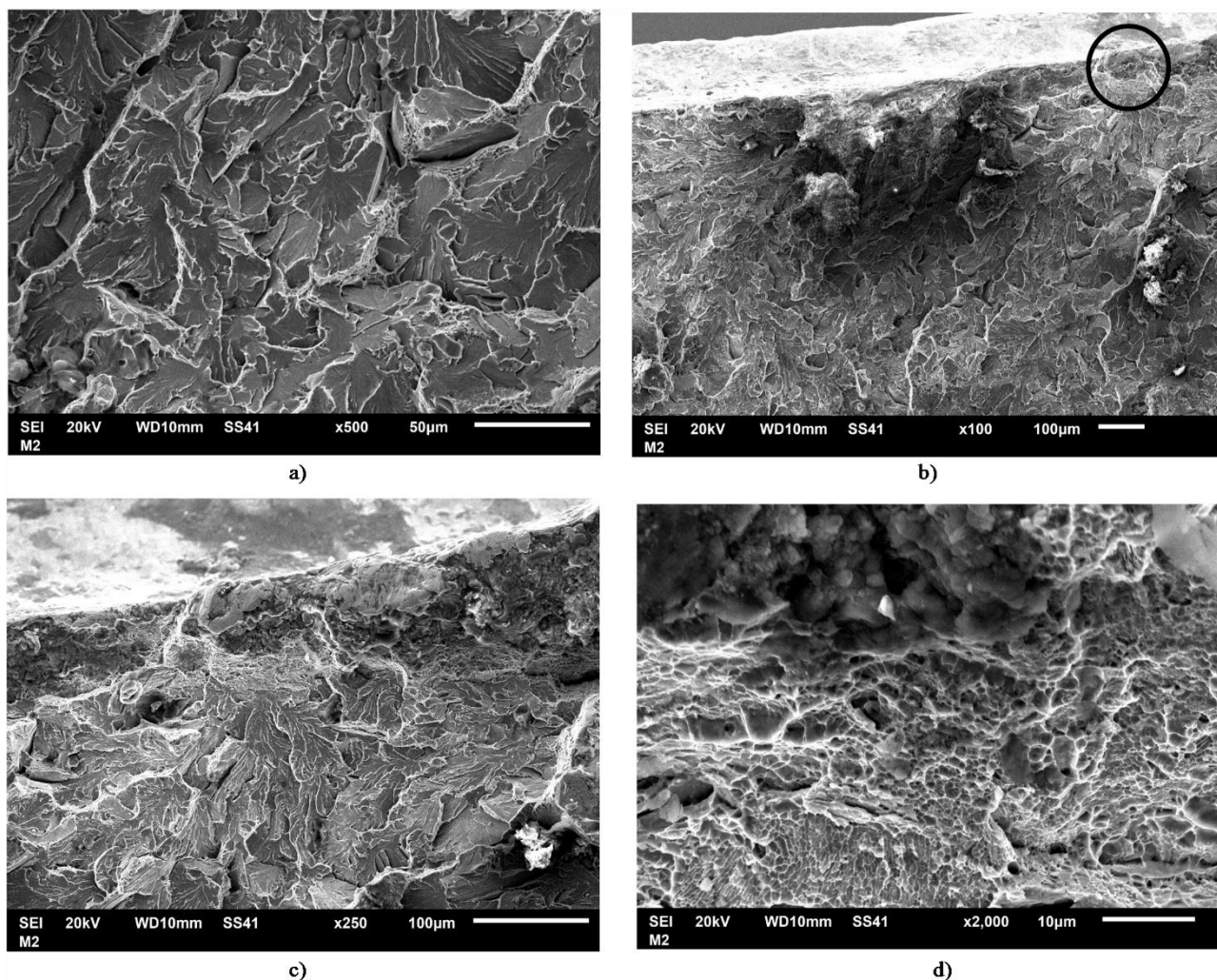


Slika 5.9. Fraktografski pregled loma uzoraka 1 i 2, makroskopski prikaz; a) uzorak 1, plastična deformacija po celom poprečnom preseku, b) uzorak 1, detalj na površini preloma, v) uzorak 2, strelice prate ševronske linije koje ukazuju na mesto nastanka pukotine, d) uzorak 2, zona nastanka pukotine, pri većem uvećanju

Izvor loma mogu biti uključci, zarezi, korozija, šupljine i dr. u materijalu koji se pod dejstvom opterećenja prostiru u materijalu kroz zrna, pa tako dolazi do transkristalnog loma. Pod većim uvećanjem ševronske linije se ne uočavaju, ali se mogu uočiti fasete koje upućuju na izvor loma.

Mikroskopsko posmatranje uzorka 2 skenirajućom elektronskom mikroskopom (SEM) na mestu izvora pukotine koja je dovela do loma otkriva fasete cepanja sa mikroskopskim tragovima širenja pukotine, odnosno linije širenja pukotine (slika 5.10.a). Linije se mogu pratiti do izvora pukotine koji je smešten skoro na površini uzorka (slika 5.10.b – označeno krugom). Na mestu iniciranja loma (slika 5.10.c) nisu pronađene inkluzije ili čestice koje bi mogle da budu uzrok loma. Međutim, detaljniji pregled pri velikom uvećanju, prikazan na slici 5.10.d, otkriva duktilne mikro praznine u sloju odmah ispod površine uzorka. Spužvasta hrapava površina vidljiva na vrhu mikrofotografije je korozija, ali čini se da nije povezana sa iniciranjem loma (slika 5.10.d). Kao što se može videti sa slike 5.10.c, prva faseta cepanja povezana je sa susednim duktilnim jamicama. Na osnovu toga, moglo bi se zaključiti da je lom izazvan nagomilavanjem dislokacija na uključcima pri plastičnoj

deformaciji, obrazovanjem šupljina i njihovim sjedinjavanjem (MVC - Microvoids coalescence), a da je napredovao transkristalnim krtim lomom - mehanizmom razdvajanja (cepanja).



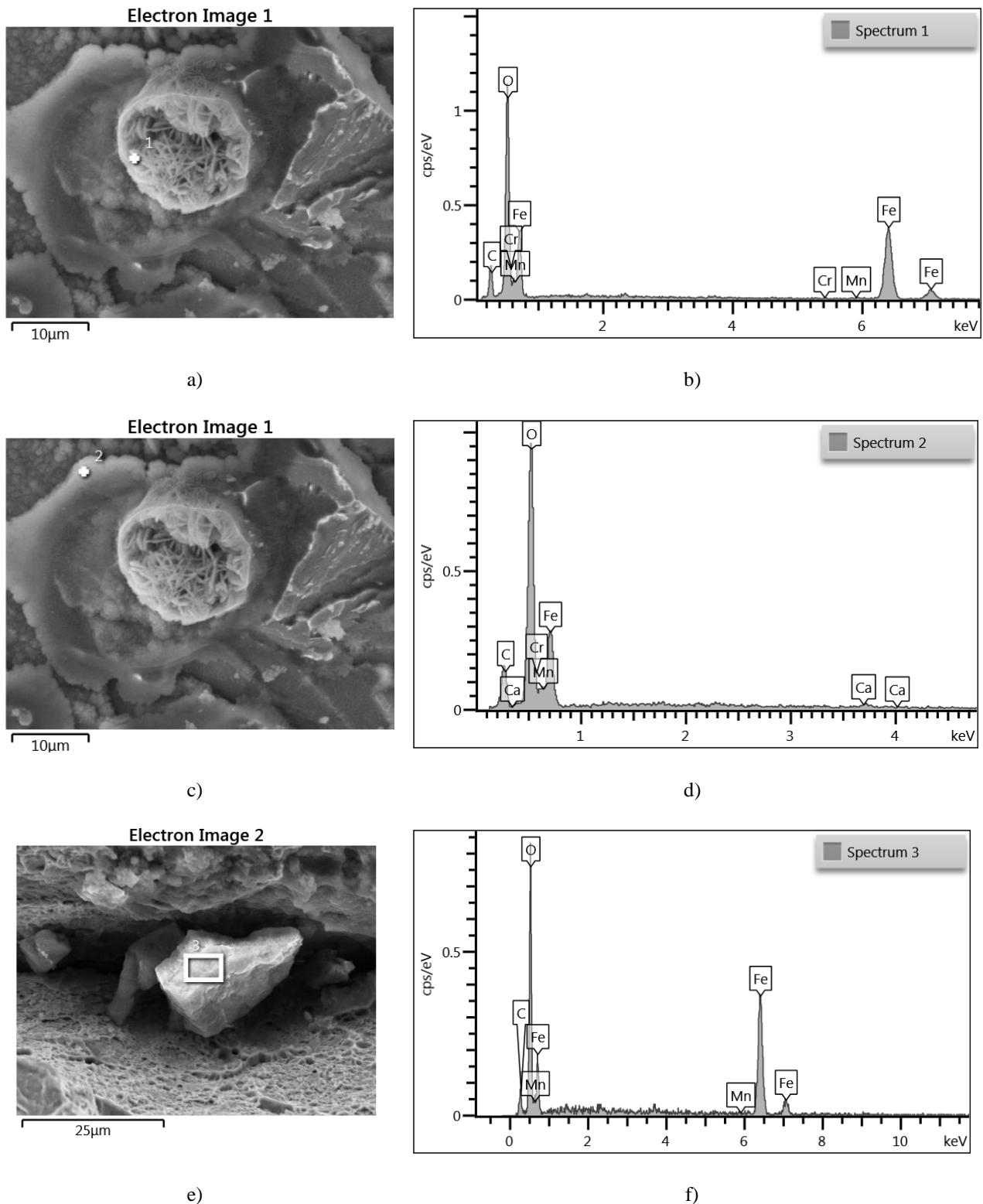
Slika 5.10. Fraktografski pregled loma, a) fasete cepanja, b) tragovi faseta cepanja koji vode do porekla frakture, c) mesto iniciranja cepanja d) duktilne udubljenja ili mikrootpori u blizini površine uzorka.

Na mestu izvora loma urađena je EDS hemijska analiza (energetski disperzivna rentgenska spektroskopija), pri kojoj nije nađena promena u hemijskom sastavu koja bi ukazivala na prisustvo uključaka drugog materijala (inkluzija), karbida ili čestica druge faze. Analiza površine loma uzorka 2 u tačkama 1, 2 i 3 je pokazala da nema krupnih uključaka u materijalu i da je čistoća materijala zadovoljavajuća, kao i da je termička obrada pravilno izvedena. EDS prikazana na slici 5.11 b, d i f, ne ukazuje na bilo kakvo odstupanje od očekivanog hemijskog sastava čelika, osim tragova kiseonika zbog prisutne korozije.

Zbog razlike u hemijskom sastavu i mikrostrukturi uzoraka 1 i 2, odgovarajuća mehanička svojstva su različita, pa je čvrstoća uzorka 1 veća zbog kaljenog (temperovanog) martenzita, dok uzorak 2 pokazuje manju čvrstoću zbog prisustva feritno-perlitne mikrostrukture. Takođe, tokom plastične deformacije uzorka 1 pre loma, došlo je do plastičnog ojačanja i velikog porasta čvrstoće.

Pregled površine loma uzorka 2 nije otkrio veće inkluzije ili prisustvo bilo kakvih koncentrata napona. Takođe, čistoća čelika je bila zadovoljavajuća, što ukazuje na to da je do loma došlo zbog izlaganja izuzetno velikom naprezanju u trenutku početnog uvođenja vučne sile. Budući da su metali sa zapreminski centriranom kubnom rešetkom (body-centered cubic - BCC) osetljivi na sniženje

temperature i na povećanje brzina deformacije, povećanje napona tečenja nije dozvolilo čeliku da reaguje na opterećenje plastičnom deformacijom, već je direktno dovelo do krtoq loma.



Slika 5.11. EDS hemijska analiza na mestu iniciranja loma uzorka 2, a), c), e) mesto hemijske analize (tačka 1, 2, 3), b), d), f) hemijska analiza u tački 1, 2, 3

5.4. Mehanička ispitivanja

Mehanička ispitivanja su vršena u hemijskoj laboratoriji Instituta IMW u Lužicama, Kragujevac. Ispitivana je tvrdoća po Brinelu i zatezna čvrstoća epruveta uzoraka 1 i 2.

Ispitivanje tvrdoće mereno je prema standardu SRPS EN ISO 6506-1 pomoću uređaja za merenje tvrdoće BH3000 po Brinelu (slika 5.12) sa opterećenjem 187,5 kN, kuglicom prečnika 2,5 mm u trajanju od 20 s za oba uzorka. Wilson BH3000 je mašina koja ispituje tvrdoću materijala po Brinelu, i ima opseg opterećenja od 62,5 kgf do 3000 kgf. Visina uzorka koji mogu da se ispituju na njoj je maksimalno do 280 mm, a širina do 130 mm [38].

Rezultati ispitivanja (tabela 5.2) pokazuju da uzorak 1 ima veću tvrdoću (srednja vrednost 262,2 HBW 2,5/187,5 kN/20 s), u odnosu na uzorak 2 (srednja vrednost 208,4 HBW 2,5/187,5 kN/20 s) za oko 25% na površini uzorka, što je posledica raličitog mateijala i termičke obrade. Oba uzorka, kao što je očekivano, imaju nešto manju vrednost merenu u materijalu (vrednost data u zagradi u tabeli 5.2). Tvrdoća uzorka 1 je u preporučenim granicama, dok je tvrdoća uzorka 2 oko 20 HBW manja od vrednosti preporučenih prema UIC 826.



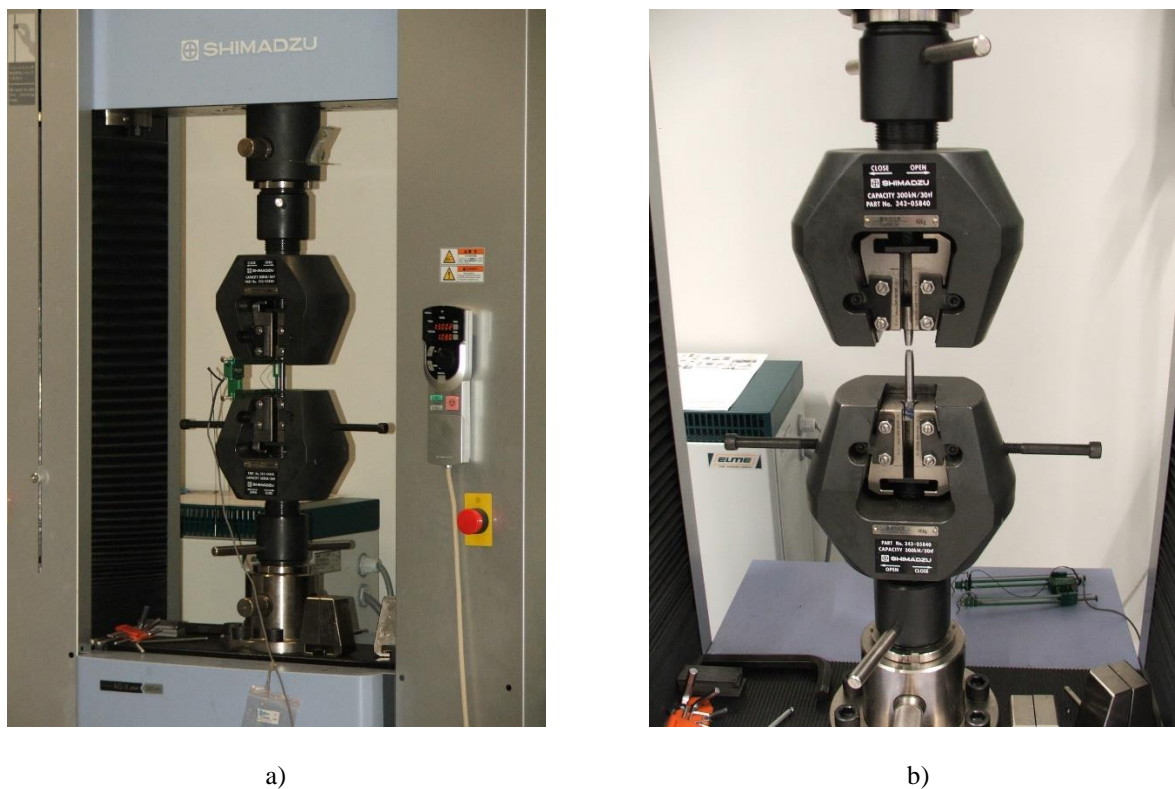
Slika 5.12. Uređaj za merenje tvrdoće po Brinelu Wilson BH3000

Zatezna čvrstoća je izmerena na univerzalnoj mašini za ispitivanje zatezanjem, pritiskivanjem i savijanjem tipa AG-X plus 300 kN, proizvođača Shimadzu. Maksimalna sila pri ispitivanju na ovoj mašini je 300 kN i može se zadavati kontinualno i ciklično, a opseg brzina ispitivanja je od 0,0005 mm/min do 500 mm/min [38].

Ispitivanje zatezanjem (slika 5.13) je vršeno kontinualnom silom sa brzinom ispitivanja propisanom standardom ISO 6892-1 [80] od 0,75 mm/min. Ispitivane epruvete su kružnog poprečnog preseka standardnih dimenzija: $L_o = 50$ mm, $L_c = 55$ mm, $d_o = 9,86$ mm. Kidalice AG-X ima mogućnost akvizicije podataka sile i izduženja epruvete, sa frekvencijom 10 kHz, kao i ekstenzije same kidalice. Kidalice je povezana sa PC uređajem i ima namenski program za akviziciju podataka, prikaz zavisnosti izduženja od porasta sile, određivanja napona, modula elastičnosti itd. Rezultat ispitivanja

u vidu dijagram sila - izduženje uzoraka 1 i 2 vešalica dat je na slici 5.15, a dijagram napon – deformacija na slici 5.16.

Ispitivanje epruvete oba uzorka pokazalo je duktilan lom, sa različitom makrografskom strukturom površine loma (slika 5.14 c i d).



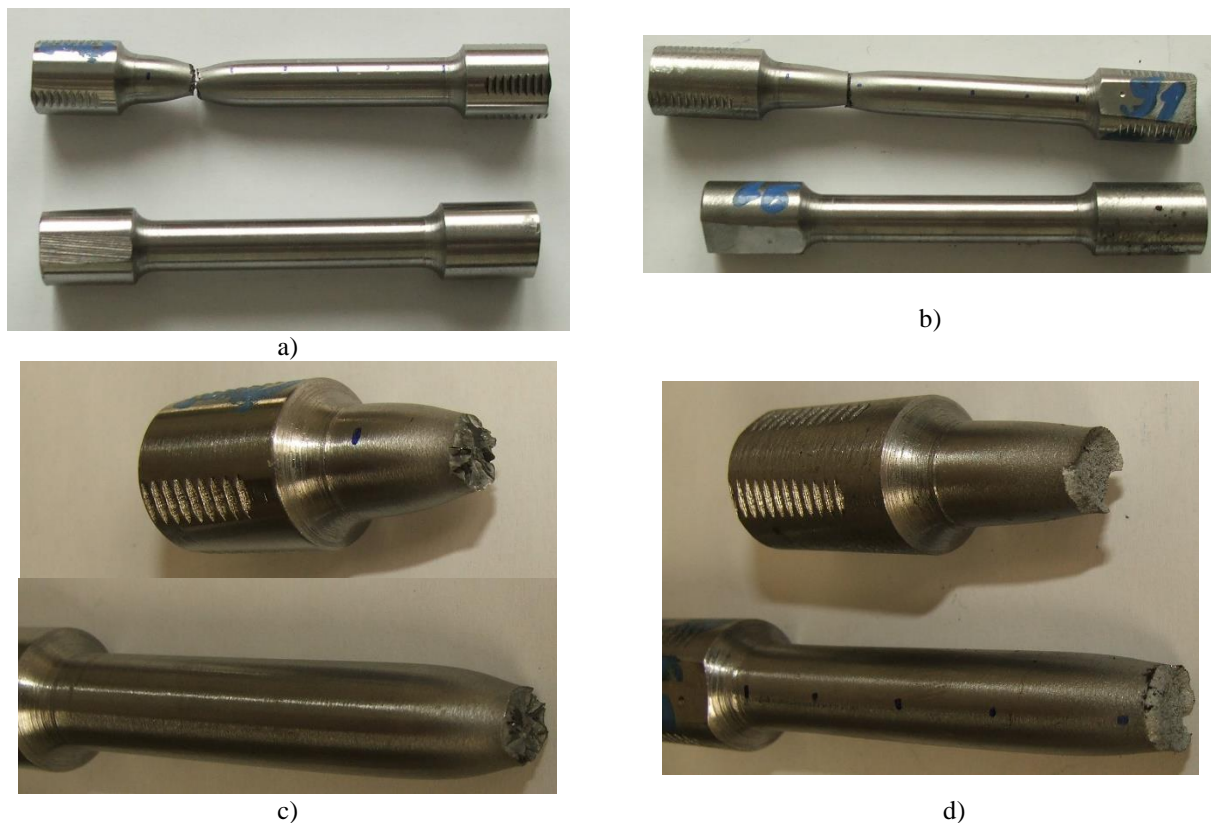
Slika 5.13. Ispitivanje zatezanjem na univerzalnoj ispitnoj mašini AG-Ks plus 300 kN, a) početak ispitivanja, b) kidanje epruvete

Rezultati mehaničkih ispitivanja

Vrednosti mehaničkih karakteristika uzorka 1 su upoređivane sa vrednostima propisanim za materijal 41Cr4 posle termičke obrade kaljenjem i otpuštanjem, a uzorka 2 za materijal C45 posle normalizacije, jer se metalografskim pregledom utvrdilo da je ovo bio način termičke obrade uzoraka 1 i 2. Mehanička svojstva oba uzorka u potpunosti ispunjavaju zahteve standarda EN 10083-3 [83] i EN 10083-2 [82] za korišćene čelike.

Uzorak 1 je niskolegirani čelik 41Cr4 koji je termički obrađen kaljenjem i otpuštanjem, a u eksploataciji, pre loma, je pretrpeo znatnu plastičnu deformaciju pri čemu je došlo do plastičnog ojačanja materijala (slika 5.16), pa je napon tečenja R_e znatno veći od propisane vrednosti. I ostale karakteristike, kao zatezna čvrstoća R_m i izduženje nalaze se u propisanim granicama.

Kao posledica različitog materijala vešalica i različite termičke obrade uzorak 1 ima napon tečenja R_e i zateznu čvrstoću R_m znatno veću uzorka 2 (slika 5.16). Naravno, pri tome treba imati u vidu razliku u hemijskom sastavu čelika uzoraka i uticaj hroma kao legirajućeg elementa na povećanje tvrdoće i zatezne čvrstoće. Mehaničke karakteristike uzorka 2 su u propisanim granicama za srednjegljenični čelik C45 sa termičkom obradom normalizacije. Izduženje uzorka 2 je iznad propisanih vrednosti, što je posledica male prethodne plastične deformacije pri lomu.

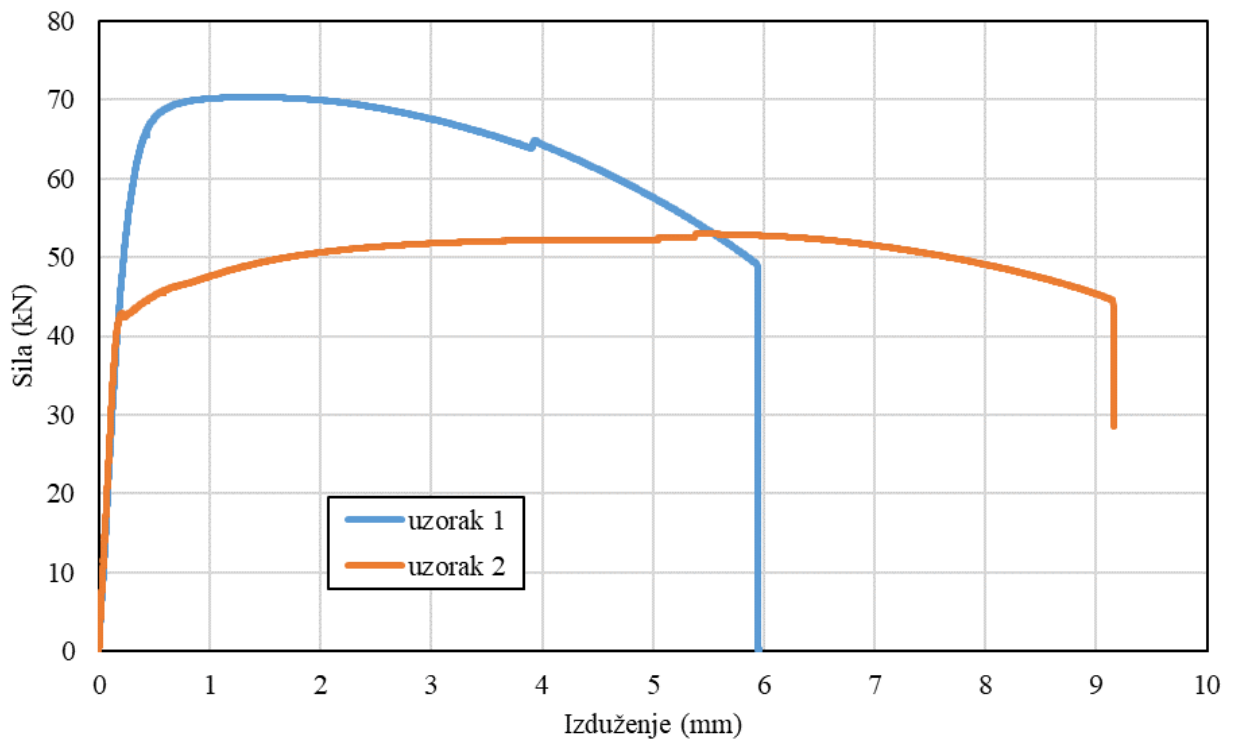


Slika 5.14. Epruvete posle ispitivanja na zatezanje, a) epruveta uzorka 1 posle kidanja b) epruveta uzorka 2 posle kidanja, c) detalj loma epruvete uzorka 1, d) detalj loma epruvete uzorka 2

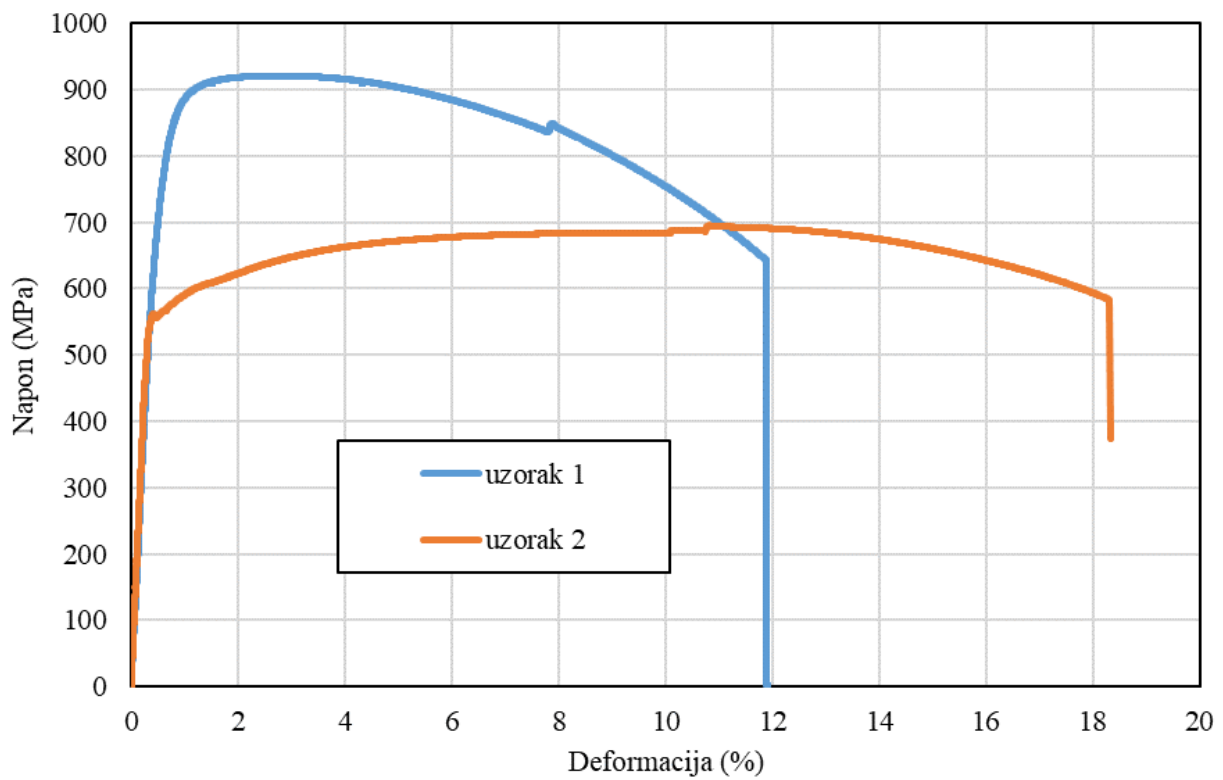
Tabela 5.2. Mehaničke osobine materijala vešalica

	Termička obrada	Napon tečenja R_e (MPa)	Zatezna čvrstoća R_m (MPa)	Izduženje A (%)	Suženje poprečnog preseka (%)	Žilavost K (U zarez) (J)	Tvrdoća (HBW)
Propisano [58]	Kaljene i otpuštane	460	750÷900	14		30	230 ÷ 275 ³
	Normalizovane	350	600÷720	18		20	
41Cr4 [83]	Kaljene i otpuštane	660	900÷1100	12	35		
C45 [82]	Kaljene i otpuštane	430	650÷800	16	40		
	Normalizovane	340	620	14	-		
Izmereno –uzorak 1	Kaljene i otpuštane	803	921	14,4	54,8	nije merena	262,2 (259,2)
Izmereno –uzorak 2	Normalizovane	563	695	18,3	45,6	nije merena	208,4 (200,1)

³ Preporuka tvrdoće u objavi UIC 826 iz 2004, koja nije ušla u standard EN 15566.



Slika 5.15. Dijagram sila - izduženje uzoraka 1 i 2 vešalica

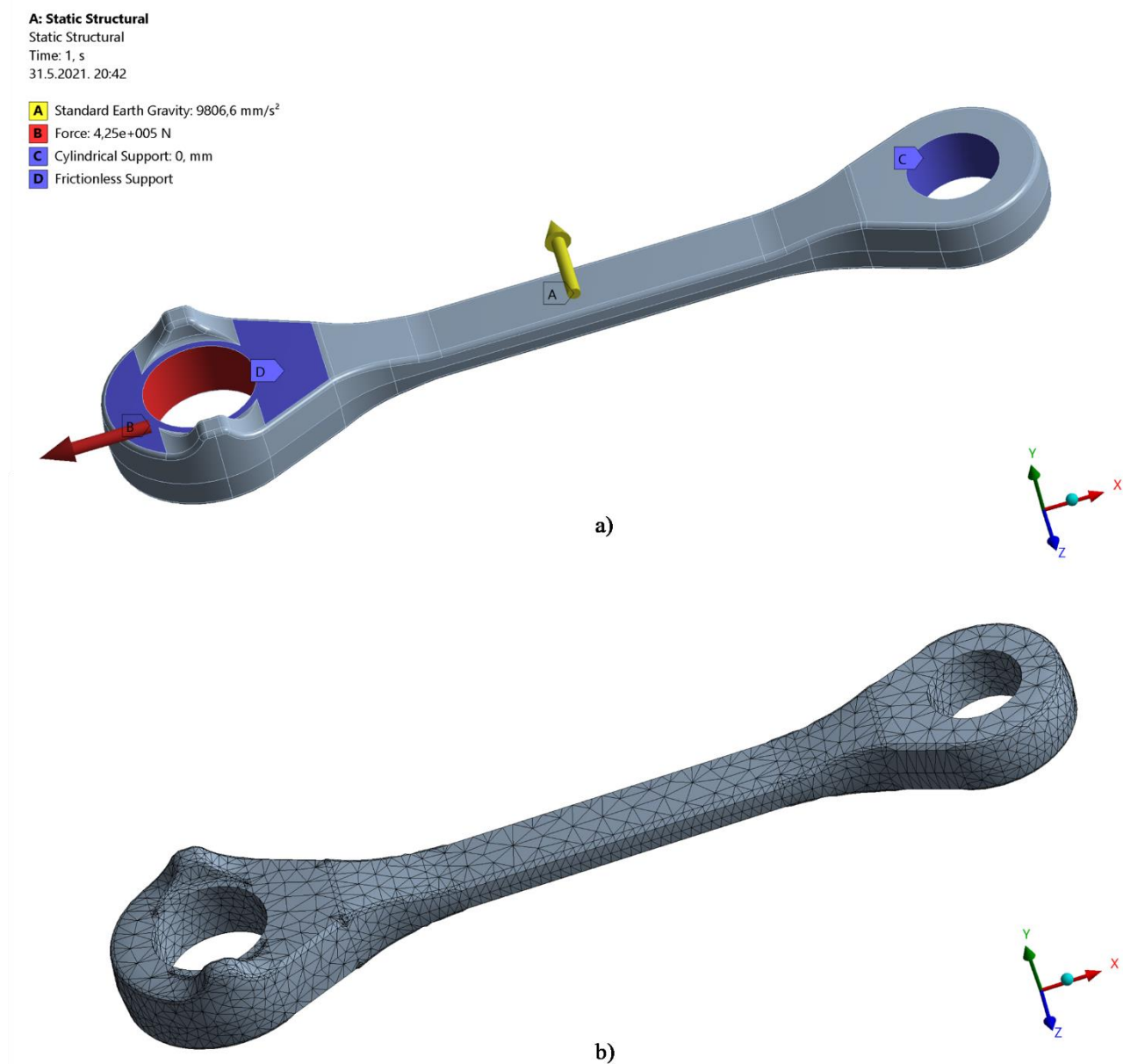


Slika 5.16. Dijagram napon - deformacija uzoraka 1 i 2 vešalica

5.5. Razvoj i verifikacija numeričkog modela vešalica

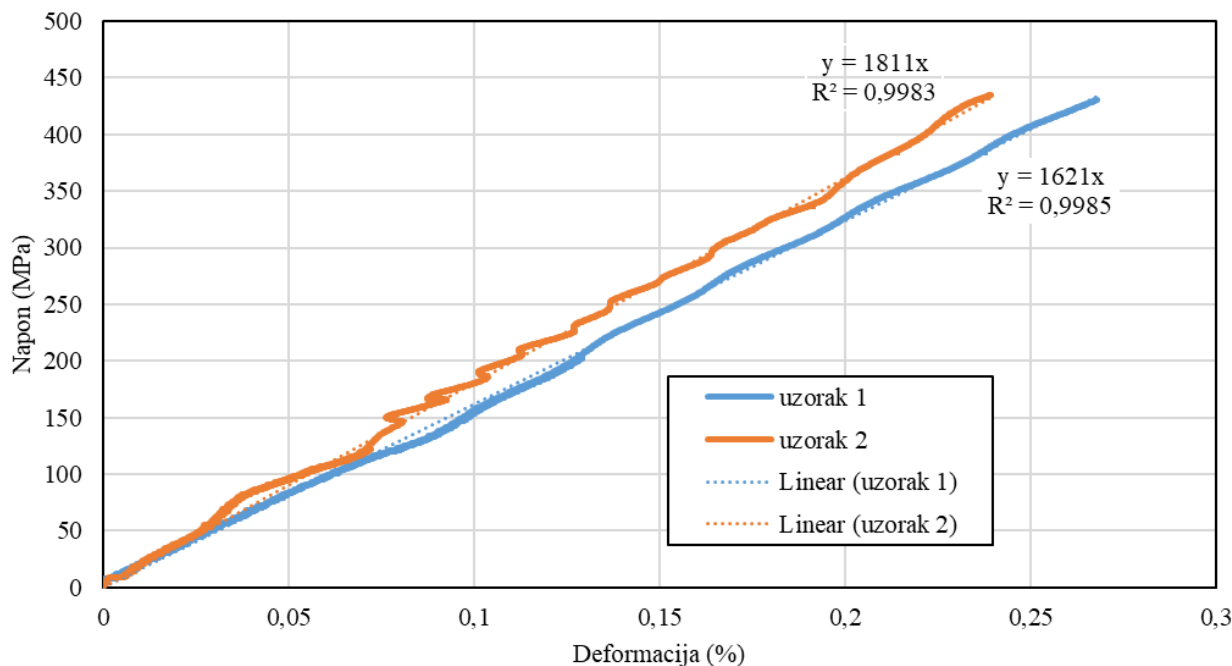
U cilju smanjenja troškova eksperimentalnih ispitivanja i mogućnosti nastavka istraživanja u ovoj oblasti, razvijen je numerički model vešalice. Verifikacija numeričkog modela vešalice izvršena je na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih ispitivanjem uzoraka 1 i 2 slomljenih vešalica.

