

# Analiza veličina koje određuju učinkovitost kočenja vlaka

---

**Sudar, Stjepan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:589922>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-22**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI  
ZAGREB**

**Stjepan Sudar**

**ANALIZA VELIČINA KOJE ODREĐUJU  
UČINKOVITOST KOČENJA VLAKA**

**ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, rujan 2018.

Zagreb, 30. ožujka 2018.

Zavod: **Zavod za željeznički promet**  
Predmet: **Vuča vlakova**

## **ZAVRŠNI ZADATAK br. 4790**

Pristupnik: **Stjepan Sudar (0135241546)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Željeznički promet**

Zadatak: **Analiza veličina koje određuju učinkovitost kočenja vlaka**

Opis zadatka:

U radu je potrebno objasniti snagu i vučnu silu potrebnu za kretanje vlaka te otpore kretanja vlaka. Osim toga, potrebno je obraditi vrste kočenja i zaustavni put vlaka. Posebno će se analizirati veličine koje utječu na učinkovitost kočenja vlaka.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

izv. prof. dr. sc. Mladen Nikšić

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
**ZAGREB**

**ANALIZA VELIČINA KOJE ODREĐUJU**  
**UČINKOVITOST KOČENJA VLAKA**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mladen Nikšić

Student: Stjepan Sudar

JMBAG: 0135233308

Zagreb, rujan 2018.

## Sadržaj:

1. UVOD .....	1
2. VRSTE OTPORA KRETANJA VLAKA.....	2
2.1. Otpor u ravnini .....	2
2.2. Otpor na usponu .....	3
2.3. Otpor u zavoju .....	4
2.4. Otpor ubrzanja.....	6
2.5. Dodatni otpori .....	8
2.5.1. Otpor pokretanja.....	9
2.5.2. Otpor u tunelu.....	9
2.5.3. Otpor vjetra .....	10
3. METODOLOGIJA IZRAČUNA OTPORA VLAKA U ZAVOJU U OVISNOSTI OD MASE I BRZINE .....	11
3.1. Osnovni podaci eksperimenta .....	12
3.1.1. Šest-osovinski model lokomotive .....	12
3.1.2. Četiri osovinski FALNS 121 model teretnih vagona .....	12
3.1.3. Eksperimentalna staza s promjenjivim nagibom $\alpha$ .....	12
3.1.4. Horizontalna ravna eksperimentalna staza .....	12
3.1.5. Horizontalna zakrivljena eksperimentalna staza .....	12
3.2. Cilj eksperimenta.....	13
3.3. Mjerna oprema i uređaji .....	13
3.4. Određivanje konstantnog otpora .....	13
3.5. Određivanje pogonske sile na ravnoj stazi .....	14
3.6. Određivanje otpora u zavoju .....	15
4. VUČNA SILA I SNAGA VUČNOG VOZILA.....	16
4.1. Snaga vučnog vozila.....	16
4.2. Vučna sila lokomotive.....	17

5. VRSTE KOČENJA .....	19
5.1. Neizravne kočnice .....	19
5.2. Izravne kočnice .....	20
5.3. Ostale vrste kočnica .....	20
6. KOČENJE .....	21
6.1. Kočna masa .....	21
6.1.1. Određivanje kočne mase putničkih kočnica .....	21
6.1.2. Određivanje kočne mase teretnih kočnica .....	21
6.2. Zaustavni put .....	22
7. LOKOMOTIVA SIMENS ES64U4.....	24
7.1. Proračun otpora vožnje lokomotive Siemens ES64U4 za vuču teretnih vagona (brzina do 120 km/h) .....	25
7.2. Proračun otpora vožnje teretnih vagona mase 2000 t (brzina do 120 km/h).....	26
7.3. Proračun otpora vožnje lokomotive Siemens ES64U4 za vuču putničkih vagona (brzina do 230 km/h) .....	27
7.4. Proračun otpora vožnje putničkih vagona mase 400 t (brzina do 230 km/h).....	28
7.5. Proračun snage lokomotive .....	29
8. ZAKLJUČAK .....	30
9. LITERATURA .....	31
10. POPIS SLIKA .....	32
11. POPIS TABLICA.....	32

# ANALIZA VELIČINA KOJE ODREĐUJU UČINKOVITOST KOČENJA VLAKA

## SAŽETAK

U ovome radu su opisani temeljni otpori koji se pojavljuju prilikom kretanja vlaka po pruzi. Analiziran je svaki otpor zasebno, te snaga lokomotive potrebna da savlada te otpore, te vrste kočenja zajedno s kočnom masom i zaustavnim putom. Provedena je specifična analiza za izračun otpora vlaka u zavoju koristeći umanjeni model vlaka u omjeru 1:87, te posebni izračuni otpora za lokomotivu Siemens ES64U4 gdje su izračunati otpori vožnje u ravnini, na usponu, u zavoju, te otpori ubrzanja lokomotive.

