



dr. sc. **Milivoj Mandić**,
dipl. ing. el.

INFRACERT d.o.o.,
m.mandic@infracert.hr



Milan Brkić, dipl. ing. el.

Rail Net d.o.o.,
milan.brkic@rail-net.eu

OČEKIVANI UČINCI ELEKTRIFIKACIJE PRUGA PREMA SREDNJODALMATINSKIM LUKAMA

U stručnome radu analiziraju se očekivani učinci moguće elektrifikacije pruga koje povezuju Split, Šibenik i Zadar u pogledu troškova vuče vlakova. Elektrifikacijom tih pruga od međunarodnog značaja mogao bi se znatno unaprijediti željeznički prijevoz, a znatno jeftinijom vučom postao bi konkurentnim i omogućio povećanje opsega pretovara u srednjodalmatinskim lukama. Time bi se obogatila ukupna ponuda lučkih kapaciteta Republike Hrvatske.

UDK: 629.42+625.1

1. Uvod

Željezničku mrežu u Republici Hrvatskoj čine pruge normalnoga kolosijeka (1435 mm) ukupne duljine 2617 km, od kojih je 276 km dvokolosiječnih [1].

Elektrificirano je ukupno 1013 km pruga. Pruge su kategorizirane na međunarodne glavne i međunarodne ostale pruge, regionalne pruge te lokalne pruge, a kao što je to vidljivo na slici 1. Međunarodne pruge prema srednjodalmatinskim lukama Splitu, Zadru i Šibeniku nisu elektrificirane jer je željeznički prijevoz za potrebe tih luka preskup i koristi se za prijevoz određenih roba kao što su žitarice, staro željezo ili građevni materijal.

Nakon Domovinskog rata i revitalizacije ličke pruge (Oštarije – Knin) ukupan željeznički prijevoz između Dalmacije i unutrašnjosti teče tom prugom. Kratkotrajno je za teretni prijevoz u uporabi bila i unaska pruga između Bosanskog Novog i Knina, no ona nije u funkciji.

Od 1. srpnja 2013. u Hrvatskoj je tržište željezničkih usluga liberalizirano, što je dovelo do povećane potražnje za željezničkim prijevozom jer su članstvom u EU-u uklonjene carinske barijere, a Hrvatska, kao pomorska zemlja, ima znatan lučki potencijal te kroz nju prolaze europski prometni koridori u koje su odnedavno uključene i pruge prema srednjoj Dalmaciji. Naime, krajem 2023. postignut je dogovor Europskog parlamenta i Vijeća o izmjenama TEN-T ured-

be (Uredbe o Transeuropskoj prometnoj mreži), čime je Republika Hrvatska, uz već postojeća dva prometna koridora (Mediterranski koridor i koridor Rajna – Dunav), dodatno pozicionirana na još dva koridora, i to na Baltičko more – Jadransko more te Zapadni Balkan – istočni Mediteran. Time se otvara mogućnost EU-ova sufinanciranja i onih dijelova Hrvatske koji do sada nisu bili prepoznati u Uredbi poput željezničke infrastrukture do Splita. [2]

2. Postojeći modeli vuče

Vuču teretnih vlakova na relaciji Oštarije – Knin te na relacijama Knin – Split, Knin – Zadar i Perković – Šibenik obavlja uglavnom HŽ Cargo, i to dizelskim lokomotivama serije 2 062 koje su prije više od 50 godina nabavljene za potrebe ŽTP-a Zagreb, namjenski za ličku prugu te za još neke pruge osovinskog pritiska do 18 t. U to vrijeme lička pruga bila je od sporedne važnosti.



