

# Razvoj novih i poboljšanje postojećih elastičnih pritiskalica za pričvršćenje tračnica

---

**Baniček, Maja; Uroš, Mario; Lakušić, Stjepan**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2022, 74, 503 - 517**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.14256/JCE.3468.2022>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:988308>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 4.4.2022.

Ispravljen / Corrected: 7.6.2022.

Prihvaćen / Accepted: 11.6.2022.

Dostupno online / Available online: 10.7.2022.

# Razvoj novih i poboljšanje postojećih elastičnih pritiskalica za pričvršćenje tračnica

## Autori:



**Maja Baniček**, mag. ing. aedif.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za tehničku mehaniku

[maja.banicek@grad.unizg.hr](mailto:maja.banicek@grad.unizg.hr)

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Mario Uroš**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za tehničku mehaniku

[mario.uros@grad.unizg.hr](mailto:mario.uros@grad.unizg.hr)



Prof.dr.sc. **Stjepan Lakušić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za prometnice

[stjepan.lakusic@grad.unizg.hr](mailto:stjepan.lakusic@grad.unizg.hr)

Pregledni rad

**Maja Baniček, Mario Uroš, Stjepan Lakušić**

## Razvoj novih i poboljšanje postojećih elastičnih pritiskalica za pričvršćenje tračnica

Jedan od problema sustava za pričvršćenje tračnica na podlogu (sustav pričvršćenja) koji se javlja s razvojem željeznica jest oštećenje elastičnih pritiskalica, čime se gubi konstrukcijski integritet između tračnice i podloge. Stoga postoji potreba za razvojem novih ili poboljšanjem postojećih pritiskalica. U radu je kroz dosadašnja istraživanja opisan doprinos i uloga pojedinih komponenata sustava pričvršćenja pri djelovanju raznih slučajeva opterećenja, a kao alatu čijom se promjenom parametara može utjecati na učinkovitost sustava pričvršćenja, posebno je usmjereno na pritiskalice. Detaljno je opisan postupak izrade numeričkih modela kojima je moguće provođenje parametarskih analiza za razvoj novih ili modifikaciju postojećih pritiskalica za pričvršćenje tračnica.

### Ključne riječi:

sustav pričvršćenja tračnica, elastična pritiskalica, CAE, MKE, numerički model, računalni eksperimenti

Subject review

**Maja Baniček, Mario Uroš, Stjepan Lakušić**

## Development of a new and modification of existing elastic clips for rails fastening

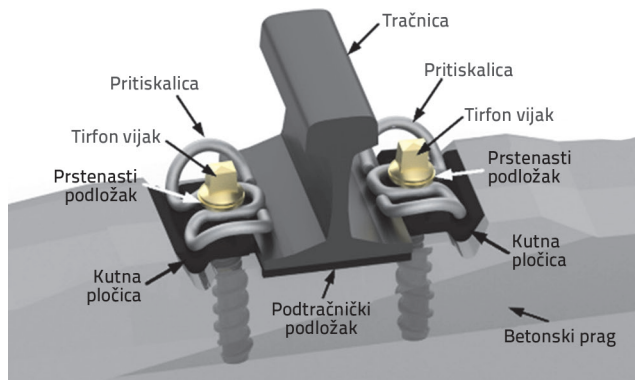
One of the problems of railway fastening systems (fastening system) that occurs due to the development of railways is the damage of the elastic clips, which leads to the loss of structural integrity between the rail and the base. Therefore, there is a need to develop new clips or improve existing ones. The paper describes the contribution and role of each component of the fastening system in different loading cases. As a tool whose parameters can affect the efficiency of the fastening system, special attention is given to the clips. Finally, an example is briefly described for creating numerical models that can be used to perform parametric analyses in order to develop new clips or improve existing ones.

### Key words:

rail fastening system, elastic clip, CAE, FEM, numerical model, computer experiments

### 1. Uvod

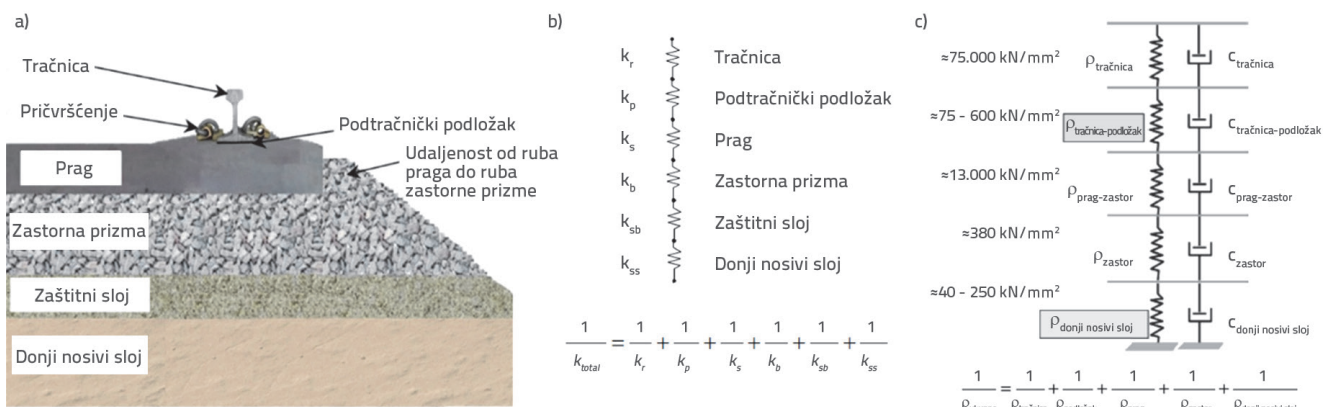
Razvojem i napretkom modernih željeznica posljednjih desetljeća rastu brzine prometovanja i osovinska opterećenja koja djeluju na konstrukciju željezničkog kolosijeka prilikom prolaska kotača željezničkog vozila po tračnicama. Posljedica toga su povećanje vertikalnih i horizontalnih opterećenja, ali i amplituda i frekvencija dinamičkih sila koje se s tračnice prenose preko sustava za pričvršćenje na pragove te dalje na ostale komponente i slojeve kolosiječne konstrukcije. Kad je konstrukcija kolosijeka s većom krutosti, dinamičke sile uzrokuju trajne deformacije i oštećenje pojedinih komponenata kolosijeka uslijed zamora te naposljetku i degradaciju cijelog kolosijeka. Gledano s ekonomske strane, cijena održavanja i trajanje kolosiječne konstrukcije, uz sigurnost i udobnost putovanja, najvažniji su parametri pri gradnji takvog tipa konstrukcije [1, 2]. Kako bi se ublažile dinamičke sile i izbjegli navedeni problemi, potrebno je krutost kolosijeka svesti na optimalnu vrijednost, što se postiže točnim odabirom vrste i dimenzija svih komponenata kolosijeka [3, 4]. Statička vertikalna krutost klasičnog kolosijeka u zastornoj prizmi, vrsta kolosijeka najrasprostranjenija diljem svijeta, može se prikazati matematičkim modelom kao serijski zbroj krutosti njegovih pojedinih slojeva (slike 1.a i 1.b), a to su: tračnica, sustav pričvršćenja, prednapeti betonski prag, zastorna prizma od kamenog agregata, zaštitni sloj i donji nosivi sloj [4]. Kada se proučava ponašanje kolosijeka pri djelovanju dinamičkih sila, koriste se složeniji modeli načinjeni od masa povezanih parovima opruga i prigušivača (slika 1.c) [5, 6]. Prema vrijednostima krutosti pojedinih slojeva prikazanim na slici 1.c može se zaključiti da se globalna krutost kolosijeka jednim dijelom može smanjiti i ugradnjom sustava pričvršćenja koji međusobnim djelovanjem više komponenata elastično povezuje tračnice s podlogom [5]. Kod klasičnog sustava pričvršćenja, najčešće komponente su: pritiskalice, podtračnički podložak, čelični prsteni, vijci i kutne pločice (slika 2).



Slika 2. Prikaz sustava pričvršćenja Vossloh W14 i njegovih komponenata

#### 1.1. Problemi koji se javljaju na sustavima pričvršćenja

Sustav pričvršćenja vrlo je važna komponenta kolosijeka što potvrđuje i podatak da je većina oštećenja i nedostataka na kolosiječnoj konstrukciji bilo izravno, a većina iskliznuća vlaka s tračnica izravno ili neizravno povezano s nedostacima na sustavima pričvršćenja [8]. Pojava karakterističnih problema na sustavima pričvršćenja uglavnom se povezuje povećanjem brzina prometovanja i osovinskih opterećenja modernih željezničkih kolosijeka, a bilo kakav nedostatak ili oštećenje neke od komponenata sustava pričvršćenja može prouzročiti promjene geometrije kolosijeka, trošenje tračnice te popuštanje ili slom pričvršnog mjesta [1, 9]. Primjerice, uslijed trajnih deformacija pritiskalica uzrokovanih zamorom materijala od kojih su one izrađene, često dolazi do smanjenja sile pričvršćenja ili u krajnjem slučaju puknuća pritiskalice (slika 3.a) [10-20]. Time se gubi konstrukcijski integritet između tračnice i praga, pa osim gubitka temeljnog svojstva stabilnosti i sigurnosti, sustav pričvršćenja gubi i svojstvo elastičnosti, što može uzrokovati degradaciju zastorne prizme te slojeva donjeg ustroja kolosijeka [14, 21]. Problemi vezani za kolosiječnu zastornu prizmu od



Slika 1. a) Prikaz poprečnog presjeka tipičnog kolosijeka u zastornoj prizmi od kamenog agregata s pripadajućim slojevima [7]; b) Matematički model poprečnog presjeka kolosijeka za odgovor na statička opterećenja [4]; c) Kombinacija statičkih i dinamičkih opterećenja [6]



Slika 3. a) Primjer puknuća pritiskalice [10]; b) istrošenje podtračničkog podloška [20]; c) ležajnog mjesta na pragu [24]; d) puknuće betonskih pragova [23]

kamenog agregata te pregled načina njezinog numeričkog modeliranja detaljno su pojašnjeni u [22].

Stoga, vrlo je važno da iznos sile pričvršćenja bude dovoljan za sve slučajeve opterećenja, čak i u slučaju istrošenja pojedinih komponenata nastalih zamorom materijala [1, 10]. Prema tome, pritiskalicama je potrebno dati posebnu pozornost te proučiti utjecaj njihovog ponašanja na ponašanje cijelog sustava pričvršćenja u svim uvjetima opterećenja [11, 12]. Osim oštećenjem pritiskalice, smanjenje sile pričvršćenja može biti uzrokovano i trošenjem podtračničkog podloška (slika 3.b), trošenjem ležajnog mjesta na pragu (slika 3.c) ili puknućem praga (slika 3.d) [20, 23, 24]. Također, sila pričvršćenja na kontaktu nožice tračnice i pritiskalice može biti oslabljena njihovom degradacijom, pri čemu dolazi do promjene mehaničkih svojstava same pritiskalice, a time i cijelog sustava pričvršćenja, što djelomično može biti uzrokovano pojavom kao što su lutajuće struje ako se ne spriječe na vrijeme [25].