Proračuni napona i deformacija vešalica, za definisana opterećenja, urađeni su metodom konačnih elemenata (MKE), korišćenjem softverskog paketa ANSYS [49]. Uzorci 1 i 2 su modelirani tetraedričnim tipom konačnih elemenata (slika 5.17.b). Konturni uslovi veze vešalica definisani su tako da je sa jedne strane cilindrična veza na mestu veze sa navrtkom, a sa druge strane je na mestu veze sa svornjakom kvačila zadata zatezna - aksijalna sila duž vešalice (slika 5.17 a). Maksimalna veličina konačnih elemenata korišćenih u modelu je 5 mm. 3D modeli su formirani korišćenjem propisanih dimenzija [52, 56] i dimenzija uzoraka (visina vešalica može varirati između 34,5 mm i 50,0 mm), dok je model materijala formiran korišćenjem mehaničkih svojstava materijala vešalica.



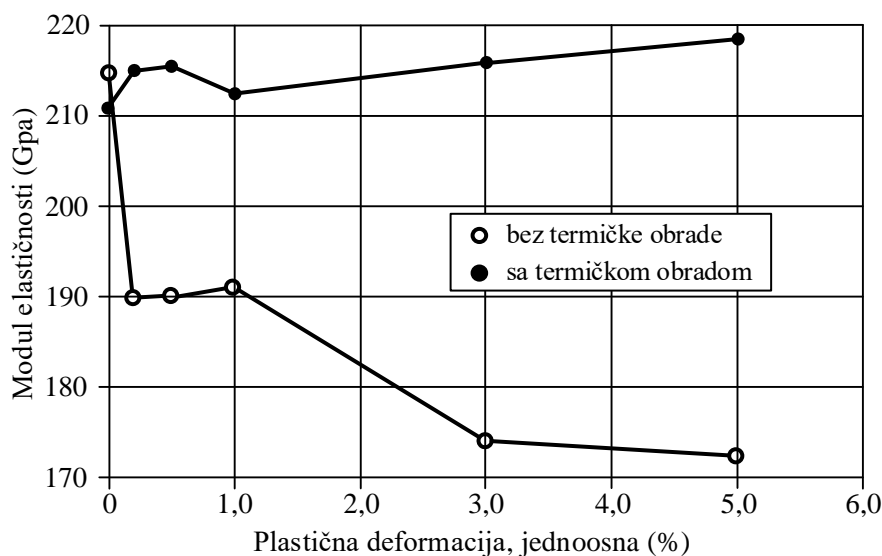
Slika 5.17. Razvoj numeričkog modela vešalica, a) konturni uslovi, b) mreža

Modul elastičnosti određen je na osnovu rezultata standardnih ispitivanja zatezanjem, sa vrednostima od 162,1 GPa za uzorak 1 i 181,1 GPa za uzorak 2 (slika 5.18). Vrednost Poasonovog koeficijenta 0,3 usvojena je kao karakteristična za čelik.



Slika 5.18. Dijagram napon - deformacija uzoraka 1 i 2 vešalica

Vrednosti izračunatih modula elastičnosti manje su od karakteristične vrednosti čelika. Dobijene manje vrednosti modul elastičnosti čelika mogu biti posledica smanjenja modul elastičnosti usled plastične deformacije. U zavisnosti od materijala i vrste deformacije, smanjenje modula elastičnosti može iznositi više od 10% [50]. Za čelike za kaljenje, termička obrada nakon plastične deformacije može čak dovesti do povećanja modula elastičnosti u odnosu na vrednost pre obrade.

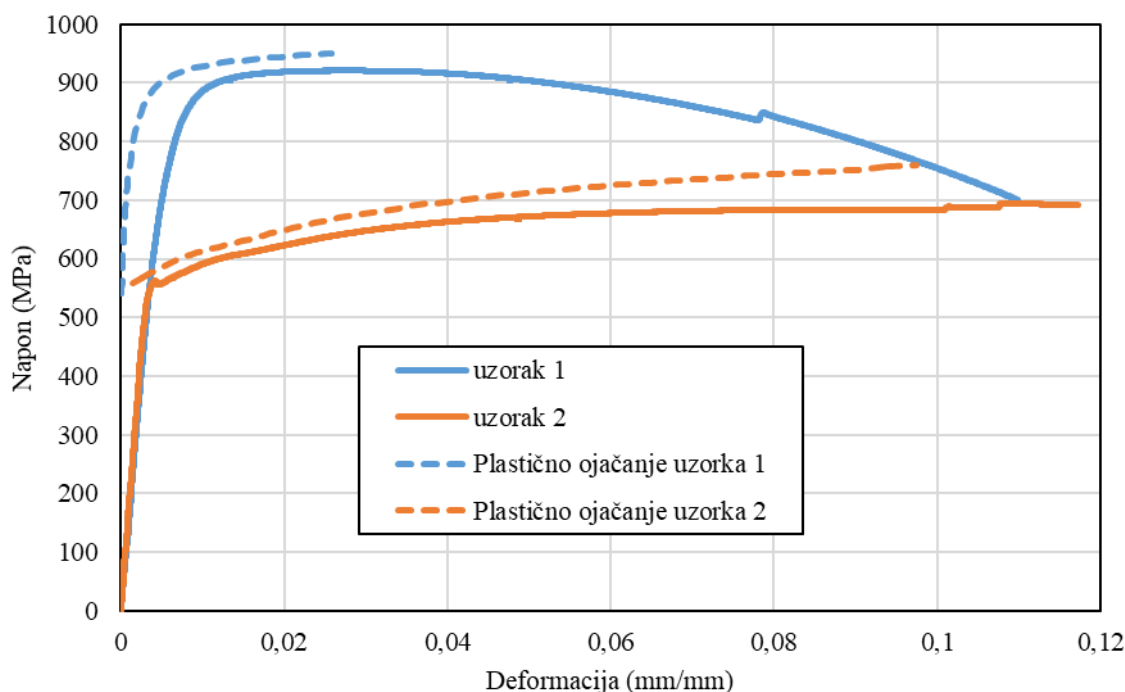


Slika 5.19. Uticaj plastične deformacije i naknadne toplote obrade na modulu elastičnosti čelika za kaljenje [50]

Zavisnost modula elastičnosti od procenta plastične deformacije čelika za kaljanje prikazana je na slici 5.19. Modul elastičnosti se najpre smanjio usled plastične deformacije, a posle termičke obrade (170°C, 20 min) usled uticaja kaljenja dolazi ne samo do ponovnog postizanja početnog modula elastičnosti, već i do njegovog povećanja [50]. Kako je u eksploataciji došlo do velike plastične deformacije uzorka 1 vešalice možemo pretpostaviti da je došlo i do smanjenja modula elastičnosti čelika. Modul elastičnosti čelika uzorka 1 manji je za 10,5% u odnosu na modul elastičnosti uzorka 2, koji nije pretrpeo značajne plastične deformacije pri lomu.

Vešalice moraju ispuniti mehaničke zahteve dok su podvrgnute zateznom naprezanju od 350 kN [58] ili polovini minimalne sile kidanja 425 kN [56], pri čemu se na njima ne smeju pokazati trajne deformacije veće od 0,2% njihove početne dužine između mesta spoja sa svornjakom i navrtkom. Pored toga, vešalice u kvačilu moraju da izdrže zatezno opterećenje od 850 kN tokom 3 minuta bez loma i pukotina [56, 58].

Da bi se uzela u obzir plastičnost materijala vešalice, modelirano je plastično ojačanje na osnovu rezultata dobijenih pri standardnim ispitivanjima zatezanjem epruveta izrađenim od uzoraka 1 i 2. Krt lom uzorka 2 pokazuje da nije bilo plastične deformacije (kao što je kasnije potvrđeno fraktografskim ispitivanjem), pa se rezultati standardnih ispitivanja zatezanjem na epruvetama (slika 5.16) mogu koristiti u multilinearnom modeliranju plastičnosti. Duktilni lom na uzorka 1 pokazuje, pri ispitivanju zatezanjem, da je već došlo do značajnog očvršćavanja, tako da se rezultati standardnih ispitivanja zatezanjem ne mogu koristiti bez poznavanja stanja pre deformacije. Oba primerka bila su izložena različitim uslovima u radu, prema oznakama utisnutim na vešalicama, uzorak 1 - 11 godina i uzorak 2 - 9 godina. Stoga je očekivano postojanje prethodnih plastičnih deformacija i ojačanja materijala, ali samo do vrednosti plastičnih deformacija propisanim u dozvoljenim eksploatacionim granica (u RS propisani su u Uputstvu 242/5 [53]). Ukupni prethodni uslovi eksploatacije (ukupna opterećenja, i ciklusi i intenzitet opterećenja itd.) su nepoznati, jer su ispitivani uzorci vešalice bili ugrađeni na vagonima stranih imaoca.

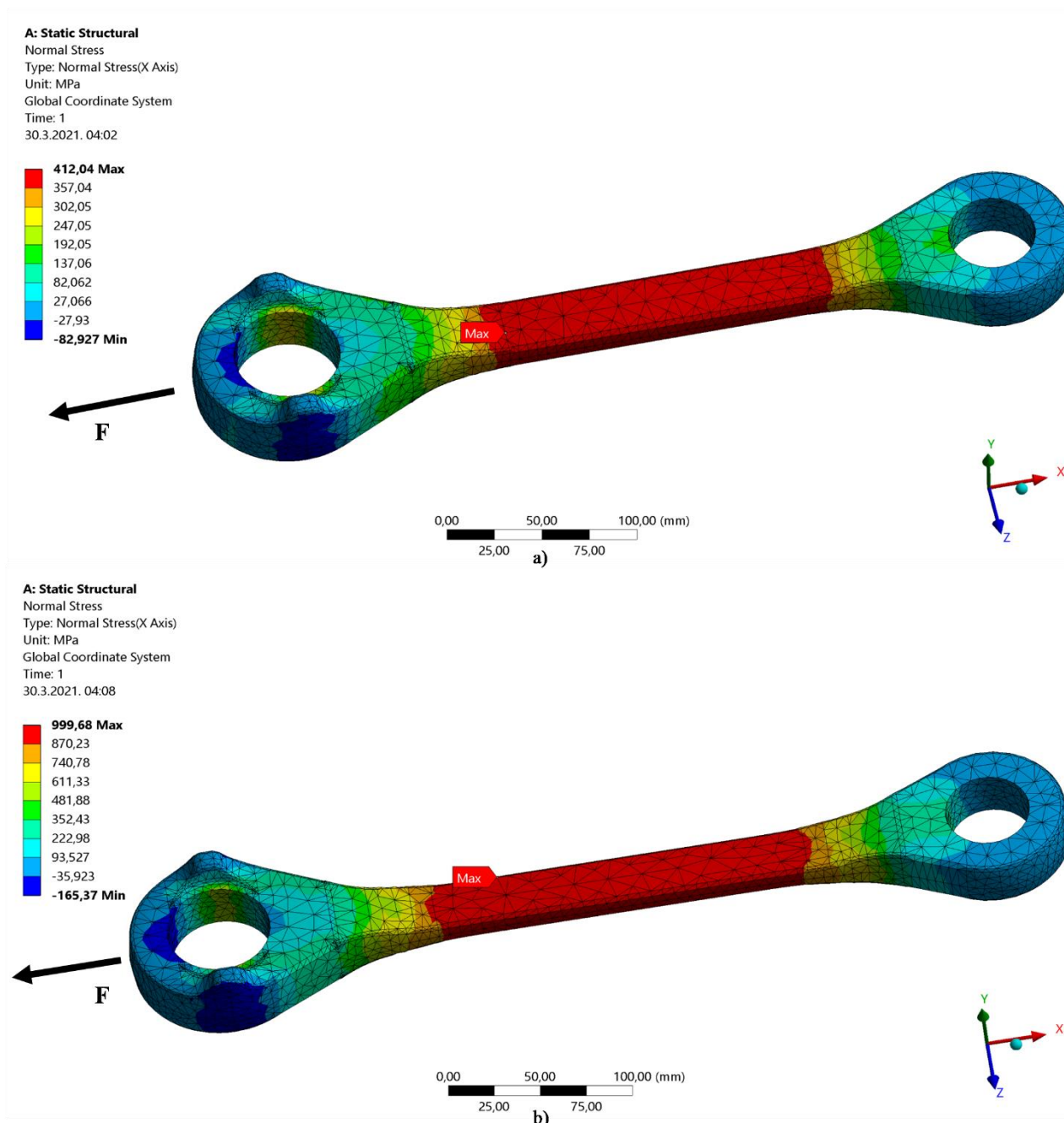


Slika 5.20. Multilinearno plastično ojačanje na osnovu rezultata ispitivanja zatezanjem

Korišćeno je numeričko modeliranje materijala na osnovu mehaničkih svojstava dobijenih standardnim ispitivanjem zatezanjem pomoću multilinearnog plastičnog ojačanja za uzorke 1 i 2

(slika 5.20). Pošlo se od pretpostavke da je raspodela opterećenja jednaka u obe vešalice, pa je minimalna sila kidanja po jednoj vešalici 425 kN, a radno opterećenje može dostići polovinu minimalne sile kidanja po vešalici (212,5 kN).

Vešalica sa karakteristikama materijala i dimenzijama koji odgovara uzorku 1, za zatezno - aksijalno opterećenje od 212,5 kN, pokazuje maksimalnu vrednost normalnog napona od 412 MPa. Ovaj maksimalan napon, koji se javlja u srednjem delu vešalice (slika 5.21 a) ne prelazi propisanu granicu tečenja od 660 MPa, kao ni izmerenu od 803 MPa (tabela 5.2), tako da vešalica sa karakteristikama uzorka 1 neće pretrpeti trajne plastične deformacije za radno opterećenje od 212,5 kN.

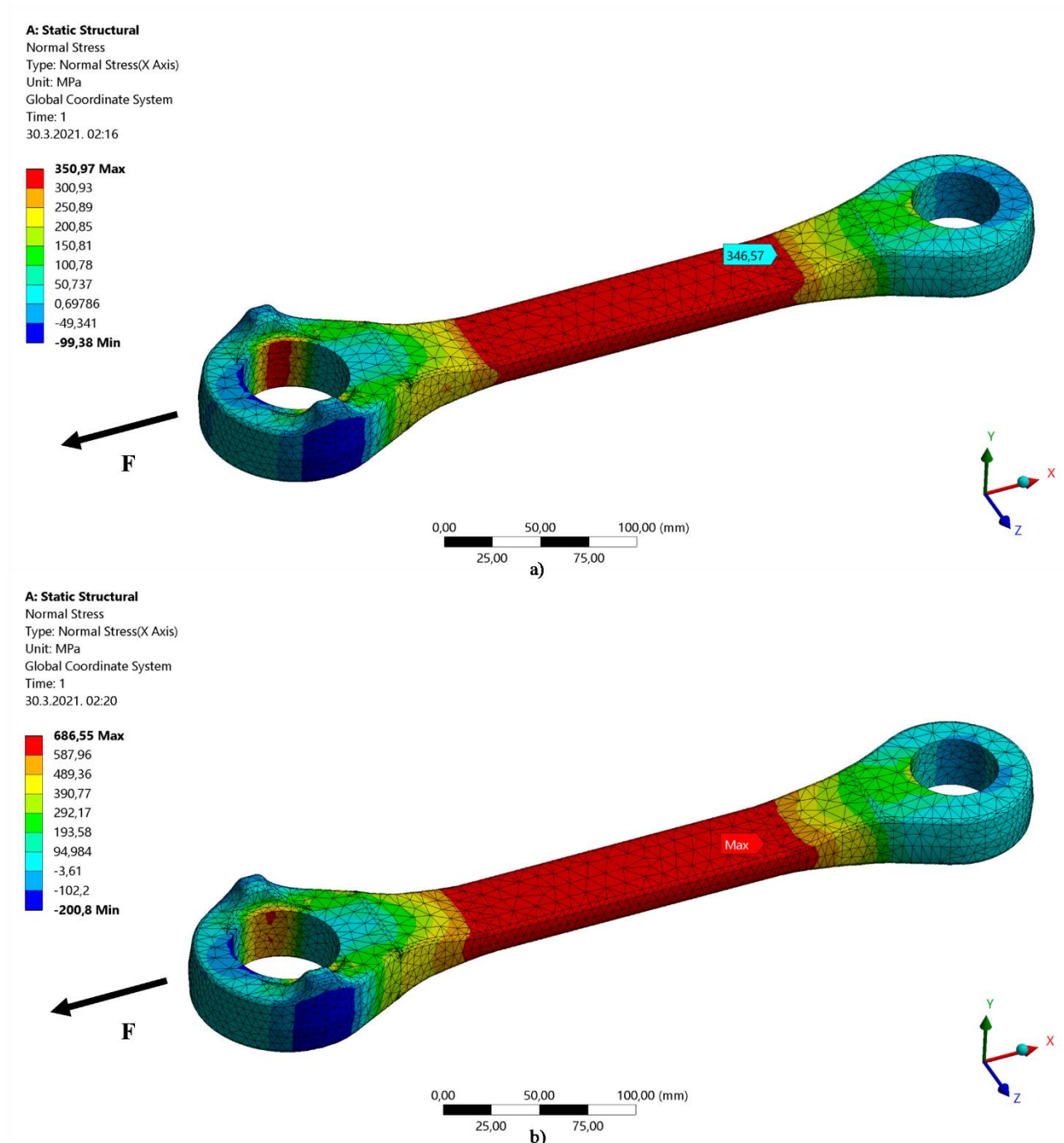


Slika 5.21. Rezultat MKE analize modela uzorka 1, a) za opterećenje 212,5 kN, b) za opterećenje 425 kN

Za minimalnu silu kidanja po jednoj vešalici (425 kN) normalni napon ima maksimalnu vrednost 999 MPa (slika 5.21 b) koja je veća od izmerene zatezne čvrstoće uzorka 1 od 921 MPa (tabela 5.2) za

8,5%. Kako se vrednost napona dobijena u modelu nalazi u opsegu propisane zatezne čvrstoće to znači da će pri minimalnoj sili kidanja (425 kN) doći do kidanja vešalice. To potvrđuje i ukupna deformacija u aksijalnom pravcu u modelu od 45 mm, koja pokazuje da bi, pod tim opterećenjem došlo do duktilnog loma.

Normalni napon od 351 MPa (slika 5.22 a) u vešalici modeliranoj na osnovu karakteristika uzorka 2, rezultat je radnog opterećenja od 212,5 kN i ne prelazi izmerenu granicu tečenja od 653 MPa, iako je 3% veća od propisane granice tečenja od 340 MPa (tabela 5.2). Za posmatrane karakteristike uzorka 2 pri radnom opterećenju neće doći do trajne plastične deformacije, ali se za druge karakteristike vešalice od srednjeugljeničnog čelika C45 koje su normalizovane, to ne može tvrditi sa obzirom na relativno niske vrednosti napona tečenja.



Slika 5.22 Rezultat MKE analize modela uzorka 2, a) za opterećenje 212,5 kN, b) za opterećenje 425 kN

Za minimalnu silu kidanja (425 kN) normalni napon modela uzorka 2 iznosi 686 MPa u središnjem delu vešalice (slika 5.22 b), što je samo 1,2% manje od izmerene zatezne čvrstoće od 695 MPa, a 10,7% veće od propisane zatezne čvrstoće koja iznosi 620 MPa (tabela 5.2). To ukazuje da je pri izboru materijala od normalizovanog srednjeugljeničnog čelika napon koji odgovara radnom opterećenju i minimalnoj sili kidanja na granici pri kojoj dolazi do plastične deformacije u prvom slučaju, odnosno loma u drugom slučaju. Ukupna deformacija u aksijalnom pravcu modela vešalice, koja odgovara minimalnoj sili kidanja (425 kN) iznosi 5,7 mm.

Rezultati dobijeni modelom vešalica u MKE sa karakteristikama koje uzimaju u obzir mehaničke osobine materijala uzoraka 1 i 2, pokazuju da su vešalice konstrukcijom i izborom materijala prilagođene funkciji sigurnosnih elemenata kvačila. Vrednosti napona usled radnog opterećenja su na granici napona tečenja, a za minimalnu silu kidanja na granici zatezne čvrstoće vešalica. Ovo ukazuje da bi pri preopterećenju aksijalnom zateznom silom vučnog uređaja došlo do plastične deformacije ili kidanja vešalica. Imajući u vidu da rezultati razvijenog numeričkog modela vešalica verifikuju eksperimentalne rezultate ispitivanja vešalica, ovaj model se može koristiti za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

6. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE VEŠALICA IZ EKSPLOATACIJE

Ispitivanjem vešalica kod kojih je došlo do loma u eksploataciji (poglavlje 5), utvrđeno je da se mehaničke karakteristike vešalica nalaze u propisanim granicama, odnosno pri opterećenju minimalnom silom kidanja (425 kN) su na granici zatezne čvrstoće što uslovljava njihov otkaz pre drugih elemenata kvačila i tegljenika. Kako podaci analize raskinuća (potpoglavlje 3.1.6) pokazuju da najčešće dolazi do loma kuke tegljenika i tegljenice, a ne vešalica, potrebno je utvrditi stanje vešalica u eksploataciji. Stoga su izvršena eksperimentalna ispitivanja vešalica koje su se u eksploataciji na teretnim vagonima koristile više godina.

Utvrđivanje stanja vučnih uređaja može se izvršiti u toku periodičnih pregleda ili redovnih opravki, ali za utvrđivanje stanja u eksploataciji najpogodnije to uraditi u radionici za tekuće održavanje. Najveća radionica za tekuće održavanje i redovne opravke teretnih kola u Beogradu nalazi se u Makišu u okviru Depoa za održavanje vozničkih sredstava „Srbija Karga“ a.d. U ovoj radionici su izvršeni vizuelni pregledi vučnih uređaja teretnih kola koja ulaze u tekuće održavanje. Na osnovu vizuelnog pregleda konstatovano je da je najnepovoljnije stanje vučnih uređaja u eksploataciji ono zbog koga se vrši zamena dela ili sklopa kvačila ili tegljenika. Stoga su sledeća merenja, kontrole i ispitivanja izvršena na vešalicama koje su demontirane sa teretnih vagona pri zameni kvačila:

- vizuelan pregled,
- dimenziona kontrola,
- ispitivanje metodama bez razaranja,
- ispitivanje hemijskog sastava,
- mehanička ispitivanja.

U prethodnom razmatranju je zaključeno da je zbog svoje uloge kao elementa sigurnosti, potrebno da pri prekoračenju opterećenja u vučnim uređajima dođe do otkaza vešalice ili zavojnog vretena. U analizi slučajeva raskinuća utvrđeno je da se otkaz vešalica u poslednjih deset godina dešava samo u veoma malom procentu oko 7% slučajeva raskinuća. Stoga je izvršeno ispitivanje vešalica uzetih iz eksploatacije radi utvrđivanja njihovih mehaničkih karakteristika. Takođe vešalica, za razliku od drugih elemenata kvačila i tegljenika, kao što je stremen i kuka tegljenika, nije izložen habanju. Pri analizi slučajeva raskinuća habanje vučnih uređaja kao uzrok raskinuća je naveden samo u dva slučaja. Velika opterećenja koja se prenose preko vučnog uređaja za posledicu imaju plastičnu deformaciju elemenata, a to je posebno uočljivo na primeru vešalice.

6.1. Vizuelan pregled i dimenziona kontrola

Vizuelnim ispitivanjem otkrivaju se poršinske greške u materijalu, kao i odstupanja u obliku i dimenzijama. Prvi vizuelan pregled je izvršen na licu mesta, u kolskoj radionici u Makišu, radi izbora uzoraka koji će se dalje ispitivati. Potom je izvršeno rastavljanje delova kvačila i izdvajanje parova vešalica i njihovo detaljno odmašćivanje i čišćenje. Kako nije bilo moguće izvršiti dovoljno dobro odmašćivanje i čišćenje četkom i šmirglom, vešalice su ispeskarene radi daljeg pregleda površine na oštećenja i pukotine.

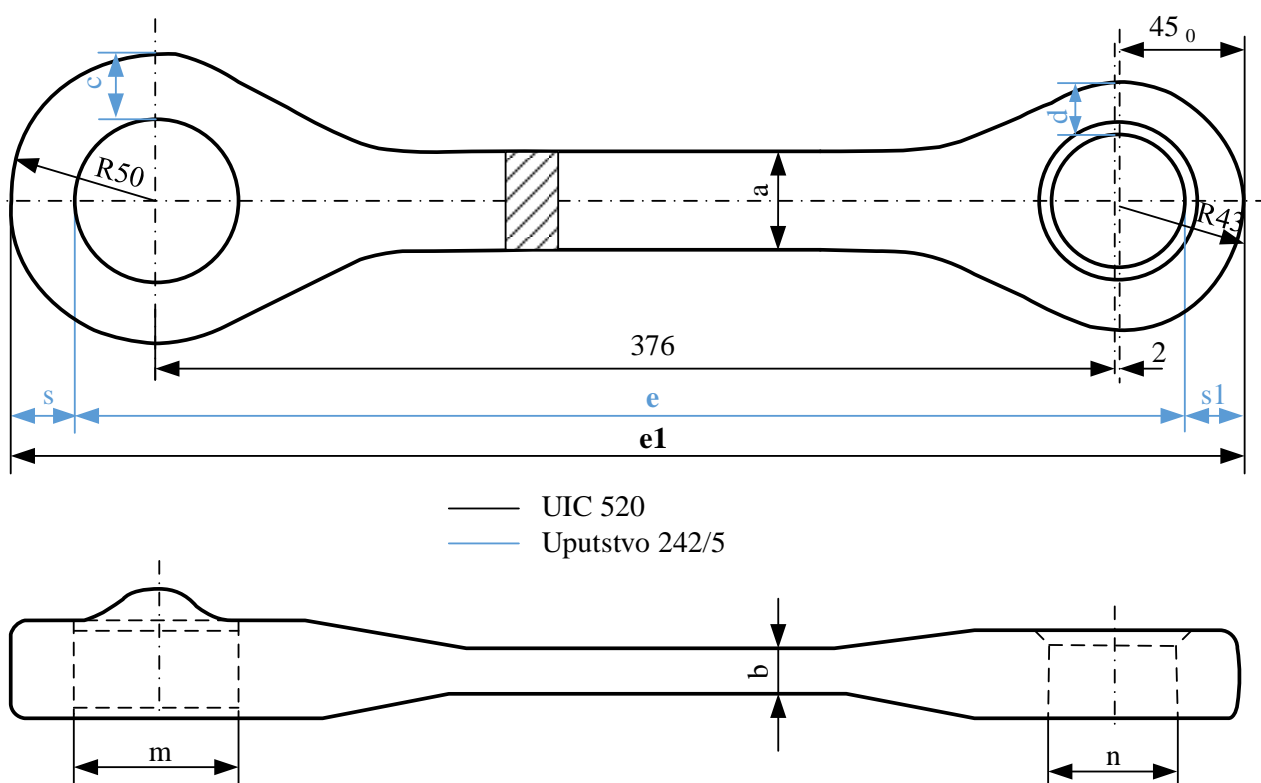
Posle peskarenja (slika 6.1) izvršena je i dimenziona kontrola vešalica prema zahtevima u objavi UIC 520 [52] i prema graničnim merama Uputstva 242/5 [53] za redovne opravke tegljeničkih i odbojnih uređaja. Granične mere date u Uputstvu 242/5 su izvedene iz mera datih u UIC 826 za kontrolu pri redovnim opravkama (slika 6.2). Nazivne i eksploatacione granične mere vešalica od 2 do 5 su date u tabeli 6.1 sa izmerenim vrednostima za kontrolisane uzorke vešalica. Vešalice koje su bile na istom

kvačilu i radile u paru obeležene su istim brojem sa dodatnom oznakom a i b. Rezultati para vešalica označenog sa 1a i 1b je pri ispitivanju odbačen, jer se utvrdilo da se radi o vešalicama koje su predviđene za opterećenja od 650 kN.

Uvidom u praksu kolskih radionica pri redovnim opravkama, kontrola ovih dimenzije se ne evidentira. Ako se ustanovi odstupanje od vrednosti propisanih Uputstvom 242/5 vešalice se zamenjuju novim. Kod radionica za tekuće održavanje, kontrola dimenzija vešalica se ne vrši. Po pravilu, pri lomu nekog od elementa kvačila (vešalica, zavojno vreteno, stremen) kvačilo se celo zamenjuje.



Slika 6.1. Vizuelan pregled vešalica posle čišćenja



Slika 6.2. Dimenzije vešalica prema UIC 520 [52] i Uputstvu 242/5 [53]

Uputstvo 242/5 [53] je iz 1993. godine i od tada nije inovirano. Ono je bilo zasnovano na međunarodnim propisima koji su tada bili relevantni, pa time i na objavi UIC 520 iz 1990. godine i UIC 826 iz 1973. godine. Od 2016. godine donet je i evropski standard koji definiše zahteve za vučne uređaje EN 15566 [56].

Većina vešalica uzorkovanih iz eksploatacije proizvedena je 80-ih godina, ali period eksploatacije ne mora odgovarati godini proizvodnje. To znači da su vešalice u eksploataciji bile 30 godina, što je inače predviđen radni vek kvačila. Takođe, za vučnu opremu na teretnim vozilima u tom periodu ne može se ustanoviti tačan broj pređenih kilometara i uslovi eksploatacije, zbog toga što se ista ne evidentira kod imaoaca tj. operatera vozila.

Nesreće i nezgode koje se dešavaju u železničkom saobraćaju, kao što je sudar, nalet, iskliznuće i raskinuće dovode, veoma često, i do oštećenja vučno-odbojnih uređaja. Oštećeni vučni uređaji se u tom slučaju ili popravljaju ili zamenjuju novim. Sa smanjenjem broja kolskih radionica koje imaju kovačnicu, neophodnu za opravku elemenata vučnih uređaja (na primer, pre oko 15 godine zatvorena je u depou u Makišu) smanjuje se broj opravki, a povećava broj zamena oštećenih delova vučnih uređaja. Sa povećanjem broja iskliznuća (oko 4 puta više iskliznuća u odnosu na pre 10 godina) povećava se broj opravki ili zamena vučnih uređaja koji se oštete prilikom iskliznuća.