# 1. UVOD

Željeznički promet je vrlo kompliciran sustav čija je glavna uloga prijevoz putnika i robe na najefikasniji i najekonomičniji mogući način. Budući da otpori vožnje uz ostale bitne čimbenike kao što su snaga vučnog vozila i kočenje imaju bitnu ulogu prilikom odabira vučnog vozila s veličinom kočenja koja je potrebna za prijevoz tereta odnosno putnika na toj dionici, moraju se izračunati otpori kretanja odabranog vlaka te je zatim potrebno na temelju dobivenih podataka izračunati i vrijeme vožnje vlaka, kako bi unatoč tome dobili vozni red za planiranu godinu.

Cilj ovog rada je analizirati sve veličine koji utječu na kočenost vlaka. Na temelju provedenih analiza i na dobivenim podacima prikazan je izračun otpora lokomotive Siemens ES64U4 pri najvećoj brzini na ravnoj horizontalnoj pruzi, te njezine snage. I izračun otpora u zavoju vlaka u ovisnosti mase i brzine.

Završni rad sastoji se od osam poglavlja:

1. Uvod
2. Vrste otpora kretanja vlaka
3. Metodologija izračuna otpora vlaka u zavoju u ovisnosti od mase i brzine
4. Vučna sila i snaga vučnog vozila
5. Vrste kočenja
6. Kočenje
7. Lokomotiva Siemens ES64U4
8. Zaključak

U drugom poglavlju izrađena je analiza svih otpora koji se pojavljuju prilikom kretanja vlaka. U trećem poglavlju prikazana je metodologija izračuna otpora vlaka u zavoju koja se provodi na umanjenom modelu vlaka u omjeru 1:87. U četvrtom poglavlju objašnjena je snaga vučnog vozila kao i vučna sila potrebna za savladavanje prethodno analiziranih otpora. U petom i šestom poglavlju objašnjene su vrste kočenja (neizravne, izravne i ostale vrste kočenja), te kočna masa i zaustavni put. U sedmom poglavlju prikazani su različiti proračuni lokomotive Siemens ES64U4 za otpore vožnje u ravnini, na usponu, u zavoju, te otpore ubrzanja lokomotive.



## 2. VRSTE OTPORA KRETANJA VLAKA

Otpori kretanja vlaka, odnosno otpori vožnje sastoje se od otpora vožnje vučnog vozila i otpora vožnje vučenog vozila. Obje vrste otpora, prilikom vožnje vlaka mora savladati vučna sila lokomotive.

Otpori vožnje mogu biti sljedeći:

- $W_h$  – otpori u ravnini, odnosno stalni otpori
- $W_i$  – otpori na usponu
- $W_r$  – otpori u zavoju
- $W_a$  – otpori ubrzanja (akceleracije)

Ukupni otpor kretanju vlaka jednak je zbroju pojedinih otpora, koji se pri vožnji vlaka istodobno pojavljuju:

$$W = W_h + W_i + W_r + W_a \text{ [N]}.$$

Pojedini otpori mogu se izraziti i kao specifični otpori, ukoliko se svedu na jedinicu mase vozila ili vlaka. Označi li se masa vlaka s  $m$  [kg], specifični otpor glasi:

$$w = \frac{W}{m} \text{ [N/kg]}$$

Mjerna jedinica za specifični otpor [daN/t], usvojena je od strane Međunarodnog saveza željeznica UIC. Međusobni odnos ovih jedinica jest [1]:

$$1 \text{ [N/kg]} = 100 \text{ [daN/kg]}$$

### 2.1. Otpor u ravnini

Otpori u ravnini nazivaju se još i stalnim otporima, a pojavljuju se uvijek pri kretanju vlaka. To su otpori koji nastaju prilikom kretanja vlaka ustaljenom brzinom na ravnoj i horizontalnoj pruzi.