Slika 1. Karta željezničke mreže RH

Izvor: https://www.hzinfra.hr/wp-content/uploads/2025/01/10M_2024_karta-mreze.pdf

Treba istaknuti da je za vuču vlakova važan mjerodavni otpor pruge, koji se utvrđuje tako da se otpor na usponu uvećava za otpore zavoja i tunela koji djeluju na vlak tijekom prometovanja. Mjerodavni otpor pruge i mjerodavni nagib iskazuju se tablično za svaki smjer posebno. Pri tom se kao mjerodavni nagib neke pružne dionice uzima pretežno najveći uzdužni nagib (bilo uspon bilo pad) na tome pružnom odsjeku duljine 1000 metara ili dulji. Najteža pružna dionica prema Dalmaciji jest dionica Knin – Split, s najvećim nagibom od 25 promila u oba smjera.

Tablica 1. Najviše vrijednosti mjerodavnih otpora pruga

Naziv pruge	Mjerodavni otpor pruge [daN/t] Smjer A-B / B-A
M604 Oštarije – Knin – Split	29/29
M605 Ogulin – Krpelj	1/3
M606 Knin – Zadar	9/10
M607 Perković – Šibenik	11/25

Kod dizelske vuče snaga za vuču ovisi o snazi dizelskog motora koja pak ovisi o stanju motora. Stanje motora mijenja se tijekom eksploatacijskog ciklusa zbog habanja sklopova snage i drugih dijelova motora. Zbog raspoloživog smještaja za ugradnju motora i prijenosnika snage dizelske lokomotive rijetko prelaze snagu od 500 kW po pogonskoj osovini, dok kod modernih električnih lokomotiva snaga za vuču dostiže i više od 1,5 MW po pogonskoj osovini. Zato je na najtežoj pružnoj dionici Solin – Labin Dalmatinski jednom šesteroosovinskom dizelskom lokomotivom serije HR 2062 moguće vući vlak bruto mase od 540 brt, eventualno 620 brt snažnijom i težom lokomotivom serije HR 2063, brzinom između 20 i 30 km/h.

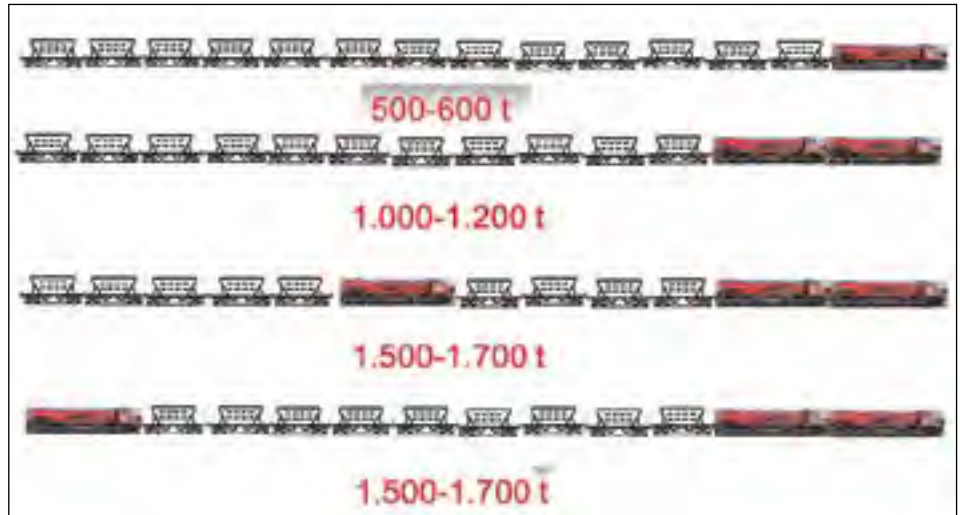
Modernija četveroosovinska dizel-električna lokomotiva ER20 na istoj bi dionici mogla vući vlak od 500 brt brzinom od 30 km/h.