Tabela 6.1. Rezultati kontrole dimenzija vešalica iz eksploatacije (deo uzorka)

Merno mesto	Nazivna mera (mm)	Granična mera (mm)	Uzorci							
			2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
e1 ⁴	471	-	480,9	477,1	480,3	480,7	477,7	479,8	487,2	493,1
e	422	428 ⁴	433,7	430	424,2	425,3	430,6	433,1	440,7	445,7
s	25	18	25,92	24,9	28,63	28,34	26,37	26,1	25,24	25,71
s1	23	22 ³	22,35	22,64	27,31	27,49	21,8	22,44	22,06	22,17
a ⁴	35 ⁺¹⁵ _{-0,5}	45	40,48	41,07	42,65	42,59	48,85	47,86	44,85	44,64
b	15	13	14,38	15,3	15,6	15,54	15,21	14,89	15,67	15,57
c	22	16	22,85	22,11	23,37	23,54	22,38	22,04	25,15	23,5
d	20,5	17	19,9	19,77	20,98	21,16	20,71	20,15	20,43	20,53
m ⁵	56 ^{+0,5} ₀	⁶	59,63	59,22	57,43	57,54	59,1	58,86	58,25	59,96
		⁷	56,6	56,96	55,84	55,86	56,02	56,52	55,41	55,52
n ⁴	46 ^{+0,5} ₀	⁵	48,16	47,87	46,62	46,71	51,1	51,33	50,64	51,43
		⁶	45,85	45,63	46,18	46,28	46,53	45,69	45,92	45,81
Oznaka			F11-88		S 90 OT7 H		ST81		ST83	

Veličine vešalice, koje su na osnovu postojećih propisa predviđene za kontrolu ili su date kao nominalne, a mogu poslužiti kao pokazatelj uticaja opterećenja su:

- dužina tela vešalice od unutrašnjeg otvora spoja za svornjak i navrtku (oznaka e, Uputstvo 242/5), koju je moguće izmeriti samo pri redovnoj opravci kada se vrši potpuno rastavljanje vučnih uređaja. Pri tome ograničenje radioničke granične mere dužine e iznosi 6 mm što je 1,42% izduženja mere e (slika 6.3). Ova mera mora, kao i dužina vešalice e1, biti ograničena prema svim propisima (UIC 520, EN 15566 i Uputstvo 242/5) i zbog uticaja na dužinu celokupnog kvačila, koje ne sme preći vrednost 986^{+10}_{-5} mm.
- dužina vešalice - gabaritna (oznaka e1, UIC 520), koju je moguće izmeriti pri tekućem održavanju u planskom pregledu ili kontroli, ali njena kontrola nije predviđena.
- debljina zidova vešalica na mestu spoja sa svornjakom i navrtkom u pravcu dejstva sile (mere s i s1) i poprečno na pravac dejstva sile (mere c i d), koje je moguće izmeriti samo kada se vrši rastavljanje vučnih uređaja.

⁴ Ovo su radioničke granične mere prema Uputstvu 242/5 za dimenzije kojima nisu date eksploatacione mere. Podrazumeva se da su ostale granične mere eksploatacione.

⁵ Dimenzije date prema prema UIC 520.

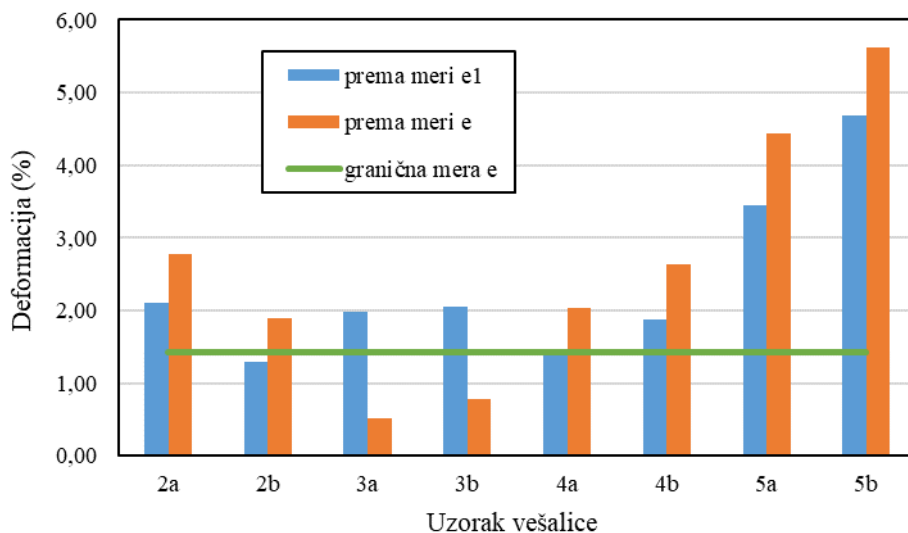
⁶ Prečnik u pravcu dejstva vučnih sila.

⁷ Prečnik poprečno na pravac dejstva vučnih sila.

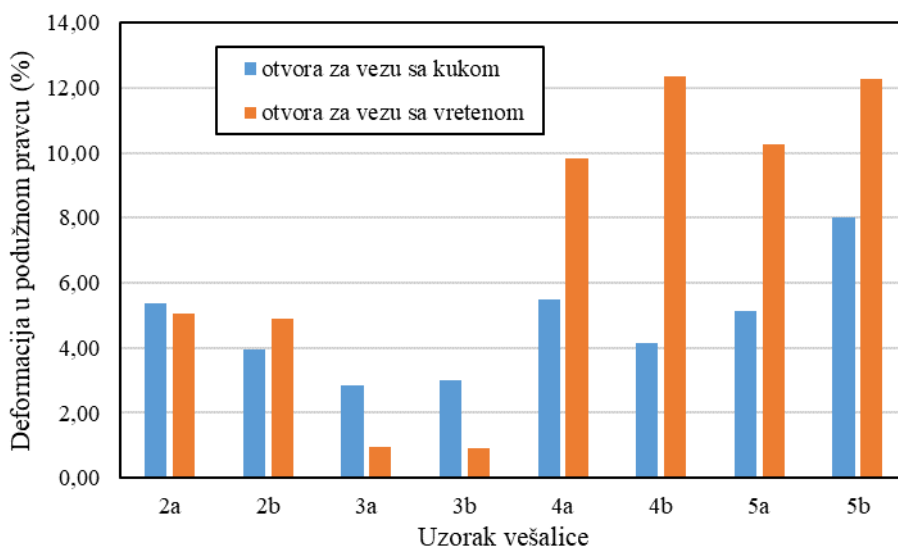
- prečnici otvora za svornjak i navrtku u pravcu dejstva sile (mere m i n) i poprečno na pravac dejstva sile, koje je moguće izmeriti samo kada se vrši rastavljanje vučnih uređaja.

Analiza dimenzione kontrole vešalica je pokazala sledeće:

- u eksploataciji je kod svih kontrolisanih vešalica došlo do plastičnih deformacija u podužnom pravcu – pravcu delovanja vučnih i uzdužno dinamičkih sila (krivljenje vešalica nastala usled nesreća i nezgoda nije uzimano u obzir). U većini slučajeva deformacija je prelazila eksploatacione granične mere predviđene Uputstvom 242/5. Deformacije dužine vešalice mera e i e1 su prikazane na slici 6.3, kao i deformacija na osnovu granične mere e.
- plastične deformacije vešalica u podužnom pravcu se manifestuje i pojavom ovalnosti otvora vešalice za vezu sa kukom na jednom kraju i sa vretenom na drugom kraju. U većini slučajeva deformacija otvora vešalice je prelazila mere predviđene objavom UIC 520. Deformacije vešalica izražena kroz ovalnost otvora za vezu vešalice (odnos izduženja otvora vešalice u podužnom pravcu u odnosu na poprečan) su prikazane na slici 6.4.
- ni za najveće plastične deformacije dužine vešalice, koje se javljaju u eksploataciji, nije došlo do smanjenje debljina zidova vešalica na mestu spoja sa svornjakom i navrtkom u pravcu dejstva sile (mere s i s1) i poprečno na pravac dejstva sile (mere c i d).



Slika 6.3. Deformacija dužine vešalica



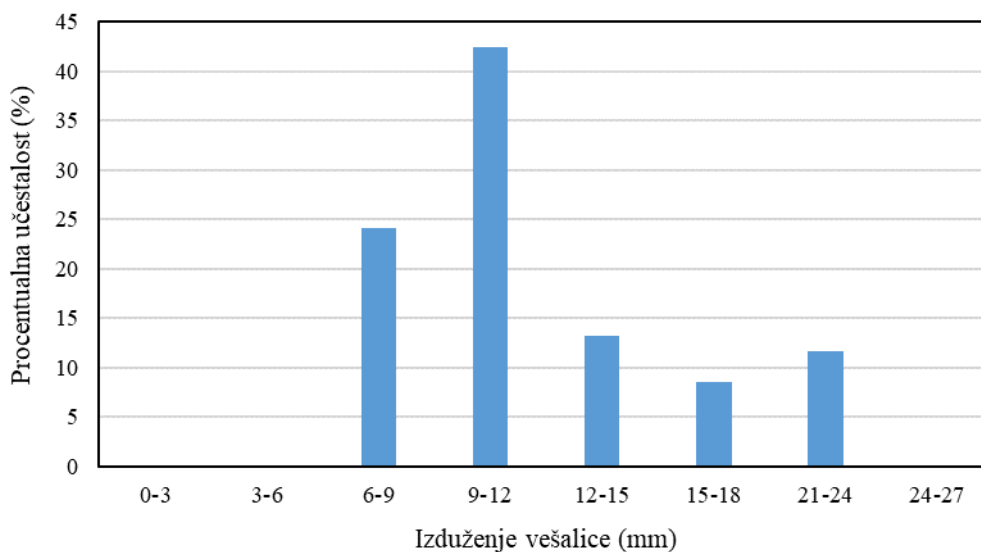
Slika 6.4. Deformacija otvora vešalica u podužnom pravcu

Na osnovu navedenog se može zaključiti sledeće:

- ako je ranije bilo potrebe za proverom mera s , s_1 , c i d navedenih u Uputstvu 242/5, na osnovu sprovedenih merenja i analize u ovom raadu, to više nije neophodno. Ovo potkrepljuje i činjenica da do loma vešalice, po pravilu, ne dolazi na mestu spoja vešalice sa navrtkom ili svornjakom. Izuzetak je raskinuće makedonskih kola tipa Eas-z broj 31655980050-3 (slika 3.40), kod kojeg je došlo do pucanja vešalice na mestu spoja sa kukom, i posledica je postojanja početnog oštećenja vešalice baš na mestu otvora.
- za utvrđivanje plastičnih deformacija vešalice dovoljno je izvršiti merenje mere e_1 , odnosno gabaritne dužine vešalice. Ovo merenje je moguće izvršiti i u eksploataciji ili pri tekućem održavanju bez skidanja ili rastavljanja vešalice iz sklopa kvačila.
- potrebno je uskladiti zahteve u pogledu kontrole vešalica u Uputstvo 242/5 sa stanjem vučne opreme u eksploataciji. Dovoljno je pratiti stanje vešalica i izvršiti merenje mere e_1 , odnosno gabaritne dužine vešalice.

Stoga su pri daljem ispitivanju vešalica označenih od 6 do 10 merene samo dužine vešalica, odnosno mera e .

Procentualna učestanost plastične deformacije vešalice u podužnom pravcu ograničena je eksploatacionim merama. Ipak se u eksploataciji mogu naći vešalice čija plastična deformacija prelazi granične mere (slika 6.5) date u tabeli 6.1. Kako opterećenja koja deluju na elemente vučnih uređaja povećavaju njihove plastične deformacije tokom eksploatacije, dolazi do plastičnog ojačanja i promena mehaničkih karakteristika. Stoga je u daljem istraživanju provereno stanje vešalica ispitivanjem metodama bez razaranja i utvrđene mehaničke karakteristike, da bi se utvrdilo da li se nalaze u propisanim vrednostima.



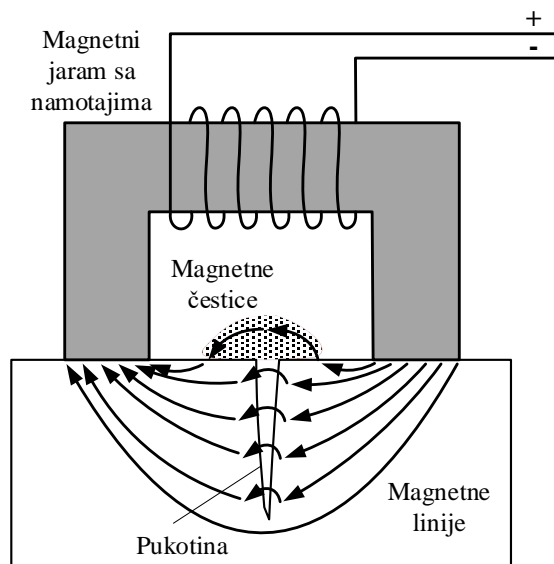
Slika 6.5 Učestanost deformacije dužine vešalica

6.2. Ispitivanje metodama bez razaranja

Ispitivanje vešalica bez razaranja izvršeno je metodom magnetnih čestica da bi se utvrdilo postojanje površinskih oštećenja, odnosno pukotina na vešalicama. Za razliku od ispitivanja sa penetrantima koji imaju mogućnost detektovanja greške, dužine od 0,1 mm i širine 0,03 do 0,05 mm površini vešalice, metoda magnetnim česticama ima veću osetljivost i može da detektuje pukotine od 0,01 mm [54]. Budući da se vešalice proizvode kovanjem odlivaka i da se naknadno vrši termička obrada kaljenjem i otpuštanjem ili normalizacijom, očekivana struktura materijala je sitnozrnasta sa povišenim mehaničkim osobinama čvrstoće i žilavosti. Stoga je za ispitivanje površinskih grešaka izabrana

metoda magnetnih čestica, koja ima veću osetljivost i omogućava detektovanje grešaka manjih dimenzija.

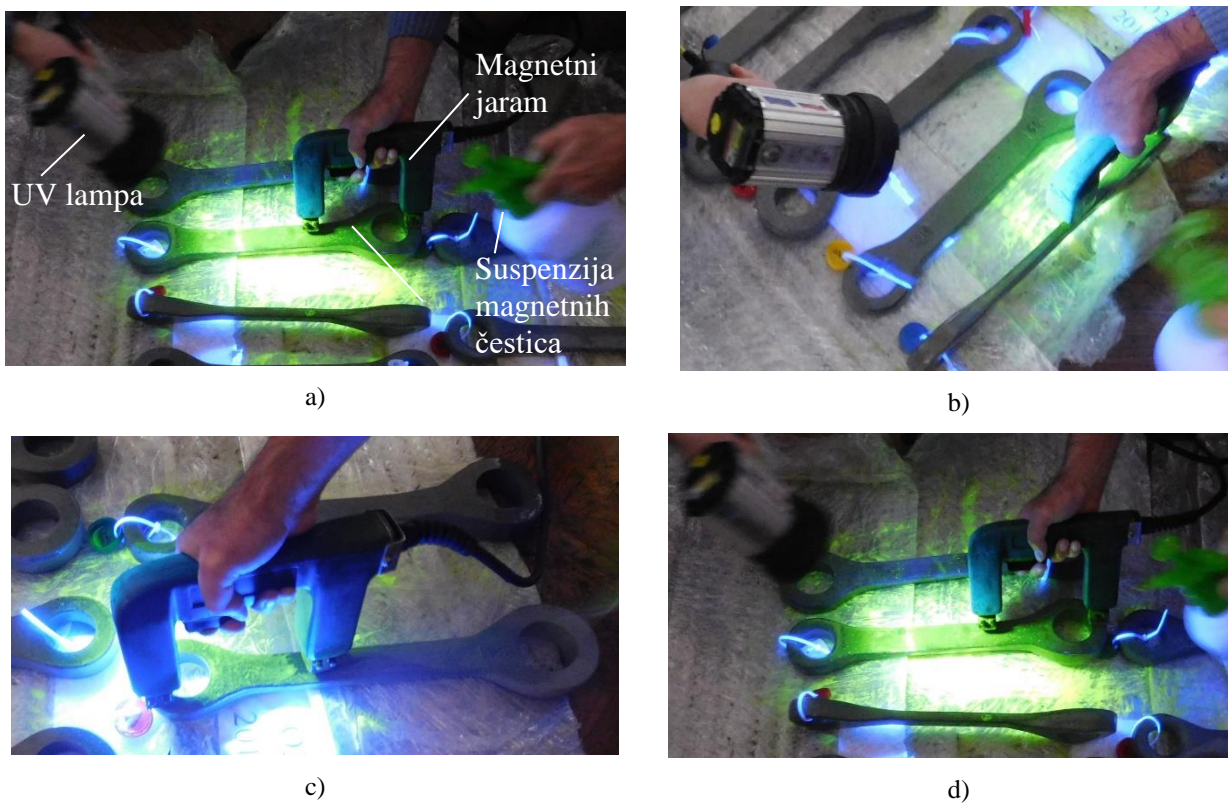
Metoda magnetnim česticama zasniva se na magnetizaciji predmeta koji se ispituje. Površinske greške u materijalu, poput pukotina ili greške neposredno ispod površine, poput uključaka, dovode do poremećaja u prostiranju magnetnih linija u magnetnom polju indukovanom stalnim magnetima ili elektromagnetima (slika 6.6). Na ispitivani predmet nanose se magnetne čestice u vidu praha ili suspenzije (na bazi ulja ili vode), koje se koncentrišu na mestima postojanja diskonuiteta u materijalu, kao što su pukotine, zarezi, uključci i drugo.



Slika 6.6. Ispitivanje magnetnim česticama

Ispitivanje vešalica magnetnim česticama izvršeno je uz pomoć prenosnog elektromagnetnog jarma koji dovodi do uzdužne magnetizacije između polova jarma kada se polovi magneta prislonu na vešalicu (slika 6.7). Budući da se na ovaj način uočavaju greške koje su upravne na pravac prostiranja magnetnih linija, ispitivanje je izvršeno tako što se deo po deo vešalica ispitivao najpre podužno i pod uglom po visini vešalica, a potom i po debljini. Fluorescentne magnetne čestice su u obliku suspenzije nanošene prskanjem na površinu vešalica, a zatim se uz pomoć UV lampe pregledala površina vešalica između stopa jarma. Fluorescentne magnetne čestice za indicaciju greške daju jaku žuto-zelenu fluorescentnu boju na mestu pukotine i veće su osetljivosti od obojene suspenzije magnetnih čestica. Najveći nedostatak ove metode je slaba primenljivost u redovnoj kontroli, na licu mesta, usled zahteva za odmašćivanjem i pripremom površine brušenjem. Metoda ispitivanjem magnetnim česticama ima visoku osetljivost na podpovršinske greške ali postoji potreba za ispitivanjem u dva normalna pravca da bi se detektovale pukotine različitog pravca prostiranja što produžava ispitivanje.

Greške koje se detektuju ispitivanjem magnetnim česticama su pukotine, koje se lako uočavaju jer izazivaju znatno skretanje magnetnih linija i intenzivno grupisanje magnetnih čestica na mestu diskonuiteta. Ostale greške, kao što su uključci ili gasna poroznost izazivaju manje uočljivo skretanje magnetnih linija i koncentraciju magnetnih čestica, pa ih je teže uočiti. Pri ispitivanju vešalica ni na jednom komadu nije uočena koncentracija magnetnih čestica, što znači da na pregledanim uzorcima nema pukotina, niti drugih oštećenja na površini i neposredno ispod površine. To znači da opterećenja kojima su vešalice bile izložene u eksploataciji nisu izazvale pojavu pukotina, kao i da je materijal vešalica i tehnološki postupak proizvodnje, uključujući termičku obradu, bio izveden na propisan način.



Slika 6.7. Ispitivanje magnetnim česticama, a-d) postupak ispitivanja

6.3. Ispitivanje hemijskog sastava

Ispitivanje hemijskog sastava je izvršeno na optičkom spektrometru Belec Lab 3000s metodom OES, proizvođača Belec Spektrometrie Opto-Elektronik GmbH (slika 6.8) u hemijskoj laboratoriji Instituta IMS u Beogradu. Delovi za hemijsku analizu su isečeni i pripremljeni brušenjem iz vešalice 2a posle mehaničkog ispitivanja.



Slika 6.8. Ispitivanje hemijskog sastava vešalice na spektrometru Belec Lab 3000s

Utvrđen hemijski sastav vešalice dat je u tabeli 6.2. Upoređivanjem sa vrednostima u objavi UIC 826 koja propisuje tehničke uslove za isporuku kvačila železničkih vozila vidi se da se hemijski sastav nije u potpunosti u propisanim granicama predviđenim za vešalice koje se obrađuju normalizacijom, jer je sadržaj mangana veći od predviđenih 0,80%. Za delove proizvedene sa termičkom obradom kaljenjem i otpuštanjem, kao što je vešalica 2a, propisan sadržaj ugljenika treba da bude u granicama od 0,57% do 0,65% C. Dobijena vrednost iznosi 0,38% i manja je od minimalne propisane vrednosti. Materijal ispitane vešalice nije srednjeugljenični čelik, niti niskolegirani hromirani čelik 41Cr4, kao što je preporučeno u objavi UIC 826 [56], već niskolegirani manganski čelik oznake 40Mn4. Kako je vešalica na kojoj je ispitivan hemijski sastav proizvedena 1988. godine (prema utisnutoj oznaci), mora se uzeti u obzir da su tada bilo merodavno prethodno izdanje objave UIC 826.

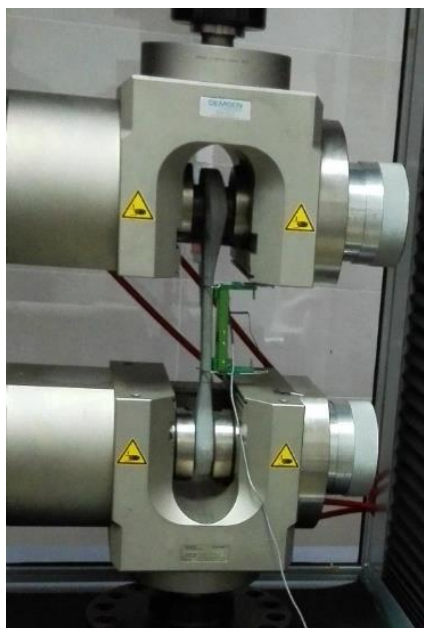
Tabela 6.2. Hemijski sastav vešalica

Element	Termička obrada	Sadržaj elemenata					
		C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	S (%)	P (%)
Propisano [58]	Normalizovane	≤ 0,50	0,40÷0,80	≤ 0,40	nije propisan	≤ 0,045	≤ 0,045
	Kaljene i otpuštane	0,57÷0,65	0,60÷0,90	0,15÷0,40	nije propisan	≤ 0,045	≤ 0,045
41Cr4 [83]	-	0,38÷0,45	0,60÷0,90	≤0,40	0,90÷1,20	≤0,035	≤0,025
40Mn4 [83]	-	0,36÷0,44	0,80÷1,10	0,25÷0,50	-	≤0,035	≤0,035
Izmereno	-	0,38	0,92	0,31	0,06	0,022	< 0,001

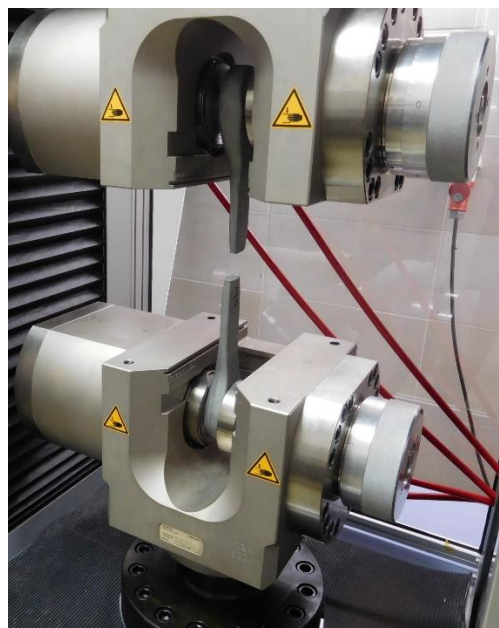
6.4. Mehanička ispitivanja

Mehanička ispitivanja su vršena u laboratoriji Instituta IMS u Beogradu. Ispitivane su mehaničke karakteristike vešalica, napon tečenja i zatezna čvrstoća. Čvrstoća je merena na univerzalnoj mašini tipa AG-X plus 600 kN za ispitivanje zatezanjem, pritiskivanjem i savijanjem, proizvođača Shimadzu. Pri ispitivanju na ovoj mašini maksimalna sila je 600 kN a brzina deformacije može da se zadaje između 0,0005 mm/min do 500 mm/min [38]. Zatezna sila je zadavana kontinualno pri čemu je ispitivanje vršeno zatom brzinom deformacije 1 mm/min na jednoj vešalici, a 250 mm/min na drugoj vešalici jednog para koji je u eksploataciji radio zajedno (par vešalica uvek radi zajedno i pri zameni se menjaju uvek obe vešalice). Akvizicija podataka sile i izduženja ispitivanih vešalica je vršena odgovarajućim softverom preko PC uređaja, koji ima mogućnost prikaza zavisnosti izduženja od porasta sile, određivanja napona i druge opcije. Ispitivanje vešalica na kidalici AG-X plus 600 kN prikazano je na slici 6.9.

Propisane mehaničke osobine preporučenog materijala vešalica date su tabeli 6.3 prema objavi UIC 826 [58] i EN 10083-3 [83] i ustanovljenog materijala prema DIN 17200 [55], koji je u periodu proizvodnje ispitane vešalice bio u primeni. Vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće utvrđenog materijala 40 Mn4 ne odstupaju značajno od vrednosti za preporučeni materijal 41Cr4. Rezultati merenja mehaničkih karakteristika dati su u tabeli 6.4. Modul elastičnosti vešalica određen prema prilogu G standarda ISO 6892-1 [80] kreće se od 192 Gpa do 194 Gpa.



a)



b)

Slika 6.9. Ispitivanje vešalice na kidalici AG-X plus 600 kN, a) početak ispitivanja, b) kidanje vešalice

Tabela 6.3. Propisane mehaničke osobine materijala vešalice

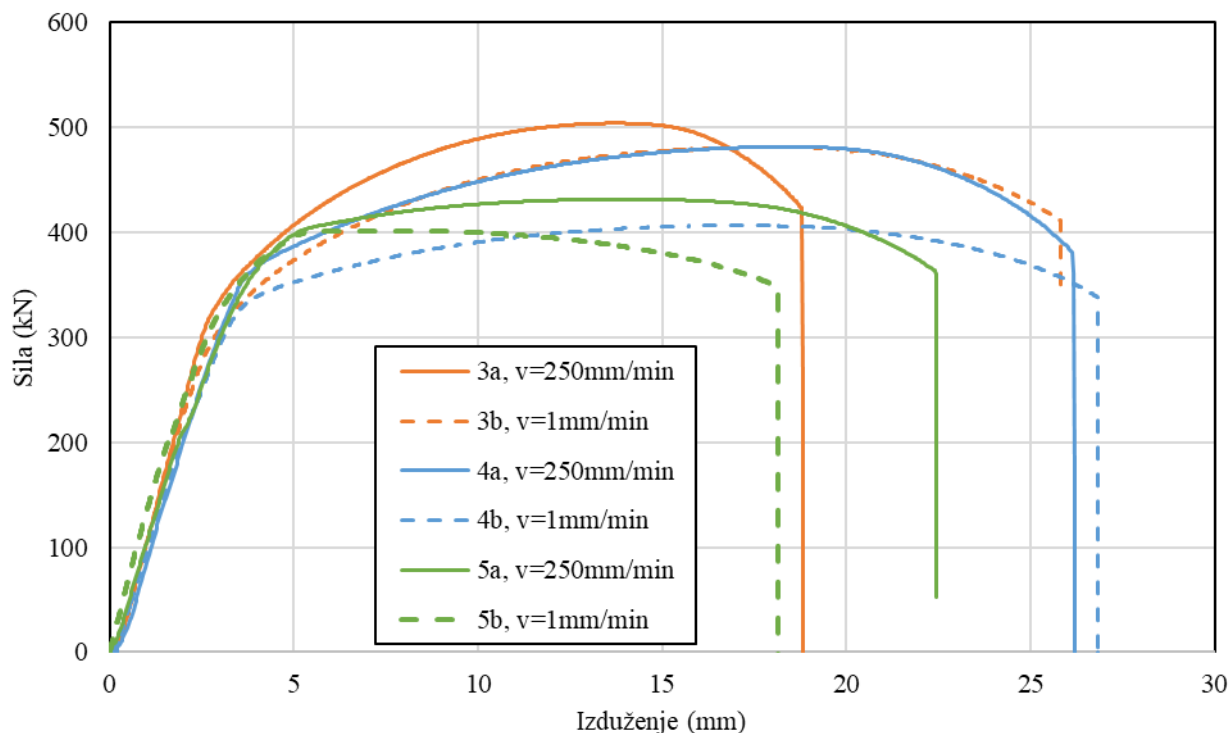
–Propisane vrednosti	Termička obrada	Napon tečenja R_e (MPa)	Zatezna čvrstoća R_m (MPa)	Izduženje A (%)	Žilavost KU (J)
Minimalno propisano [58]	Normalizovane	350	600÷720	18	20
	Kaljene otpuštane i	460	750÷900	14	30
41Cr4 [83]	Kaljene otpuštane i	660	900÷1100	12	-
40Mn4 [55]	Kaljene otpuštane i	635	880÷1080	12	34

Na osnovu izmerenih mehaničkih karakteristika vidi se da je napon tečenja svih ispitanih vešalica u propisanim granicama za minimalne zahteve prema UIC 826, odnosno nalazi se iznad vrednosti 460 MPa. Maksimalna sila vešalice pri kidanju, osim kod vešalica 4b, 5b i 8a, dostiže minimalnu silu kidanja, prema današnjim propisima, od 425 MPa (odnosno 850 MPa za kvačilo). Pri tome izmerena zatezna čvrstoća osim kod vešalica 2a i 6a, ne dostiže propisanu zateznu čvrstoću prema UIC 826 [58] od 750 MPa. Treba imati u vidu da su sve ispitivane vešalice iz 80-ih i početka 90-ih godina, što znači da su u eksploataciji već 30 do 40 godina. Takođe propisi na osnovu kojih su poređene vrednosti mehaničkih karakteristika nisu bili još na snazi. Sredinom 80-ih još su se u eksploataciji nalazila kola sa vučnim uređajima predviđeni za silu kidanja 650 MPa, pored onih sa silom kidanja 850 MPa. Vrednosti mehaničkih karakteristika su upoređivane sa vrednostima propisanim za termičku obradu kaljenjem i otpuštanjem, jer se pregledom loma utvrdilo da je ovo bio način termičke obrade svih uzorkovanih vešalica.

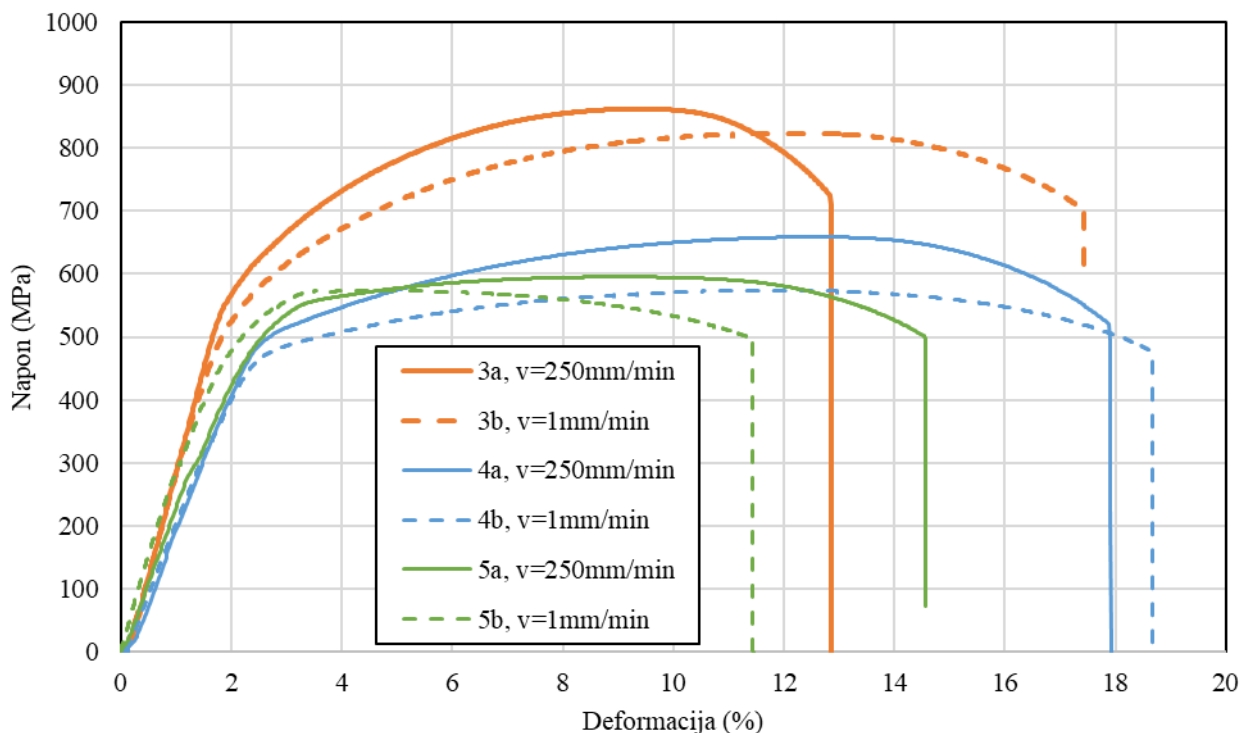
Rezultat ispitivanja karakterističnih uzoraka parova vešalica (oznake 3, 4 i 5) u vidu dijagrama sila – izduženje dat je na slici 6.10, a dijagrama napon – deformacija na slici 6.11. Sa dijagrama se može uočiti da postoji mala razlika u dijagramima parova vešalica koji su u eksploataji bili na istom kvačilu. Jedna vešalica iz para je ispitivana brzinama predviđenim za standardno ispitivanje na zatezanje (1 mm/min), dok je druga ispitivana maksimalnom brzinom deformacije od 250 mm/min, koja može da se ostvari na kidalici. Uočavaju se male razlike u maksimalnim vrednostima zatezne čvrstoće i napona tečenja koje su posledica različitih brzina deformacije pri ispitivanju. Vešalice ispitivane većim brzinama imale su veće izmerene vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće, što je očekivano za relativno male brzine i razlike brzina kao što je u ovom ispitivanju bio slučaj.