## 1.2. Zahtjevi za moderne sustave pričvršćenja

S obzirom na navedene probleme, propisuju se sve stroži zahtjevi za sve komponente konstrukcije željezničkog kolosijeka pa tako i za komponente sustava pričvršćenja. Kako bi se prilagodili povećanim prometnim opterećenjima, brzinama, te sveukupnim zahtjevima za poboljšanjem svojstava, sustavi pričvršćenja kontinuirano se unapređuju u smislu povećanja sile pričvršćenja ili povećanja dinamičke čvrstoće pojedinih komponenata, pa je stoga do danas razvijeno mnogo različitih tipova i oblika elastičnih pritiskalica i sustava za pričvršćenje koji se međusobno razlikuju po trajnosti, elastičnosti, jednostavnosti održavanja, sili pričvršćenja koju ostvaruju u kontaktu s tračnicom, cijeni proizvodnje, načinu ugradnje te zaštiti od vandalskih radnji [26]. Upravo zbog te raznolikosti ne postoje propisani proračuni za njihovo dimenzioniranje, no prije stavljanja u uporabu sustavi pričvršćenja trebaju zadovoljiti zahtjeve iz propisa kojima se laboratorijskim ispitivanjima procjenjuje njihova sigurnost i kvaliteta, a to su primjerice europski propisi [27, 28], američki propisi za betonske pragove (AREMA) [29], japanski propisi JIS (Japanese Industrial Standards), australski propisi [30] itd. Budući da je primarna funkcija sustava pričvršćenja osiguranje stabilnosti kolosijeka, upravo je glavni zahtjev svih navedenih propisa da sustav pričvršćenja mora imati dovoljnu elastičnost za dopuštanje pomaka u smjerovima djelovanja, ali i dovoljnu krutost da te pomake spriječi u određenim granicama, pa se

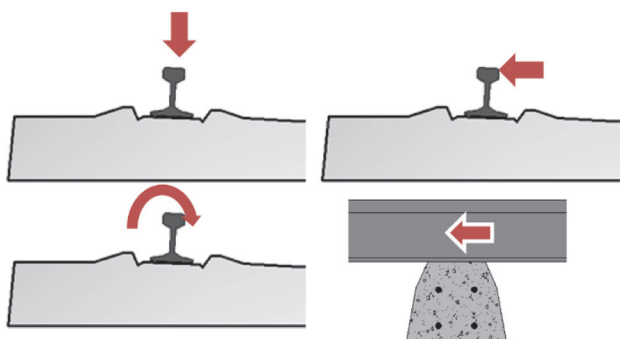
može reći da je elastičnost pričvršćenja mjera kojom se dopušta vertikalno i horizontalno pomicanje te zakretanje tračnice na mjestu njezina pričvršćenja na podlogu [2, 31]. Potrebno je napomenuti da su elementi gornjeg ustroja, kao što je sustav pričvršćenja, važni u trenucima iznenadnih utjecaja, kao što je potres, te je odabir i dimenzioniranje komponenata sustava pričvršćenja u seizmički aktivnim područjima također važan korak u postupku projektiranja kolosiječne konstrukcije [32].

Tijekom razvoja novog ili poboljšanja postojećeg sustava pričvršćenja obično se počinje s više početnih varijanti za svaku od kojih je potrebno propisanim metodama ispitivanja provesti početnu procjenu, pri čemu takvi postupci postaju vremenski i financijski preskupi. Upravo zbog toga autori Gutierrez Romero i ostali [26] napominju da postoji potreba za metodom kojom bi se mogla usporediti svojstva različitih sustava pričvršćenja te provesti točna analiza različitih varijanti u svrhu poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava. Autori navode da jedan od načina kako usporediti sustave pričvršćenja jest proučavanje njihovog ponašanja i elastičnosti pod različitim slučajevima opterećenja, odnosno koliki je mogući pomak ili zaokret tračnice nad ležajnim mjestom na pragu. Pritom smatraju da je drugi način analiza dinamičke čvrstoće pojedinih komponenata sustava pričvršćenja. Upravo se prema tome dosadašnja istraživanja koja različitim pristupima pomoću numeričkih modela opisuju ponašanje sustava pričvršćenja mogu podijeliti u dvije grupe. Prva grupa istraživanja proučava mehaničko ponašanje pritiskalice i/ili cijelog sustava za pričvršćenje pod djelovanjem sila u različitim smjerovima kako bi se odredile elastičnost i otpornost sustava a druga grupa istraživanja proučava dinamičku čvrstoću pritiskalice s gledišta mehanike loma i s gledišta frekvencijske domene.

## 2. Uloga pojedinih komponenata pri mehaničkom ponašanju sustava pričvršćenja

Sile koje se prilikom prolaska kotača željezničkog vozila prenose s tračnice na pragove preko sustava pričvršćenja su statičke i dinamičke te po smjeru djelovanja vertikalne, poprečne, rotacijske (u obje ravnine) i uzdužne [1, 2, 26] (slika 4.). Odgovor je sustava pričvršćenja na ta opterećenja složen, jer se sile prenose preko više njegovih komponenata koje zajedno čine konstrukcijsku i elastičnu povezanost tračnice i podloge. Stoga, tijekom analize ponašanja takvog sustava potrebno je promotriti prijenos sila u cijelom sustavu [33, 34, 35], a u proračun uključiti sve komponente [36]. Za pravilno oblikovanje i dimenzioniranje

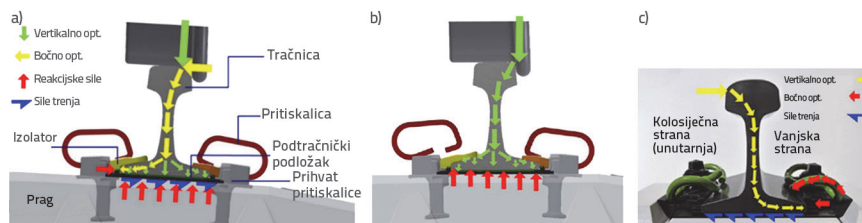
cijelog sustava pričvršćenja potrebno je dobro poznavanje mehaničkih svojstava njegovih dviju glavnih komponenata: elastične pritiskalice i podtračničkog podloška [6]. Dok podtračnički podložak, koji se najčešće izrađuje od polimernog materijala, svojom elastičnosti smanjuje buku koja nastaje na kontaktu kotača i tračnice te ublažuje statičke i dinamičke sile i udarna opterećenja koja se prenose s tračnice na pragove [1, 37, 38], elastična pritiskalica, izrađena od opružnog čelika, prilikom ugradnje svojom deformacijom ostvaruje silu pričvršćenja na nožici tračnice te tako osigurava stalni kontakt tračnice i pragova, amortizira vibracije te ostvaruje otpornosti bočnom zakretanju tračnice [10].



Slika 4. Osnovni smjerovi opterećenja na tračnicu uslijed prolaska kotača željezničkog vozila: a) vertikalno prema gore (izdizanje) i prema dolje, horizontalno bočno, moment torzije i moment savijanja, uzdužno [2]

### 2.1. Uzdužna otpornost sustava pričvršćenja

Uslijed puzanja, relaksacije, toplinskog širenja ili skupljanja tračnice te ubrzanja ili usporavanja željezničkog vozila, javljaju se velike uzdužne sile koje mogu prouzročiti uzdužno pomicanje tračnice unutar njezinog ležajnog mjesta. Sustav pričvršćenja pri takvom opterećenju treba imati dovoljnu uzdužnu otpornost, što se postiže dovoljnim iznosom sile pričvršćenja, a time je također spriječena i opasnost od nastanka i rasta pukotina koje mogu uzrokovati lom tračnice [10, 39, 40]. Prema europskoj normi EN 13481-2 [27], maksimalna uzdužna sila određena prema EN 13146-1 - Određivanje otpora uzdužnom pomicanju tračnice [40], ne bi smjela biti manja od 7 kN, a za sustave pričvršćenja koji su namijenjeni željezničkim prugama s brzinom prometovanja većom od 250 km/h ta vrijednost ne bi smjela biti manja od 9 kN. Međutim, budući da tijekom konvencionalnih opterećenja u uzdužnom smjeru sila pričvršćenja i krutost pritiskalice ima najveći doprinos otpornosti sustava, pri djelovanju sila kočenja ili ubrzanja u kombinaciji s udarnim opterećenjima najveći utjecaj na pomicanje tračnice unutar njezinog ležajnog mjesta ima sila trenja ostvarena između tračnice i podtračničkog podloška te podtračničkog podloška i praga, a krutost pritiskalice u uzdužnom smjeru ima manji utjecaj [41].





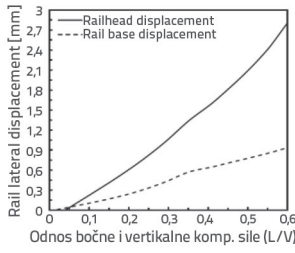


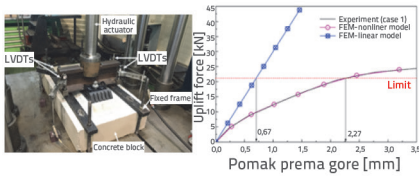


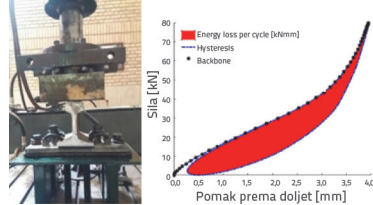

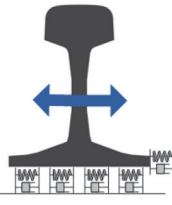
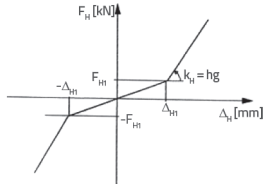
Slika 5. Prikaz prijenosa sila u sustavu pričvršćenja: a) dvoosnog opterećenja [33]; b) vertikalne komponente [34]; c) bočne komponente [35]

### 2.2. Otpornost sustava pričvršćenja na torzijsko zakretanje tračnice

Na kontaktu kotača željezničkog vozila i tračnice javlja se dominantno dvoosno opterećenje kod kojeg je omjer bočne i vertikalne komponente sile ( $L/V$ ) važan parametar, pogotovo u zavojima malog polumjera gdje se javlja značajna bočna komponenta  $L$ . Pri djelovanju dvoosnog opterećenja vrlo je važno da sustav pričvršćenja ima dovoljnu otpornost zakretanju tračnice oko njezine uzdužne osi [1, 6], jer preveliki takav zaokret može uzrokovati iskliznuće kotača vozila s tračnice (eng. *derailment*). Prijenos sila kroz sustav pričvršćenja pri dvoosnom opterećenju prikazan je na slici 5.a, te prijenos vertikalne i bočne komponente tog opterećenja na slikama 5.b i 5.c. Kao što se može vidjeti na matematičkom modelu na slici 6.a, otpornost sustava pričvršćenja torzijskom zakretanju tračnice uglavnom se ostvaruje zajedničkim djelovanjem krutosti pritiskalice na izdizanje i krutosti podloške na tlačno opterećenje [42]. Zbog elastičnog svojstva sustava pričvršćenja, torzijski zaokret tračnice dopušten je u određenoj mjeri pri kojem se dodirna točka pritiskalice i nožice tračnice spušta ili podiže, a ovisno o ostvarenom vertikalnom pomaku dodirne točke, sila pričvršćenja varira, kao i deformacije i naprezanja svakog dijela pritiskalice [43]. Iznos tog pomaka ovisi o veličini i poziciji dvoosnog opterećenja na voznoj površini tračnice, kao i o strani tračnice na kojoj se pritiskalica nalazi (unutarnje ili vanjske) [43, 44]. Utjecaj omjera  $L/V$  na iznos bočnog pomaka glave i nožice tračnice prikazan je krivuljama na slici 6.e. Kritična vrijednost omjera  $L/V$  pada sa smanjenjem krutosti podtračničkog podloška, a kod nekih sustava pričvršćenja s mekanim podloškom i omjerom  $L/V > 0,4$ , naprezanja u pritiskalici u kojoj se javljaju najveća naprezanja mogu prekoračiti i granicu tečenja, pri čemu u pritiskalici ostaju trajne deformacije te postoji opasnost od smanjenja sile pričvršćenja [23].