3. Troškovi dizelske vuče

Općenito, ukupne troškove vlaka T_o čine troškovi korištenja lokomotive, vagona, infrastrukture, pogonske energije, manevriranja, osoblja i nadgradnje, što se može prikazati jednostavnom jednadžbom:

$$T_o = T_{l+} + T_{v+} + T_{t+} + T_{m+} + T_{io+} + T_{oh}$$

gdje su:



Slika 2. Postojeći vučni modeli na prugama prema Dalmaciji

- T_{l+} – trošak korištenja lokomotive (koji se dobiva množenjem jedinične cijene izražene u lok-km i duljine vučne dionice na kojoj se lokomotiva koristi za vuču tog vlaka, uključujući prazne vožnje lokomotive u svrhu vuče tog vlaka)
- T_{v+} – trošak korištenja vagona (koji se dobiva množenjem jedinične cijene po vag-km i ukupne duljine dionice na kojoj se vagon koristi, uključujući prazne povratne vožnje)
- T_{t+} – trošak pristupa infrastrukturi (uključuje trošak korištenja trase, pristojbe HAKOM-u i pristupa uslužnim objektima)
- T_{m+} – trošak manevriranja, pripreme i rasformiranja vlaka (po jediničnim cijenama iz IOM-a)
- T_{io+} – trošak izvršnog osoblja prema ostvarenim norma satima (strojno osoblje, pregledači vagona i manevristi)
- T_{oh} – trošak nadgradnje, koji se obično računa u postotnome iznosu zbroja prethodno navedenih troškova i nadodaje se prethodno navedenim troškovima radi određivanja ukupnih produkcijskih troškova vlaka.

naravno predstavlja izazov za svakog prijevoznika. Realno sagledavanje svih troškova osnovni je preduvjet za uspješno nadmetanje u pružanju usluga željezničkog prijevoza.

3.1. Usporedba troškova uporabe dizelskih i električnih lokomotiva

Usporedbu troškova korištenja lokomotiva uobičajeno je svoditi na trošak po lokomotivskome kilometru (lok-km). U produkcijskome smislu lokomotivski kilometri predstavljaju komercijalne vlak-kilometre uvećane za strojne vožnje lokomotiva i vuču podijeljenih vlakova na određenim dionicama. Radi se o uvećanju od dvadesetak posto. Trošak korištenja lokomotive uključuje nabavnu cijenu (amortizaciju) i održavanje. S obzirom na to da se dizelske lokomotive ne proizvode u većim serijama, njihova je nabavna cijena relativno visoka. Realno je pretpostaviti da nabavna cijena nove dizelske lokomotive za vuču na otvorenoj pruži odgovara cijeni nabave električne lokomotive iste mase odnosno vrijednosti od približno milijun eura po pogonskoj osovini.

Iako se radi o naoko jednostavnoj jednadžbi, utvrđivanje pojedinog segmenta troška ovisi o raznim parametrima, što

Iz prethodno navedenog može se zaključiti da bi realni trošak korištenja četveroosovinske električne lokomotive iznosio

Tablica 2. Procijenjeni troškovi korištenja dizelskih i električnih lokomotiva

	Nabavna vrijednost nove lokomotive	Mjesečna kilometraža	Amortizacija po km	Održavanje po km	Trošak korištenja po km
4-osovinska el. lok.	4 000 000	15 000	1,11	1,50	2,61
4-osovinska dizel. lok.	4 000 000	12 000	1,39	5,00	6,39

2,61 eura po lokomotivskome kilometru, dok bi za četveroosovinsku dizelsku lokomotivu iznosio 6,39 eura po lokomotivskome kilometru.

Pod pretpostavkom da se na ličkoj pruzi dizelskom vučom vuče šest pari teretnih vlakova na dan, dvjema lokomotivama ostvarilo bi se 2 628 000 lokomotivskih kilometara. Za takvu lokomotivsku vuču korištenje električnih lokomotiva umjesto dizelskih donosilo bi uštedu od 9,93 mil. eura na godinu.