Tabela 6.4. Izmerene mehaničke osobine materijala vešalica

Uzorak broj	Maksimalna sila F_{max} (kN)	Brzina deformacije V (mm/min)	Izduženje Δl (mm)	Izduženje A (%)	Napon tečenja R_e (MPa)	Zatezna čvrstoća R_m (MPa)
2a	455,8	250 (prethodno 1)	18,71	11,97	515,00	779,65
2b	479,6	1	20,63	12,75	546,30	739,27
3a	504,0	250	18,81	12,86	537,40	734,15
3b	481,5	1	25,82	17,42	473,80	729,73
4a	481,6	250	26,2	17,92	498,10	658,67
4b	406,7	1	26,83	18,67	547,20	573,90
5a	431,5	250	22,45	14,57	526,60	595,19
5b	401,7	1	18,18	11,46	515,00	572,93
6a	449,9	250	21,58	183,78	754,86	754,86
6b	457,9	1	19,70	176,27	749,17	599,34
7a	420,2	250	18,21	174,99	741,51	741,51
7b	437,8	1	23,05	183,85	677,78	677,78
8a	475,9	250	17,72	184,41	653,29	653,29
8b	483,0	1	18,74	174,09	641,72	641,72
9a	446,6	250	21,57	172,16	628,48	628,48
9b	484,2	1	17,74	181,14	646,65	646,65
10a	414,4	250	18,01	176,35	543,53	543,53
10b	425,7	1	21,03	172,48	619,34	619,34



Slika 6.10. Dijagram sila - izduženje karakterističnih uzoraka vešalica

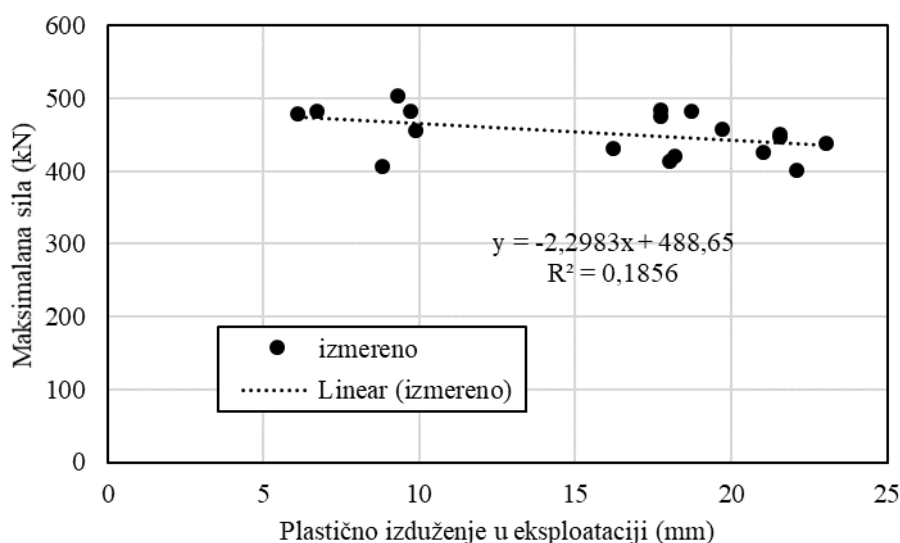


Slika 6.11. Dijagram napon - deformacija karakterističnih uzoraka vešalica

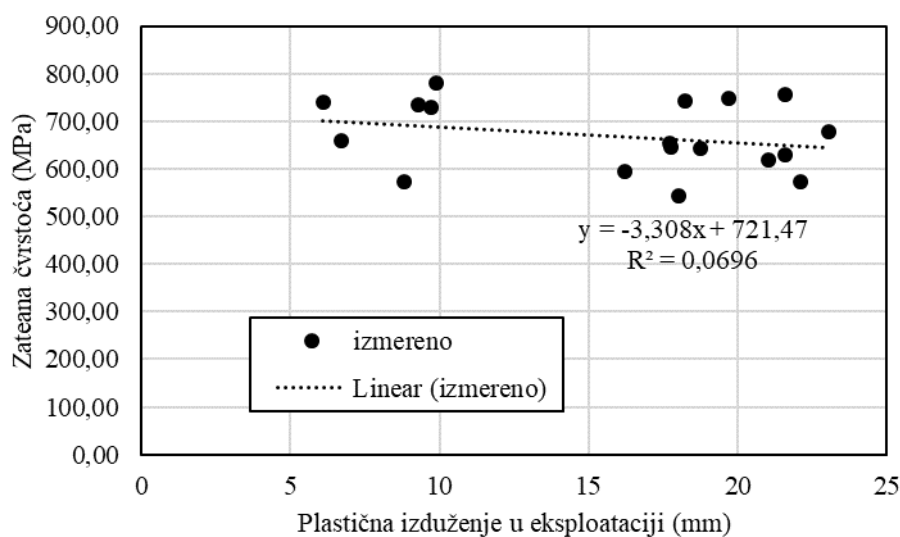
Izduženje vešalica pri ispitivanju ne zavisi od brzina ispitivanja, pri primenjenim, relativno malim brzinama, već je bilo uslovljeno prethodnom plastičnom deformacijom u eksploataciji. Vešalice koje su imale primetno veću prethodnu plastičnu deformaciju (npr. vešalica 5b koja je imala prethodnu plastičnu deformaciju od 22,1 mm, što je za 5,9 mm veće nego njen par 5a) imala su pri ispitivanju primetno manje izduženje (slika 6.10) i naravno deformaciju (slika 6.11). Vešalice 4a i 4b koje su

imale manju prethodnu plastičnu deformaciju (6,7 mm i 8,8 mm respektivno) i malu razliku prethodne plastične deformacije, imala su pri ispitivanju приметno veće izduženje i deformaciju. Ipak specifični uslovi proizvodnje i eksploatacije uslovljavaju i odstupanja, što se vidi na primeru vešalice 3a, koja i pored nevelike prethodne plastične deformacije od 9,3 mm ostvaruje malo izduženje, odnosno deformaciju pri ispitivanju.

Zavisnost maksimalne sile pri ispitivanju od prethodne plastične deformacije u eksploataciji ima mali stepen korelacije (slika 6.12), odnosno ima veliko rasipanje rezultata, što je posledica primene različitih vrsta čelika za izradu vešalica, specifičnosti postupaka proizvodnje različitih proizvođača (termička obrada), rad pod različitim eksploatacionim uslovima i dr. Slično je i u slučaju zavisnosti zatezne čvrstoće pri ispitivanju od prethodne plastične deformacije u eksploataciji (slika 6.13), gde je stepen korelacije još manji. Porast plastične deformacije tokom eksploatacije nije uslovljavalo povećanje napona tečenja i zatezne čvrstoće što znači da ostali elementi vučnih uređaja i dalje imaju veću nosivost od ispitivanih elemenata sigurnosti - vešalica.

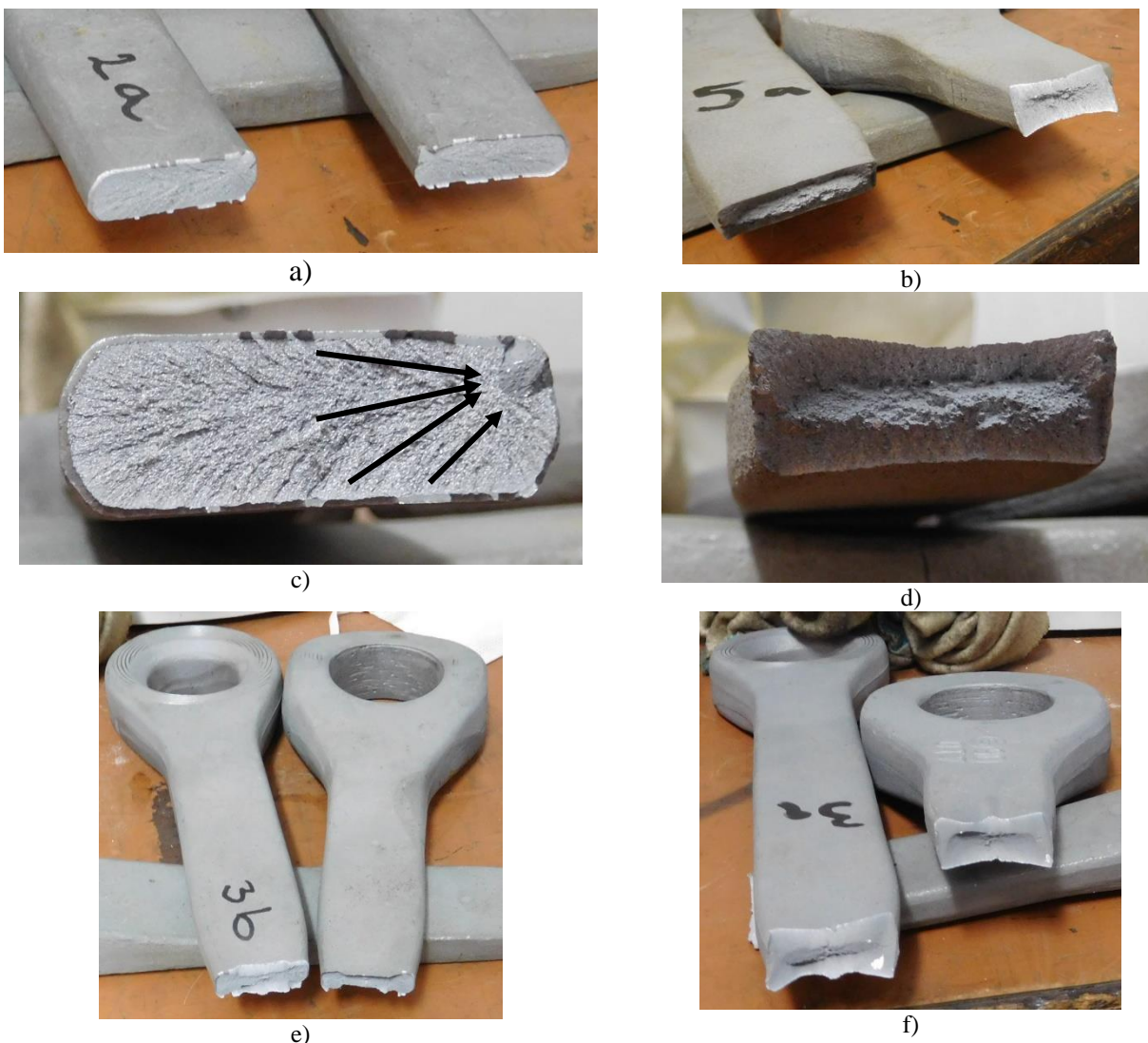


Slika 6.12. Zavisnost maksimalne sile pri ispitivanju vešalica od prethodne plastične deformacije



Slika 6.13. Zavisnost zatezne čvrstoće pri ispitivanju vešalica od prethodne plastične deformacije

Ispitivanje vešalica pokazalo je duktilan lom, sa različitom makrografskom strukturom površine loma (slika 6.14). Na slici 6.14 c se uočava detalj površine loma vešalice 2a, gde ševronske linije upućuju na izvor, grešku u materijalu, od koje je počeo dominantno krti lom, kao i pravac širenja loma. Na slikama 6.14 b, d, e i f prikazani su duktilni lomovi vešalica 3a, 3b i 5a, čija površina poprečnog preseka loma pokazuje ravansko stanje napona.



Slika 6.14. Izgled loma vešalica pri ispitivanju zatezanjem na kidalici, a) vešalice 2a, b) vešalice 5a, c) vešalice 2a detalj, d) vešalice 3a detalj, e) vešalice 3b, f) vešalice 3a

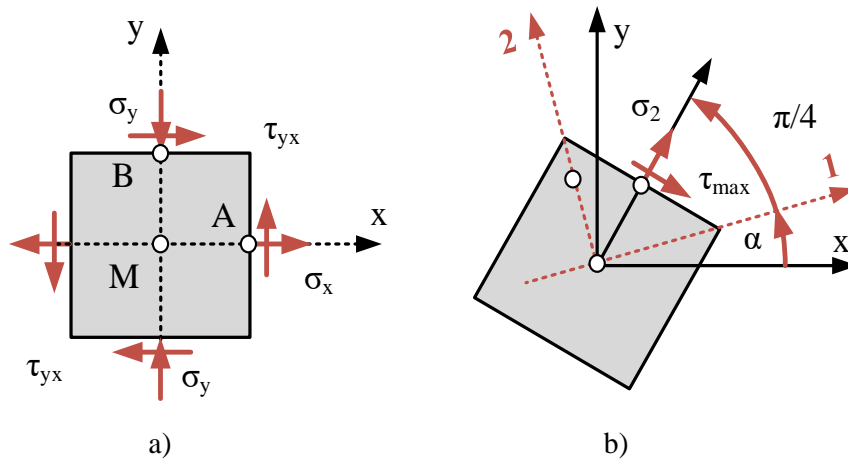
Ako naponi deluju u ravni, odnosno nema komponenti u pravcu z ose, tada je naponsko stanje ravno [37, 81]. Tenzor napona za ravansko stanje prema slici 6.15 a [81]:

$$\sigma_x = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{Bmatrix} \quad (6.1)$$

Ekstremne vrednosti smičućih napona (slika 6.15 b) koje deluju u ravni sa normalom pod uglom $\alpha+45^\circ$ određuju se pomoću izraza 6.2, sa odgovarajućim normalnim naponom izraz 6.3 [81]:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (6.2)$$

$$\sigma_x = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (6.3)$$



Slika 6.15. Naponi a) ravansko stanje napona, b) ekstremne vrednosti smičućih napona [81]

Promena napona može se predstaviti pomoću Morovih krugova [81] izrazima:

$$\left(\sigma_n - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_n^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 \quad (6.4)$$

gde je izraz 6.4 jednačina kruga sa centrom $\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}; 0\right)$ i poluprečnikom $\frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$.

7. ANALIZA UTICAJNIH FAKTORA NA RASKINUĆE VOZA

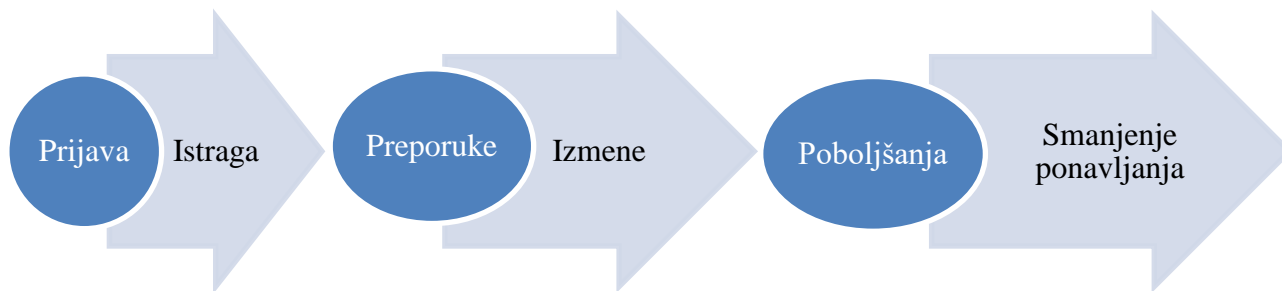
Kod svakog raskinuća železničkih vozila opremljenih vučno-odbojnim uređajima razdvojenog tipa – sa kvačilom, tegljenikom i odbojnicima, neminovno dolazi do loma nekog od elemenata mehaničke veze – elementa kvačila ili tegljenika. Tako je neposredan uzrok raskinuća uvek lom vučnih uređaja. Pri tome se zanemaruje činjenica da je nosivost delova mehaničke veze železničkih kola, kao i svih ostalih mašinskih elemenata „...najveći napon koji mašinski deo može u toku radnog veka, pod određenim radnim uslovima, da izdrži, sa sigurnošću da ne nastupi razaranje ili neko drugo kritično stanje.“ [61]. Vučni uređaji su konstruisani da izdrže opterećenje propisano objavama Međunarodne železničke unije UIC 826 [58], UIC 825 [57], UIC 520 [52] i evropskim standardom EN 15566 [56].

U daljoj analizi uzroka raskinuća koristiće se kombinovani postupci metode utvrđivanja osnovnog uzroka (Root cause) ili više njih, odnosno analiza osnovnog uzroka (RCA): 5 Zašto, Išikava dijagram (Riblja kost, Dijagram Uzrok – Posledica) i Pareto analiza. RCA metoda je usmerena na pronalaženje osnovnih uzroka problema, a ne neposrednih uzroka ili čak posledica. Pojava raskinuća je upravo primer ovakve pojave, kod koje uzroci mogu da se pogrešno identifikuju i zamene sa posledicama.

Jasno je, da je veoma značajno da se uzroci nesreća i nezgoda (NIN), a time i raskinuća, istraže pre svega:

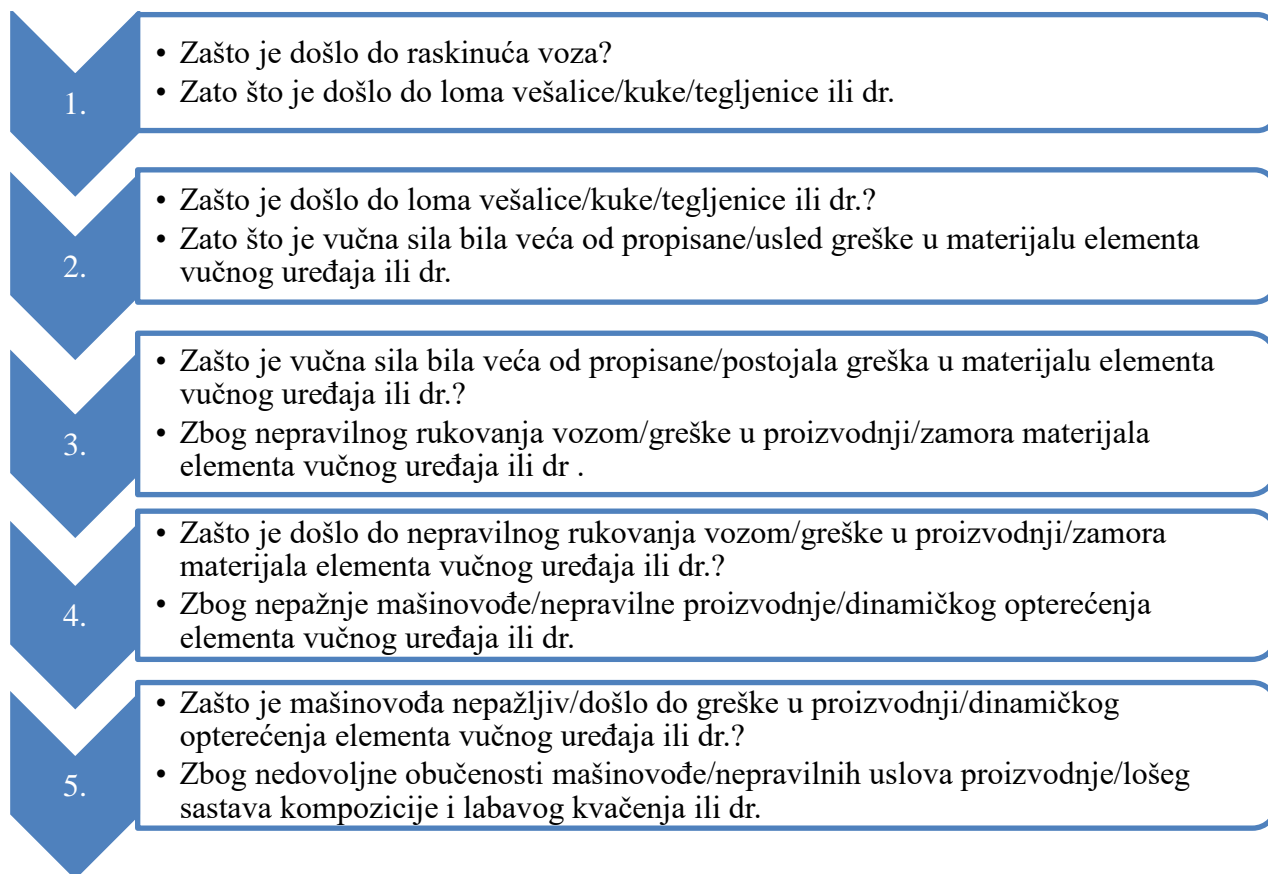
- da bi uočili faktore, radnje ili uslove koji dovode do raskinuća,
- da bi identifikovali nepravilnosti ili oštećenja koja su dovela do raskinuća,
- da bi smanjili ili izbegli mogućnost oštećenja sredstava,
- da bi smanjili ili izbegli mogućnost povreda i dr.
- radi smanjenja materijalne štete,
- radi smanjenja štetnog uticaja na životnu sredinu,
- da bi se sprečilo ponavljanje slučajeva raskinuća i dr.

Stoga je sprovedena analiza raskinuća sa ciljem utvrđivanja osnovnih uzroka i donošenja preporuka koje bi smanjile broj raskinuća (slika 7.1). Ukoliko istraživanje uzroka ne utvrdi osnovne uzroke, ne mogu se doneti preporuke za izmenu, pa neće doći ni do poboljšanja i stoga će se pojave raskinuća ponavljati.



Slika 7.1.Značaj istraživanja raskinuća

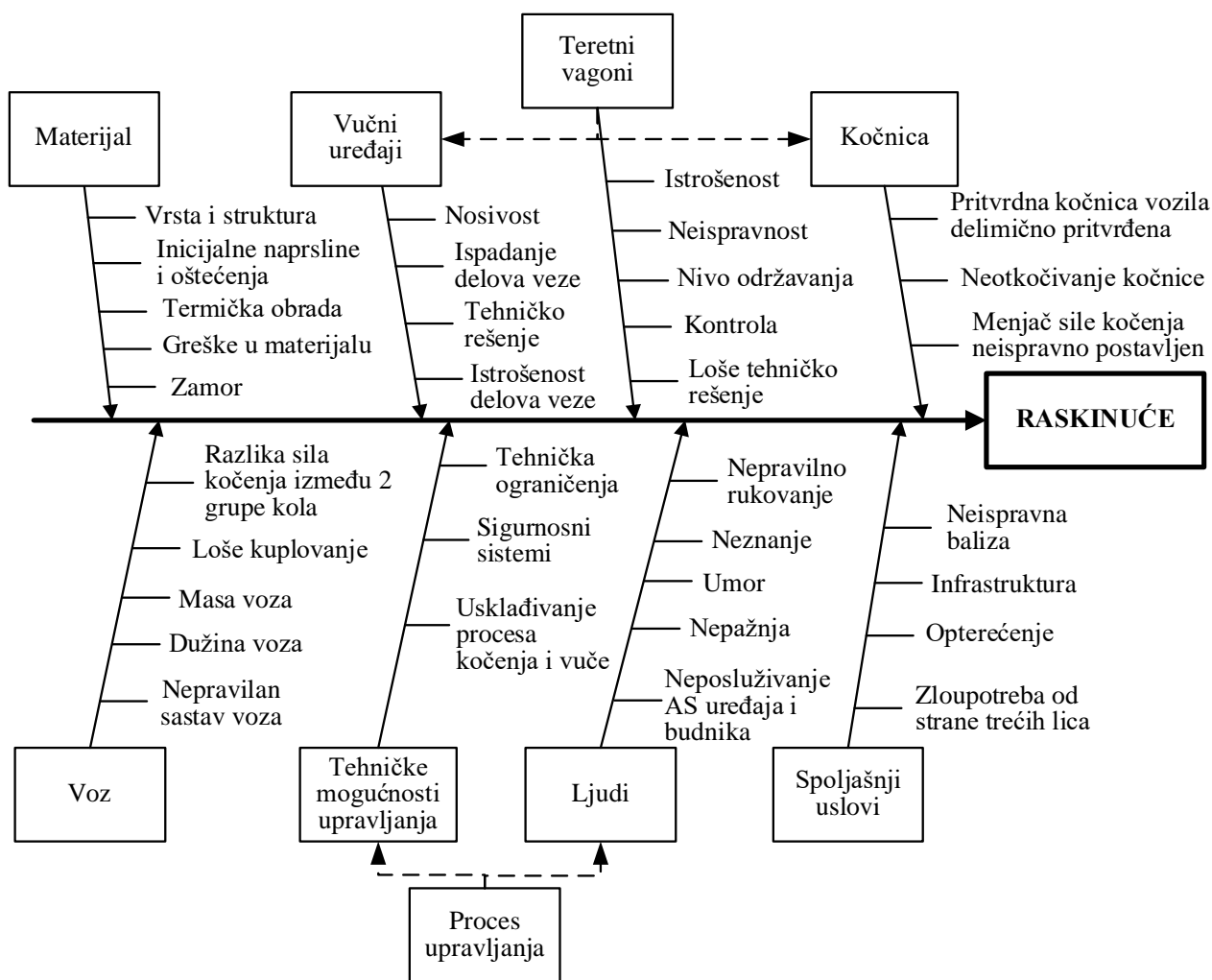
Primer analize osnovnog uzroka (RCA) primenom metode 5 Zašto prikazan je na slici 7.2.



Slika 7.2. Utvrđivanja osnovnog uzroka raskinuća primenom metode 5 Zašto

Za utvrđivanja uzroka koji za posledicu daju raskinuće voza možemo koristiti dijagram uzroka i posledica, odnosno Işikava dijagram (riblja kost). Na Işikava dijagramu (slika 7.3) prikazani su prepoznati i mogući uzroci raskinuća voza. Faktori uticaja na raskinuća voza mogu se grupisati u sledeće kategorije:

- **sastav i karakteristike voza** (nepravilan raspored kola, raspored 2-osovaca u vozu, raspored kola sa većom kočnom masom, raspored kola sa isključenom kočnicom, stanje zakvačenosti - razmak između odbojničkih tanjira pri zategnutom kvačilu, masa voza, dužina voza, natovarenost i dr.),
- **upravljanje vozom** koje obuhvata:
 - **tehničke mogućnosti za upravljanjem vučnog vozila** (tehnička ograničenja upravljanja, sporost procesa upravljanja,),
 - **ljudski uticaj** (nepravilno rukovanje, neposluživanje AS uređaja i budnika, nepravilna manevra, nepravilno potiskivanje voza i dr.)),
- **ispravnost vozila** koja obuhvata:
 - **ispravnost vučnih uređaja** (nosivost, istrošenost delova, ispadanje delova veze, inicijalne naprsline i oštećenja, zamor),
 - **ispravnost kočnice** (stanje zakočenosti, oštećenja glavnog vazdušnog voda kočnice, labavljenje spojeva vazdušne instalacije, oštećenje i greške u materijalu kočničke spojnice i čone slavine),
- **materijal** (vrsta i struktura materijala, greške, uticaj termičke obrade, inicijalne naprsline i oštećenja, zamor, i dr.),
- **spoljašnji faktori** (greške u infrastrukturi na pruži ili balizama i dr., zloupotreba od strane trećih lica, preveliko opterećenje i dr.).



Slika 7.3. Išikava dijagram raskinuća

Kvantifikacija faktora uticaja može da se izvrši na osnovu sistematizacije podataka iz komisijskih izveštaja o istrazi i islednom materijalu slučajeva raskinuća u periodu od 2007-2011. [35] i 2018-2020. godine [36]. Vrednost faktora uticaja predstavlja učestanost pojave faktora u slučajevima raskinuća u posmatranom periodu, odnosno može da se izrazi kao procentualna zastupljenost. U tabeli 7.1. date su vrednost faktora uticaja za navedene periode. Pošto je kvantifikacija faktora uticaja određena na osnovu podataka iz istraga raskinuća, treba imati u vidu da neki faktori nisu u istragama sagledani, pa se njihova vrednost ne može odrediti, kao i da se tačnost vrednosti faktora zasniva na tačnosti podataka evidentiranih u istražnom postupku. Na osnovu vrednosti faktora (tabela 7.1) vidi se da najveći uticaj na pojavu raskinuća ima faktor materijala elemenata vučnog uređaja sa 40,2% u periodu od 2007-2011. godine. Ovaj uticaj je povećan u periodu od 2018-2020. godine i iznosi 58,1%. Drugi faktor po značaju na nastanak raskinuća je ljudski faktor sa 15,5% u periodu od 2007-2011. i 18,6% u periodu od 2018-2020. godine. Uzimajući u obzir ostale faktore uticaja, pored materijala, na ispravnost vučnih uređaja vidi se da stanje vučnih uređaja ukupno utiče na raskinuće od 50,7% do 68,6%.

Tabela 7.1. Vrednost faktora uticaja na raskinuće voza

Faktori uticaja		Vrednost faktora (%) za period	
		2007-2011.	2018-2019.
Sastav i karakteristike voza	nepravilan raspored kola	4,4	1,2
	razlika u sili kočenja između 2 grupe kola	8,8	0,0
	nedovoljna pritegnutost kvačila	3,9	2,3
	ukupno	17,1	3,5
Tehničke mogućnosti upravljanja vučnog vozila		0	0
Ljudski uticaj	nepravilno rukovanje	11,6	16,3
	neposluživanje AS uređaja i budnika	2,2	2,3
	nepravilna manevra	1,7	0,0
	ukupno	15,5	18,6
Ispravnost vučnih uređaja	istrošenost delova	1,1	0,0
	ispadanje delova veze	7,2	1,2
	neodgovarajuće tehničko rešenje	2,2	9,3
	Materijal - zamor i inicijalne naprsline	40,2	58,1
	ukupno	50,7	68,6
Ispravnost kočnice	pritrvdna kočnica vozila delimično pritrvdena	0,6	0,0
	neotkočivanje kočnice na vozilu	1,1	0,0
	otkazi GV, kočničke spojnice i čeone slavine	2,2	2,3
	menjač sile kočenja neispravno postavljen	1,1	0,0
	ukupno	5,0	2,3
Spoljašnji faktori	greške infrastrukture	0,6	0,0
	zloupotreba od strane trećih lica	1,7	2,3
	ukupno	2,3	2,3
Nepoznati i drugi faktori		9,4	4,7
Ukupno		100,0	100,0

7.1. Sastav i karakteristike voza

Ispravno sastavljen voz ima raspored kola koji ne utiče na povećanje uzdužnih dinamičkih sila između vagona u vozu, a ova pravila su navedena u Uputstvo 233 o kočenju vozova. Pravilan sastav vagona u vozu prema Saobraćajnom pravilniku [29] i Uputstvu 233 [33] podrazumeva da:

- u vozove brzine do 100 km/h kočene kočnicama P mogu se izuzetno dodavati kola sa kočnicom G do 1/3 broja kola sa kočnicama P (tačka 11.4.6. [33]),

- iza vozne lokomotive u vozu sa kočnicama P dozvoljeno je uvršćenje samo jednog neradnog vučnog vozila sa uključenom kočnicom P (tačka 11.4.7. [33]),
- kod svih vozova bez obzira na vrstu kočnice, izuzetno se mogu dodati kola koja imaju samo glavni vod, ali najviše do 8 osovina (tačka 11.4.11. [33]),
- kod vozova u unutrašnjem saobraćaju, koji se izuzetno koče kočnicama G, mogu se u zadnjem delu voza uvrštavati kola sa uključenim kočnicama P bez menjačkog uređaja vrste kočnice G/P, uključena i uračunata u kočenje voza, s tim da ukupna kočna masa sa kočnicama P ne prekoračuje kočnu masu dela voza sa kočnicama G (tačka 11.4.10. [33]).

Pored navedenih pravila, na osnovu iskustava u eksploataciji, uvedeno je da se kola sa većom kočnom masom uključuju u sastav voza odmah posle lokomotive kao grupa. Nepravilnosti vezane za sastav voza u vidu nepravilnog rasporeda kola u periodu 2007-2011. javljao se kao uzrok raskinuća u 4,4% slučajeva, dok se razlika u sili kočenja između 2 grupe kola javljala kao uzrok raskinuća u 8,8% slučajeva. U periodu 2018-2019. samo u 1% slučajeva kao uzrok raskinuća javile su se nepravilnosti vezane za sastav voza.

Kod svih teretnih vozova bez obzira na vrstu dejstva (G ili P), kvačila vozila moraju biti tako nategnuta da su odbojnici lako sabijeni prema Uputstvu 233 [33]. U praksi ovaj zahtev skoro nikad ne može da se ispuni. Usled plastičnih deformacija elemenata kvačila, koje se dešavaju u eksploataciji i kad su potpuno zavrnuti vretena kvačila, postoji razmak između odbojnika (slika 7.4). Pri tome treba imati u vidu da pritegnutost kvačila utiče na smanjenje uzdužnih sila za oko 25% u odnosu na vrednosti sila koje se dobijaju kada su odbojnici samo u kontaktu [7]. Kao uzrok raskinuća loše kuplovanje, odnosno nedovoljno pritezanje odbojnika javilo se u periodu 2007-2011. godine 3,9%, a u periodu 2018-2020 samo oko 2%. Ovo prividno smanjenje broja nepritegnutosti odbojnika posledica je situacije da je to u železničkom saobraćaju uobičajno, toliko da se uglavnom ne evidentira ili ne unosi kao uzrok nesreća u izveštajima.



Slika 7.4. Razmak između odbojnika teretnih kola u kompoziciji koja treba da su lako pritegnuti (raskinuće 06.11.2020. voza 53412, Debeljača)

Ograničenja u pogledu mase voza, sa obzirom na infrastrukturu RS na kojoj saobraćaju, određuju se na osnovu Uputstva 52 o tehničkim normativima i podacima za izradu i izvršenje reda vožnje [34]. Masa voza se određuje na osnovu vučne sile lokomotive, ali pri tome moraju da se uzmu u obzir i karakteristike pruge (maksimalni nagibi), ograničenja minimalne sile kidanja vučnih uređaja, otpori i željena brzina vožnje. Dužina voza ograničena je korisnom dužinom glavnih prolaznih koloseka u stanicama i posredno masom voza određenom prema Uputstvu 52.

7.2. Upravljanje vozom

Upravljanja vozom je postupak koji zahteva tehničko znanje i veštine u oblasti konstrukcije vučnih vozila i u oblasti železničkog saobraćaja. Način upravljanja vozom može da utiču na pojavu raskinuća na dva načina, kroz:

- tehničke mogućnosti vučnog vozila i
- ljudski faktor.

7.2.1. Tehničke mogućnosti upravljanja vučnog vozila

Primenjen sistem napajanja kontaktne železničke mreže u RS je 25 kV i 50 Hz naizmenične struje. Međutim, vučne karakteristike lokomotiva su uslovljene transformacijom električne energije u mehaničku od vučnih elektromotora do pogonskih osovina. Stoga spoljašnje karakteristike vučnih elektromotora određuju vučnu silu voza [62]. Vučna sila F_V vučnih železničkih vozila je ograničena uslovom kretanja, odnosno ograničena je silom prijanjanja (athezije) F_a [62]:

$$F_V < F_a = \sum_i^n \varphi_i \cdot \left(\frac{P_o}{2}\right) \quad (7.1)$$

gde je:

φ_i - koeficijent prijanjanja (athezije) u širem smislu koji obuhvata koeficijent prijanjanja, kao i uslove prijanjanja kada dolazi do elastične deformacije kontaktnih površina, neravnomernost rada vučnih motora i prenosnika, delovanje sila inercije oscilatornih masa,

$\frac{P_o}{2}$ – vertikalno statičko opterećenje točka pogonskog osovinskog sklopa na šinu.