### 2.3. Otpornost sustava pričvršćenja pri izdizanju tračnice

Uslijed prolaska željezničkog vozila po tračnici, dolazi do njezinog izdizanja ispred i iza kotača [1], pri čemu glavnu ulogu imaju elastične pritiskalice, odnosno njihova krutost i iznos sile pričvršćenja koju one ostvaruju s tračnicom [2]. Određivanje iznosa sile pričvršćenja provodi se ispitivanjem, primjerice, prema normi EN 13146-7 (slika 6.f) te je od velike važnosti

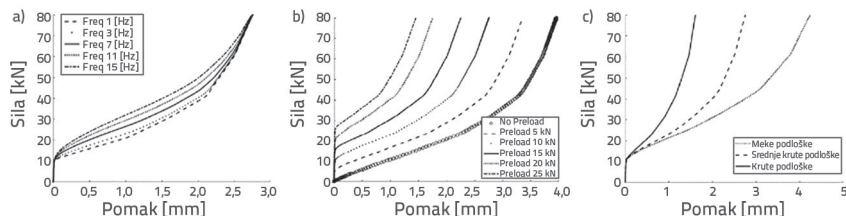
Sudjelujuće komponente	Matematički model za pojedini slučaj opterećenja	Pripadajuća krivulja koja opisuje ponašanje sustava pričvršćenja
 <p>[2]</p>	 <p>a)</p>	 <p>e)</p>
 <p>[2]</p>	 <p>b)</p>	 <p>f)</p>
 <p>[2]</p>	 <p>c)</p>	 <p>g)</p>
 <p>[2]</p>	 <p>d)</p>	 <p>h)</p>

Slika 6. Matematički modeli sustava pričvršćenja za slučaj: a) dvoosnog opterećenja; b) izdizanja tračnice; c) vertikalne komponente opterećenja u smjeru prema dolje; d) bočne komponente opterećenja; i pripadajuće krivulje koje opisuju ponašanje sustava pri tim opterećenjima; e) torzijsko zakretanje tračnice [47]; f) pomicanje tračnice prema gore [46]; g) pomicanje tračnice prema dolje [48], h) bočno pomicanje tračnice [42]

kako bi se osigurao prijenos opterećenja na pragove. Pritom se zahtijeva da minimalni iznos sile pričvršćenja bude osiguran kroz cijeli životni ciklus sustava pričvršćenja, pa se iz tog razloga sila pričvršćenja određuje prije i poslije provođenja ispitivanja utjecaja ponavljanja opterećenja [45]. Ponašanje sustava pričvršćenja za taj slučaj opterećenja može se opisati matematičkim modelom prikazanim na slici 6.c, gdje se pritiskalice modeliraju parom opruga i prigušivača. Krivulja sila-pomak nožice tračnice pri izdizanju prikazana je na slici 6.f iz koje se može uočiti da je mehaničko ponašanje sustava pričvršćenja nelinearno, te ga je kao takvo vrlo važno uzeti u obzir kod numeričkog proračuna sustava pričvršćenja [46].

## 2.4. Vertikalna krutost sustava pričvršćenja

Ponašanje sustava pričvršćenja pri vertikalnom opterećenju može se opisati matematičkim modelom prikazanim na slici 6.c. Općenito se odgovor sustava pričvršćenja na vertikalno statičko djelovanje razlikuje od dinamičkog po obliku krivulje histereze [49] koja se dobiva tlačnim ispitivanjem sustava pričvršćenja, primjerice, prema europskom propisu 13146-9 [50] (slika 6.g), a ovisno o tome radi li se o kvazistatičkom ili niskom, srednjem ili visokom frekvencijskom tlačnom opterećenju, iz nje se određuje statička ili dinamička krutost sustava pričvršćenja [48, 49]. Odgovor je sustava pričvršćenja

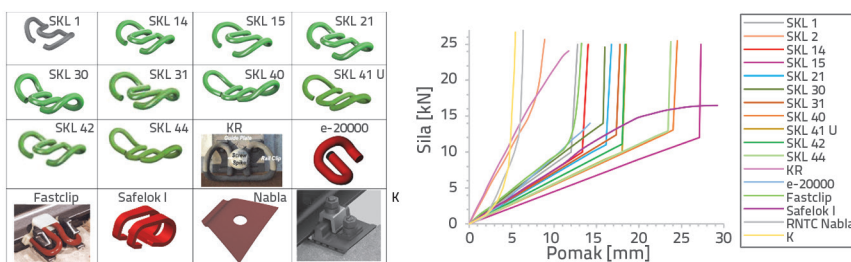


Slika 7. a) Utjecaj frekvencije opterećenja; b) Utjecaj iznosa sile pričvršćenja; c) Utjecaj krutosti podtračničkog podloška na promjenu krivulje okosnice (eng. backbone) histereze [48]

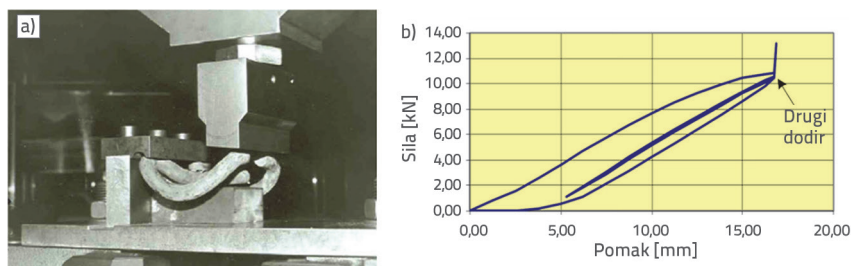
na harmoničnu pobudu pomakom nelinearan te se sastoji od elastične sile i sile prigušenja. Također, dinamička krutost i gubitak energije (histereza) strogo su ovisni o temperaturi, svojstvima materijala elastičnog podtračničkog podloška, iznosu sile pričvršćenja, dinamičkoj amplitudi i frekvenciji [51, 52]. Primjeri utjecaja nekih od navedenih parametara na promjenu oblika krivulje okosnice (eng. backbone) histereze prikazani su na slikama 7.a, 7.b i 7.c.

### 2.5. Otpornost sustava pričvršćenja na djelovanje bočne komponente opterećenja

Ako se pogledaju slike 6.d i 6.h, uočava se da pri djelovanju bočne komponente opterećenja otpornost pomicanju tračnice ovisi o krutosti pritiskalice u bočnom smjeru, o sili trenja između donjeg lica podloška i praga te o otpornosti kutne pločice u bočnom smjeru. Međutim, u slučaju malih iznosa vertikalne komponente i kada bočna sila koja se s tračnice prenosi na sustav pričvršćenja prekorači iznos sile trenja između podtračničkog podloška i ležajnog mjesta praga, dolazi do pomicanja tračnice u bočnom smjeru bez njezinog zakretanja [53]. U tom slučaju kutna pločica preuzima bočnu silu, što se detaljno istražilo u radu [54] laboratorijskim statičkim ispitivanjem sustava za pričvršćenje W 40 na ispitnom modelu kolosijeka, a slično se navodi i u tehničkim uputama Vossloh sustava sa SKL pritiskalicama [39]. Kada se pri prolasku željezničkog vozila kotač nađe na mjestu najudaljenijem od pričvršnog mjesta tračnice, bočna komponenta opterećenja uzrokuje moment torzije u ravni paralelnoj s donjim licem nožice tračnice, zbog kojeg može doći do gubitka stabilnosti tračnice uslijed njezina zaokreta. Kako bi se potvrdilo da sustav pričvršćenja neće izgubiti funkciju osiguranja stabilnosti tračnice, europskom je normom [55] propisan postupak provođenja procjene kvalitete i sigurnosti za navedeni slučaj opterećenja.



Slika 8. a) Prikaz različitih tipova pritiskalice i b) Krivulja sila-pomak kraka pritiskalice (podaci uzeti iz [56, 59-61, 63])



Slika 9. a) Primjer kvazistatičkog ispitivanja pritiskalice u laboratoriju; b) Dijagram odnosa sile na kraku pritiskalice i pomaka kraka SKL-1 pritiskalice [10]

## 3. Elastična pritiskalica - alat za poboljšanje učinkovitosti sustava pričvršćenja

### 3.1. Elastična pritiskalica

Najčešći oblici pritiskalice za pričvršćenje tračnica, ugrađenih na više od 90 % željezničkih mreža diljem svijeta jesu: pritiskalice žičanog oblika koje se izrađuju od čelične šipke okruglog poprečnog presjeka, primjerice, SKL, Fastclip ili "e" pritiskalice, i pločastog oblika krućih mehaničkih svojstava u odnosu na one žičanog oblika, primjerice, Nabla ili K pritiskalice (slika 8.a). Budući da se sila pričvršćenja ostvaruje deformacijom pritiskalice, promjenom geometrije pritiskalice i/ili svojstva materijala od kojeg je ona izrađena, značajno se mijenjaju njezina mehanička svojstva, što se može vidjeti na slici 8.b usporedbom krivulja sila-pomak kraka različitih tipova pritiskalice koje se međusobno razlikuju po obliku i dimenzijama (slika 8.a). Krivulja sila-pomak dobiva se kvazistatičkim ispitivanjem nanošenjem sile na krak pritiskalice, kao što je prikazano na primjeru SKL 1 pritiskalice na slici 9.a te pripadajućom krivuljom sila-pomak (slika 9.b) za isti primjer. Ta krivulja opisuje statičko ponašanje pritiskalice te daje podatak o njezinoj statičkoj krutosti koja značajno utječe na statičko, ali i na dinamičko ponašanje sustava pričvršćenja.