3.2. Usporedba troškova pogonske energije

Utrošak energije za vuču vlaka uglavnom ovisi o masi vlaka. Za usporedbu troškova pogonske energije za dizelsku i električnu vuču na ličkoj pruzi uzima se u obzir to da se vučom šest pari teretnih vlakova pojedinačne bruto mase 1300 t na udaljenosti od 300 km ostvaruje 1708 200 kbrtkm.

Prema analitičkim podacima iz razdoblja intenzivnijeg opsega prometa, prosječna specifična potrošnja dizelskoga goriva za vuču na ličkoj pruzi iznosi 10 l/kbrtkm. Trošak električne energije prema Izjvešću o mreži za 2025. godinu za brdske pruge obračunava se prema prosječnoj potrošnji u iznosu od 37,5 kWh/kbrtkm. Na temelju tablice 3. može se zaključiti da bi godišnja ušteda u troškovima pogonske energije na bazi šest pari teretnih vlakova iznosila 15.672.735 eura.

Zato je realno procijeniti ukupne uštede na troškovima vuče vlakova supstitucijom dizelske vuče od 25 milijuna eura na godišnjoj razini. Pod pretpostavkom

Tablica 3. Usporedba troškova dizelske i električne vuče na ličkoj pruzi i na dalmatinskim prugama na bazi šest pari vlakova bruto mase 1300 t

	Prosječna potrošnja po kbrtkm	Jedinična cijena [€]	Ukupni trošak na bazi 1708 200 kbrtkm na godinu [€]
Dizelsko gorivo	10 l	1,18	20.156.760
Električna energija	37,5 kWh	0,07	4.484.025

Izvor: [3]

da bi sama elektrifikacija postojeće pruge koštala oko milijun eura po kilometru, već pokazatelj uštede od 25 milijuna eura na godinu opravdava investiciju u elektrifikaciju pruga prema srednjodalmatinskim lukama.

Ovdje se ne analiziraju drugi benefiti koje donosi električna vuča umjesto postojeće dizelske vuče, a to su:

- smanjenje emisije CO₂
- niža razina buke
- mogućnost povrata električne energije tijekom regenerativnoga kočenja
- veća produktivnost zbog mogućeg povećanja mase vlakova i veće brzine prometovanja.

Dakle, investicije u elektrifikaciju 420 kilometra ličke pruge i dalmatinskih pruga mogle bi se pokriti uštedama u primjeni električne vuče u periodu od 17 godina.

4. Elektrifikacija postojećih pruga bez promjena profila

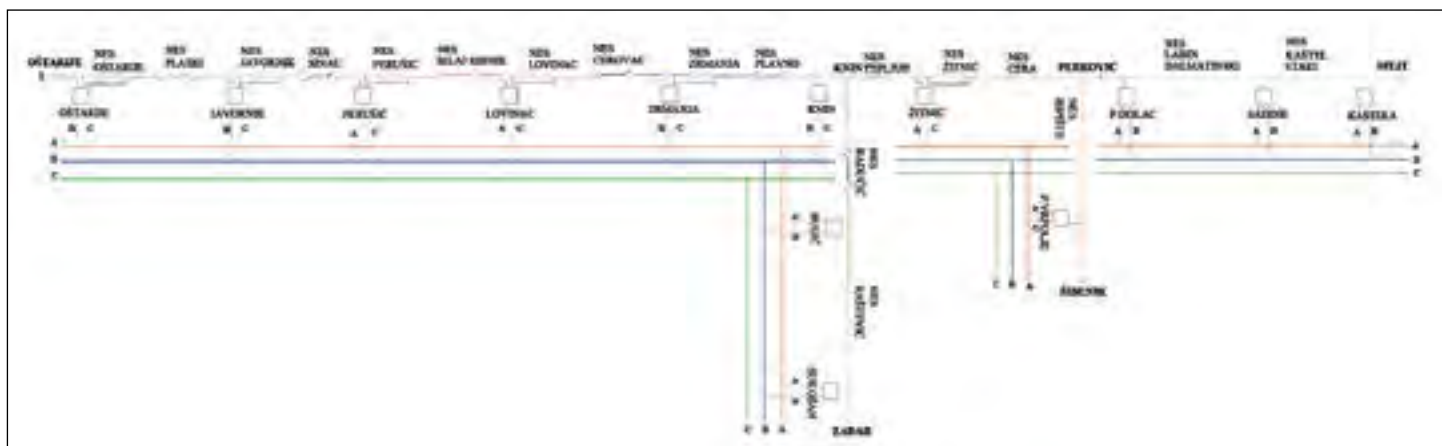
Elektrifikacija pruga Oštarije – Knin – Split, Knin – Zadar i Perković – Šibenik imala bi znatan utjecaj na električne prilike u prijenosnoj mreži zapadnog i južnog dijela Hrvatske [4].