Da bi prilagodili vučnu silu potrebama vožnje i promenama koeficijenta athezije potrebno je obezbediti njeno lako regulisanje. Način regulisanja vučne sile uslovljen je koncepcijom vučnog vozila, koje zavisi od tehničkog rešenja uslovljenog godinom proizvodnje. Vučni vozni park operatera „Srbija Kargo“ a.d. raspolaže sa sledećim vozilima:

- elektolokomotive:
 - 441 (oko 20 komada prosečne starosti 40 godina),
 - 461 (oko 45 komada prosečne starosti 45 godina),
 - 444 (oko 30 komada tiristrizovanih 441 pre oko 15 godina),
- dizel lokomotive:
 - 621 (oko 12 komada prosečne starosti 20 godina),
 - 641 (oko 40 komada prosečne starosti 40 godina),
 - 642 (oko 20 komada prosečne starosti 60 godina),
 - 643 (oko 11 komada prosečne starosti 50 godina),
 - 644 (oko 6 komada prosečne starosti 50 godina),
 - 661 (oko 40 komada prosečne starosti 55 godina),
- višesistemske Vectron lokomotive (oko 16 komada prosečne starosti 1 godina).

Od približno 240 vučnih vozila samo 16 komada su nova, dok su ostala stara u proseku oko 45 godina. Koncepcija ovih lokomotiva zasniva se na tehnologiji sa malom mogućnošću regulacije i upravljanja u odnosu na savremena rešenja. To se ogleda i u načinu regulacije brzine kretanja koja se vrši preko stepenastog prekidača. Brzine kretanja lokomotive zavisi od brzine obrtanja rotora vučnih motora, koji se se menja promenom napona napajanja vučnih motora.

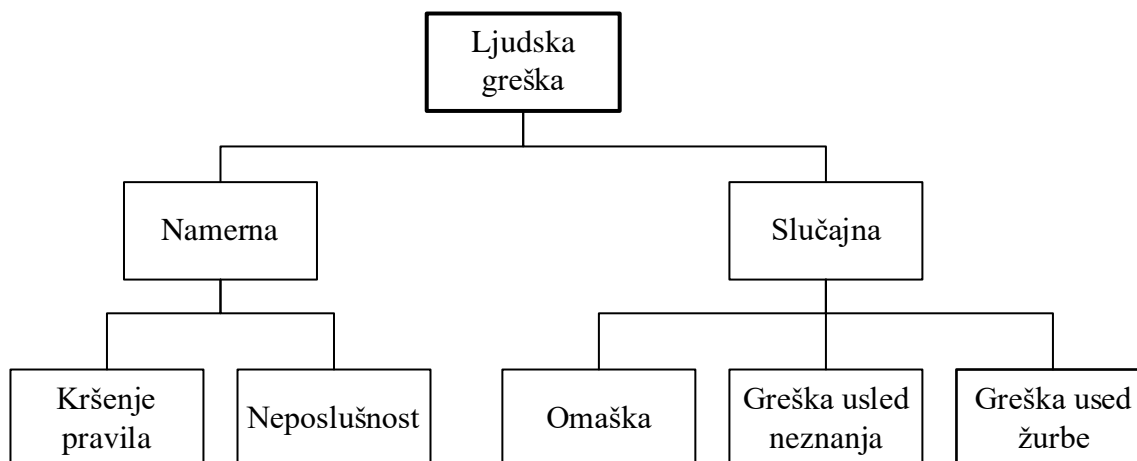
Primer raskinuća 20.12.2007. pri kome se raskinuće dogodilo između prvih i drugih kola ilustruje primer greške pri upravljanju, a uslovljena je i tehničkim mogućnostima upravljanja vozova zbog inertnosti sistema. Komisija je na osnovu analize brzinomerne trake utvrdila da je pri brzini 26 km/h zaveden proces kočenja od 0,5 bar što dovodi do smanjenja brzine na 6 km/h. Pritisak u GV od 5 bar

postignut za 9 s. Posle 6 s primetno povećanje snage motora. Kako proces otkočivanja nije mogao biti izvršen za tako kratko vreme komisija smatra da je glavni uzrok raskinuća voza nepravilno rukovanje kočnikom. Jačina struje na generatoru u momentu kidanja ukazuje na to da voz nije bio otkočen u momentu pokušaja povećanja brzine što je prouzrokovalo raskinuće voza. Snaga motora pri raskinuću $I = 726$ A, dok je pri polasku iz stanice bila 380 A, komisija je konstatovala da je to zbog toga što je voz još kočio - proces otkočivanja nije bio sproveden do kraja, što se kosi sa odredbama Uputstva 233 tačka. 2.1.4.

7.2.2. Ljudski faktor

Pri proceni rizika često se u dovoljnoj meri ne uključuje uticaj ljudskog faktora, što je u potpunoj suprotnosti sa visokim učešćem otkaza koji su prouzrokovani ljudskim grešakama. Doprinos ljudskog faktora koji se bazira na Ljudskim i organizacionim faktorima (HOF - Human and organisational factors), kod velikih nesreća često se uzima između 70% i 80% [63]. Ovi podaci pokazuju značaj ljudskih i organizacionih faktora HOF u cilju upravljanja bezbednošću. Mnoge velike nesreće, kao osnovni uzrok imaju ljudski faktor. Direktni doprinos ljudskog faktora nesrećama i nezgodama se obično naziva ljudska greška. Organizacioni faktori često nisu dovoljno identifikovani tokom istrage nesreće, jer zahtevaju dublju analizu i zato što proces istrage prestaju kada se utvrdi neposredni uzrok nesreće. Stoga se organizacioni faktori po pravilu ne identifikuju i ne analiziraju. Organizacioni faktori uključuju stav i rukovođenje uprave u pogledu bezbednosti, obuke, komunikacije, karakteristika radnika, nadzor i timski rad i dr. [63].

Pri analizi uzroka nastanka NIN u železničkom saobraćaju ustanovljeno je da je ljudski faktor jedan od najčešćih, čak do 70% NIN nastaje poremećajem pažnje kod mašinovođa [64]. Ostalo službeno osoblje, takođe ima odgovorne uloge u sprovođenju železničkog saobraćaja, pa i njihov uticaj pri analizi ljudskog faktora mora biti uzet u obzir. Faktori koji utiču na pažnju mašinovođe uključuju vreme reakcije mašinovođe, upravljanje vozom, vidljivost i drugo [65]. NIN su povezane i sa organizacionim faktorom [64] koji pre svega podrazumeva probleme u organizaciji, upravi i međuljudskim odnosima. Značajnu ulogu u povećanom broju NIN usled ljudskog faktora ima nerazvijenost svesti i kulture o bezbednosti, prema [64]: „Čak 30% vanrednih događaja nastaje zbog lošeg „stava“ osoblja, koje se ogleda u niskom moralu, nedostatku ponosa, slaboj motivaciji, ne sprovođenju posla po proceduri već traženje prečica i dr.“.

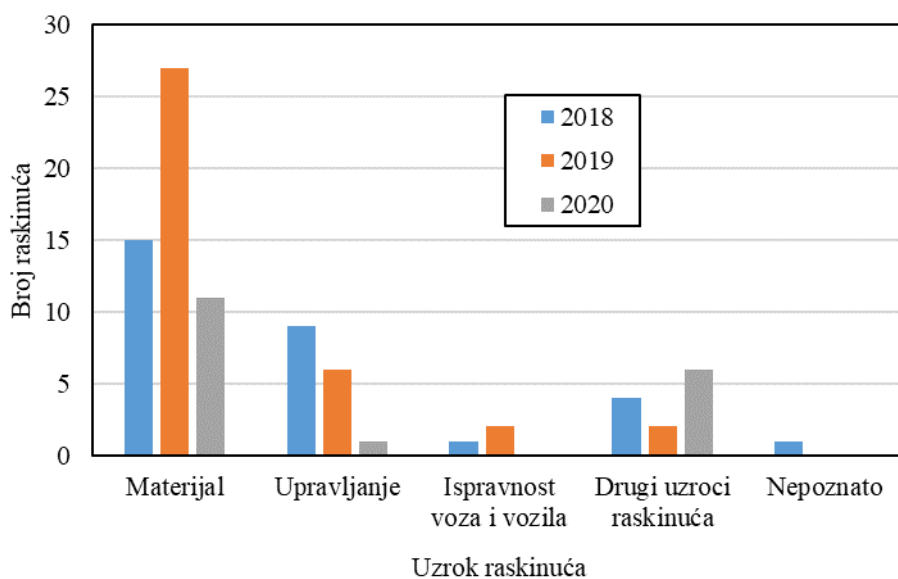


Slika 7.5. Vrste ljudskih grešaka

Za potrebe procene rizika razvijene su tehnike za modeliranje vrsta ljudskih grešaka i brzine po kojima se one mogu dogoditi, kao na primer Tehnika za predviđanje stope ljudskih grešaka THERP (Technique for Human Error Rate Prediction). Ova tehnika koristi Boolean logiku za modeliranje i predviđanje stope ljudskih grešaka i primenjuje se kada su zadaci rutinski i sprovede se po

procedurama. Ljudske greške mogu biti omaške (iako zna šta treba da uradi) ili greške (kada osoba ne zna šta treba da uradi ili je pogrešno naučena), slika 7.5. Greške takođe mogu biti greške u izvršenju (činjenje nečega pogrešnog) ili u neizvršenju potrebnog zadatka. Ljudska bića nisu uređaji pa njihovo delovanje, a time i greške zavise od mnogih uticaja poput umora, motivacije, raspoloženja i dr. [66]. Greške mašinovođa u železničkom saobraćaju, po pravilu su slučajne i poledica omaške ili propusta usled nepažnje, gubitka koncentracije u rutinskom izvođenju postupaka vožnje na poznatim deonicama pruge. Međutim i dobro uvežbane rutinske operacije zahtevaju proveru i pažnju prilikom izvođenja. Najkarakterističnije kod grešaka u vožnji voza je što ovakve greške nemaju mogućnost lake ili brze ispravke, jer su procesi, npr. kočenja ili otkočivanja dugotrajni i ne mogu se prekinuti bez dodatnih negativnih posledica. Stoga je smanjenje grešaka ove vrste veoma teško.

Udeo ljudskih grešaka u uzrocima raskinuća operatera „Srbija Kargo“ a.d. za period 2018-2020. godina kroz upravljanje vozom prikazan je na slici 7.6. Ovi podaci su zasnovani na uzrocima raskinuća utvrđenih u postupku istrage od strane istražnih komisija. Vidi se da dobijeni rezultati (slika 3.20 b) nepravilnosti u upravljanju za posmatrani period iznose 18% slučajeva raskinuća.



Slika 7.6. Uzroci raskinuća u periodu 2018-2020. godina

7.3. Ispravnost vozila

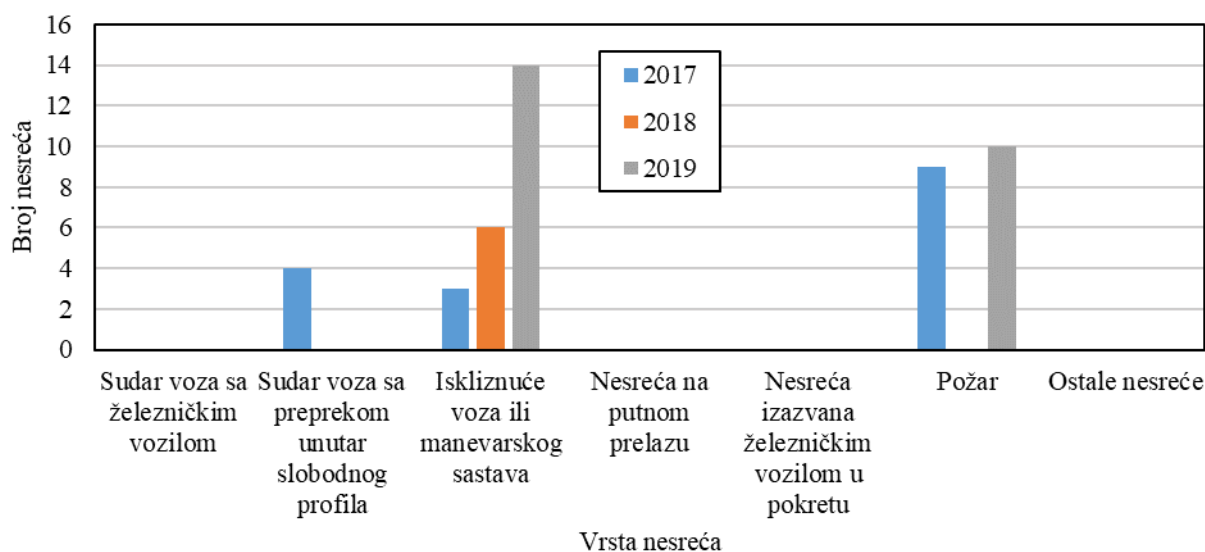
Ispravnost vozila obuhvata ispravnost svih podistema i sklopova železničkih vozila, posebno onih koji utiču na bezbednost saobraćaja, kao što su kočnice, osovinski sklopovi i dr. Uticaj stanja, odnosno ispravnosti vozila na pojavu raskinuća možemo da vidimo na osnovu evidencije uzroka raskinuća u godišnjim pregledima i na osnovu evidencije neispravnosti vagona utvrđenoj pri kontrolama u eksploataciji. Na osnovu Statističkih izveštaja o nesrećama i nezgodama „Srbija Kargo“ a.d. za 2017. godinu [4], za 2018. [5] i 2019. [5] formirane su slike od 7.7 do 7.10.

Kao najčešća vrsta nesreća prouzrokovana tehničkim stanjem železničkih vozila, u periodu 2017-2019. su bila isključiva vozova ili manevarskog sastava sa prosečno 16% u odnosu na ukupan broj nesreća i požari sa 16% (slika 7.7).

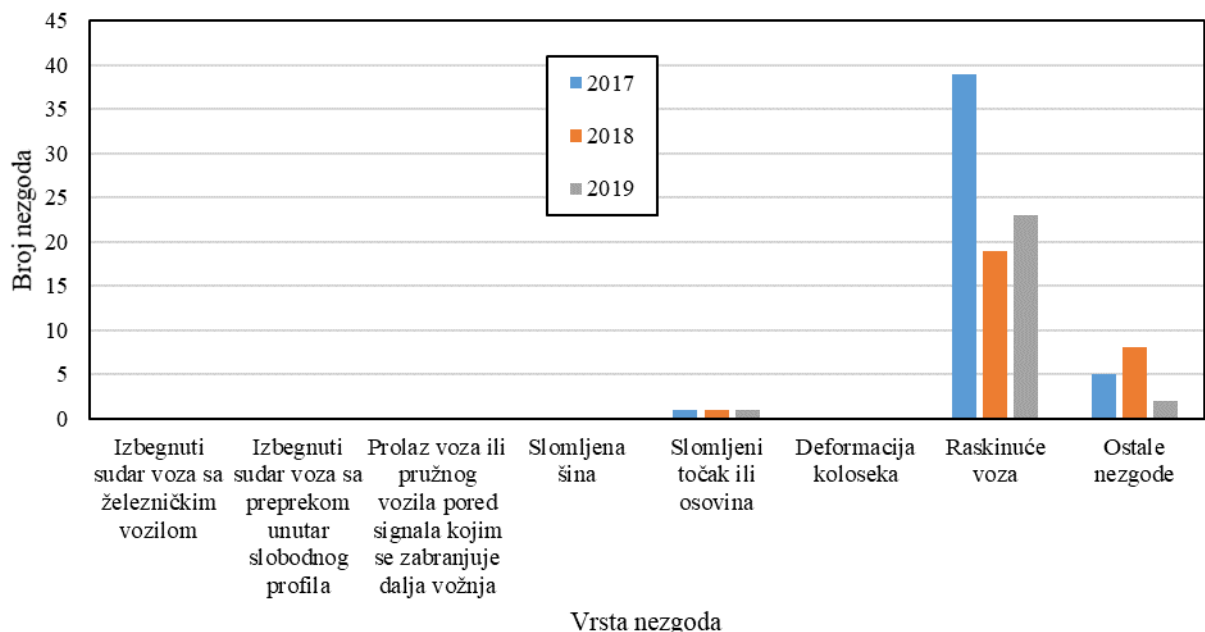
U periodu 2017-2019. godini bilo je prosečno 33 nezgode godišnje, ukoliko posmatramo isključivo tehničke uzroke. Pri tome su najčešća raskinuća voza sa prosečno 27 raskinuća godišnje (prourokovano tehničkim stanjem vozila), što iznosi 53% u odnosu na ukupan broj NIN usled tehničke neispravnosti železničkih vozila. Ostale nezgode su se dešavale prosečno 5 puta godišnje, što čini oko 11% (slika 7.8).

Zbog velikog udela ljudskog faktora u uzroku NIN, CINS je u svojim preporukama (BP_23/19) preporučio „Srbija Kargo” a.d. da formira tim za procenu elemenata ljudskog faktora na nastanak nesreća i nezgoda. Ova preporuka ima za cilj izradu modela kritičnih elemenata, kao i klasifikaciju istih prema važnosti i izradu rang liste zastupljenosti (identifikacija svih rizika) kako bi se radilo na svrsishodnom strukturiranju preventivnih mera i predviđanju ljudskog ponašanja u kriznim situacijama u cilju smanjenja uticaja na nastanak novih nesreća i nezgoda.

Kao što se sa slika 7.7 do 7.10. vidi, iako je pri nesrećama i nezgodama dolazilo do oštećenja železničkih vozila, ova oštećenja su nastajala naknadno, kao posledica nesreće ili nezgode. Iako se u evidenciji i Statističkim izveštajima o nesrećama i nezgodama za „Srbija Kargo“ a.d. pod tehničkim uzrocima nesreća i nezgoda vode podsystemi železničkih vozila, u slučaju iskliznuća, uzroci u najvećem broju nisu vezani za vozila nego za stanje koloseka.

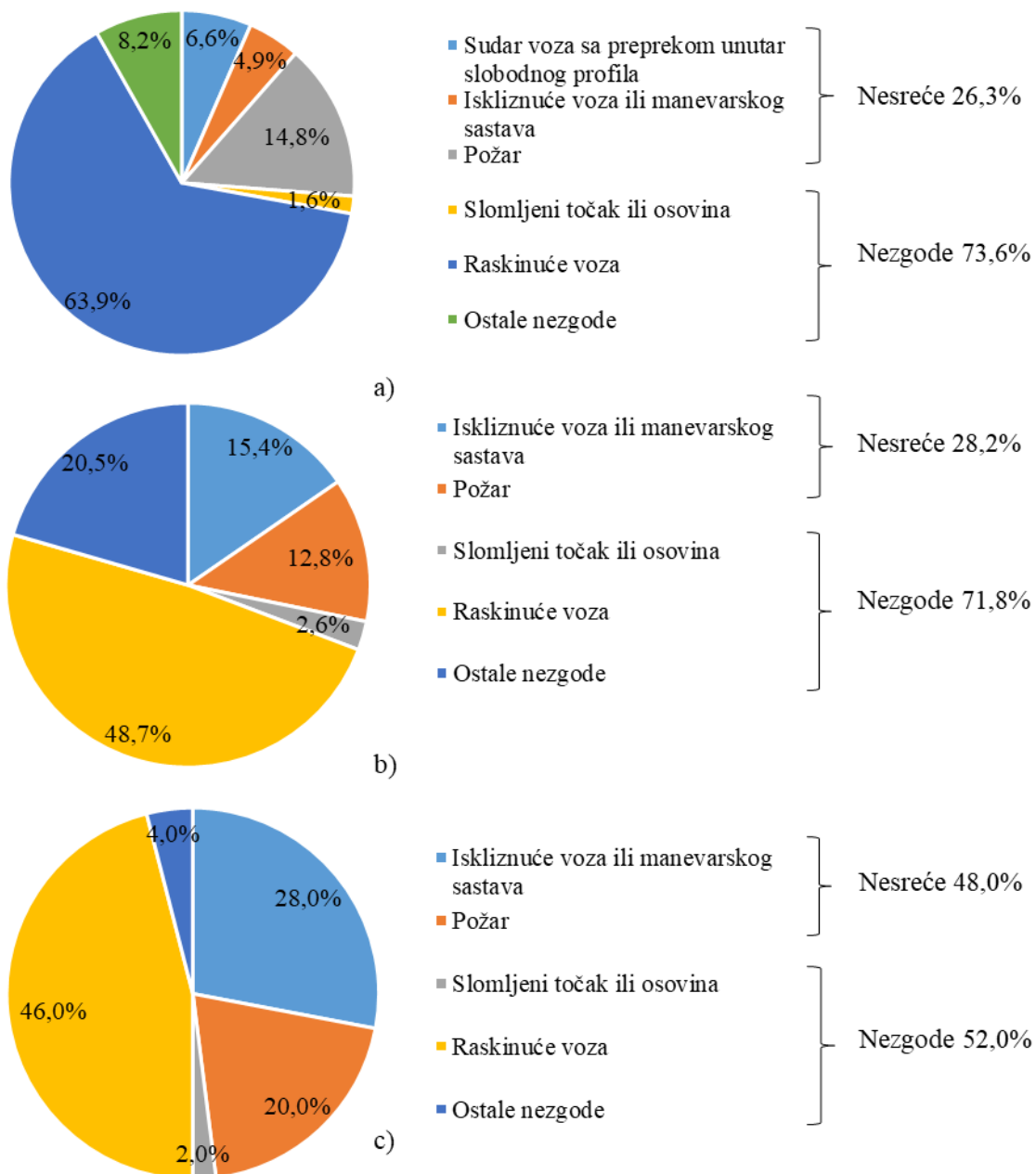


Slika 7.7. Nesreće pri kojima je uzrok tehničko stanje železničkog vozila „Srbija Kargo“ a.d. u periodu 2017.-2019. godine



Slika 7.8. Nezgode pri kojima je uzrok tehničko stanje železničkog vozila „Srbija Kargo“ a.d. u periodu 2017.-2019. godine

Iz podataka se vidi da stanje vozila nije ni jednom prouzrokovalo nesreće kao što su sudar voza sa železničkim vozilom ili preprekom unutar slobodnog profila, nesreću na putnom prelazu ili izazvanu železničkim vozilom u pokretu, kao ni izbegnuti sudar voza sa železničkim vozilom ili sa preprekom unutar slobodnog profila prolaz voza ili pružnog vozila pored signala kojim se zabranjuje dalja vožnja i drugo (slika 7.7). Nesreće pri kojima je uzrok bilo tehničko stanje, odnosno neispravnost vozila je sudar voza sa preprekom unutar slobodnog profila, iskliznuće voza ili manevarskog sastava i požar (slika 7.9).

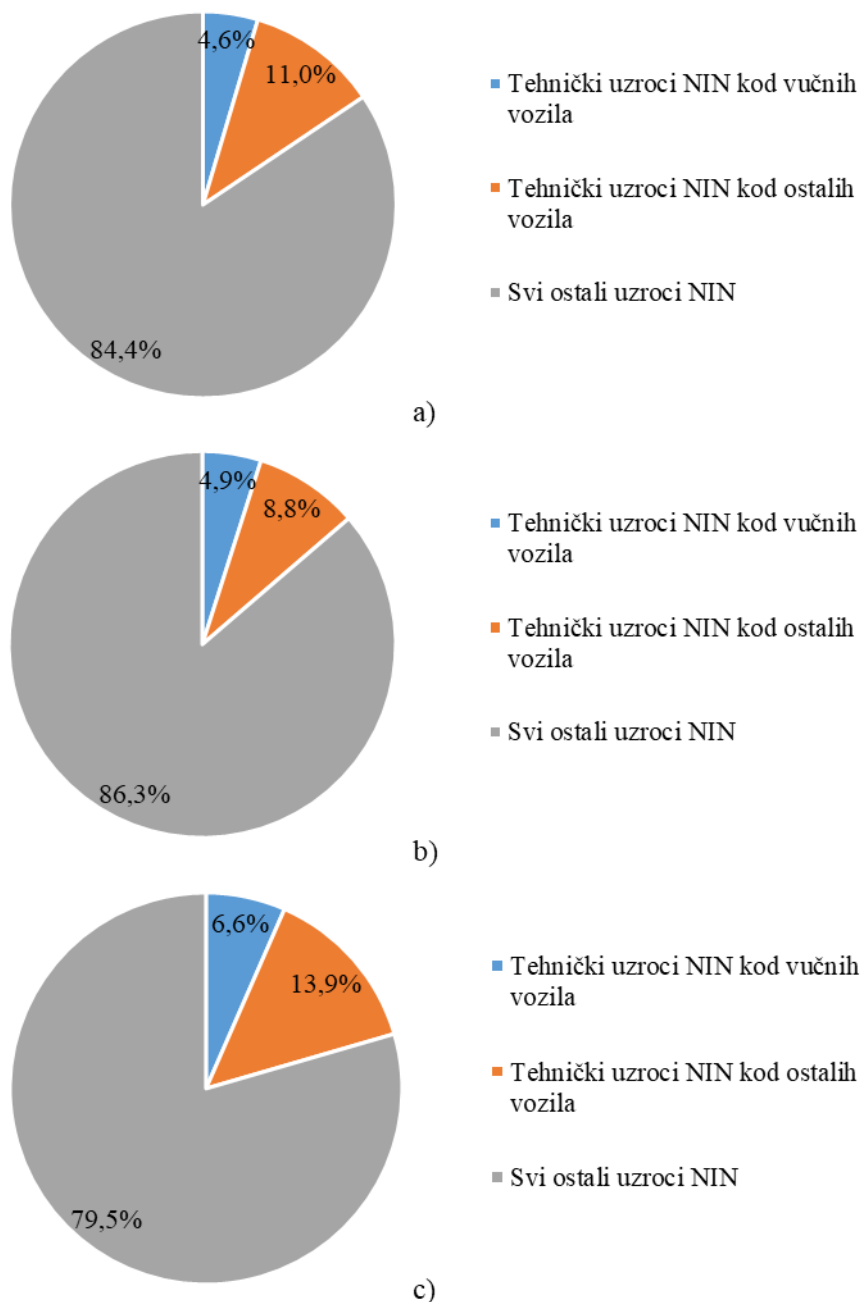


Slika 7.9. Vrste NIN pri kojima je uzrok tehničko stanje železničkog vozila „Srbija Kargo“ a.d., a) 2017., b) 2018., c) 2019. godine

Na slikama 7.7, 7.8 i 7.9 prikazan je procenat različitih tehničkih uzroka železničkih vozila u nesrećama i nezgodama u 2017., 2018. i 2019. godini respektivno. Na osnovu njih se može zaključiti da je procenat požara i raskinuća voza veliki za posmatrani trogodišnji period, dok iskliznuće voza

ili manevarskog sastava raste u posmatranom periodu sa 4,9% u 2017. godini na 28,0% u 2019. godini.

Na slici 7.9 prikazan je procenat nesreća i nezgoda izazvanih tehničkim uzrocima železničkih vozila, odnosno tehničkim stanjem (neispravnostima) železničkih vozila u odnosu na ukupan broj nesreća i nezgoda (NIN) u 2017., 2018. i 2019. godini respektivno. Kao što se sa slike 7.10 vidi procenat nesreća i nezgoda izazvanih tehničkim uzrocima železničkih vozila, odnosno tehničkim stanjem (neispravnostima) železničkih vozila čini svega od 13,7% do 20,6% u odnosu na ukupan broj nesreća i nezgoda u periodu 2017.-2019. godine. Ovo pokazuje da je uticaj tehničkog stanja železničkih vozila na pojavu nesreća i nezgoda mali i da su drugi uzroci presudni za veliki broj nesreće i nezgode u železničkom saobraćaju u periodu 2017.-2019. godine.

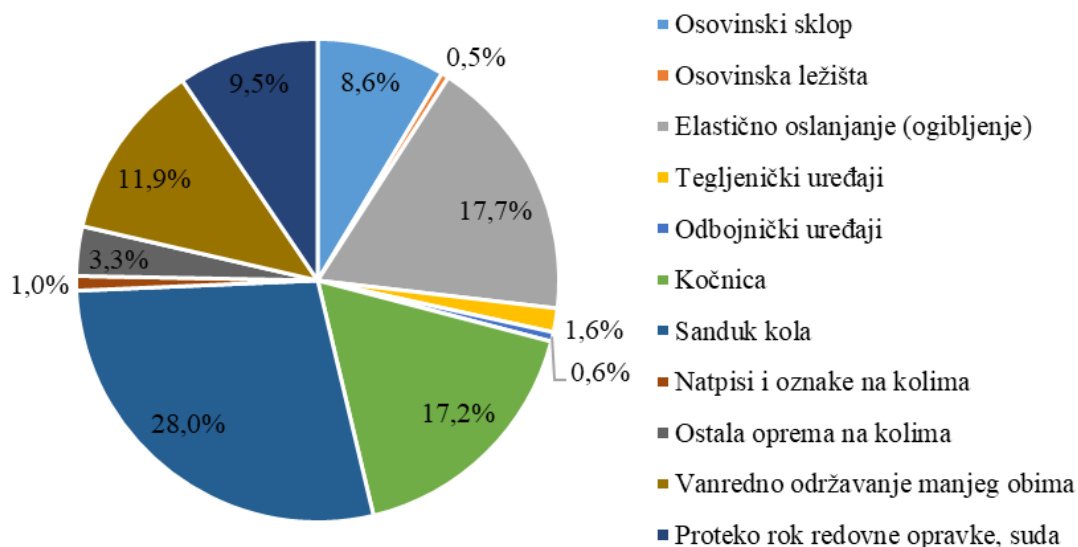


Slika 7.10. NIN po vrstama vozila pri kojima je uzrok tehničko stanje železničkog vozila „Srbija Kargo“ a.d., a) 2017., b) 2018., c) 2019. godine

Na osnovu evidencije isključenih teretnih kola iz saobraćaja Tehničko kolske službe stanice Niš za period od 2016.-2018. godine, iz saobraćaja je isključeno 2261 kola zbog neispravnosti, nedostataka i oštećenja, i poslato na vanredno održavanje u radionici Niš – ranžirna (vanredno održavanje većeg obima) [67], a na 306 kola izvršeno je vanredno održavanje manjeg obima (bez isključivanja kola iz saobraćaja). Raspodela učestanosti isključenja po celinama teretnih kola data je u tabeli 7.2, i prikazana na slici 7.11. Vidi se da uzrok raskinuća koji mogu da prouzrokuju neispravnosti vučno-odbojnih uređaja čini samo 2,2% ukupne neispravnosti.

Tabela 7.2. Učestanost pojave neispravnosti teretnih kola po konstrukcionim grupama od 2016.-2018. godine [67]

Neispravnosti	Broj kola na kojima su uočene nepravilnosti		
	2016	2017	2018
Osovinski sklop	86	71	64
Osovinska ležišta	6	3	4
Elastično oslanjanje (ogibljenje)	174	151	130
Tegljenički uređaji	17	14	10
Odbojnički uređaji	8	2	6
Kočnica	162	145	135
Sanduk kola	264	253	203
Natpisi i oznake na kolima	14	11	0
Ostala oprema na kolima	35	35	15
Vanredno održavanje manjeg obima	121	108	77
Proteko rok redovne opravke, suda	84	78	81

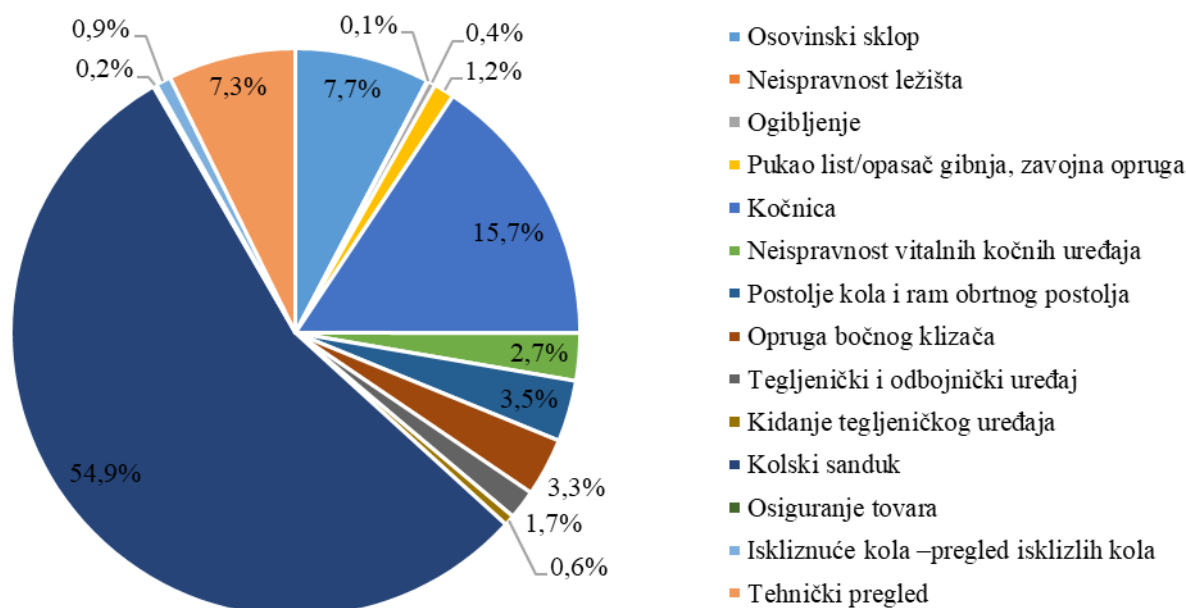


Slika 7.11. Učestanost pojave neispravnosti teretnih kola po konstrukcionim grupama od 2016.-2018. godine [67]

Na osnovu prikupljene evidencije nastalih neispravnosti (oštećenja, kvarova, nedostataka) na teretnim kolima „Srbija Karga“ a.d. na osnovu obrazaca TK-18 (Evidencija izvršenih opravki) u periodu eksploatacije 2018. do 2019.godine izvršena je analiza vrsta neispravnosti (tabela 7.3) [73]. Vidi se da kao uzrok raskinuća mogu da se pojave neispravnosti vučno-odbojnih uređaja, a oni čine samo 2,3% ukupne neispravnosti (slika 7.12).