Pogleda li se krivulja na slici 9.b, može se primijetiti lom krivulje, takozvani drugi dodir koji je svojstven SKL tipu pritiskalice, pa se često kaže da taj tip pritiskalice ima i sekundarnu krutost što je prednost ovog tipa pritiskalice, jer se sa sekundarnom krutosti ostvaruje velika otpornost na torzijsko zakretanje i izdizanje tračnice [6, 56].

Promjenom geometrije pritiskalice i karakteristike njezinog materijala, osim krutosti pritiskalice, mijenja se i iznos ostvarene sile pričvršćenja, što se također može uočiti na krivulji sila-pomak pritiskalice očitanim iznosom sile pričvršćenja koju pritiskalica pri određenom pomaku ostvaruje na gornjem licu nožice tračnice. Zahtjevi za iznosom sile pričvršćenja ovise o veličini tračnice, vrsti i brzini prometovanja željezničkog vozila, svojstvima i geometriji kolosijeka, promjeni temperature tračnice, itd. [62]. Pritom je važno da se njezin iznos postigne velikom deformacijom pritiskalice prilikom ugradnje tako da njezin iznos što manje varira uslijed promjene debljine podtračničkog podloška pod različitim slučajevima opterećenja te uslijed trošenja pojedinih komponenata tijekom uporabljivosti sustava pričvršćenja [6, 57]. U većini se slučajeva po pritiskalici ostvaruje sila pričvršćenja u rasponu od 7,5 do 12,5 kN s deformacijama pritiskalice između 5 i 15 mm [58].

### 3.2. Procjena dinamičke čvrstoće pritiskalica

Iako posjeduju elastično svojstvo, neki tipovi pritiskalica pokazuju u određenim slučajevima plastične deformacije i u fazi ugradnje i tijekom uporabe, pa konvencionalne metode procjene granice izdržljivosti koje se provode postupcima ispitivanja prema normi 13146-4 [64] ne mogu biti primjereno primijenjene [17, 18]. S obzirom na to, radi dobivanja što bolje procjene dinamičke izdržljivosti pojedinog tipa pritiskalice, mnogi stručnjaci provode istraživanja primjenjujući različite pristupe, pa se dosadašnja istraživanja u tom području mogu podijeliti u dvije grupe.

Pritiskalice su tijekom uporabe podvrgnute kombinaciji statičkog (sila pričvršćenja na nožici tračnice) i dinamičkog opterećenja (prolazak kotača tračničkog vozila po tračnici), pa su stoga i osjetljive na oštećenje zamorom [15, 16, 18], a pojava kritične pukotine u pritiskalici znači otkazivanje cijelog sustava za pričvršćenje. Općenito, radni uvjeti pritiskalice odgovaraju visokocikličkom zamoru ( $N > 10^6$ ), odnosno zamor materijala i stupanj oštećenja pojedinih elemenata ovise o amplitudama i frekvenciji opterećenja [15]. Stoga, prva grupa istraživanja procjene dinamičke čvrstoće pritiskalica koristi pristupe temeljene na mehanici loma kojom se primjenom pripadnih parametara (koeficijent intenzivnosti naprezanja,  $J$ -integral, CTOD i slično) analizira ponašanje pukotine u konstrukcijskoj komponenti. Primjerice, u radovima [13, 17, 18, 65, 66] su S-N (eng. *stress - life*) metodom analizira visokociklički zamor materijala pritiskalica pri čemu su iz Wöhlerovih (S-N) krivulja dobiveni podaci o broju ciklusa do loma za određenu amplitudu naprezanja. Općenito, s inženjerskoga stajališta se pokazalo da je za procjenu dinamičke čvrstoće pritiskalica, kada se koristi S-N metoda, najpouzdanija kombinacija Goodmanovog i Gerberovog izraza [66], a kojima se prikazuje utjecaj srednjeg naprezanja na dinamičku čvrstoću pritiskalica. U radu [67] je Parisovim zakonom analiziran rast pukotine primjenom linearno elastične mehanike loma (koeficijenta intenzivnosti naprezanja). Rain-flow metoda, koja je pogodna za procjenu

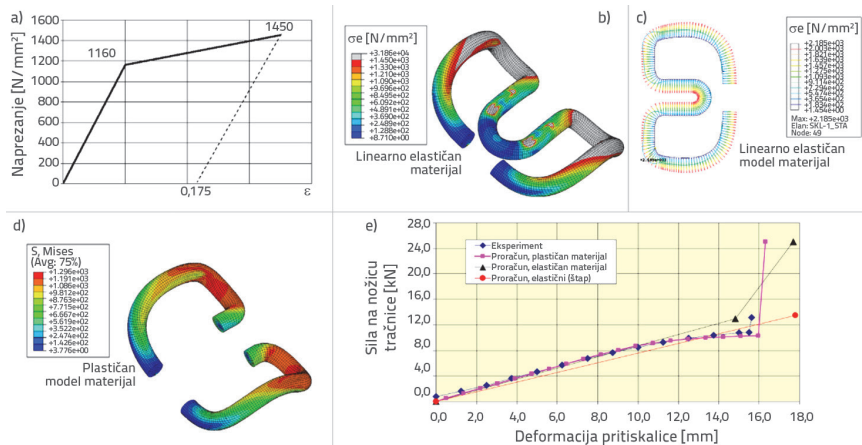
dinamičke čvrstoće pri djelovanju slučajnih opterećenja kakva se javljaju pri prolasku željezničkog vozila, primijenjena je u radovima [15, 68].

Pri velikoj brzini kretanja željezničkog vozila i kotrljanja kotača po voznoj površini tračnice može doći do oštećenja glave tračnice ili pojave nabora njezine vozne površine (eng. *corrugation*), što je pručeno numeričkim proračunima u radu [69].

Prolaskom kotača po takvim dijelovima tračnice dolazi do vertikalnih i horizontalnih dinamičkih sila visokih frekvencija i velikih amplituda (većih od 100g) [5, 70], pa je osim statičkih, vrlo važno poznavati i dinamičke parametre sustava pričvršćenja kao što su vlastiti oblici vibriranja, vlastite frekvencije, dinamička krutost i prigušenje, a na koje bitno utječe iznos sile pričvršćenja i krutost pritiskalice [71-73]. Stoga se može reći da druga grupa istraživanja uključuje pristup procjene dinamičke čvrstoće pritiskalice s gledišta frekvencijske domene [14, 19, 74]. Kako je pritiskalica u većini slučajeva izravno u kontaktu s tračnicom, ona može vibrirati u rezonanciji s tračnicom pri čemu može doći do oštećenja pritiskalice, smanjenja sile pričvršćenja ili u krajnjem slučaju puknuća pritiskalice [19, 74, 75]. Problemi povezani s nepravilnosti na površini kotača, tračnice i pojedinim komponentama kolosijeka uglavnom su uzrokovani vertikalnim silama koje su najznačajnije do 1500 Hz. Sile koje se djelomično prenose kroz inerciju kotača na osovину, ovjes i vozilo, te kroz kolosijek na temeljno tlo, jesu značajnih frekvencija od približno 500 Hz [5]. Mnoga su istraživanja provedena mjerenjima na terenu pokazala da je oštećenje pritiskalica uglavnom uzrokovano vibracijama koje nastaju međudjelovanjem kotača i tračnice frekvencija manjima od 1000 Hz [14]. Međutim, istraživanja vezana za dinamičke parametre pritiskalica sa stajališta frekvencijske domene navode da je raspon frekvencija u kojem bi se trebale istražiti vlastite vrijednosti vibriranja pritiskalice 0-1000 Hz [14, 74], a neki navode i do 2000 Hz [19]. Kod analize cijelog sustava pričvršćenja, kada se u obzir ne uzima buka, do sada su istraživanja provedena u rasponu od 100-1000 Hz [71, 73, 76]. Prema tome, potrebno je razumjeti povezanost između vlastitih frekvencija pritiskalice i vlastitih frekvencija odgovora tračnice na dinamičke sile koje nastaju na kontaktu tračnice i kotača. Stoga, autori Sun i ostali [14] napominju da je prvi važan korak pri analizi pritiskalice određivanje njezinih modalnih svojstava uključujući vlastite frekvencije i vlastite oblike vibriranja. Osim toga, postupak izbjegavanja rezonantnog fenomena pritiskalice i tračnice trebao bi se promotriti već u samoj fazi oblikovanja pritiskalice [14].

U obje se grupe istraživanja razina sile pričvršćenja, geometrija pritiskalice, svojstva materijala pritiskalice, opterećenja koja djeluju tijekom uporabe ističu se kao najutjecajniji parametri na promjenu statičkih i dinamičkih svojstava cijelog sustava pričvršćenja [12], pa je upravo mijenjanje tih parametara jedan od mogućih načina za poboljšanje njegove učinkovitosti [77]. S obzirom na to, postoji potreba da se optimizira oblik i veličina postojećih pritiskalica kao i odabir materijala od kojih se one izrađuju [66, 68].





Slika 10. a) Elastoplastičan model materijala; b) Prikaz distribucije naprezanja trodimenzijskog MKE modela pritiskalice s linearno elastičnim modelom materijala; c) Prikaz naprezanja štapnog modela s linearno elastičnim modelom materijala; d) Prikaz distribucije naprezanja modela s elastoplastičnim modelom materijala, e) Krivulje sila-pomak nožice različitih modela SKL1 pritiskalice [10]

### 3.3. Numerički modeli pritiskalice i sustava pričvršćenja

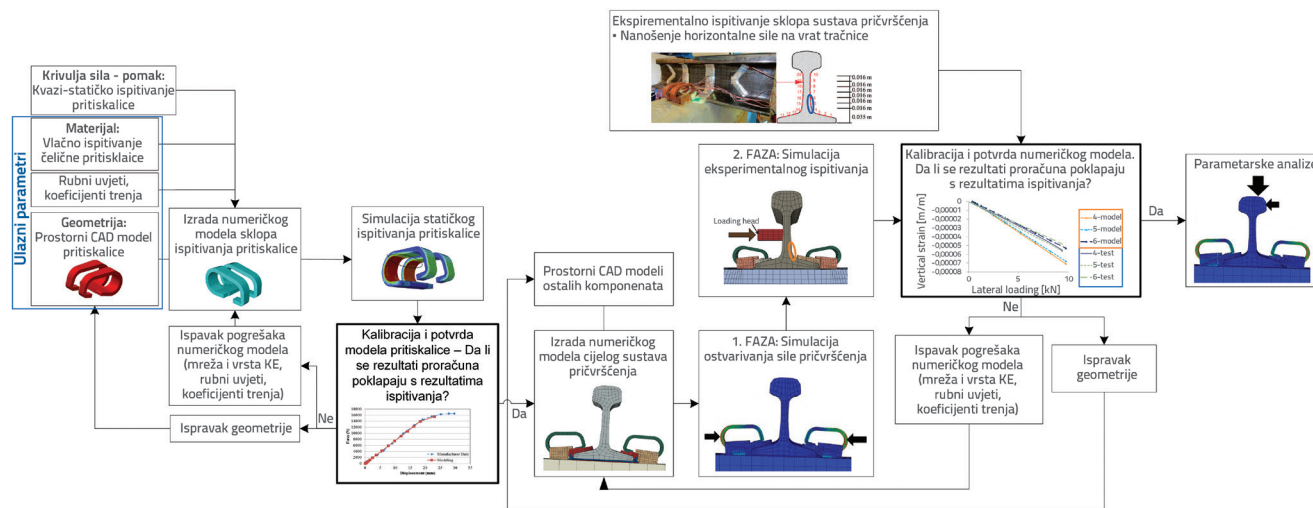
Budući da se pritiskalice u početku u matematičkim modelima modelirala samo elastičnom oprugom ili parom opruge i prigušivača, a zbog njezine vrlo složene geometrije, teško je bilo razumjeti raspodjelu i iznos naprezanja kao i spoznati mjesta gdje se javljaju najveća naprezanja u pritiskalici. Osim toga, bilo je gotovo nemoguće povezati parametre geometrije pritiskalice s njezinim statičkim i dinamičkim svojstvima kao ni s iznosom ostvarene sile pričvršćenja kojima bi se moglo utjecati na mehaničko ponašanje sustava pričvršćenja. Potaknuti navedenim nedostacima tadašnjih pristupa procjeni pritiskalice te sve češćom pojavom njihova puknuća, autori Lakušić i ostali u radu [78] prvi put provode statičke analize pritiskalice pomoću CAE (Computer-Aided Engineering) računalnih