Elektrovučne podstanice (EVP) izmjeničnog sustava napajanja 1 x 25 kV koje se na prijenosnu mrežu elektroenergetskog sustava priključuju preko transformatora 110/25 kV na dvije faze za trofazni sustav predstavljaju nesimetrično opterećenje.

Predviđena shema napajanja EVP-a na navedenim prugama prikazana je na slici 3.

Prije priključivanja novih EVP-ova trebalo bi provesti analize njihova utjecaja na strujne i naponske prilike u prijenosnoj mreži EES-a.

Za potrebe dimenzioniranja rasklopne opreme u elektroenergetskim i elektrovučnim postrojenjima planiranih EVP-ova provedeni su i proračuni trolonoga kratkog spoja u prijenosnoj mreži EES-a Hrvatske za nazivnu 2010. Rezultat tog proračuna jesu maksimalne struje i snage trolonoga kratkog spoja na 110-kilovoltnim sabirnicama transformatorskih stanica EES-a na koje su priključeni navedeni EVP-ovi, što je osnova za određivanje struja kratkog spoja u kontaknoj mreži.



Izvor: [3]

Slika 3. Priključak EVP-a na različite faze trofaznog sustava uz uvažavanje postojećih priključaka EVP-ova Oštarije i Knin na faze B i C

5. Vučni modeli nakon elektrifikacije pruga

Nakon elektrifikacije ličke pruge i dalmatinskih pruga vuču bi preuzele četveroosovinske električne lokomotive snage 6 MW koje bi vukle vlakove mase od 700 do 810 bruto tona brzinom od 70 km/h na najvećim nagibima. Ako bi se za vuču vlakova koristile šesteroosovinske lokomotive snage 9 MW, na najtežoj dionici vlak mase 1100 t mogao bi voziti brzinom od 60 km/h.

Specifična potrošnja električne energije za vuču vlakova definirana je kao količina energije izražene u Wh za izvršeni jedinični rad električne vuče izražen u brttkm ili Wh/brttkm.

Specifična potrošnja električne energije proizlazi iz analize električnih opterećenja po EVP-ovima 110/27,5 kV koja je provedena na temelju podloga iz prometno-tehnološkog projekta [5].

Analiza se temelji na grafičkome prikazu prometa vlakova za period od dva najopterećenija sata tijekom dana po pružnim dionicama koje pripadaju području napajanja pojedinog EVP-a 110/27,5 kV.

Specifična potrošnja električne energije izračunava se na temelju podataka o potrošenoj energiji za vrijeme maksimalnoga voznog reda pojedinog EVP-a i izračuna izvršenog rada. Dobiveni podaci prikazani su za svaki EVP 110/27,5 kV u tablici 2.

Iz prethodne tablice vidljivo je da je specifična potrošnja najniža na zadarskoj pruzi, koja je pretežno ravničarska, a najveća na EVP-u Javornik, koji napaja najdulju brdsku dionicu preko planine Kapele.