Tabela 7.3. Uporedni prikaz neispravnosti teretnih kola u 2018. i 2019. godini [73]

Sklop/podsklop i vrsta neispravnosti	Broj neispravnosti u 2018.	Broj neispravnosti u 2019.	Ukupno broj neispravnosti u 2018. i 2019.
Osovinski sklop	437	299	736
Neispravnost ležišta		6	6
Ogibljenje		42	42
Pukao list/opasač gibnja, zavojna opruga	15	98	113
Kočnica	500	1005	1505
Neispravnost vitalnih kočnih uređaja	100	159	259
Postolje kola i ram obrtnog postolja	71	263	334
Opruga bočnog klizača	100	218	318
Tegljenički i odbojnički uređaj	90	70	160
Kidanje tegljeničkog uređaja	24	34	58
Kolski sanduk	3660	1613	5273
Osiguranje tovara	7	13	20
Iskliznuće kola –pregled isklizlih kola	40	42	82
Tehnički pregled*		697	697
Ukupno kola	5044	4559	9603



Slika 7.12. Učestanost pojave neispravnosti teretnih kola po konstrukcionim grupama od 2018.-2019. godine [73]

Na stanje vučnih uređaja utiču mnogi faktori:

- u proizvodnji:
 - hemijski sastav materijala,
 - termička obrada,
 - greške u materijalu ili obradi
- u eksploataciji:
 - opterećenje – intenzitet i učestanost uzdužnih dinamičkih sila i sila vuče,
 - habanje delova u kontaktu,
 - korozija
 - kvalitet održavanja i način kontrole
- u projektovanju promena propisa i kritičnih elemenata npr. vešalica i zavojnog vretena kod kvačila i dr.

Neki od uzroka ukazuju na povećanje uzdužnih dinamičkih sila u vozu, koje su posebno izražene pri pokretanju i zaustavljanju voza. Kao posledica povećanja dinamičkog opterećenja dolazi do pojave inicijalnih naprslina, a potom i njihovog širenja i pojave zamora materijal. Na ovaj način se smanjuje se životni vek i povećava mogućnost otkaza (loma) elemenata vučnih uređaja u toku vožnje.

Pored stanja vučnih uređaja na raskinuća posredno utiče i vrsta vučnih ali i odbojnih uređaja. Prikaz vrste vučno-odbojnih uređaja koje se koriste na teretnim vagonima „Srbija Kargo“ a.d. 2020. godine data je u tabeli 7.4 [73]. Treba imati u vidu da se u poslednjih 20 godina na Evropskim teretnim kolima za vučno-odbojne uređaje sve više koriste elastični uređaji (gumeno-metalne opruge, opruge od elastomera, hidrodinamički i hidrostatički) koji imaju veću apsorpcionu moć od prstenaste opruge koja se nalazi u vučno-odbojnim uređajima teretnih kola „Srbija Kargo“ a.d. Sledeći ovaj trend i prednosti koje pružaju elastični uređaji i na „Srbija Kargo“ a.d. počelo se sa ugradnjom elastičnih elemenata od elastomera. Za sada broj kola opremljenih oprugama od elastomera u vučno-odbojnim uređajima čini oko četvrtinu voznog parka.

Tabela 7.4. Opremljenost teretnih kola „Srbija Kargo“ a.d. prema tipovima odbojnika i tegljenika [73]

Serija teretnih kola	Broj kola	Stanje na dan 19.11.2020.		Tip elastičnog elemenata odbojničkog uređaja	Tip elastičnog elemenata tegljeničkog uređaja
		TIP 0 ⁸	TIP 1 ⁹		
Tad	438	258	182	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
Ga	35	35	0	Prstenasta opruga sile 350kN hoda 75mm	Čeoni tegljenik sa pužastom oprugom postavljenom na red
Hbis	125	30	95	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
Habbins	3	3	0	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
Kgs	259	141	118	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
Regs	326	111	215	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
La	2	2	0	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
Sgnss	135	22	113	Termoplastični elastomer	Čeoni tegljenik sa oprugom od termoplastičnog elastomera
Smpt	36	36	0	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
Shimms	45	45	0	Termoplastični elastomer	Čeoni tegljenik sa oprugom od termoplastičnog elastomera
E	67	17	50	Prstenasta opruga sile 350kN hoda 75mm	Produžni tegljenik sa pužastom oprugom
Eas	1494	788	706	Prstenasta opruga sile 350kN hoda 75mm Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm Termoplastični elastomer Miner	Čeoni tegljenik sa pužastom oprugom postavljenom na red Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom 590kN Čeoni tegljenik sa oprugom od termoplastičnog elastomera
Eanoss	782	433	349	Termoplastični elastomer	Čeoni tegljenik sa oprugom od termoplastičnog elastomera
Falns	17	17	0	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa pužastom oprugom postavljenom na red
Fals	36	36	0	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
Faccs	140	136	4	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
Z	62	62	0	Prstenasta opruga sile 350kN hoda 75mm	Čeoni tegljenik sa pužastom oprugom postavljenom na red
U	32	23	9	Prstenasta opruga sile 350kN hoda 75mm	Čeoni tegljenik sa pužastom oprugom postavljenom na red
Uac	17	17	0	Prstenasta opruga sile 590kN hoda 105mm	Čeoni tegljenik sa prstenastom oprugom sile 590kN
Ukupno:	4051	2210	1841		

⁸ TIP 0 – teretna kola kojima je istekao rok redovne opravke⁹ TIP 1 – teretna kola koja su u reviziji

Pored oštećenja, korozije, pojava pukotina i dr. koje utiču na smanjenje pouzdanosti vučnih uređaja i habanje elemenata u kontaktu doprinosi povećanju njihove neispravnosti. Primer pohabanosti elemenata vučnih uređaja koji treba kontrolisati su mere kuke tegljenika na mestu sa spoju sa stremenom. Usled stalnog stavljanja i skidanja stremena na kuku, kao i stalnog trenja između njih pri eksploataciji dolazi do habanja površina. Kako je stremen element kvačila koji se lako može zameniti, vršena je kontrola mera kuki tegljenika.

Provera eksploatacionih mera kuke tegljenika (slika 7.13) vrši se u specijalizovanim radionicama i to pri vršenja periodičnih pregleda odnosno redovnih opravki. Tom prilikom se popunjava merna lista kuke tegljenika na kojoj se nalaze nominalne vrednosti odnosno mere, dozvoljena granica istrošenja, eksploatacione granične mere istrošenja. Izmerene vrednosti ojednost kuke tegljenika (n), i izmerene vrednosti otvorenost kuke tegljenika (m), su kod svih merenih kuka van dozvoljenih graničnih mera istrošenja u eksploataciji. Izmerene vrednosti otvorenosti kuke tegljenika (m) odstupaju od dozvoljenih graničnih mera istrošenja u eksploataciji za 0,69 mm, a ojednosti kuke tegljenika (n) za 10,23 mm, odnosno 14% (tabela 7.5).



Slika 7.13. Merenje otvorenosti kuke tegljenika kljunastim pomičnim merilom

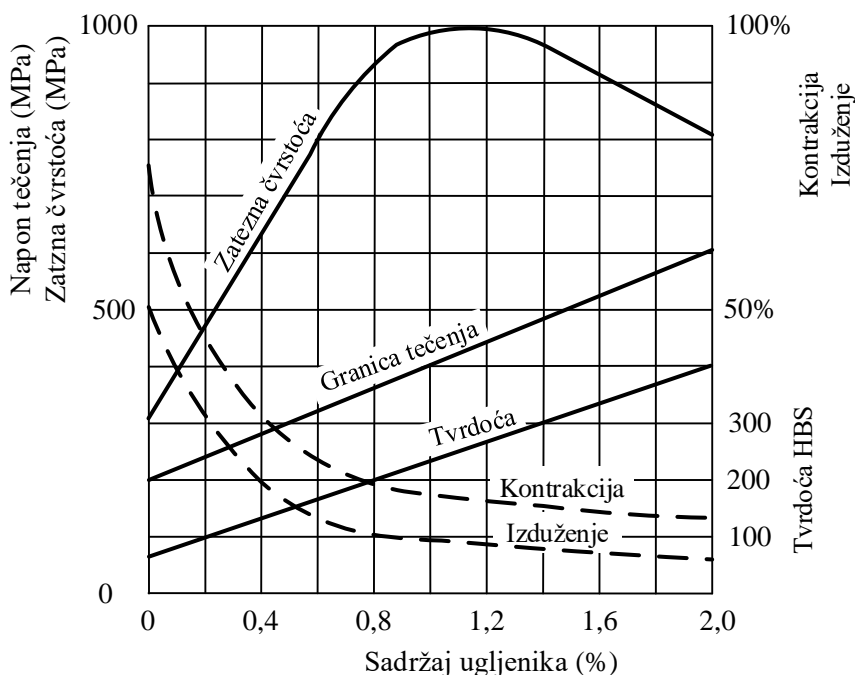
Tabela 7.5. Rezultati merenja ojednosti i otvorenosti kuke tegljenika

Broj vagona	Broj ležišta	Ojednost (mm)	Otvorenost (mm)
31720822254-9	1/2	47,26	79,21
	7/8	47,54	78,95
31723924145-6	1/2	48,16	74,67
	7/8	47,97	75,03
80725958966-9	1/2	47,13	70,14
	7/8	47,83	71,02
21723229808-2	1/2	47,01	67,76
	7/8	47,09	67,59
31724552055-4	1/2	47,06	69,34
	7/8	47,19	69,78
33727868001-5	1/2	48,87	77,36
	7/8	49,17	77,88
	Prosečna vrednost	47,69	73,23

Ispravnost kočnice neposredno veoma malo utiče na pojavu raskinuća od 2,3% do 5,0%, kroz otkaz pritvrdne kočnice, neotkočivanje kočnice na vozilu, otkaze GV, kočničke spojnice i čeone slavine i neispravno postavljanje menjača sile kočenja. Posredno ispravnost kočnice utiče na pojavu raskinuća preko intenziteta uzdužnih dinamičkih sila.

7.4. Materijal

Kao što se vidi iz objava UIC 826 [58], hemijski sastav materijala delova kvačila i tegljenika je ograničen i za odgovorne delove, koji prenose opterećenje, primenjuju se srednjeugljenični čelici (od 0,25% do 0,6% C) ili niskolegirani čelici do (5% legirajućih elemenata). Pri tome su ograničene vrednosti legirajućih elemenata: ugljenika, mangana i silicijuma, kao i primesa sumpora i fosfora. Sadržaj hroma nije definisan, osim u varijanti kada se kuka tegljenika, viljuškasta tegljenica, zavojno vreteno, stremen i navrtke uz stremen izrađuju od niskolegiranog čelika 42 CrMo4 i kada se vrši termička obrada kaljenjem i otpuštanjem. U tom slučaju sadržaj hroma mora biti u granicama od 0.9% do 1,2%. Prema standardu SRPS EN 15566 [56], ako nije drugačije definisano tehničkim uslovima, materijali i termička obrada elemenata kvačila bira se iz standarda EN 10083 serije (standard EN10083-2 [82] za srednjeugljenične čelike i EN10083-3 [83] za niskolegirane čelike). Mehanička svojstva ugljeničnih čelika se menjaju sa sadržajem ugljenika, tako što povećanje od 0,1% ugljenika povećava zateznu čvrstoću čelika za oko 90 MPa, a napon tečenja za oko 45 MPa [39].



Slika 7.14. Uticaj ugljenika na mehanička svojstva ugljeničnih čelika [39]

Nisko legirani čelici imaju istu strukturu i slične osobine kao ugljenični (nelegirani) čelici. Neke njihove osobine poboljšavaju legirajući elementi u zavisnosti od vrste i količine. Glavne prednosti nisko legiranih čelika u odnosu na ugljenične su veća žilavost pri istoj čvrstoći, viši napon tečenja, veća čvrstoća na povišenim temperaturama i manja sklonost ka stvaranju prslina. [39]

Hrom i molibden u čeliku 42 CrMo4 mogu da grade čvrste rastvore rastvarajući se u α i γ -železu, stvaraju sopstvene karbide (Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , Mo_2C) ili se rastvaraju u cementitu (Fe_3C , Cr_3C) [39].

Sa povećanjem sadržaja hroma od 5 - 6% Cr povećavaju se zatezna čvrstoća, napon tečenja i sposobnost deformisanja, a iznad tog sadržaja ova svojstva opadaju. Sadržaj Cr iznad 1% smanjuje

žilavost. Povećanjem sadržaja Cr povećavaju se otpornost prema oksidaciji na povišenim temperaturama i otpornost prema koroziji.

Pri termičkoj obradi dolazi do promena u procesu zagrevanja i procesu hlađenja. Pri tome se površinski sloj brže širi od unutrašnjeg, pa je sredina elementa koji se zagreva opterećena na zatezanje, a površina pritisak. Pri hlađenju površina elementa se brže hladi pa je sredina elementa opterećena na pritisak, a površina na zatezanje. Usled ovih promena nastaju termička naprezanja koja mogu dovesti do stvaranja pukotina [42].

Pri hlađenju posebno pri formiranju martenzita se javljaju znatno veća strukturna naprezanja: prvo dolazi do transformacije austenita u martenzit, tako da će u početku na površini biti martenzit, a u sredini austenit. Martenzit ima veću specifičnu zapreminu od austenita i širi se, tako da je površina opterećena na pritisak, a sredina (koja nije transformisana u martenzit) je opterećena na zatezanje [42].

7.5. Intenzitet i učestanost opterećenja

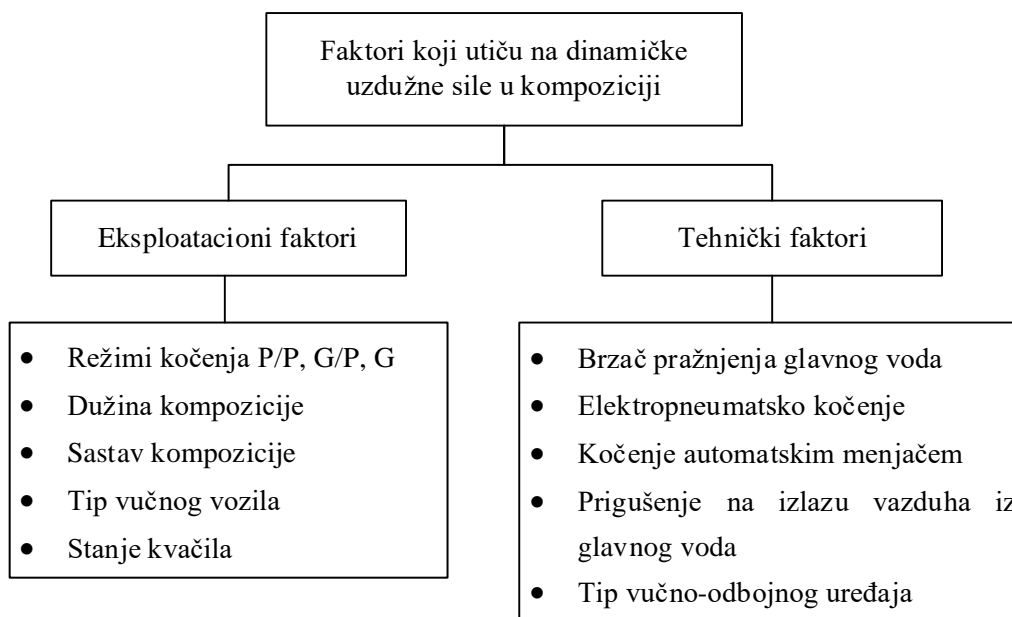
Istovremeno i ujednačeno kočenje svih vagona u kompoziciji obezbeđuje najefikasnije kočenje i najkraći zaustavni put. Da bi se ostvarilo istovremeno kočenje svih vozila u kompoziciji potrebno je da svi rasporednici deluju u istom trenutku. Ujednačeno kočenje uslovljeno je podjednakim razvojem sile pritiska u svim kočnim cilindrima i podešenošću kočnih sila za svaki točak prema trenutnom adhezionom ograničenju i opterećenju od težine. Svako zaostajanje pojedinih rasporednika u delovanju, nejednak razvoj sile pritiska u svim kočnim cilindrima na vagonima, kao i nepodešenost kočne sile opterećenju vagona, dovodi do uzdužnih poremećaja manjeg ili većeg intenziteta u kompoziciji [2]. Pri regulisanju podužnog oscilovanja vagona u kompoziciji značajno utiču odbojnici koji elastično prigušujućim vezama povezuju sve vagone u kompoziciji i tako sačinjavaju sa vagonima na kojima su ugrađeni jedinstveni oscilatorni sistem.

Pojava uzdužnih dinamičkih sila posebno je nepovoljna pri malim brzinama, jer je tada efekat kočenja veći zbog povećanja koeficijenta trenja između kočnog umetka i točka, a protivklizni uređaj ima svoj prag osetljivosti pa često dolazi do kratkotrajnih proklizavanja. Pri velikim brzinama efekat kočenja je slabiji zbog manje vrednosti koeficijenta trenja pa su i poremećaji u podužnom pravcu manji jer se retko prekoračuje granica athezije. Zbog velikog broja faktora koji utiču na pojavu i intenzitet uzdužnih sila u vozu teorijski je vrlo teško opisati ovu pojavu i dati neku opštu zavisnost. U principu, što su uzdužne sile u kompoziciji manje, kraći je zaustavni put [2].

Na slici 7.5 dat je pregled faktora koji u eksploataciji utiču na promenu uzdužne sile u kompoziciji.

Što je kraće vreme punjenja kočnih cilindara to se brže razvija sila kočenja u vozilu. Za iste mase kompozicije sa malo dužim vremenom punjenja kočnih cilindara mogu se očekivati povećanja uzdužnih sila. Pri konstantnoj masi kompozicije uzdužne sile se povećavaju sa dužinom kompozicije. Na uzdužne sile ne utiče sastav kompozicije osim kada se na početku voza nalaze prazna ili opterećana kola, u režimu P, i/ili prazna dvoosovinska kola. U režimu P/P za masu kompozicije između 500 i 800 t, uzdužne sile su veće u slučaju lokomotive sa 6 osovina nego u slučaju lokomotive sa 4 osovine. Pritegnutost kvačila utiče na smanjenje uzdužnih sila za oko 25% u odnosu na vrednosti sila koje se dobijaju kada su uređaji samo u kontaktu [7,16].

Sa obzirom na značaj uzdužnih dinamičkih sila na lom vučnih uređaja, a time i na pojavu raskinuća, ovoj oblasti je potrebno posebno obratiti pažnju. Istraživanja u oblasti dinamičkog ponašanja železničkih vozila su veoma aktuelna i poslednjih godina u svetu je publikovan veliki broj radova, studija i monografija koje se bave izučavanjem ove oblasti.



Slika 7.15 Pregled faktora koji u eksploataciji utiču na promenu uzdužne sile u kompoziciji [7]

Knjigu *Dynamics of railway vehicle systems* [15], pored velikog broja kasnije publikovanih radova iz ove oblasti, mnogi istraživači smatraju osnovnom literaturom u oblasti dinamike železničkih vozila. U njoj je dat široki teorijski pregled problematike i razvijeni su matematički modeli za opisivanje dinamike železničkih vozila. Sve do sredine 1980-ih primena nelinearnih modela je bila ograničena zbog kapaciteta računara koji su vršili proračune, pa su prvi modeli analizirali dinamiku između grupe vagona koje su smatrane čvrsto spojenim.

Istraživanja uzdužne dinamike voza bila su podstaknuta željom da se smanje oscilacije u vožnji, kao i zbog pojave pukotina i lomova kvačila usled zamora materijala i pojava plastičnih deformacija na elementima kvačila i vučno-odbojnih uređaja. Krajem 80-ih i početkom 90-ih godina ovaj problem se počeo intenzivnije istraživati kako u svetu, tako i u Evropi [7, 16, 30]. Posebno u Evropskim zemljama, u okviru UIC vršena su ispitivanja sa ciljem utvrđivanja povećanja brzina teretnih vozova koja su na postojećoj železničkoj mreži ograničavala brzine u putničkom saobraćaju. Da bi se mogle povećati brzine teretnih vozova, za postojeća predsignalna rastojanja morala se obezbediti odgovarajuća snaga kočnice, a time i zaustavni put. Stoga je analizirano, a potom i vršeno ispitivanje kočenja teretnih vozova u brzom režimu dejstva P [16, 30].

Posle 1990-ih nelinearni modeli se široko primenjuju pri analizi dinamike vozova i dolazi do stvaranja programa za simulaciju uzdužne dinamike voza u Evropi (TRAIN, E- TRAIN, TrainDy koji je razvijen za potrebe UIC), Aziji (TOS-A) i dr. U zemljama koje primenjuju automatsko kvačilo kao primarni izvor uzdužnih oscilacija u vozu prepoznat zazor koji može da se javi između automatskih kvačila [17] dotle je u zemljama Evrope, koje koriste razdvojene vučno-odbojne uređaje kao primarni uzrok prepoznato kašnjenje porasta pritiska u kočnom cilindru duž kompozicije u dugim vozovima zbog ograničene probojne brzine vazduha [2].

Poglavlje 9 Longitudinal train dynamics u knjizi *Handbook of railway vehicle dynamics* [17], daje pregled uzdužne dinamike voza i pregled mogućnosti njegovog modeliranja. Najveći značaj je dat modeliranju spoja između vagona (automatskog kvačila, kao i razdvojenih vučno-odbojnih uređaja; kvačila i tegljenika), kao i ostalih komponenti voza: vuče, dinamičke kočnice, osnovnih otpora kretanja, otpora u krivini, otpora usled nagiba pruge i sistema pneumatske kočnice. U poglavlju 6 knjige *Design and Simulation of Rail Vehicles* [18], data je analiza uzdužne dinamike voza i način njenog modeliranja sa primerom modela u programskom paketu Simulink. Pri tome značajan uticaj

na dinamiku voza imaju karakteristike eleastičnih elemenata ugrađenih u vučno-odbojne uređaje, koji na evropskim prugama moraju ostvariti zahteve objava UIC 827-1 [59] i UIC 827-1 [60].

Rezultati ispitivanja [7] voza sastavljen od 48 kola, mase 1676 t i dužine 671,1 m pokazuju brži pad pritiska u glavnom vodu i brži porast pritiska u kočnim cilindrima pri brzom kočenju sa dejstvom brzača pražnjenja glavnog voda u odnosu bez dejstva brzača. Najveće uzdužne dinamičke sile bez brzača postignute su na prednjoj trećini voza. Na primer, pri brzom kočenju iz pokretanja iz 30 km/h između 18 i 19 vagona uzdužne dinamičke sile iznose oko 550 - 585 kN.

Novija istraživanja iz ove oblasti potvrđuju uticaj zazora između odbojnika, odnosno nepritegnutosti kvačila, koji dovodi do povećanja uzdužnih dinamičkih sila i zamora materijala vučno-odbojnih uređaja [68]. Uticaj karakteristika voza, u pogledu broja vagona, odnosno dužine voza i mase pokazuje povećanje uzdužnih dinamičkih sila sa povećanjem dužine, dok uticaj mase zavisi od rasporeda i stanja natovarenosti [19].

8. PROCENA RIZIKA OD RASKINUĆA

Upravljanje rizicima predstavlja primenu različitih mera i aktivnosti kako bi se rizici u željenoj sredini sprečili, smanjili ili kontrolisali [75]. U tu svrhu donet je standard EN 31010 [76] koji daje smernice za izbor i primenu tehnika za procenu rizika nezavisno od oblasti u kojoj se primenjuje. Uvođenje novih pristupa upravljanja, baziranih na upravljanju rizikom, pokrenuto je i na železnici donošenjem standarda EN 50126 1999. godine koji je za cilj imao da uvede upravljanje na bazi pouzdanosti, dostupnosti, pogodnosti za održavanje i bezbednost - RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety). Sa razvojem ovog koncepta standardi EN 50126-1 [69] i EN 50126-2 [70] danas obezbeđuju procese upravljanja bezbednošću za primenu na železnici uz uputstva i metode za sprovođenje istih. Iako je primena ovih standarda namenjena, pre svega kod novih sistema, poželjna je njegova primena i kod značajnih izmena na postojećim sistemima.

Primena standarda serije EN 50126 na definisanju pouzdanosti i sigurnosti osovinskih sklopova i postolja na železničkim vozilima prikazana je u okviru UIC B169, RP 29, a uputstvo za primenu upravljanja na bazi pouzdanosti, dostupnosti, pogodnosti za održavanje i bezbednost - RAMS je dato u okviru UIC B169, RP 43 [72]. Analiza rizika prepoznaje rizike, procenjuje njihovu prihvatljivost i u odnosu na ragiranost prema nivou kritičnosti preporučuje mere za smanjenja rizika, odnosno za postizanje prihvatljivog rizika. Primenom funkcionalne analize, kroz spoljašnju funkcionalnu analizu EFA (External Functional Analysis) i unutrašnju funkcionalnu analizu IFA (Internal Functional Analysis) i kroz analizu mogućih otkaza primenom Analize načina i efekata otkaza i kritičke analize FMECA (Failure Mode and Effects and Criticality Analysis), otkazi se rangiraju prema nivou kritičnosti, poznatom kao broj prioriteta rizika RPN (Risk Priority Number).

Rizik od raskinuća vozova u železničkom saobraćaju je kvantitativna mera opasnosti da do raskinuća dođe, uz sagledavanje posledica raskinuća. Preduzimanje mera za smanjenje ili eliminisanje uzroka raskinuća i smanjenje posledica takvog događaja predstavlja upravljanje rizikom od raskinuća, a najvažniji metodološki korak za adekvatno upravljanje rizikom jeste procena rizika od raskinuća.

8.1. Primena FMECA metode

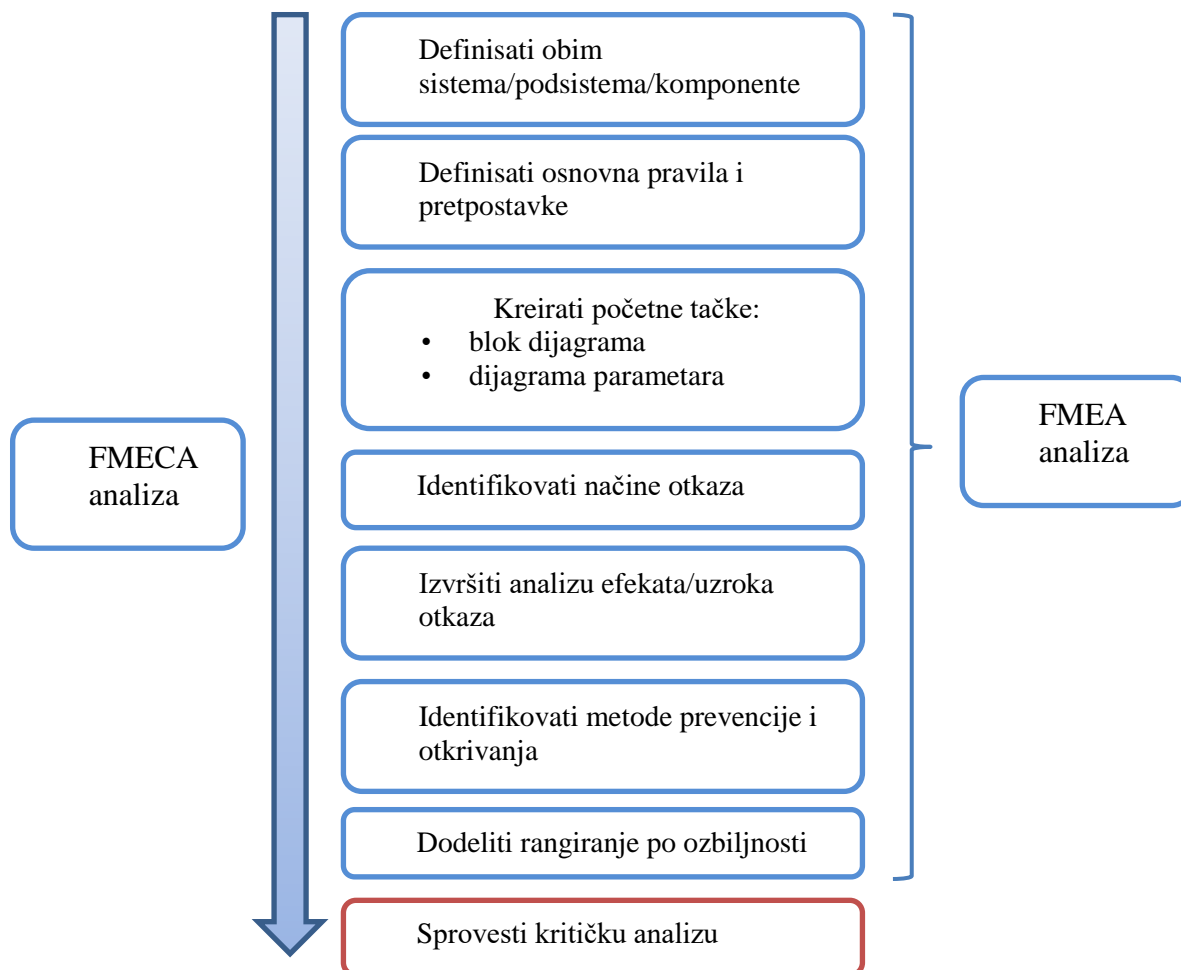
Procena rizika pomoću FMECA metode (Failure Mode and Effects and Criticality Analysis - Analiza načina i efekata otkaza i kritičke analize) kod železničkih vozila i primena te iste metodologije pri proceni rizika zasniva se na primeni Analize načina i efekata otkaza FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) metode (slika 8.1). Razlika se ogleda samo u primeni kritičke analize koja se vrši posle sprovedene FMEA metode.

Funkcionalna analiza sistema daje karakteristike funkcija, okruženja, uslova rada i elemenata sistema. Spoljnom funkcionalnom analizom (EFA) identifikuju se granice sistema, kao i spoljni uticaji na sistem. Parametri spoljne funkcionalne analize (EFA) su namena sistema, predviđene funkcije, spoljašnji uslovi i postojeće mere bezbednosti. Primenom unutrašnje funkcionalne analize (IFA) sistem se deli na podsistema i osnovne elemente, čime se dobija spisak elemenata koji obuhvata čitav sistem, a koji se koristi dalje u FMECA metodi. Pri tome je moguće jedan element, koji čini jednu fizičku celinu podeliti na više područja na kojima se dešavaju različiti otkazi, i sa njima se pri analizi postupa kao sa posebnim elementima.

Svrha Analize načina i efekata otkaza i kritičke analize FMECA je da:

- identifikuje sve otkaze sistema i njihove uzroke,
- identifikuje uticaj svih otkaza na nivou celokupnog sistema,

- utvrdi značaj, tj. kritičnost, svakog otkaza u funkciji njegovog uticaja na normalan rad sistema, i da se proceni njegov uticaj na pouzdanost i bezbednost sistema;
- izračuna kritičnost, tj. broj prioriteta rizika (RPN) za svaki definisani otkaz i da se u odnosu na vrednost koja je postavljena kao granična za RPN utvrde kritični elementi radi sprovođenja mera kontrole rizika.



Slika 8.1. Procena rizika raskinuća pomoću metode FMECA [77]

Primena FMECA metode na analizu rizika raskinuća obuhvata kao unutrašnje komponente elemente vučnih uređaja i elemente vazdušne instalacije kočnice. Analiza načina, efekata i kritičke analize FMECA karakteriše se preko dva osnovna aspekta:

- ozbiljnosti posledica (neželjeni efekti, gubitak),
- učestanosti posledice (frekvencija, neodređenost)

Na osnovu ozbiljnosti i učestanosti posledica vrši se kvantifikacija rizika. Za kvantifikaciju rizika, kao kvalitativni ili kvalitativno-kvantitativni alat koriste se matrice rizika. Jednostavna matrica rizika sa dva osnovna aspekta rizika je prikazana u tabeli 8.1 [77]. Pri analizi složenih tehničkih sistema, kao što su železnička vozila, gde se održavanje vrši planski preventivno, kao dodatni aspekt uzima se i mogućnost detekcije neispravnosti. Ukoliko je mogućnost detekcije neispravnosti velika smanjuje se mogućnost realizacije samog otkaza.

Frekvencije otkaza tokom nekog vremenskog perioda predstavlja odraz njene verovatnoće i znači učestanost ispoljavanja rizika posmatranom vremenskom periodu. Ukoliko se neki otkaz javlja često u posmatranom vremenskom periodu njegova frekvencija je velika.

Ozbiljnost posledice otkaza definisan je veličinom ekonomske (finansijske) štete ili ljudskih žrtava koja nastaje realizacijom otkaza. Ozbiljnost posledice je veća ukoliko je ekonomska šteta ili broj ljudskih žrtava prouzrokovana otkazom veća.

Tabela 8.1. Matrica rangiranja rizika sa legendom [77]

Posledice Verovatnoća	Veoma male	Male	Srednje	Velike	Veoma velike
Veoma visoka					
Visoka					
Srednja					
Niska					
Veoma niska					



prihvatljivo - koriste se samo ALARP mere



prihvatljivo - koriste se ALARP mere i po potrebi primenjuje se druge mere



neprihvatljivo – primenjuju se mere za smanjenje rizika

ALARP (As Low As Reasonably Practical) – Mere koje se koriste samo koliko je razumno praktično

Na osnovu matrice rizika, a uzimajući u obzir i aspekt detekcije neispravnosti može se odrediti nivo kritičnosti. To je broj prioriteta rizika RPN (Risk Priority Number) koji predstavlja proizvod nivoa ozbiljnosti posledice (S), detektovanja (D) i učestalosti (F).

Rangiranje ozbiljnosti posledica otkaza za teretni železnički saobraćaj dato je u tabeli 8.2, pri čemu rang, odnosno nivo ozbiljnosti posledica može da ima vrednosti od 1 do 10. Rangiranje detekcije otkaza (neispravnosti) za teretni železnički saobraćaj prikazano je u tabeli 8.3, pri čemu rang, tj. nivo detekcije ima vrednosti od 1 do 10. Rangiranje učestanosti otkaza za teretni železnički saobraćaj dato je u tabeli 8.4, pri čemu rang učestanosti ima vrednosti od 1 do 10. Navedeno rangiranje je primenjeno u UIC B169, RP 43 [72], a zasnovano je na standardu EN 60812 koji daje tehnike analize za pouzdanost sistema FMEA metodom.