alata i trodimenzijskih modela pritiskalice temeljenih na metodi konačnih elemenata (MKE modela). Tim se istraživanjem pokazalo da su takvi proračuni pouzdani pri procjeni statičkog ponašanja pritiskalice te je dobivenom prostornom distribucijom naprezanja moguće predvidjeti mjesta na pritiskalici gdje se mogu pojaviti oštećenja uslijed zamora materijala. Međutim, u tom je radu model materijala pritiskalice definiran kao linearno elastičan, pa se u radu [10] ističe prednost upotrebe elastoplastičnog modela materijala (slika 10.a) u odnosu na linearnoelastičan model, kao i korištenja trodimenzijskih MKE modela (slike 10.b i 10.d) u odnosu na štapne modele (slika 10.c), usporedbom krivulja sila-pomak nožice pritiskalice za svaki analizirani model SKL 1 pritiskalice (slika 10.e).

Sve češći problemi koji se javljaju na sustavima pričvršćenja, ali i shvaćanje da se dobrim razumijevanjem složenog mehaničkog ponašanja sustava pričvršćenja (do kojeg se dosad dolazilo dugotrajnim i financijski skupim ispitivanjima) može unaprijediti njegova učinkovitost, protekla se dva desetljeća intenzivno provode istraživanja pomoću numeričkih modela i CAE računalnim alatima [10-16, 18, 19, 23, 47, 74, 79, 80], a sve se češće parametarskim analizama promjenom geometrije pritiskalice pokušava produžiti njezino trajanje kao i trajanje cijelog sustava pričvršćenja [77, 80, 81].

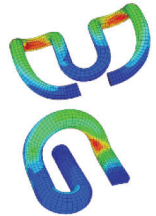
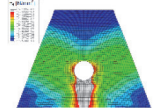
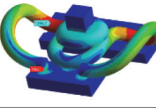

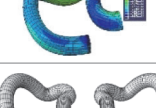
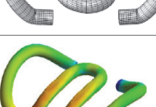

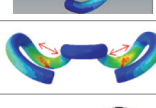

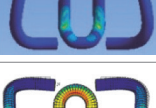
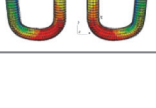

#### 3.3.1. Primjer izrade numeričkog modela pritiskalice i sustava pričvršćenja

Izrada MKE modela nekog sklopa, kao što je sustav pričvršćenja, složen je postupak koji uključuje niz koraka kako bi rezultati numeričkog proračuna simulirali fizikalne pojave stvarnog



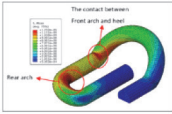
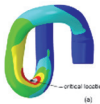
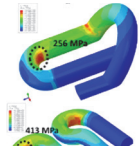
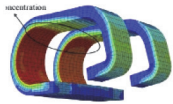


Slika 11. Tijek postupka izrade modela konačnih elemenata sustava za pričvršćenje temeljen na istraživanjima iz radova [23, 63, 84, 85]

Tablica 1. Pregled vrsta i svojstava čelika pritiskalica korištenih za numeričke modele iz pregledane literature

Tip pritiskalice	Materijal	Modul elastičnosti [MPa]	Gustoća materijala [kg/m <sup>3</sup> ]	Poissonov faktor	Granica tečenja [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Slika modela pritiskalice	Rad
SKL 1 SKL 12	čelik	205000	7850	0,3	-	1450		[78]
SKL 1 e-2000 RNTC Nabla	čelik	210000	7850	0,3	1160	1457		[10]
SKL 1	čelik 38Si7	-	-	-	1077	1291		[66]
SKL 12	čelik	210000	7850	0,313	-	1590		[44]
SKL 14	čelik	200000	-	0,3	1300	-		[67]
SKL 14	čelik	180000	7800	0,3	-	-		[47]
SKL 15	čelik	21000	27146	0,313	-	1590		[11]
SKL 15	čelik	200000	7850	0,27	1000	1300		[88]
SKL 15 SKLB 15	čelik 38Si7	200000	-	0,27	≥1150	1300-1600		[18]
SKL 15	čelik 60Si2Mn 38Si7	206000	7800	0,3	-	-		[68]
SKL 15	čelik 38Si7	183333	7800	0,26	1242	1375		[89]
SKL 15	čelik 38Si7	205000	7800	0,3	-	-		[77]
ω-tip	čelik	210000	7500	0,3	-	-		[74]

Tablica 1. Pregled vrsta i svojstava čelika pritiskalice korištenih za numeričke modele iz pregledane literature - nastavak

Tip pritiskalice	Materijal	Modul elastičnosti [MPa]	Gustoća materijala [kg/m <sup>3</sup> ]	Poissonov faktor	Granica tečenja [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Slika modela pritiskalice	Rad
KR	SPS9A	205000	-	-	1377	1509		[60]
e-tip	čelik	206 000	7800	0,3	1176	1274		[19]
e-tip	Čelik 60Si2Mn	206000	7800	0,3	1200	1300		[13]
e-tip	čelik SUP10	210000	-	-	-	-		[86]
Fastclip e-tip	čelik	216700	7850	0,3	1311,3	1470,3		[87]
Safelok I	čelik	158585	-	0,29	1261	1393		[85]

"-" - podatak nije naveden u literaturi

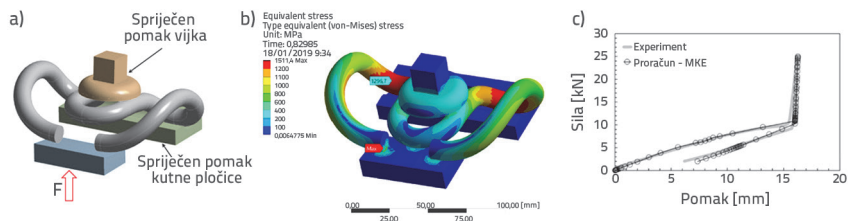
modela, pa se često kaže da je numerički model digitalni prototip fizikalnom modelu, a simulacije na numeričkim modelima računalni eksperimenti [82]. Takav pristup štedi vrijeme i novac, pa se u posljednje vrijeme u istraživanjima vezanima za pritiskalice i sustave pričvršćenja sve češće simuliraju postupci ispitivanja prema propisima [48, 66, 77, 83]. Primjer izrade detaljnog numeričkog modela sustava pričvršćenja Safelok I prikazan je na slici 11., a postupak je opširno opisan kroz istraživanja provedena u radovima [23, 63, 84, 85].

Simulacija ispitivanja na numeričkom modelu sustava pričvršćenja i pritiskalice obično se dijeli u dvije faze. Prva faza predstavlja simulaciju ostvarivanja sile pričvršćenja, odnosno uvođenje statičkog stanja naprezanja u pritiskalice i sustav pričvršćenja. Druga je faza, ovisno o ispitivanju koje se simulira, simulacija nanošanja opterećenja [10, 48, 66, 77, 78, 83]. Osim ispitivanja, u nekim su istraživanjima provedene simulacije prometnog opterećenja u obliku amplificiranih statičkih kako bi se simulirala dinamička i udarna opterećenja [16, 75, 86], dok se u zadnje vrijeme, s napretkom računala, sve češće provode dinamički proračuni [41, 87].

Kako su geometrijski oblici pritiskalice složeni, često se prije izrade njihovog modela u nekom od CAD (eng. *Computer-Aided*

*Design*) računalnog alata provodi 3D skeniranje njihovog stvarnog modela [18, 19, 67, 88]. Izrađeni CAD model se potom uvodi u neki od računalnih programa za inženjerske simulacije kako bi se dobio trodimenzijski numerički model pritiskalice što veće geometrijske točnosti. Svojstvo materijala vrlo je važan ulazni parametar numeričkog proračuna pritiskalice i sustava pričvršćenja, pa su u okviru nekih od istraživanja provedena vlačna ispitivanja čelika od kojeg su pritiskalice izrađene [17, 66, 87, 89], a najčešće su to čelici za opruge 38Si7 te 60Si2Mn [90]. Prikaz vrste čelika pritiskalice korištenih u literaturi i svojstva tih čelika dani su u tablici 1.

Pouzdanost rezultata numeričkog proračuna koji opisuju mehaničko ponašanje nekog sustava najvećim dijelom ovisi o ulaznim parametrima kao što su geometrija, svojstvo materijala i rubni uvjeti [91]. Numeričke simulacije najčešće uključuju pogreške idealizacije i pogreške diskretizacije. Pogreške idealizacije nazivaju se i pogreškama modeliranja, a mogu uključivati: zamjenu nelinearnog problema linearnim, zanemarivanje nelinearnosti materijala, zanemarivanje geometrijske nelinearnosti, netočno modeliranje kontakata, tretiranje dinamičkog problema kao statičkog i slično. Pogreške diskretizacije nastaju izradom mreže konačnih elemenata te ovisi o vrsti, redu i broju konačnih elemenata koji se koriste za diskretizaciju geometrije promatranog konstrukcijskog elementa.