6. Alternativna rješenja

Električne lokomotive s dodatnim dizelskim agregatom kao rješenje za dizelsku vuču na većim udaljenostima u teoriji dolazi u obzir i na prugama na kojima su najteže dionice jednokolosiječne i neelektrificirane. Međutim, upotreba takvih lokomotiva neisplativa je zbog visoke nabavne cijene novih lokomotiva i povećane mase koje te lokomotive imaju zbog dodatnoga dizelskog agregata.

Pogoni na vodik za sada nisu našli primjenu u vuči teških vlakova zbog malog akcijskog radijusa te potrebe za dodatnom masom radi uskladištenja energije

na samome vozilu. Pod pretpostavkom da se za vuču koristi električna lokomotiva, u vlaku treba osigurati prostor za skladištenje vodika, gorive ćelije i pretvorbu električne energije. Takva struktura pogonskog dijela vlaka imala bi znatnu masu, što pri vuči na dionicama s velikim nagibom znatno utječe na troškove vuče vlaka. Osim toga potrebno je sagraditi infrastrukturu za proizvodnju i punjenje vodikom, što također zahtijeva znatna investicijska ulaganja.

7. Zaključak

Od strateškog je značaja za RH osigurati pouzdan i ekonomski prihvatljiv željeznički prijevoz između srednjodalmatinskih luka i unutrašnjosti. To je moguće ostvariti elektrifikacijom postojećih pruga ili gradnjom potpuno novih pružnih dionica. Uzimajući u obzir velike iznose potrebne za investicije u gradnju novih pruga i vrlo duge rokove izgradnje, propituje se održivost poslovanja srednjodalmatinskih luka. Kao kratkoročno rješenje prednost bi imala elektrifikacija pruge, čime bi se omogućila supstitucija dizelske vuče električnom. Investicija u elektrifikaciju pruga po postojećim trasama isplatila bi se u periodu znatno kraćem od 20 godina.

Tablica 4. Podaci iz proračuna potrošnje električne energije za pojedini EVP

EVP	Energija za vuču tijekom 2 h (MWh)	Izvršeni rad el. vuče (kbrttkm)	Duljina podstaničnog sektora (km)	Specifična potrošnja el. energije (Wh/brttkm)
OŠTARIJE	11,60	338,767	59,12	34,24
JAVORNIK	12,10	266,622	46,65	46,65
PERUŠIĆ	10,58	266,436	49,50	39,71
LOVINAC	6,90	261,868	45,75	26,35
ZRMANJA	12,60	338,345	37,45	37,24
KNIN	6,00	182,395	54,09	32,90
ŽITNIĆ	9,68	271,992	29,00	35,59
PR. DOLAC	4,30	150,103	26,03	28,64
SADINE	2,60	57,928	14,41	44,88
KAŠTELA	1,83	46,454	15,873	39,39
PR. VRPOLJE	3,07	90,922	20,402	33,76
BULIĆI	2,81	160,193	47,80	17,54
SUKOŠAN	2,41	100,233	31,50	24,04
PROSJEK RELACIJE OŠTARIJE – SPLIT (ŠIBENIK)	74,270	2067,345	Duljina pružne dionice 346,87 km	35,92
PROSJEK RELACIJE OŠTARIJE – KNIN	49,904	1362,222	Duljina pružne dionice 223,63 km	36,63
PROSJEK RELACIJE KNIN – SPLIT (ŠIBENIK)	24,366	705,123	Duljina pružne dionice 123,24 km	34,55
PROSJEK PRUGE KNIN – ZADAR	5,507	269,146	Duljina pružne dionice 94,86 km	20,46

Izvor: [3]

LITERATURA

- [1] HŽ INFRASTRUKTURA: 2025 Izvješće o mreži
- [2] https://transport.ec.europa.eu/document/download/41528897-a27b-4768-ab61-c98df2681f41_en?filename=Annex3_alignment_EuropeanTransportCorridors.pdf
- [3] Fakultet elektrotehnike i računarstva: Analiza izbora i način priključka na 110 kV elektroprivrednu mrežu elektrovučnih podstanica 110/25 kV, elaborat, Zagreb, siječanj 2007.