Pri analizi može se dogoditi da jedan otkaz prouzrokuje više različitih osnovnih uzroka posebno, pri čemu se za svaki uzrok vrši posebna procena kako bi se utvrdio njegov rizik.

„Režim otkaza“ je prema EN 50126, tačka 3.13 definisan kao: „Predviđeni ili uočeni rezultati uzroka otkaza na navedenom predmetu u odnosu na radne uslove u trenutku otkaza“. Ovo znači da posmatrani predmet (element) ne može više da izvrši funkciju i obezbedi radne uslove koje bi trebalo. Prema tome, pogoršanje kvaliteta komponente ne znači istovremeno i njen otkaz. Postoje brojni nedostaci ili neispravnosti komponenata koji, usled pogoršanja tokom vremena, postaju uzroci otkaza. To znači da neke neispravnosti koji se analiziraju kao kvarovi ili otkazi postaju osnovni uzrok za druge naredne otkaze.

Tabela 8.2. Rang ozbiljnosti posledica otkaza [72]

Nivo	Ozbiljnost posledice	Kriterijum
1	nema posledica	Nema prepoznatljive posledice.
2	vrlo mala	Manje promene u strukturi i dimenzijama koje su u dozvoljenim granicama.
3	mala	Postoje dugoročni uticaji na vozna sredstva i infrastrukturu.
4	vrlo niska	Zbog kvara dugoročan uticaj na kvalitet voznih sredstava i na infrastrukturu.
5	niska	Zbog kvara, srednjoročno se utiče na kvalitet voznih sredstava i na infrastrukturu.
6	umerena	Usled kvara, kratkoročno se utiče na kvalitet voznog parka i na infrastrukturu. Roba koja se prevozi može se oštetiti.
7	visok	Rizik od povređivanja trećih i službenih lica. Rizik od značajnog uticaja na životnu sredinu i saobraćaj. Saobraćaj na pruzi je zatvoren ili je kapacitet pruge smanjen satima. Roba koja se prevozi može se oštetiti.
8	veoma visok	Rizik od povređivanja nekoliko trećih i službenih lica. Rizik od značajnog uticaja na životnu sredinu. Saobraćaj na pruzi je zatvoren nedeljama. Deo voza je uništen.
9	nebezbedno sa upozorenjem	Rizik od usmrćivanja i povređivanja više trećih i službenih lica. Uticaj na životnu sredinu je veoma velik. Saobraćaj na pruzi je zatvoren nedeljama. Veliki deo voza je uništen.
10	nebezbedno bez upozorenja	Rizik od usmrćivanja i povređivanja mnogo trećih i službenih lica. Uticaj na životnu sredinu je katastrofalan. Saobraćaj na pruzi je zatvoren nedeljama. Voz je uništen.

Tabela 8.3. Rang detekcije otkaza [72]

Nivo	Detekcija	Kriterijum
1	gotovo sigurna	Sa veoma velikom verovatnoćom neispravnost će se otkriti u vrlo ranoj početnoj fazi.
2	vrlo visoka	Sa velikom verovatnoćom neispravnost će se otkriti u vrlo ranoj početnoj fazi.
3	visoka	Sa velikom verovatnoćom neispravnost će se otkriti u ranoj početnoj fazi.
4	umereno visoka	Sa velikom verovatnoćom neispravnost će se otkriti nakon početne faze.
5	umerena	Sa umerenom verovatnoćom neispravnost će se otkriti kratko vreme posle pojave, a pre nego što postane kritična.
6	niska	Neispravnost se otkriva posle nekog vremena, neposredno pre nego što postane kritična.
7	vrlo niska	Neispravnost se otkriva posle dužeg vremena, neposredno pre nego što postane kritična.
8	mala	Neispravnost se teško otkriva u vrlo kasnoj fazi.
9	neizvesna	Otkrivanje neispravnosti pre nego što postane kritično (dođe do otkaza) je neizvesno.
10	gotovo neizvesna	Otkrivanje neispravnosti je gotovo nemoguće.

Rangiranje ili vrednovanje rizika predstavlja poređenje određenog broja prioriteta rizika RPN sa graničnom vrednošću definisanom u procesu analize rizika u cilju grupisanja kritičnih slučajeva sa povećanim rizikom. Ako je izračunati rizik iznad zadate granične vrednosti smatra se neprihvatljivim i moraju se sprovesti mere za smanjenje rizika (tabela 8.1). Ako je rizik ispod zadate granične vrednosti, ali nije zanemarljiv smatra se uslovno prihvatljivim i primenjuju se samo ekonomski opravdane mere, takozvane ALARP mere (As Low As Reasonably Practical).

Tabela 8.4. Rang učestanosti otkaza [72]

Nivo	Učestanost	Verovatnoća - broj kvarova po operativnom "vozilu u upotrebi"
1	mala - otkaz je malo verovatan	$< 10^{-9}$
2	veoma niska - vrlo malo otkaza	$\leq 10^{-9}$ do $< 3 \cdot 10^{-8}$
3	niska - relativno malo otkaza	$\leq 3 \cdot 10^{-8}$ do $< 8 \cdot 10^{-7}$
4	umerena - retko ima otkaza	$\leq 8 \cdot 10^{-7}$ do $< 2 \cdot 10^{-7}$
5	umerena - ponekad ima i otkaza	$\leq 2 \cdot 10^{-7}$ do $< 5 \cdot 10^{-6}$
6	umerena - često ima otkaza	$\leq 5 \cdot 10^{-6}$ do $< 10^{-6}$
7	visoka – otkazi se ponavljaju	$\leq 10^{-6}$ do $< 2 \cdot 10^{-5}$
8	visoka - ponavljanje otkaza u kratkom periodu	$\leq 2 \cdot 10^{-5}$ do $< 4 \cdot 10^{-4}$
9	veoma visoka - otkazi u kratkom periodu koji se teško mogu izbeći	$\leq 4 \cdot 10^{-4}$ do $< 8 \cdot 10^{-3}$
10	veoma visoka - otkazi u vrlo kratkom periodu koji se ne mogu izbeći	više od $8 \cdot 10^{-3}$ godišnje

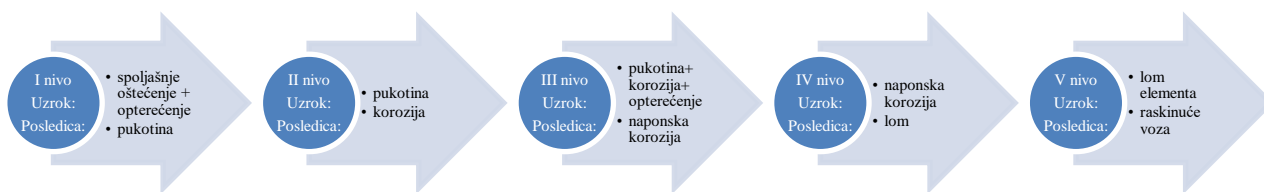
Kako je za vučne uređaje postojećih železničkih vozila operatera „Srbija Kargo“ a.d. u poglavlju 6.3 već prikazana utvrđena učestanost oštećenja u eksploataciji ovi podaci mogu se iskoristiti u analizi rizika. Pri tome treba imati u vidu da je broj železničkih vozila operatera „Srbija Kargo“ a.d. u periodu 2018-2020. godine iznosio oko 4000 teretnih vagona (tačan broj efektivno korišćenih vozila se menjao u posmatranom vremenskom periodu, kao i broja vozila koji je uziman u zakup).

Učestanost pojave neispravnosti na vučnim uređajima železničkih vozila može da se ustanovi na osnovu evidencije isključenih teretnih vagona iz saobraćaja. Prikaz neispravnosti vučnih uređaja teretnih vagona operatera „Srbija Kargo“ a.d. evidentiran u Tehničko kolskoj službi stanice Niš u periodu od 2016-2018. godine dat je u tabeli 6.8.

Budući da rang ozbiljnost posledica (S), detektovanja (D) i učestalosti (F) ima vrednosti između 1 i 10 rezultat evolucije rizika u vidu broja prioriteta rizika RPN će se kretati u vrednostima od 1 do 1000. Prikaz evolucije rizika prema metodi FMECA i modelu datom u UIC B169, RP 43 [72] za vučne uređaje železničkih vozila dat je delimično u tabeli 8.5.

Pošto se mnoge neispravnosti javljaju u različitim fazama eksploatacije elemenata vučnih uređaja oni mogu da budu u jednom nivou analize rizika uzrok otkaza ili posledica otkaza neke druge neispravnosti. Tako se za jedan ili više elemenata vučni uređaja može ustanoviti da usled pogoršanja njihovog stanja tokom vremena (npr. usled delovanja korozije) ili tokom delovanja opterećenja, može progresivno povećavati rang ozbiljnosti posledice. Na primer, pod dejstvom opterećenja spoljašnje oštećenje nekog elementa vučnih uređaja se širi i dolazi do stvaranja male pukotine, koja uz dejstvo

korozije dovodi do pojave naponske korozije, koja neminovno, a ko se ne uoči na vreme dovodi do loma elementa (slika 8.2).



Slika 8.2. Progresivna promena posledica i uzroka neispravnosti elemenata vučnih uređaja

Tabela 8.5 Prikaz evolucije rizika za vučne uređaje železničkih vozila prema UIC B169, RP 43

Sklop:		Vučni uređaj				Sistem:					
Broj utvrđenih otkaza:		160				Granica broja prioriteta rizika (RPN - Risk Priority Number) za vrednovanje:					300
Element nivo I	Element nivo II	Osnovni uzrok otkaza A	Otkaz B	Direktne posledice otkaza C	Napomena	Ozbiljnost posledice (S) 1.: B 2.: A	Detekcija (D) 1.: B 2.: C & A	Učestanost (F) 1.: B 2.: A	RPN		
Kvačilo	Vešalica	prevelika bočna sila	deformisana (bočno)	oštećenje vešalice bez loma		4	2	3	24		
Kvačilo	Vešalica	isključive vozila	deformisana (bočno)	oštećenje vešalice bez loma		5	1	10	50		
Kvačilo	Vešalica	naskakanje na odbojnik susjednog vozila	deformisana (po visini)	oštećenje vešalice bez loma		5	2	2	20		
Kvačilo	Vešalica	prevelika vučna sila	deformisana (po dužini)	oštećenje vešalice bez loma		4	5	10	200		
Kvačilo	Vešalica	prethodno spoljašnje oštećenje	pukotina	dugoročno moguće širenje, vešalica bi se mogla slomiti		4	6	6	144		
Kvačilo	Vešalica	prevelika vučna sila	pukotina	dugoročno moguće širenje, vešalica bi se mogla slomiti		4	8	3	96		
Kvačilo	Vešalica	prethodno spoljašnje oštećenje	lom	raskinuće voza		5	8	7	280		
Kvačilo	Vešalica	geometrija odstupa od propisanih vrednosti (u proizvodnji)	pukotina	dugoročno moguće širenje, vešalica bi se mogla slomiti		2	6	4	48		
Kvačilo	Vešalica	nezadovoljavajući kvalitet materijala (u proizvodnji)	korozija	dugoročno moguće širenje, vešalica bi se mogla slomiti		4	8	5	160		
Kvačilo	Vešalica	nezadovoljavajući kvalitet termičke obrade (u proizvodnji)	krupnozrnasta struktura materijala vešalice	dugoročno moguće širenje, vešalica bi se mogla slomiti		4	9	4	144		
Kvačilo	Vešalica	nezadovoljavajući kvalitet termičke obrade (u proizvodnji)	zaostali naponi	dugoročno moguće širenje, vešalica bi se mogla slomiti		3	8	5	120		
Kvačilo	Vešalica	zaostali naponi	pukotina	dugoročno moguće širenje, vešalica bi se mogla slomiti		4	8	5	160		
Kvačilo	Vešalica	prevelika vučna sila i korozija	naponska korozija	dugoročno moguće širenje, vešalica bi se mogla slomiti		5	8	6	240		
Kvačilo	Vešalica	naponska korozija	lom	raskinuće voza		5	7	6	210		

Stoga, iako je analiza rizika putem FMECA metode prema modelu datom u UIC B169, RP 43 [72] značajna za nove konstrukcije, za vučne uređaje železničkih vozila koji se u eksploataciji, uz izmene, nalaze duže od veka može biti dugotrajna i veoma obimna. Uzimajući u obzir najgori ishod svake progresivne promene u sledu uzrok-posledica za sve potencijalne neispravnosti koje se mogu javiti na elementima vučnih uređaja može se konstatovati da je to uvek lom ili rastavljanje elementa koji kao najozbiljniji ishod ima raskinuće voza. Tako se može znatno skratiti postupak procene rizika za maksimalne vrednosti rizika od raskinuća uzimajući u obzir samo one slučajeve gde je otkaz elementa lom ili rastavljanje, a posledica raskinuće voza (tabela 8.6).

Rezultati evaluacije rizika za vučne uređaje železničkih vozila u teretnom saobraćaju zasnovani na voznom parku, tehničkom stanju vozila, opremi operatera „Srbija Kargo“ a.d. u periodu 2018-2020. godine, kao i vozila koji u razmeni teretnih vozila saobraćaju na javnoj železničkoj mreži pruga RS dati su u tabeli 8.6 samo za kritične elemente i njihove otkaze sa najozbiljnijim posledicama. Naveći rizik imaju otkazi koji se najčešće pojavljuju, teško detektuju i koje dovode do najozbiljnijih posledica.

Tabela 8.6. Evoluacija rizika od raskinuća za kritične elemente i kritične otkaze

Element (podsklop)	Uzroci otkaza (koji dovode do istog otkaza)	Vrsta otkaza	Posledice otkaza	Rang ozbiljnosti posledice (S)	Rang detekcije otkaza (D)	Rang učestalosti otkaza (F)	Rizik (RPN)
Stremen (kvačilo)	preopterećenje, korozija, inicijalna naprslina, zamor materijala	lom	raskinuće voza	4	6	8	192
Vešalica (kvačilo)				4	8	9	288
Svornjak (kvačilo)				4	8	1	32
Navrtka uz stremen (kvačilo)				4	8	1	32
Navrtka uz vešalicu (kvačilo)				4	9	1	36
Vreteno (kvačilo)				4	9	8	288
Rascepke (kvačilo)	labavljenje veze, inicijalna naprslina,	ispadanje (rastavljanje elemenata)	raskinuće voza	4	8	1	32
Kuka (tegljenik)	preopterećenje, korozija, inicijalna naprslina, zamor materijala	lom	raskinuće voza	4	8	10	320
Svornjak (tegljenik)				4	8	9	288
Tegljenica (tegljenik)				4	10	10	400
Vijak i navrtka kod svornjaka (tegljenik)				4	10	1	40
Navrtka tegljenice (tegljenik)				4	10	1	40
Elastični element (tegljenik)	preopterećenje, inicijalna naprslina, zamor materijala	lom	raskinuće voza	4	10	7	280
Kočnička spojnica (kočnica)	spoljašnje oštećenje, starenje gume	oštećenje creva	ponekad dovode do raskinuća voza	4	8	8	256
Čeona slavina (kočnica)	spoljašnje oštećenje	lom		4	8	6	192
Vazdušni vod (kočnica)	spoljašnje oštećenje, labavljenje elemenata veze	oštećenje voda		4	8	8	256

Analiza rizika od raskinuća je pokazala da je broj prioriteta rizika RPN najveći za slučajeve gde je otkaz elementa njegov lom, a posledica raskinuće voza. Kako je u tom slučaju rang ozbiljnosti posledice (S) isti, broj prioriteta rizika RPN zavisi od mogućnosti detekcije otkaza i učestalosti otkaza koji se razlikuje za različite elemente vučnih uređaja. Kao najkritičniji pokazali su se:

- tegljenica, za koji je određen $RPN = 400$, zbog velike učestalosti i male mogućnosti otkrivanja neispravnosti u eksploataciji (nepristupačnost) koje dovode do otkaza,
- kuka tegljenika, $RPN = 320$, takođe zbog velike učestalosti i male mogućnosti otkrivanja neispravnosti u eksploataciji (nepristupačnost),
- vreteno, svornjak tegljenika i vešalica, sa brojem prioriteta rizika $RPN = 288$, jer imaju manji rizik da dovedu do raskinuća zahvaljujući manjoj učestalosti i boljoj mogućnosti otkrivanja neispravnosti u eksploataciji (pristupačni su za pregled),
- elastični element, $RPN = 280$, koji ima manju učestalosti pojave ali nema mogućnost otkrivanja neispravnosti u eksploataciji zbog nepristupačnost.

8.2. Primena eksploatacionih podataka

Iako veoma značajna za određivanje rizika od raskinuća za nove ili značajno modifikovane sisteme vučnih uređaja metoda FMECA kod sistema koji su u eksploataciji veoma dugo, i za koje imamo eksploatacione podatke, nije praktičan iz više razloga:

- mora se pri analizi rizika uzeti u obzir veliki broj uslova i parametara,
- svi uslovi i parametri se moraju adekvatno kvantifikovati (oceniti),
- dobijeni rezultati mogu uključivati događaje koji se nikad ne javljaju u eksploataciji,
- zbog prevelikog broja uslova i parametara mnogo je zahtevnije dobijanje konkretnih rezultata ocene rizika,
- praktično korišćenje dobijenih rezultata zahteva veće angažovanje zbog analize velikog broja rizika sličnog ranga.

Relativan pokazatelj raskinuća vozova u teretnom saobraćaju predstavlja odnos broja raskinuća i obima teretnog saobraćaja iskazanog u milionima brutotonskih kilometara. Ovaj relativan pokazatelj raskinuća predstavlja ustvari učestanost pojave raskinuća F_r svedenog na brutotonske kilometre. Na osnovu utvrđene učestanosti raskinuća F_r i posledica raskinuća železničkih vozova u teretnom saobraćaju u prethodnom periodu, moguće je predvideti rizik od raskinuća u narednom periodu. Pri tome je primena uslovljena istim ili sličnim:

- voznim sredstvima i njihovim stanjem (ispravnošću),
- uslovima saobraćanja,
- načinom rukovanja i
- drugim uslovima eksploatacije

za koje su podaci dobijeni. Ovo je ujedno i najveće ograničenje postupka određivanja eksploatacionog rizika od raskinuća. Naime, na ovaj način se ne može dovoljno tačno predvideti rizik za drugi vozni park, uslove saobraćaja i upravljanja vozilima. Takođe, ukoliko dođe do promene nekog od navedenih parametara, projektovan rizik od raskinuća neće odgovarati stvarnom. Kao primer, možemo da na osnovu podataka koeficijentu raskinuća utvrđenog za vozni park operatera „Srbija Kargo“ a.d. i uslove saobraćanja na javnoj železničkoj infrastrukturi RS za period 2018-2019. godina, izvršimo projekciju rizika od raskinuća za 2020. godinu.

Učestanost raskinuća F_r iskazana kroz broj raskinuća na milion brutotonskih kilometara u toku jedne godine za period 2016-2019. u teretnom saobraćaju operatera „Srbija Kargo“ a.d. iznosi prosečno

0,0079 raskinuća/milion brutotonskih kilometara za godinu dana (tabela 8.7). Za predviđeni ili, u našem slučaju, poznat obim teretnog saobraćaja u 2020. godini od 4.178 milion brutotonskih kilometara i poznatu učestanost raskinuća možemo očekivati 33 slučaja raskinuća (tabela 8.7). Stvarno, u 2020 godini desila su se samo 24 slučaja raskinuća. Smanjenje slučajeva broja raskinuća u 2020. godini za čak 36,8% u odnosu na prethodnu godinu nije slučajna, jer kada se uporede ukupan broj NIN u 2019. i 2010. godini (tabela 2.1) jasno je da je trend smanjenja prisutan kod svih vrsta NIN i iznosi 27,5%. Ovo smanjenje broja raskinuća i ukupnog broja NIN je posebno značajno jer se zna da nije posledica smanjenja obima saobraćaja (tabela 2.1) koji iznosi samo 8,5% u 2020. u odnosu na 2019. godinu. Na osnovu navedenih podataka jasno je da je neki drugi parametar uticao na smanjenje broja raskinuća, odnosno ukupnog broja NIN.

U okviru Sistema za upravljanje bezbednošću operatera „Srbija Kargo“ a.d. formiran je Tim za analizu nesreća i nezgoda (NIN) krajem 2019. godine sa ciljem ponovne analize svih NIN posle dostavljanja konačnih izveštaja istrage. Tim za analizu nesreća i nezgoda u kojima su učestvovala vozila „Srbija Kargo“ a.d. kao rezultat svog rada predlože odgovarajuće mere koje imaju za cilj povećanje bezbednosti saobraćaja. Očigledno je formiranje ovakvog Tima imalo za posledicu veću odgovornost svih uključenih u proces železničkog saobraćaja i istraživanje NIN. Ostvareno smanjenje ukupnog broja NIN i broja raskinuća očigledno je posledica primene mera i bezbednosnih preporuka Tima za analizu i čitavog Sistema za upravljanje bezbednošću.

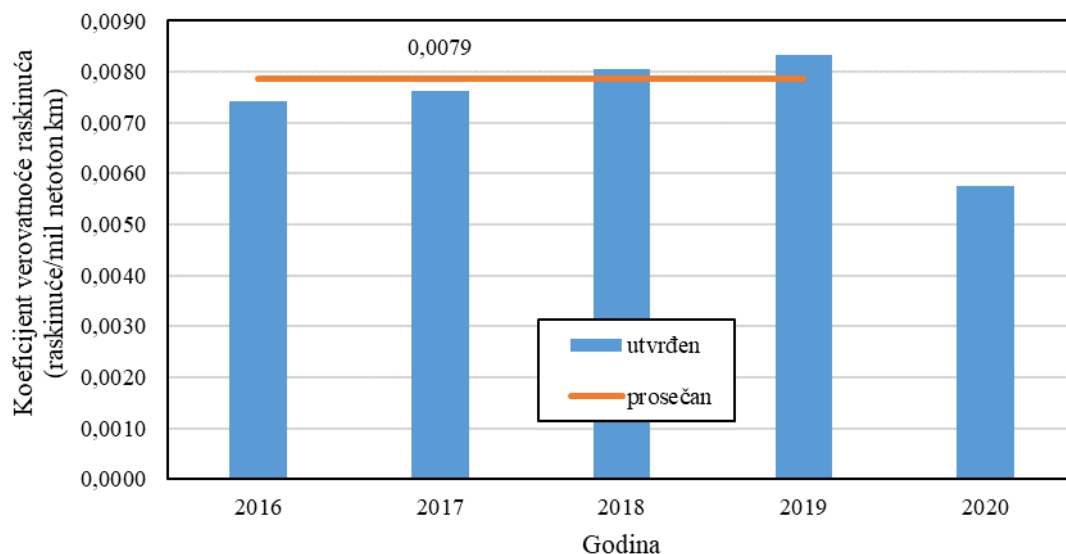
Tabela 8.7. Predviđanje raskinuća na osnovu eksploatacionih podataka

Godina	Broj raskinuća teretnih vozova	Obim teretnog saobraćaja (milion brutotonskih kilometri)	Učestanost raskinuća (broj raskinuća/milion brutotonskih kilometara za godinu dana)
2016	37	4.979	0,0074
2017	42	5.501	0,0076
2018	41	5.087	0,0081
2019	38	4.565	0,0083
Prosečan 2016-2019.	40	5.033	0,0079
Predviđeno 2020	33	4.178	0,0079
Stvarno 2020	24	4.178	0,0057
Odstupanje	9	-	0,0022

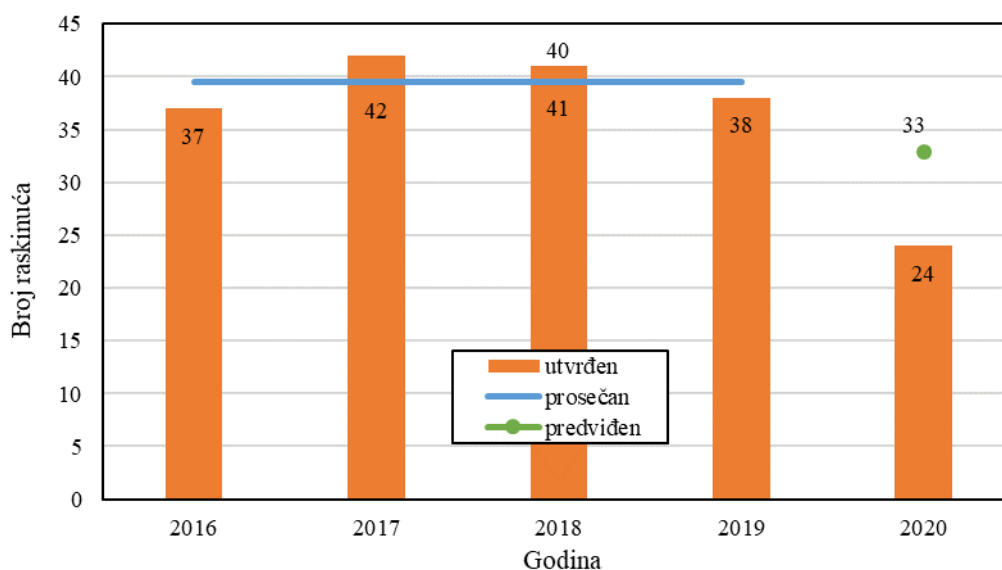
Iz navedenog primera jasno se vidi da promena uslova u sprovođenju saobraćaja, koji ne moraju biti tehničke prirode već utiču na ljudski faktor, odnosno na način upravljanja u vožnji, može veoma značajno da doprinese smanjenju broja raskinuća, ali i ostalih NIN.

Posledice raskinuća nisu jednoznačne i morali bi se svesti na jedan parametar. Iako se direktni materijalni troškovi mogu lako izraziti, indirektni troškovi kašnjenja vozova i eventualno angažovane trase vozova moraju se na adekvatan način izraziti u novcu. Tako dobijena vrednost mogla bi, u slučaju raskinuća, gde nema ljudskih žrtava ni povreda, u potpunosti da se iskaže preko materijalnih sredstava. Ozbiljnost posledice raskinuća S_r u tom slučaju za period od 2018. do 2020. godine, bi mogla prosečno da se proceni (pošto svi troškovi nisu bili poznati, kao ni realni troškovi organizacije

prevoza i zastoja) po jednom raskinuću na 150.000 dinara, uzimajući u obzir direktne troškove opravke, organizacije prevoza i zastoja saobraćaja.



Slika 8.3. Koefficient raskinuća vozova u teretnom saobraćaju



Slika 8.4. Projekcija broja raskinuća

8.3. Preporuke za smanjenje broja raskinuća

U cilju povećanja bezbednosti železničkog saobraćaja prema Pravilniku o elementima godišnjeg izveštaja o bezbednosti upravljača železničke infrastrukture i železničkog prevoznika i godišnjeg izveštaja Direkcije za železnice [74] vrši se praćenje i analiza zajedničkih pokazatelja bezbednosti. Na osnovu toga sačinjava se izveštaj koji pored podataka o ZPB sadrži rezultate analize bezbednosti i preporuke za poboljšanje bezbednosti železničkog saobraćaja na osnovu mera bezbednosti koje su usvojene kao posledica prethodnih nesreća. Ocenu rizika treba da vrši upravljač železničke infrastrukture ili železnički prevoznik i kroz prikaz promena na železničkoj mreži i analizu stanja

bezbednosti na železnici u odnosu na prethodni period sagledava stanje bezbednosti i potrebu za primenom mera za smanjenje rizika, odnosno povećanje bezbednosti železničkog saobraćaja.

Prema Pravilniku [74]: „Predlozi za poboljšanje bezbednosti železničkog saobraćaja obuhvataju:

1. predlaganje izmena nacionalnih propisa za bezbednost sa opisom izmena,
2. davanje inicijativa za održavanje ili poboljšanje bezbednosti železničkog saobraćaja,
3. davanje inicijativa za izmenu zajedničkih bezbednosnih metoda.“

Primena mera za poboljšanje bezbednosti železničkog saobraćaja obezbeđuje se kroz kontrole sprovođenja naloženih mera i praćenje efektivnosti naloženih mera, kroz rad:

- Direkcije za železnice, kao nacionalnog tela za bezbednost i interoperabilnost železničkog saobraćaja,
- Centara za istraživanje nesreća u saobraćaju – CINS, koji kao posebna organizacija vrši istraživanje ozbiljnih nesreća i nezgoda u železničkom saobraćaju i
- Odseka za inspeksijske poslove železničkog saobraćaja u okviru Ministarstva građevinarstva, saobraćaja i infrastrukture, koji obavlja inspeksijski nadzor nad izvršavanjem zakona, drugih propisa i opštih akata iz oblasti železničkog saobraćaja.

Poboljšanje bezbednosti na železnici praktično se postiže kroz bezbednosne preporuke CINS i drugih organa, analizu ZPB u petogodišnjem periodu, praćenje i rezultate sprovođenja bezbednosnih preporuka i drugo.

Shodno tome i analize slučajeva raskinuća treba da imaju kao rezultat najbitnije uzroke raskinuća i da daju preporuke za njihovo smanjenje. U okviru ove analize utvrđeni su najvažniji parametri raskinuća, mada bi poboljšanje istražnog postupka u pogledu tačnijeg i detaljnijeg utvrđivanja tehničkih faktora raskinuća značajno doprinelo kvalitetu analize i preciznijem rangiranju uzroka raskinuća i parametara koji do njega dovode. Na osnovu prethodno izvršene analize predlozi za smanjenje broja raskinuća su vezani za tehničke parametre, za upravljanje saobraćajem, rukovanje vozom, postupke istrage i drugo:

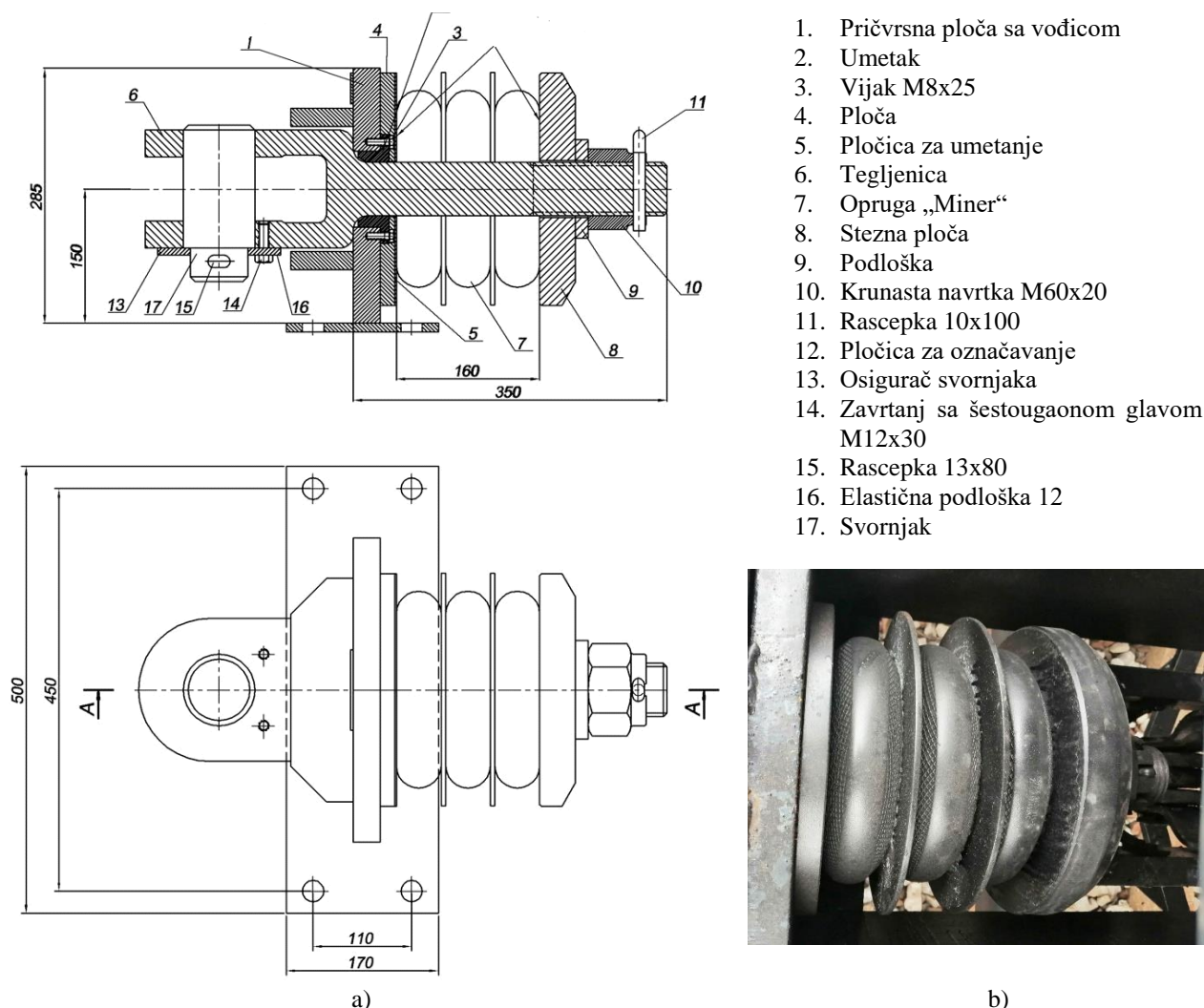
- pri analizi slučajeva raskinuća moraju se vršiti detaljnije analize loma elemenata vučnih uređaja od strane stručnih lica,
- moraju se poštovati propisi vezani za ograničenja formiranja vozova u pogledu dozvoljene mase,
- mora se uspostaviti redovna kontrola traka brzinomera radi uvida u način vožnje vozova,
- mora se sprovoditi strožija kontrola stanja zakvačenosti kvačila u eksploataciji,
- poželjna je strožija kontrola ispravnosti vozila u održavanju, sa posebnom pažnjom na stanje svih elemenata vučnih uređaja, ovo se može obezbediti uvođenjem dodatnih postupaka ispitivanja metodama bez razaranja,
- potrebno je periodično sprovoditi edukaciju mašinovođa, pregledača kola i drugih službenih lica vezano za potencijalne uzroke NIN (a time i raskinuća), kod kojih se može uticati ljudskim faktorom na smanjenja tih pojava,
- potrebno je uvesti novine u pristupu periodične prover znanja mašinovođa, pregledača kola i drugih službenih lica,
- potrebno je kroz praksu pokazati da se neće tolerisati niti prikrivati stvarni uzroci raskinuća; smanjenje broja NIN, a time i raskinuća, uvođenjem Tima za analizu NIN je dobar primer delotvornosti takvih mera,
- uvođenje kontrole rada komisija za istraživanje NIN, iako istražne komisije nisu uvek u mogućnosti da tačno procene uzrok loma pa je broj lomova usled zamora materijala manji

nego što je navedeno, čak i ako uzmemo u obzir da je komisija u određenom broju slučajeva navela zamor materijala kao uzrok, iako to nije slučaj, ovaj procenat je prevelik

- pri redovnom ili većem vanrednom održavanju zameniti kuke tegljenika i viljuškaste tegljenice.