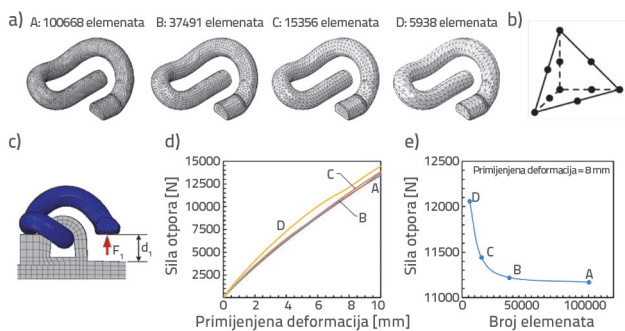
Slika 12. a) Kvizistatičko ispitivanje pritiskalice SKL-1; b) Prostorni prikaz raspodjele napreznja; c) Potvrda numeričkog proračuna pritiskalice [66]

Da bi se potvrdila točnost rezultata numeričkog modela, potrebno je provesti provjeru valjanosti odabranih konačnih elemenata, primijenjenih rubnih uvjeta, karakteristika materijala, faktora trenja i slično. Osim toga, potrebno je provesti analizu konvergencije numeričkih rezultata provođenjem analiza s više različitih mreža konačnih elemenata. Odstupaju li i dalje rezultati znatnije od eksperimentalnih mjerenja, potrebno je provjeriti valjanost primijenjenih numeričkih algoritama.

Potvrda točnosti numeričkog modela pritiskalice najčešće se provodi usporedbom numeričkih rezultata dobivenih simulacijom djelovanja sile na nožici/nožicama pritiskalice s krivuljom sila-pomak dobivenom eksperimentalnim kvizistatičkim ispitivanjem na fizikalnom, ispitnom modelu (slika 12). Neki od primjera statičke kalibracije i potvrde modela pritiskalice mogu se naći i u radovima za SKL 1 [10, 66], SKL 14 [15] i Safelok I pritiskalicu [85].

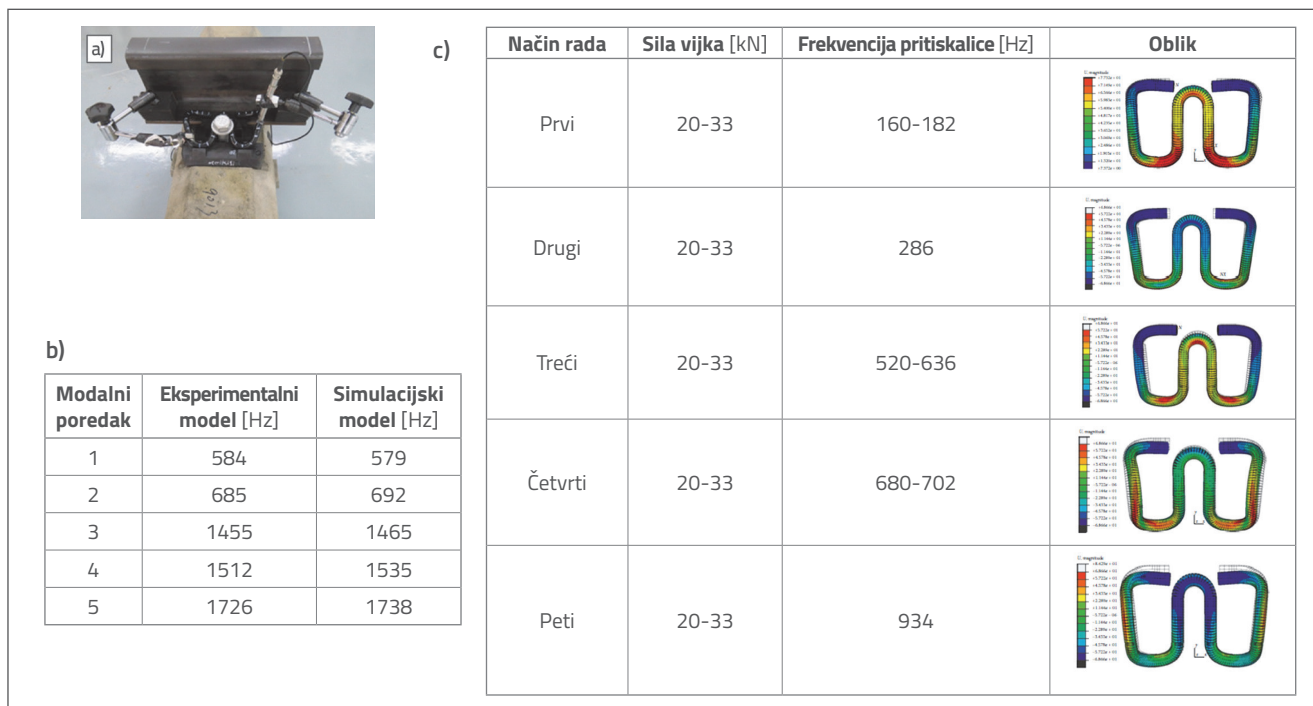
Budući da je geometrija pritiskalice u većini slučajeva dosta složena, geometrijski oblik ruba modela često odstupa od stvarnog modela te se prilagođava oblicima konačnih

elemenata, pa ponekad može doći do pogreške pri aproksimaciji geometrije modela prilikom njegove diskretizacije [91]. Kako bi se te pogreške isključile, a da numerički proračun uz dovoljnu točnost ostane vremenski prihvatljiv, može se provesti provjera utjecaja broja i vrste konačnih elemenata, kao na primjeru na pritiskalici prikazanom na slici 13.



Slika 13. a) Modeli pritiskalice s različitim brojem konačnih elemenata; b) Odabrani konačni element u obliku tetraedra s deset čvorova kojim je podijeljena geometrija pritiskalice; c) Zadavanje pomaka na pritiskalicu; d) Krivulja zadani pomak - ostvarena sila za svaki model; e) Usporedba ostvarenih sila pri zadanom pomaku od 8 mm [16]

Takvim se postupkom zaključilo da, primjerice, ako se koriste konačni elementi u obliku tetraedra s 10 čvorova, potreban je



Slika 14. a) Prikaz sklopa za ispitivanje modalnih parametara; b) Usporedba vlastitih frekvencija numeričkog modela i ispitivanja; c) Vlastite frekvencije i oblici pritiskalice W1 dobiveni proračunom MKE [74]

37491 konačni element za adekvatnu aproksimaciju geometrije modela pritiskalice [16]. U radu [66] proveden je sličan postupak gdje je za aproksimaciju geometrije SKL 1 pritiskalice odabran konačni element u obliku heksaedra te je ukupan broj elemenata cijelog numeričkog modela ispitnog sklopa (slika 12.) iznosio 49097 konačnih elemenata i 190060 čvorova. U tom je postupku postupno smanjivana veličina konačnih elemenata sve dok varijacija u Von Missesovim naprezanjima nije bila manja od 5%. Kad se promatra dinamičko ponašanje pritiskalice, osim statičkih, dobro je numerički model pritiskalice potvrditi uspoređivanjem dinamičkih parametara kao što su vlastite frekvencije i vlastiti oblici vibriranja pritiskalice dobivene numeričkim proračunom s onima dobivenima, primjerice, eksperimentalnom modalnom analizom [14, 74]. Primjer dinamičke kalibracije MKE modela pritiskalice prikazan je na slici 14.

Ako se promatra ponašanje cijelog sustava pričvršćenja, pogotovo u slučaju djelovanja bočne ili uzdužne sile, pri čemu se otpornost sustava pomicanju tračnice djelomice postiže i silom trenja [41], prilikom izrade modela vrlo je važno ispravno definirati model kontakata između pojedinih komponenata. Kod takvog je modela dobro, osim potvrde rezultata numeričkog proračuna na razini jedne komponente, provesti postupak kalibracije numeričkog modela za cijeli sustav pričvršćenja kako bi se odredili faktori trenja kojima se dobivaju rezultati numeričkog proračuna što bliže rezultatima ispitivanja na fizikalnom modelu. Primjer takve kalibracije prikazan je na primjeru sa slike 11.

Nakon kalibracije i potvrde numeričkog modela pritiskalice i/ili sustava pričvršćenja, moguće je provođenje parametarskih analiza, a najčešći parametri su dimenzije, oblik [16, 74, 77, 80] i svojstva materijala pritiskalice [68], iznos i pozicija opterećenja od željezničkog vozila na voznoj površini tračnice [23, 47], razmak betonskih pragova, odnosno, oslonaca tračnice [23], promjena krutosti podtračničkog podloška [48, 49].

#### 4. Zaključak

Protekla se dva desetljeća napretkom računala intenzivno provode istraživanja pomoću računalnih eksperimenata vrlo složenih sustava kojima se pokušava što vjernije opisati njihovo mehaničko ponašanje u svrhu prepoznavanja parametara pojedinih komponenata kojima se bitno utječe na poboljšanje učinkovitosti cijelog sustava. Prednost računalnih eksperimenata prepoznata je u postupcima numeričkih proračuna sustava pričvršćenja kojima je sada moguće na jednostavniji način i uz manji financijski i vremenski trošak spoznati uzroke problema koji se s napretkom željeznica javljaju na sustavima pričvršćenja, a provođenjem parametarskih analiza poboljšati pojedine komponente pa time i mehaničkih svojstava cijelog sustava pričvršćenja. Elastična pritiskalica prepoznata je kao kritična i vrlo važna komponenta kojom se bitno utječe na statičko i dinamičko ponašanje sustava pričvršćenja, primjerice, promjenom geometrije i/ili promjenom svojstava materijala pritiskalice. Zaključci nakon širokog pregleda područja istraživanja su:

- Sila se pričvršćenja na nožici tračnice ostvaruje deformacijom pritiskalice. Stoga, geometrija pritiskalice, uz svojstva

materijala od kojeg je ona izrađena, ključni su parametri kojima se može bitno utjecati na statička i mehanička svojstva sustava pričvršćenja te na taj način optimizirati sustav pričvršćenja.

- Kada se analiziraju sustavi pričvršćenja pri dominantnom dvoosnom opterećenju, iznos naprezanja u pritiskalicama ovisi o veličini omjera  $L/V$  (omjer bočne i vertikalne komponente sile) te poziciji tog opterećenja na voznoj površini tračnice, a također ovisi na kojoj strani tračnice se pritiskalica nalazi. Kod nekih sustava pričvršćenja i tipova pritiskalica pri dvoosnom opterećenju većeg omjera  $L/V$ , naprezanja u pritiskalici mogu prekoračiti granicu tečenja pri čemu dolazi do trajnih deformacija te bržeg razvoja mikropukotina i oštećenja pritiskalice.
- S-N metoda pouzdana je za analizu visokocikličkog zamora materijala pritiskalica, pri čemu se iz Wöhlerovih S-N krivulja dobivaju podaci o broju ciklusa do loma za određenu amplitudu naprezanja. Također se pokazalo da za procjenu dinamičke čvrstoće pritiskalica, kada se primijeni S-N metoda, najpouzdanija je kombinacija Goodmanovog i Gerberovog izraza kojima se prikazuje utjecaj srednjeg naprezanja na dinamičku čvrstoću pritiskalica.
- Kako tračnica i pritiskalica mogu vibrirati u rezonanciji, vrlo je važno tijekom analize ovakvih sustava, osim statičkih, proučiti i dinamičke parametre kao što su vlastite vrijednosti vibriranja, a značajne vlastite frekvencije pritiskalice su u rasponu od 0 do 1000 Hz.