SAŽETAK

OČEKIVANI UČINCI ELEKTRIFIKACIJE PRUGA PREMA SREDNJO DALMATIN- SKIM LUKAMA

Elektrifikacijom pruga koje povezuju Split, Šibenik i Zadar s unutrašnjosti postižu se učinci u smanjenju troškova vuče, a time i troškova željezničkog prijevoza. Najveća ušteda ostvaruje se smanjivanjem troškova uporabe lokomotiva i pogonske energije. Osim ušteda u troškovima vuče elektrifikacijom se postižu drugi pozitivni učinci koje tek treba valorizirati.

Ključne riječi: elektrifikacija pruge, vuča vlakova, troškovi vuče vlakova

Kategorizacija: stručni rad

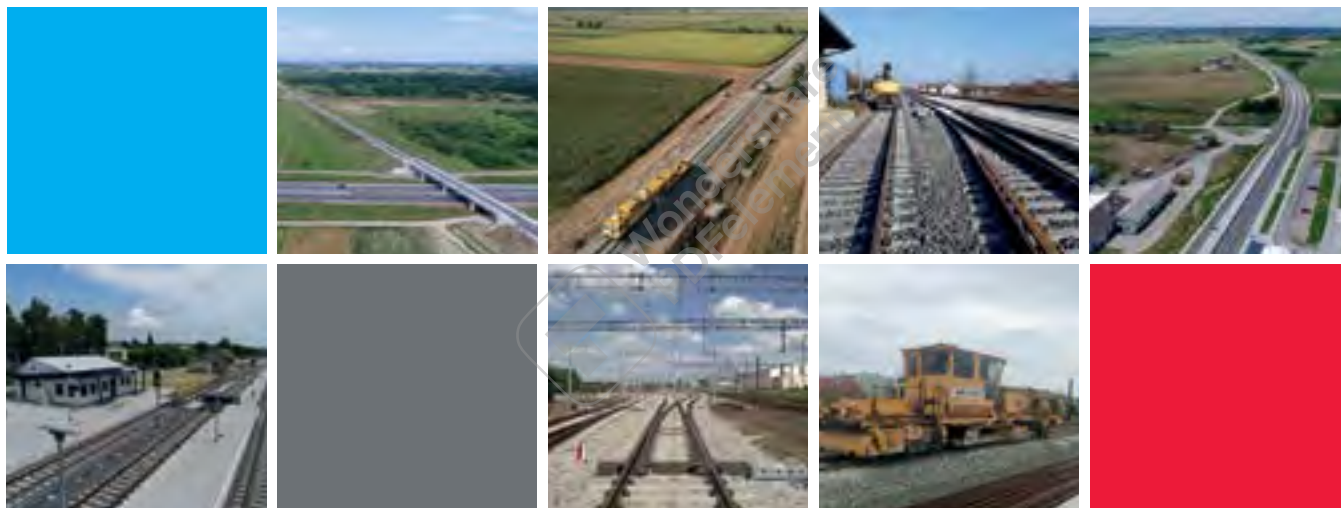
SUMMARY

EXPECTED EFFECTS OF ELECTRIFYING THE LINES TOWARDS THE CENTRAL DALMATIAN PORTS

The electrification of the lines connecting Split, Šibenik and Zadar with the interior will achieve effects in reducing the costs of traction, time and rail transport. The greatest savings are achieved by reducing the costs of using locomotives and motive power. In addition to reducing traction costs, electrification has other positive effects that have yet to be evaluated.

Key words: electrification of the line, train traction, train traction costs

Categorization: professional paper



U službi najboljih infrastruktura u Hrvatskoj


COMSA
CORPORACIÓN

Gradimo održivu
budućnost

Brazil | Danska | Hrvatska | Kolumbija | Letonija | Litva | Meksiko
Peru | Portugal | Španjolska | Švedska | Urugvaj

www.comsa.com