Većina raskinuća vozova dogodila se u blizini železničke stanica gde se često javlja veliki broj pokretanja i zaustavljanja (vuča i kočenje), čak do 70% u periodu od 2018. do 2020. godine, kada je bilo mnogo više raskinuća pri manevrisanju. To ukazuje da su način upravljanja vozom i rukovanje jedan od najznačajnijih faktora raskinuća voza.

Zbog brojnih problema sa postojećim elastičnim elementima od prstenaste ili pužaste opruge na vučno-odbojnim uređajima vozila „Srbija Kargo“ a.d. je započela postupak modifikacije vučno-odbojnih uređaja 2017. godine. Modifikacija obuhvata zamenu prstenastih i pužastih elastičnih elemenata vučno-odbojnih uređaja elastičnim elementima od elastomera i rekonstrukciju ostalih delova vučno-odbojnih uređaja [73]. Od postojećih komponenti čaurastog odbojnika korišćeni su sudarna i vođična čaura sa dvodelnim osiguravajućim prstenom i odbojnička ploča. Kod tegljenika korišćene su tegljenica i pričvrnsne ploče sa vođicom tegljenice.



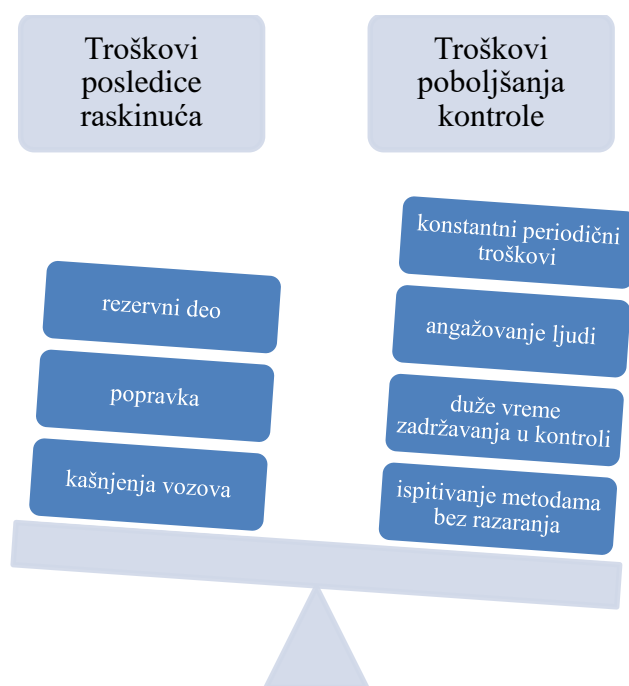
Slika 8.5. Elastični element tegljenika ST-9-2 proizvođača „Miner“, a) tehnički crtež b) izgled pre ugradnje [73]

Pri modifikaciji moralo se voditi računa o razlici dužina elastičnih elamenata koji se se zamenjuju, obzirom da je prstenasta opruga duža od elastičnog elamenat od elastomera. Elastični element koji se ugrađuje u tegljenik je tipa ST-9-2 proizvođača „Miner“ od termoplastičnog elastomera kapaciteta 20 kJ i maksimalne sile 1000 kN (slika 8.5) [73]. Modifikacija se vrši u redovnim opravkama teretnih

vagona sukcesivno. Modifikovani vagoni uz vagone koji već imaju elastične elemente vučno-odbojnih uređaja od elastomera (serije Shimms, Eanoss, Sgnss i jedan broj Eas) čine oko četvrtinu teretnog voznog parka „Srbija Kargo“ a.d. Praćenje efekata ove modifikacije vrši se u skladu sa smernicama Zajedničkog bezbedonosnog metoda za monitoring.

Na osnovu svih bezbedonosnih preporuka koje je doneo CINS izdvaja se bezbedonosna preporuka koja se odnosi na teretni saobraćaj operatera „Srbija Kargo“ a.d. BP_23/19 [78, 79]: „BP_23/19 „Srbija Kargo“ a.d. da formira Tim za procenu elemenata ljudskog faktora na nastanak nesreća i nezgoda u cilju izrade modela kritičnih elemenata, praveći klasifikaciju istih prema važnosti i rang listu zastupljenosti (identifikacija svih rizika) kako bi se radilo na svrsishodnom strukturiranju preventivnih mera i predviđanju ljudskog ponašanja u kriznim situacijama u cilju smanjenja uticaja na nastanak novih nesreća i nezgoda.“

Posledice raskinuća direktnih materijalnih troškova (cene rezervnog dela i cene popravke, obuhvataju i indirektno troškove kao što je kašnjenje vozova i prekidom saobraćaja). Preporučeno uvođenje dodatnih postupaka ispitivanja metodama bez razaranja radi utvrđivanja stanja ispravnosti elemenata vučnih uređaja, koje bi se moralo sprovoditi na svim vozilima, u intervalu od 2-3 meseca (zbog mogućnosti progresivnog širenja oštećenja izazvanih naponskom korozijom ili zamorom materijala) moglo bi da ima za rezultat veće troškove nego što su troškovi raskinuća na godišnjem nivou (slika 8.6). Stoga bi za sgladavanje uvođenja takvih mera bilo potrebno izvršiti detaljnu ekonomsku analizu. U eksploataciji železničkog saobraćaja bezbednost putnika, službenog osoblja i trećih lica, kao i robe mora biti uvek na prvom mestu, pa mere koje se sprovode radi povećanja bezbednosti ne mogu biti razmatrane samo sa ekonomskog stanovišta.



Slika 8.6. Ekonomski odnos troškova posledica raskinuća i troškova dodatne dijagnostike

Bez obzira na relativno mali rizik raskinuća i u pogledu ozbiljnosti posledica i u pogledu zastupljenosti (u odnosu na druge vrste NIN sudare, iskliznuća i dr.) neophodno je:

- pratiti eksploatacione pokazatelje rizika od raskinuća: učestanost raskinuća i ozbiljnost raskinuća i stalno ih porediti sa prosekom na višegodišnjem nivou,
- vršiti detaljne analize uzriaka raskinuća, i zahtevati veću transparentnost i reviziju slučajeva raskinuća,
- sprovoditi postupke i mere sa ciljem smanjenja broja raskinuća.

Većina ozbiljnih nesreća nastaje kao posledica superponiranja više nepovoljnih faktora ili otkaza. Kod raskinuća, iako pri samom raskinuću nastupa automatsko kočenje raskinutih delova voza, prisustvo drugih nepovoljnih uticaja ili grešaka može dovesti do ozbiljnih posledica. Na primer, pri raskinuću voza na velikom usponu, pri čemu u vozu ima uključenih vozila sa neispravnom ili isključenom kočnicom, koji mogu biti nepravilno uključeni u sastav voza (suprotno odredbama Uputstva 233 [33]) može doći do sporijeg zaustavljanja raskinutih delova voza i do prolaska kroz zatvoren signal ili prelaska preko putnog prelaza, što za posledicu može da ima ljudske žrtve. Stoga relativno mala ozbiljnost posledica raskinuća u svakodnevnoj praksi, ne sme biti razlog da se ne preduzmu sve mere da se broj raskinuća smanji.

9. ZAKLJUČAK

U železničkom saobraćaju teži se smanjenju nesreća i nezgoda koji dovode do oštećenja železničkih vozila i zastoja na železničkoj infrastrukturi, a u cilju povećanja bezbednosti saobraćaja i smanjenja troškova eksploatacije. Neposredan uzrok raskinuća voza je otkaz (lom ili rastavljanje) elemenata kvačila ili tegljenika (vučnih uređaja), mada se može javiti i otkaz elemenata vazdušne kočnice. Suštinski uzrok raskinuća je smanjenja nosivosti elemenata vučnog uređaja (usled greške u proizvodnji ili oštećenja u eksploataciji, spoljašnjih uslova i dr.) ili prekoračenja propisanog opterećenja. Učešće raskinuća teretnih vozova u ukupnom broju nesreća i nezgoda na „Srbija Kargo“ a.d. u periodu od 2016. do 2019. godine iznosi 13,9%, a učešće raskinuća u nezgodama iznosi 32,4%.

U svim propisima vezanim za vučne uređaje železničkih vozila, na nivou UIC objava ili standarda EN, u dužem vremenskom periodu, kao najslabiji element definisano je zavojno vreteno ili vešalice ili i jedno i drugo. Analiza slučajeva raskinuća u periodu 2018-2020. godine (potpoglavlje 3.1.6) pokazuju da najčešće dolazi do loma kuke tegljenika (30,6%), tegljenice (19,4%) i da je u poslednjih 10 godina došlo do povećanja loma ovih elemenata tegljenika. U znatno manjem broju dolazi do loma vešalice (4,6%) i zavojnog vretena (8,3%). Posebno se smanjio broj otkaza vešalica u poslednjih 10 godina sa 9,2% na 4,6%, iako vešalice kao sigurnosni element treba da imaju najveći broj otkaza. Stoga je izvršeno ispitivanje vešalica sa ciljem da se ustanovi da li se njihove mehaničke karakteristike nalaze u propisanim granicama ili su iznad propisanih, što uslovljava otkaz drugih elemenata kvačila i tegljenika. Utvrđivanje karakteristika vešalica je izvršeno analizom vešalica kod kojih je u eksploataciji došlo do loma (poglavlje 5) i eksperimentalnim ispitivanjem vešalica posle 30 i više godina u eksploataciji (poglavlje 6).

Rezultati navedenih ispitivanja vešalica pokazali su sledeće:

- opterećenja u eksploataciji kojima su vučni uređaji izloženi su veoma različita, kreću se od velikih opterećenja na zatezanje koje se unose postepeno u konstrukciju (npr. pokretanje i vuča teških vozova) do brzih unosa opterećenja pri trzajima nastalim usled promene vučne sile ili promene režima (kočenje pa vuča),
- materijali vešalica proizvedenih posle donošenja propisa [56, 58] koji su sada na snazi, izabrani su iz preporučenih standarda EN 10083 serije i u potpunosti ispunjavaju zahteve za hemijskim sastavom, strukturom i mehaničkim svojstvima,
- vešalice koje su ispitane i analizirane u okviru predmetnih istraživanja preuzete su iz eksploatacije ispunjavaju delimično tehničke specifikacije i zahteve prema važećim standardima [56, 58] u pogledu dimenzija (prekoračenje graničnih vrednosti aksijanog izduženja vešalica) i mehaničkih karakteristika (izmerena zatezna čvrstoća ne dostiže propisanu zateznu čvrstoću [58]),
- vešalice ispitane u ovom istraživanju i posle 30 godina u eksploataciji imaju u 83% slučajeva izmerenu silu kidanja veću od propisane minimalne sile kidanja 425 MPa [56, 58],
- stanje vešalica koje su bile u eksploataciji je zadovoljavajuće po kvalitetu i strukturi i na njima nema znakova inicijalnih naprslina i drugih značajnih nepravilnosti ili nedostataka.

Izmerene manje vrednosti zatezne čvrstoće vešalica trebalo bi u eksploataciji da dovedu do većeg broja lomova vešalica pri raskinuću, ali to analizom slučajeva raskinuća nije utvrđeno. Naprotiv broj lomova vešalica pri raskinuću je opao, što ukazuje da vučni uređaji nisu podvrgnuti operativnim opterećenjima većim od dozvoljenih, već da je kod elemenata tegljenika došlo do gubitka nosivosti. Kako se pri svakom oštećenju nekog elementa kvačila, u praksi najčešće menja celo kvačilo i kako su elementi kvačila pristupačni za vizuelnu kontrolu, oštećenja se lakše uočavaju i zamenjuju, čak i na službenim mestima dok je vozilo u sastavu voza.

Elementi tegljenika nisu lako dostupni za vizuelnu kontrolu, pa se oštećenja ne uočavaju sve dok ne dođe do loma. Vreme između redovnih opravki teretnih vagona je $5 \div 6$ godina, uz mogućnost produženja. Na osnovu ovih saznanja mogu se dati sledeći predlozi za sprečavanje budućih raskinuća:

- izvršiti detaljnije analize pojava loma vučnih uređaja pri isleđivanju uz obaveznu vizuelno dokumentaciju polomljenih i oštećenih elemenata, kao i samog izgleda loma,
- primenjivati propise i preporuke u pogledu ograničenja mase voza,
- vršiti redovnu kontrolu zapisa brzina radi uvida u režim vožnje,
- sprovesti redovnu kontrolu sastava voza i stanja zakvačenosti kvačila u eksploataciji (da li su odbojnici lako pritegnuti),
- propisati većim obim radova kontrole tegljenika pri periodičnim pregledima teretnih vagona (koji se za većinu serija vrše na tri godine),
- strožije kontrolisati radove pri redovnoj opravi teretnih vagona na tegljeniku, posebno ispitivanje pukotina na kuki tegljenika magnetnim česticama (kao što je propisano [53]), a ovo ispitivanje bi trebalo primeniti i na tegljenice.

Istrage slučajeva raskinuća, kao uzrok raskinuća, navode u preko 50% svih slučajeva materijal elemenata veze. Nepravilnosti u upravljanju su navedene u $15,5\% \div 18,0\%$ slučajeva kao uzrok raskinuća, a značajno utiču još i ispravnost sastavljanja kompozicije i kvačenja kao i ispravnost vozila sa $,09\% \div 19,9\%$. Povećanje slučajeva u kojima su uzroci raskinuća bili vezani za materijal vučnih uređaja sa $50,8\%$ na $59,6\%$ u poslednjih desetak godina ukazuje da je došlo do smanjenja kvaliteta dijagnostike u održavanju vučnih uređaja. Kako se većina raskinuća dogodila u blizini železničke stanice i na rasputnicama, gde se često javljaju pokretanja i zaustavljanja (vuča i kočenje) jasno je da je način rukovanja vozom jedan od najznačajnijih faktora raskinuća.

Naučni doprinos istraživanja u ovoj disertaciji se ogleda u sledećem:

- napravljena je prva sveobuhvatna i sistematska analiza pojave raskinuća vozova sa metodologijom analize, pri čemu su definisane karakteristike preko kojih se vrši analiza, čime se podiže nivo naučnog saznanja iz oblasti raskinuća vozova, koja je sa obzirom na prosečan broj raskinuća teretnih vozova od 40 slučaja godišnje neophodna,
- utvrđeno je stanje vešalica kao sigurnosnih elemenata vučnog uređaja, koje su u propisanim granicama i čije stanje ne utiče na učestanost pojave raskinuća, niti na otkaze drugih elemenata vučnog uređaja,
- utvrđen je eksploatacioni rizik raskinuća na osnovu podataka o učestanosti i ozbiljnosti posledica raskinuća zasnovanog na višegodišnjem praćenju pojave raskinuća, koji može da se koristi kao polazni pokazatelj za dalju ocenu rizika od raskinuća,
- utvrđivanje uticaja elemenata vučnih uređaja na pojavu raskinuća kompozicije, kao i preporuka koje mogu da smanje pojavu loma istih,
- analiza loma sigurnosnih elemenata vučnih uređaja - vešalica i utvrđivanje odstupanja njihovih karakteristika u eksploataciji, kao i verifikacija putem numeričkog modela u MKE za praćenje naponskog i deformacionog stanja vešalica.
-

Pored naučnog doprinosa u disertaciji je ostvaren i sledeći inženjerski doprinos:

- sistematizacija i izdvajanja karakterističnih slučajeva raskinuća vozova,
- utvrđivanje i kvantifikaciji parametara koji utiču na pojavu raskinuća,
- procena nastanka raskinuća pri poznatim uslovima eksploatacije i stanja vučnih uređaja,
- ocena rizika od raskinuća na osnovu primene FMECA metode i na osnovu eksploatacionih podataka.

Navedeni naučni doprinos predstavlja osnovu za dalji naučnoistraživački rad u oblasti raskinuća vozova u železničkom saobraćaju, mehanici loma elemenata vučnih uređaja i dinamici železničkih

vozila. U oblasti mehanike loma potrebno je izvršiti ispitivanja karakterističnih lomova, utvrđenih u ovom istraživanju, na kuki tegljenika i tegljenici i proveriti mehaničke karakteristike, kao i stanja istih u eksploataciji. Takođe je potrebno razviti numerički model elemenata tegljenika koji bi se koristio za dalja istraživanja u ovoj oblasti. U oblasti dinamike kretanja železničkih vozila moguće je primenom simulacija kretanja voza postaviti kritične vrednosti vučnih i uzdužnih dinamičkih sila u eksploataciji.

LITERATURA

- [1] Simić G., Vagoni Konstrukcija i proračun, Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, 2013.
- [2] Milovanović M., Lišanin R.: Kočnice i kočenje šinskih vozila, prvi deo: Teorijske osnove, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [3] Vukšić Popović M., Radulović S.: *Breaking of coupling of trains on the serbian railways*, XVIII International Scientific-expert Conference on Railway Railcon 18, Niš, Srbija, 11-12.10.2018. (ISBN: 978-86-6055-086-6, pp. 121-124)
- [4] Statistički izveštaj o nesrećama i nezgodama za 2017. godinu, „Srbija Kargo“ a.d., <https://srbcargo.rs/wp-content/uploads/2020/02/STATISTI%C4%8CKI-IZVE%C5%A0TAJ-DEO-A-2017-GODINA.pdf>
- [5] Statistički izveštaj o nesrećama i nezgodama za 2018. godinu, „Srbija Kargo“ a.d., <https://srbcargo.rs/wp-content/uploads/2020/02/STATISTI%C4%8CKI-IZVE%C5%A0TAJ-DEO-A-2018-GODINA.pdf>
- [6] Statistički izveštaj o nesrećama i nezgodama za 2019. godinu, „Srbija Kargo“ a.d., <https://srbcargo.rs/wp-content/uploads/2020/02/STATISTI%C4%8CKI-IZVE%C5%A0TAJ-DEO-A-2019-GODINA.pdf>
- [7] ERRI B 126: Braking problems, RP 11: Problems relating to the braking and dynamic of freight trains up to 700 m in length and operated using the P braking system. Basic studies with a view to assessing the influencing parameters, European Rail Research Institute – ERRI, 1.09.1986.
- [8] Pravilnik o zajedničkim pokazateljima bezbednosti u železničkom saobraćaju, "Službeni glasnik RS", br. 25/2019, 3.4.2019.
- [9] Pravilnik o istraživanju, evidentiranju, statističkom praćenju i objavljivanju podataka o nesrećama i nezgodama, "Službeni glasnik RS", br. 4/2016, 22.1.2016.
- [10] Izveštaj o bezbednosti i funkcionisanju železničkog saobraćaja na području "Železnice Srbije" a.d. za 2012. godinu, Sektor za saobraćajne poslove, AD „Železnice Srbije“, Beograd, 2013.
- [11] Mohammadi M., Rahmatfam A., Zehsaz M., Hassanifard S, *Failure analysis study of railway draw-hook coupler*, Journal of Central South University, April 2019, 26, pp. 916–924
- [12] Cernescu A., Dumitru I., Faur N., Branzei N., Bogdan R.: *The analysis of a damaged component from the connection system of the wagons*, Engineering Failure Analysis, 2013, 29: pp. 93–107.
- [13] Nový F., Jambor M., Petrů M., Trško L., Fintová S., Bokůvka O., *Investigation of the brittle fracture of the locomotive draw hook*, Engineering Failure Analysis, 2019, 105, pp. 305–312
- [14] Ulewicz R., Nový F., Novák P., Palček P., *The investigation of the fatigue failure of passenger carriage drawhook*, Engineering Failure Analysis, 2019, 104, pp. 609–616, Elsevier Ltd.
- [15] Garg V. K., Dukkipati R. V., *Dynamics of railway vehicle systems*, Academic Press, Canada, 1984, 407 p.
- [16] ERRI B 177: Problems connected with the braking and dynamics of goods trains up to 700 m long, operated using the p-brake position, RP 2: Calculations and tests using selected parameters and presentation of recommendations, European Rail Research Institute – ERRI, 18.04.1990.
- [17] Cole C. Longitudinal train dynamics. In: Iwnicki S, editor. Handbook of railway vehicle dynamics. Chapter 9. London: Taylor & Francis; 2006. p. 239–278.
- [18] Spiryagin M., Cole C., Sun Y.Q., McClanachan M., Spiryagin V., McSweeney T., *Design and Simulation of Rail Vehicles*, CRC Press, UK, 2014, 337 p.

- [19] Crăciun C., Dumitriu M., Cruceanu C., Parametric study of the distribution of longitudinal dynamic forces developed in the train body using hysteretic characteristics of Ringfeder buffers, MATEC Web of Conferences 112, 07011 (2017), IManE&E 2017, DOI: 10.1051/mateconf/20171120701 1
- [20] Zakon o bezbednosti u železničkom saobraćaju, "Službeni glasnik RS", br. 41/2018, 31. 05.2018
- [21] Pravilnik o načinu evidentiranja, statističkog praćenja i objavljivanja podataka o vanrednim događajima nastalim u železničkom saobraćaju i o drugim pojavama od značaja za bezbednost železničkog saobraćaja (Pravilnik 19), "Službeni glasnik ZJŽ" br. 3/92
- [22] Rail accidents by type of accident (ERA data), Eurostat, https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=tran_sf_railac&lang=en
- [23] Izveštaj o regulisanju tržišta železničkih usluga za 2018. godinu, Direkcija za železnice, Republika Srbija jun 2019. [http://www.raildir.gov.rs/doc/izvestaji/Izvestaj%20 o regulisanju trzista zeleznickih uslug a za 2018. godinu.pdf](http://www.raildir.gov.rs/doc/izvestaji/Izvestaj%20o%20regulisanju%20trzista%20zeleznickih%20usluga%20za%202018.%20godinu.pdf)
- [24] Izveštaj o regulisanju tržišta železničkih usluga za 2019. godinu, Direkcija za železnice, Republika Srbija jun 2020. [http://www.raildir.gov.rs/doc/izvestaji/Izvestaj%20 o regulisanju trzista zeleznickih uslug a za 2019 godinu.pdf](http://www.raildir.gov.rs/doc/izvestaji/Izvestaj%20o%20regulisanju%20trzista%20zeleznickih%20usluga%20za%202019%20godinu.pdf)
- [25] Zakonom o istraživanju nesreća u vazdušnom, železničkom i vodnom saobraćaju („Službeni glasnik RS“ broj 66/15)
- [26] Directive 2004/49/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on safety on the Community's railways, Official Journal of the European Union, L 164/44, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32004L0049&qid=1618337470560>
- [27] Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on railway safety, Official Journal of the European Union, L 138/102, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02016L0798-20201023>
- [28] Goods transport by rail, Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ttr00006/default/table?lang=en>
- [29] Saobraćajni Pravilnik (Pravilnik 2), "Službeni glasnik ZJŽ" br. 4/93
- [30] ERRI B 177: Problems connected with the braking and dynamics of goods trains up to 700 m long, operated using the p-brake position, RP 3: Research into technical measures for reducing longitudinal compressive forces for future services using long P-braked goods trains for international transport, 1/03/1993
- [31] Opšti ugovor za korišćenje teretnih kola OUK AVV/CUU/GCU, Verzija 2018., <https://srbcargo.rs/wp-content/uploads/2020/09/114.pdf>
- [32] ERFA European Rail Freight Association, GCU - General Contract of Use, <http://erfarail.eu/collaborations/gcu>
- [33] Uputstvo 233 o kočenju vozova, Zajednica jugoslovenskih železnica, „Službeni glasnik“ ZJŽ broj 4/98, Želnid, Beograd, 1989.
- [34] Uputstvo 52 o tehničkim normativima i podacima za izradu i izvršenje reda vožnje, Zajednica jugoslovenskih železnica, „Službeni glasnik“ ZJŽ broj 9/89, Želnid, Beograd, 1998.
- [35] Isledni materijal vanrednih događaja raskinuća za 2007, 2008, 2009, 2010 i 2011. godinu, JP „Železnice Srbije“ a.d., Odeljenje za vanredne događaje, Beograd, 2012.
- [36] Isledni materijal nesreća i nezgoda za 2018, 2019 i 2020 godinu, „Srbija Kargo“ a.d., Sektor za saobraćaj i transport, Odeljenje za naknade IŽS, nesreće i nezgode, Beograd, 2021.

- [37] Devedžić B., Osnovi teorije plastičnog deformisanja metala, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 1975.
- [38] IMW Institut, <https://imw.rs>
- [39] Đorđević V., Mašinski materijali – prvi deo, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1999.
- [40] Development of a concept for the EU-wide migration to a digital automatic coupling system (DAC) for rail freight transportation, Final Report for the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI), hwh Gesellschaft für Transport und Unternehmensberatung mbH, Germany, 2020.
- [41] Atanasovska I. i dr.: Priprema modela kvaliteta u forenzičkom inženjerstvu, 34. Nacionalna konferencija o kvalitetu, Festival kvaliteta, Kragujevac, 2007.
- [42] Oruč M., Sunulahpašić R., Lomovi i osnove mehanike loma, Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale Zenica, Zenica, 2009.
- [43] Prokić Cvetković R., Popović O.: Mašinski materijali 1, Mašinski fakultet, Beograd, I izdanje, 2012.
- [44] Isledni materijal nesreća i nezgoda broj U-160/2020, Srbija Kargo a.d., Sektor za saobraćaj i transport, Odeljenje za naknade IŽS, nesreće i nezgode, Beograd, 2021.
- [45] Momčilović D., Mitrović M, Atanasovska I., Koncentracija napona i zamor materijala – savremeni pristup proračunu mašinskih elemenata i konstrukcija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2016.
- [46] Dieter G., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill book company, London, 1988.
- [47] Momčilović D., Delić B., Grabulov V., Ponašanje metala pri udarnom opterećenju, Integritet i vek konstrukcija (1/2001), str. 23-28
- [48] Wulpi D.J. Understanding how components fail. ASM International. 1999. DOI: 10.1361/uhef1999p001
- [49] ANSYS WORKBENCH
- [50] Münstermann S., Feng Y. & Bleck W. Influencing parameters on elastic modulus of steels, (2014) Canadian Metallurgical Quarterly, 53:3, 264-273, DOI: 10.1179/1879139514Y.0000000127
- [51] Direkcija za železnice, Registri i evidencije, <http://www.raildir.gov.rs/latinica/registri-evidencije.php>
- [52] UIC 520 Wagons, coaches and vans — Draw gear — Standardisation
- [53] Uputstvo 242/5 za redovne opravke tegljeničkih i odbojnih uređaja, ZJŽ, Preduzeće za železničku izdavačko-novinsku delatnost – ŽELNID, d.o.o., Beograd, 1993.
- [54] Oruč M., Sunulahpašić R., Ispitivanje metalnih materijala II – defektoskopija, Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale Zenica, 2012., Zenica
- [55] DIN 17200:1987-03 Steels for quenching and tempering; technical delivery conditions, 1987-03
- [56] EN 15566:2016 Railway applications - Railway Rolling stock - Draw gear and screw coupling
- [57] UIC 825 Technical specification for the supply of draw hooks with nominal load equal to 250 kN, 600 kN or 1000 kN for tractive and trailing stock
- [58] UIC 826 Technical specification for the supply of screw couplings for tractive and trailing stock
- [59] UIC 827-1 Technical specification for the supply of elastomer components for buffers and draw gear, 1990.
- [60] UIC 827-2 Technical specification for the supply of steel rings for buffer springs, 1981.

- [61] Ognjanović M., Mašinski elementi, Mašinski fakultet, Beograd, 2016.
- [62] Lučanin V., Teorija vuče, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1996.
- [63] Balfe N., Leva M., Human Factors analysis in risk assessment, Contemporary Ergonomics and Human Factors, 2014 (pp.77-84) 2014, DOI:10.1201/b16742-21
- [64] Edkins D., G.Pollock M, C., 1997, The influence of sustained attention on railway accidents, *Accid. Anal. and Prev.*, Vol. 29. No. 4. pp. 533-539
- [65] Aleksić D., Konvolucije eksternih faktora u oceni rizika vanrednih događaja na železnici, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, doktorska disertacija, Novi Sad, 2016.
- [66] Sutton I., Process Risk and Reliability Management, Elsevier, 2014, ISBN 9780128016534, <https://iansutton.com/safety-moments/safety-moment-103-human-error-modeling>
- [67] Đokić D., Analiza uzroka neispravnosti teretnih kola "Srbija Kargo" u periodu 2016-2018. godine, Visoka železnička škola strukovnih studija, specijalistički rad, 2019
- [68] Cole C, Sun Y., Simulated comparisons of wagon coupler systems in heavy haul trains. *Proc. IMechE*, vol. 220, Part F: J. Rail and Rapid Transit.
- [69] EN 50126-1:2017 Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 1: Generic RAMS Process, 2017
- [70] EN 50126-2:2019 Railway applications - Specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) Part 2: Systems Approach to Safety, 2019
- [71] Common Safety Methods for risk evaluation and assessment, EC - Regulation 402 /2013, 30.04.2013
- [72] UIC B 169/RP 43 RAMS - Guideline: Reliability, availability, maintainability, safety - Implementation of EN 50126 for Mechanical Components in Railway, UIC, 2015
- [73] Krišan I., Modifikacija odbojničkog i tegljeničkog uređaja na teretnim kolima „Srbija Kargo“ a.d., specijalistički rad, ATUSS - Visoka železnička škola, Beograd, 2021.
- [74] Pravilnik o elementima godišnjeg izveštaja o bezbednosti upravljača železničke infrastrukture i železničkog prevoznika i godišnjeg izveštaja Direkcije za železnice, "Sl. glasnik RS", broj 49/19 Beograd, 08.07.2019.
- [75] Grozdanović M., Stojiljković E., Metode procena rizika, Fakultet zaštite na radu Niš, 2013.
- [76] SRPS EN 31010:2011 Menadžment rizikom - Tehnike ocene rizika
- [77] <https://industryforum.co.uk/blog/confused-about-fmea-and-fmeca/>
- [78] Godišnji izveštaj za 2019. godinu, Centar za istraživanje nesreća u saobraćaju, Sektor za istraživanje nesreća u železničkom saobraćaju, Republika Srbija, Beograd, 2020. godine
- [79] Izveštaj direkcije za železnice o stanju bezbednosti u železničkom saobraćaju za 2019. godinu, Direkcija za železnice, Republika Srbija, Beograd, septembar 2020. godine
- [80] ISO 6892-1 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature
- [81] Lubarda V., Otpornost materijala, Univerzitet „Veljko Vlahović“ u Titogradu, NIO „Univerzitetska riječ“, Titograd, 1989.
- [82] EN 10083-2 Steels for quenching and tempering - Part 2: Technical delivery conditions for non alloy steels
- [83] EN 10083-3 Čelici za kaljenje i otpuštanje — Deo 3: Tehnički zahtevi za isporuku legiranih čelika

Biografija

Mr Marija N. Vukšić Popović, dipl. inž. mašinstva, rođena je 08.01.1970. godine u Beogradu. Osnovnu i srednju školu završila je u Beogradu. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu upisala je 1988. godine, a diplomirala 1994. godine na Katedri za železničko mašinstvo (sada Katedra za šinska vozila). Magistarske studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisala je 1994. godine, a magistrirala je 1999. godine.

Od 1994. zaposlena je u Institutu "Kirilo Savić", najpre kao pripravnik i istraživač pripravnik, a od 2000. godine kao istraživač saradnik, odnosno od 2010. kao viši stručni saradnik, a od 2015. kao stručni savetnik. U svom naučno – istraživačkom radu u okviru Instituta učestvovala je u većem broju projekata, kao i u inovacionim i strateškim projektima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Od 2016. zaposlena je u Višoj železničkoj školi strukovnih studija u Beogradu (sada odsek u Akademiji tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd) kao predavač na studijskom programu Železničko mašinstvo osnovnih strukovnih studija.

Član je Komisija za standarde, grupa Primene na železnici (ISS/KS P256), u okviru Institut za standardizaciju Srbije od 2011. godine. Interni je proveravač prema ISO/IEC 17020 od 2011. godine.

U dosadašnjem radu uspešno je ovladala specifičnim softverima za modeliranje i simulaciju (Matlab, Simulink) i Metodom konačnih elemenata (Ansys), a duži niz godina koristi i standardne aplikacije iz softverskog paketa MS Office (Word, Access, Excel, Visio, PowerPoint), i druge: MS Project, AutoCAD (CET sertifikat od 1997.), Adobe Photoshop, Adobe Illustrator, Origin, CorelDRAW, Mathematica. Posедуje znanje engleskog jezika na naprednom nivou.

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisani-a Marija N. Vukšić Popović

broj indeksa D21/16

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Analiza otkaza vučnih uređaja železničkih vozila kao faktor bezbednosti

i rizika od raskinuća voza

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 01.06.2021. godine

Prilog 2.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Marija N. Vukšić Popović Broj indeksa D21/16 Studijski program Doktorske akademske studije – Šinska vozilaNaslov rada Analiza otkaza vučnih uređaja železničkih vozila kao faktor bezbednosti i rizika od raskinuća vozaMentor Prof. dr Jovan Tanasković, vanredni profesor, Katedra za šinska vozila, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultetPotpisani/ a Marija N. Vukšić Popović

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 01.06.2021. godine

Prilog 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Analiza otkaza vučnih uređaja železničkih vozila kao faktor bezbednosti

i rizika od raskinuća voza

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis doktoranda

U Beogradu, 01.06.2021. godine

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.