Preporuke za daljnja istraživanja:

- Proučiti utjecaj pojedinih parametara geometrije pritiskalice na statičke parametre te na dinamičku čvrstoću pritiskalice. Pritom primijeniti metode procjene s gledišta mehanike loma, a ako se proučava određena trasa željezničke pruge, dobro je provesti i procjenu u frekvencijskoj domeni.
- U posljednje se vrijeme u istraživanjima vezanima za pritiskalice i sustave pričvršćenja sve češće simuliraju postupci ispitivanja prema propisima, pa se može reći da se postupno razvijaju virtualni laboratoriji u kojima bi se mogla provesti početna procjena sigurnosti i kvalitete novo razvijenih komponenata i sustava pričvršćenja. S obzirom na to, potrebno je postaviti smjernice za izradu pouzdanih digitalnih prototipa za provedbu računalnih eksperimenata kako bi se u postupku razvoja novih ili modifikacije postojećih sustava pričvršćenja mogle provesti procjene njihove stabilnosti i kvalitete prema propisima. Također bi se na taj način mogao riješiti problem vezan za način oblikovanja i dimenzioniranja pritiskalica i ostalih komponenata sustava pričvršćenja.

#### Zahvala

Rad je izrađen u okviru projekta "Razvoj DIV elastične kopče" referentne MIS oznake: KK.01.2.1.01.0011 koji financira Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta RH kroz program "Jačanje konkurentnosti gospodarstva poticanjem investicija i učinkovitim korištenjem EU sredstava".

## LITERATURA

- [1] Esveld, C.: *Modern Railway Track*, 2<sup>nd</sup> ed., Zaltbommel, The Netherlands, MRT Productions, 2001.
- [2] Tzanakakis, K.: *The Railway Track and Its Long Term Behaviour: A Handbook for a Railway Track of High Quality*, 1<sup>st</sup> ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36051-0>.
- [3] Vaquero, C., Alfonso, I.: *Optimización y análisis de comportamiento de sistemas de sujeción para vías de ferrocarril de alta velocidad española*, Universidad de Cantabria, 2006.
- [4] Berggren, E.: *Railway track stiffness: dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance*, Royal Institute of Technology (KTH), 2009.
- [5] Knothe, K.L., Grassie, S.: *Modelling of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies*, *Veh. Syst. Dyn.*, 22 (1993), pp. 209–262, <https://doi.org/10.1080/00423119308969027>.
- [6] Giannakos, K.: *Secondary Stiffness of Fastening Clips: Influence on the Behavior of the Railway Track Panel*, *Materials and Infrastructures* 2, 5B (2016), J. Torrenti, La Torre, F., John Wiley & Sons, Ltd, pp. 115–129, <https://doi.org/10.1002/9781119318613.ch9>.
- [7] Sayeed, M.A., Shahin, M.A.: *Design of ballasted railway track foundations using numerical modelling. Part I: Development*, *Can. Geotech. J.*, 55 (2017) 3, pp. 353–368, <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0633>.
- [8] Sadeghi, J., Fesharaki, M., Khajehdezfuly, A.: *Influences of train speed and axle loads on life cycle of rail fastening clips*, *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, 39 (2015) 1, pp. 1–11.
- [9] Xiao, X., Jin, X., Wen, Z.: *Effect of disabled fastening systems and ballast on vehicle derailment*, *J. Vib. Acoust.*, 129 (2006), pp. 217–229, <https://doi.org/10.1115/1.2424978>.
- [10] Lakušić, S., Bartoš, D., Bajić, A.G.: *Analysis of elastic fastening spring clips for rail fastening*, *ŽELJEZNICE* 21, 7 (2008) 3, pp. 7–12.
- [11] Choi, S.H., Park, B.H., Yun, K.-M., Bae, H.U., Lim, N.H.: *Behavior of Tension Clamp in Rail Fastening System*, *J. Korea Acad. Coop. Soc.*, 16 (2015) 12, pp. 8812–8819, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8812>.
- [12] Baik, C.H., Joo, B.G., Choi, J.Y., Choi, I.Y., Park, Y.G.: *The parametric study on the performance characteristics of elastic rail fastening system on the sharp curved track*, in *Proceedings of the KSR Conference*, (2011), pp. 2163–2173.
- [13] Hong, X., Xiao, G., Haoyu, W., Xing, L., Sixing, W.: *Fatigue damage analysis and life prediction of e-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE*, *Adv. Mech. Eng.*, 10 (2018) 3, pp. 1–12, <https://doi.org/10.1177/1687814018767249>.
- [14] Sun, L., Yan, Z., Xiao, J., Fang, H., Cui, S.: *Experimental analysis of the modal characteristics of rail fastening clips*, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 234 (2020) 2, pp. 134–141, <https://doi.org/10.1177/0954409719834784>.
- [15] Mohammadzadeh, S., Ahadi, S., Nouri, M.: *Stress-based fatigue reliability analysis of the rail fastening spring clip under traffic loads*, *Lat. Am. J. Solids Struct.*, 11 (2014) 6, pp. 993–1011, <https://doi.org/10.1590/S1679-78252014000600006>.
- [16] Hasap, A., Paitekul, P., Noraphaipaksa, N., Kanchanomai, C.: *Analysis of the fatigue performance of elastic rail clip*, *Eng. Fail. Anal.*, 92 (2018), pp. 195–204, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.013>.
- [17] Tamagawa, S.: *A fatigue limit diagram for plastic rail clips*, *COMPRAIL* 2014, pp. 839–848, 2014., <https://doi.org/10.2495/CR140701>.
- [18] Park, Y.C., An, C., Sim, H.B., Kim, M., Hong, J.K.: *Failure Analysis of Fatigue Cracking in the Tension Clamp of a Rail Fastening System*, *Int. J. Steel Struct.*, 19 (2019) 5, pp. 1570–1577, <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00231-5>.
- [19] Xiao, H., Wang, J.B., Zhang, Y.R.: *The fractures of e-type fastening clips used in the subway: Theory and experiment*, *Eng. Fail. Anal.*, 81 (2017), pp. 57–68, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.006>.
- [20] Oregui, M., Li, Z., Dollevoet, R.: *An investigation into the modeling of railway fastening*, *Int. J. Mech. Sci.*, 92 (2015), pp. 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.11.019>.
- [21] Kaewunruen, S.: *Experimental and numerical studies for evaluating dynamic behaviour of prestressed concrete sleepers subject to severe impact loading*, University of Wollongong, 2007.
- [22] Slugačić, V., Lakušić, S., Lazarević, D.: *Track ballast modelling by discrete element method*, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 7, pp. 589–600, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2350.2018>
- [23] Chen, Z., Shin, M., Andrawes, B., Edwards, J.R.: *Parametric study on damage and load demand of prestressed concrete crosstie and fastening systems*, *Eng. Fail. Anal.*, 46 (2014), pp. 49–61., <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.08.002>
- [24] LoPresti, J., McHenry, M.: *Detection of Concrete Tie Rail Seat Deterioration*, Washington DC, 2019.
- [25] Vranešić, K., Lakušić, S., Serdar, M.: *Corrosion and stray currents at urban track infrastructure*, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 7, pp. 593–606, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2909.2020>
- [26] Gutierrez Romero, M., Edwards, J.R., Barkan, C.P.L., Wilson, B., Mediavilla, J.: *Advancements in fastening system design for North American Concrete crossties in heavy-haul service*, *Proceedings of the AREMA 2010 Annual Conference & Exposition*, Orlando, FL, USA, 2010.
- [27] CEN: EN 13481-2 *Željeznički sustav - Željeznički gornji ustroj - Zahtjevi za izradbu kolosiječnog pričvrsnog pribora - 2.dio: Kolosiječni pričvrсни pribor za betonske pragove*, Brussels, 2017.
- [28] CEN: HRN EN 13146 - *Željeznički gornji ustroj - Ispitne metode za kolosiječni pričvrсни pribor - 1.-9. dio*, (2019), CEN, 2019.
- [29] American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA): *Chapter 30 Ties, Manual for Railway Engineering - Volume 1*, 2019.
- [30] Standards Australia: AS1085.19 *Railway track material - Part 19: Resilient fastening assemblies*, 2003.
- [31] Hay, W.W.: *Railroad engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1982.
- [32] Lakušić, S., Haladin, I., Vranešić, K.: *Railway infrastructure in earthquake affected areas*, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 10, pp. 905–922, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2967.2020>
- [33] Williams, B., Holder, D.E., Dersch, M., Edwards, R., Barkan, C.: *Quantification of Lateral Forces in Concrete Crosstie Fastening Systems*, *Transportation Research Board 94<sup>th</sup> Annual Meeting*, Washington D.C., 2015.
- [34] Manda, K.R., Dersch, M., Kernes, R., Edwards, R.J., Lange, D.A.: *Vertical Load Path Under Static and Dynamic Loads in Concrete Crosstie and Fastening Systems*, 2014 Joint Rail Conference, Colorado Springs, Colorado, USA, 2014., <https://doi.org/10.1115/JRC2014-3832>.
- [35] Holder, B.G.J., Qian, Y., Dersch, M.S., Edwards, J.R.: *Lateral load performance of concrete sleeper fastening systems under non-ideal conditions*, *RailTEC Faculty and Student Papers and Presentations IHHA 2017*, Cape Town, 2017.

- [36] Chen, Z., Andrawes, B.: A mechanistic model of lateral rail head deflection based on fastening system parameters, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 231 (2017) 9, pp. 999-1014, <https://doi.org/10.1177/0954409716642485>.
- [37] Kaewunruen, S., Remennikov, A.: *Dynamic properties of railway track and its components: a state-of-the-art review*, Weiss, BN (ed) *New Research on Acoustics*, Nova Science Publishers, Hauppauge, New York, pp. 197-220, 2008.
- [38] Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gámez, M.C.: The use of elastic elements in railway tracks: A state of the art review, *Constr. Build. Mater.*, 75 (2015), pp. 293-305, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.027>.
- [39] Vossloh Fastening Systems GmbH: *System W 14*, 2019., [www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product\\_11018](http://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_11018)
- [40] CEN:EN 13146-1:2019 *Željeznički sustav - Željeznički gornji ustroj - Metode ispitivanja za kolosiječni pričvrсни pribor - 1. dio: Određivanje otpora uzdužnomu pomicanju tračnice*, 2019.
- [41] Zhang, Z.: *Finite element analysis of railway track under vehicle dynamic impact and longitudinal loads*, Doktorski rad, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.
- [42] Turek, J.: Non-linear Response of the Track, *Veh. Syst. Dyn.*, 24 (1995) 1, pp. 265-279, <https://doi.org/10.1080/00423119508969630>.
- [43] Hasap, A., Noraphaiphaksa, N., Kanchanomai, C.: Influence of malposition on the performance of elastic rail clip: Toe load, stress, and friction, *Structures*, 28 (2020), pp. 2661-2670, <https://doi.org/10.1016/j.ISTRUC.2020.10.073>.
- [44] Lee, D.W., Choi, J.Y., Baik, C.H., Park, Y.G.: Influence of initial clamping force of tension clamp on performance of elastic rail fastening system, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 33 (2013) 3, pp. 1243-1251, <https://doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.3.1243>
- [45] CEN: EN 13146-7 *Željeznički sustav - Željeznički gornji ustroj - Metode ispitivanja za kolosiječni pričvrсни pribor - 7. dio: Određivanje pričvršne sile i otpornosti prema izdizanju*, 2019.
- [46] Sung, D.: *Nonlinear Analysis Method for Serviceability Investigation of Bridge Deck Ends with a Concrete Slab Track*, *Adv. Civ. Eng.*, 2018 (2018), pp. 1-9, <https://doi.org/10.1155/2018/6075686>.
- [47] El-sayed, H.M., Zohny, H.N., Riad, H.S., Fayed, M.N.: A three-dimensional finite element analysis of concrete sleepers and fastening systems subjected to coupling vertical and lateral loads, *Eng. Fail. Anal.*, 122 (2021) 105236, pp. 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105236>.
- [48] Sadeghi, J., Seyedkazemi, M., Khajehdezfuly, A.: Nonlinear simulation of vertical behavior of railway fastening system, *Eng. Struct.*, 209 (2020) 110340, pp. 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110340>.
- [49] Liu, Y.: *Experimental and numerical analysis of nonlinear properties of rail fastening systems*, Doktorski rad, Université Paris-Est, 2015.
- [50] CEN:EN 13146-9 *Željeznički sustav - Željeznički gornji ustroj - Metode ispitivanja za kolosiječni pričvrсни pribor - 9. dio: Određivanje krutosti*, 2020.
- [51] Wang, S.W., Luo, Y.Y., Li, L., Liu, L.: Dynamic Property Analysis of Rubber Absorber in Rail Fastenings of Different Force Condition, *Vibration, Structural Engineering and Measurement II*, 226 (2012), pp. 877-880. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.226-228.877>.
- [52] Luo, Y., Liu, Y., Yin, H.P.: Numerical investigation of nonlinear properties of a rubber absorber in rail fastening systems, *Int. J. Mech. Sci.*, 69 (2013) , pp. 107-113, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.01.034>.
- [53] Boon, J., Kesler, C., Hayes, W.F., Whitten, B.T.: *High Speed Rail Tilt Train Technology: A State of the Art Survey*, United States Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 1992.
- [54] Holder, D.E., Csenge, M.V., Qian, Y., Dersch, M.S., Edwards, J.R., Van Dyk, B.J.: Laboratory investigation of the SKL-style fastening system's lateral load performance under heavy haul freight railroad loads, *Eng. Struct.*, 139 (2017) , pp. 71-80, <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.02.039>.
- [55] CEN: EN 13146-2 *Željeznički sustav - Željeznički gornji ustroj - Ispitne metode za kolosiječni pričvrсни pribor - 2. dio: Određivanje otpora zakretanju tračnice*, 2012.
- [56] Vossloh Fastening Systems GmbH: *Conventional Rail: Innovation for the rail of tomorrow*, [www.vossloh.com](http://www.vossloh.com), 2019.
- [57] Profillidis, V.A.: *Railway Management and Engineering*, 3. ed., Taylor & Francis Group, 2017.
- [58] FIB - The International Federation for Structural Concret: *FIB 37: Precast concrete railway track systems*, 2006., <https://doi.org/doi.org/10.35789/fib.BULL.0037>.
- [59] Vossloh AG: *Products & solutions: Rail fastening systems*, [www.vossloh.com](http://www.vossloh.com) , 2021.
- [60] Kim, S.H., Fang, X.J., Park, Y.C., Sim, H.-B.: Evaluation of Structural Behavior and Fatigue Performance of a KR-Type Rail Clip, *Applied Sciences*, 11 (2021) 24, <https://doi.org/10.3390/app112412074>.
- [61] Tomičić-Torlaković, M. Ranković, S.: *Gornji stroj željeznica*, Beograd: University of Beograd, 1996.
- [62] Esveld, C.: *Geometrisch en constructief ontwerp van wegen en spoorwegen: Part D, Railway Structural Design*, Delft University of Technology, Delft, 2004.
- [63] Chen, Z., Shin, M., Andrawes, B.: Finite element modeling of the fastening systems and the concrete sleepers in North America, *Proceedings of the 2013 International Heavy Haul Association Conference*, New Delhi, India, 2013.
- [64] CEN: EN 13146-4 *Željeznički sustav - Željeznički gornji ustroj - Metode ispitivanja za kolosiječni pričvrсни pribor - 4. dio: Utjecaj ponavljanja opterećenja*, 2020.
- [65] Deshimaru, T., Tamagawa, S., Noguchi, M., Kataoka, H.: Improving the Performance of Rail Fastening System, *Quarterly Report of RTRI*, 59 (2018) 3, [https://doi.org/10.2219/rtrriqr.59.3\\_181](https://doi.org/10.2219/rtrriqr.59.3_181).
- [66] Ferreño, D. et al.: Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system, *Eng. Struct.*, 188 (2019) , pp. 553-563, <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.03.053>.
- [67] Mohammadzadeh, S., Ahadi, S., Keshavarzian, H.: Assessment of fracture reliability analysis of crack growth in spring clip type Vossloh SKL14, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 228 (2014) 5, pp. 460-468, <https://doi.org/10.1177/1748006X14527926>.
- [68] Wang, P., Zhao, C., Lu, J., Yao, L., Ming, X.: Analysis on the Effects of Material Parameters on the Fatigue Performance of Novel Anticorrugation Elastic Rail Clips, *Shock Vib.*, 2020 (2020), pp. 1-11, <https://doi.org/10.1155/2020/5416267>.
- [69] Ovchinnikov, D., Bondarenko, A., Kou, L., Sysyn, M.: Extending service life of rails in the case of a rail head defect, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 2, pp. 119-125, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2860.2019>
- [70] De Man, A.P.: *Dynatrack: A survey of dynamic railway track properties and their quality*, Doktorski rad, Delft University Press, Delft, 2002.

- [71] Thompson, D.J. Verheij, J.W.: The dynamic behaviour of rail fasteners at high frequencies, *Appl. Acoust.*, 52 (1997) 1, pp. 1-17, [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00016-9).
- [72] Vincent, N., Thompson, D.J.: Track Dynamic Behaviour at High Frequencies. Part 2: Experimental Results and Comparisons with Theory, *Veh. Syst. Dyn.*, 24 (1995) 1, pp. 100-114, <https://doi.org/10.1080/00423119508969618>.
- [73] Valikhani, M., Younesian, D.: Application of an optimal wavelet transformation for rail-fastening system identification in different preloads, *Measurement*, 82 (2016), pp. 161-175, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.039>.
- [74] Gao, X., Wang, A., He, Y., Gu, X.: Structural Improvement of the  $\omega$ -Type High-Speed Rail Clip Based on a Study of Its Failure Mechanism, *Shock Vib.*, 2019 (2019) , pp. 1-14, <https://doi.org/10.1155/2019/4127065>.
- [75] Ling, L., Li, W., Shang, H., Xiao, X., Wen, Z., Jin, X.: Experimental and numerical investigation of the effect of rail corrugation on the behaviour of rail fastenings, *Veh. Syst. Dyn.*, 52 (2014) 9, pp. 1211-1231, <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.934844>.
- [76] Oregui, M., Li, Z., Dollevoet, R.: Identification of characteristic frequencies of damaged railway tracks using field hammer test measurements, *Mech. Syst. Signal Process.*, 54-55 (2015) , pp. 224-242, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.08.024>.
- [77] Cheng, Y.C., Kuo, C.M., Lee, C.K., Xie, M.S.: Optimization design of rail clip in Vossloh fastening system by uniform design and grey relation analysis, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 235 (2021) 21, pp. 5639-5652, <https://doi.org/10.1177/0954406221995529>.
- [78] Lakušić, S., Bartoš, D., Bajić, G. A.: Experimental and numerical analysis of the rail fastening spring clips types SKL1-SKL12, 22<sup>nd</sup> DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, Parma, University of Parma, pp. 248-249, 2005.
- [79] Lakušić, S., Bartoš, D.: Numerical analysis of rail fastening spring clips, *European Modelling Symposium*, 2006.
- [80] Todorov, G., Kamberov, K., Pantaleev, T., Koprarev, N.: Elastic rail clip design development, based on virtual prototyping, *The 10<sup>th</sup> International Symposium Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering*, 393 (2018) 12120, Novi Sad, Serbia, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/393/1/012120>.
- [81] Gao, X., Wang, A., Liu, L., He, Y., Ju, L.: Analysis of failure mechanism of W1-type fastening clip in high speed railway and structure study of damping composite, *Eng. Fail. Anal.*, 118 (2020) 104848, pp. 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104848>.
- [82] Santer, T.J., Williams, B.J., Notz, W.I.: *The Design and Analysis of Computer Experiments*, 2<sup>nd</sup> Ed., Springer Science+Business Media, LLC, New York, USA, 2018., <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8847-1>.
- [83] Song, X.L., Qian, Y., Wang, K., Liu, P.: Effect of Rail Pad Stiffness on Vehicle-Track Dynamic Interaction Excited by Rail Corrugation in Metro, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2674 (2020), pp. 1-18, <https://doi.org/10.1177/0361198120918584>.
- [84] Bizarria do Carmo, T.: *Multifaceted Approach for the Analysis of Rail Pad Assembly Response*, Diplomski rad, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.
- [85] Chen, Z., Shin, M., Wei, S., Andrawes, B., Kuchma, D.A.: Finite element modeling and validation of the fastening systems and concrete sleepers used in North America, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F J. Rail Rapid Transit*, 228 (2014) 6, pp. 590-602.
- [86] Hasap, A., Paitekul, P., Noraphaiphaksa, N., Kanchanomai, C.: Influence of toe load on the fatigue resistance of elastic rail clips, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F J. Rail Rapid Transit*, 232 (2018) 4, pp. 1078-1087, <https://doi.org/10.1177/0954409717707834>.
- [87] Liu, Z., Tsang, K.S., Liu, Y., Pang, J.H.L.: Finite element and experimental study on multiaxial fatigue analysis of rail clip failures, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 43 (2020) 10, pp. 2390-2401, <https://doi.org/10.1111/ffe.13310>.
- [88] Cho, J.G., Kim, J.W., Koo, J.S.: A Study on Fatigue Strength Improvement for Tension Clamp of Railway Using Work Hardening, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 491 (2019) 12028, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/491/1/012028>.
- [89] Liu, Y., Li, Q., Jiang, X., Liu, H., Yuan, X., Zhu, Z.: The Effect of Material Static Mechanical Properties on the Fatigue Crack Initiation Life of Rail Fastening Clips, *Adv. Civ. Eng.*, 2021 (2021) 1366007, pp.1-14, <https://doi.org/10.1155/2021/1366007>.
- [90] CEN: EN 10089 Hot rolled steels for quenched and tempered springs - Technical delivery conditions, 2003
- [91] Dvornik, J., Lazarević, D.: Manjkavost proračunskih modela inženjerskih konstrukcija, *GRAĐEVINAR*, 57 (2005) 4, pp. 227-236.