Otpore u ravnini čine:

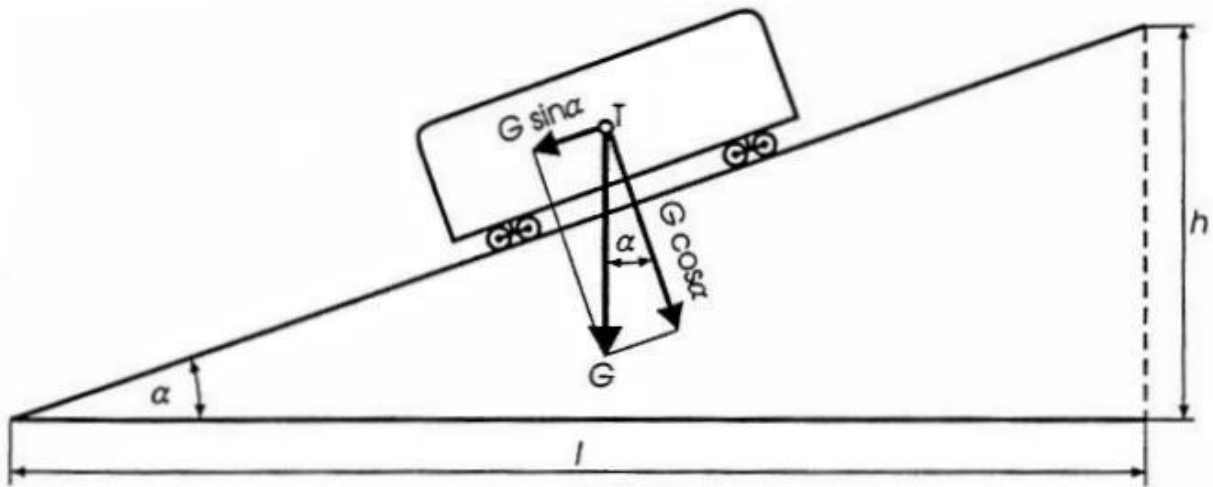
- $W_k$  – otpori kotrljanja
- $W_l$  – otpori u ležajevima kolnih slogova
- $W_p$  – otpori parazitskih kretanja
- $W_z$  – otpori zraka[1]

## 2.2. Otpor na usponu

Ukoliko se vozilo nalazi na usponu čiji je nagib pod nekim kutom  $\alpha$ , na njega će djelovati sila paralelna s prugom koja je komponenta težine vozila, a predstavlja otpor na usponu.

$$W_i = \pm G \sin \alpha$$

Taj otpor mora savladati odgovarajuća vučna sila kako bi se vozilo moglo kretati uz navedeni uspon. U slučaju kretanja niz uspon, otpor ima negativan predznak i djeluje kao vučna sila.



Slika 1. Komponente težine vozila na usponu

Izvor: Zavada, Josip: Željeznička vozila i vuča vlakova, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 2004.

Prilikom malih kutova uspona, kakvi se susreću na adhezijskim prugama, može se uzeti vrijednost  $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ .

Ako se na duljini  $l$  pruga uzdigne za visinu  $h$ , vrijedi:

$$\tan \alpha = \frac{h}{l}$$

Iz navedenog dobivamo vrijednost uspona:

$$i = \frac{h}{l} \cdot 1000 [\text{‰}]$$

Prema navedenom za otpor na usponu vrijedi:

$$W_i = \pm G \cdot \frac{i}{1000}$$

Ukoliko svedemo taj otpor na jedinicu mase vozila odnosno vlaka, dobit će se specifični otpor na usponu:

$$w_i = \pm \frac{W_i}{m} = \pm \frac{G \cdot \frac{i}{1000}}{\frac{G}{9,81}} \approx \pm \frac{i}{100} [N/kg]$$

Odnosno:

$$w_i = \pm i [daN/t]$$

Granični uspon na adhezijskim prugama obično ne premašuje 60 [%], što predstavlja kut uspona  $\alpha = 3,4^\circ$ . Otpor na usponu u velikoj mjeri utječe na ukupne otpore vožnje, a budući da je on upravo proporcionalan težini vozila, preporučljivo je na brdskim prugama koristiti vozila lakše konstrukcije, kako bi taj otpor bio što manji [1].

### 2.3. Otpor u zavoju

Konstruktivne značajke željezničkih vozila bitno utječu na otpor u zavoju. Uzrok pojave otpora vožnje u zavoju su čvrsto navučeni kotači istog promjera na osovini. Osovinski sklopovi su međusobno paralelni na vozilu ili u okretnom postolju.

Otpore u zavoju stvaraju:

- trenje između oboda kotača i tračnica zbog klizanja, kao i posljedica različitih duljina putova koje trebaju prijeći kotači na istom kolnom slogu
- trenje zbog poprečnog klizanja kotača prilikom zakretanja vozila
- trenje između vijenca kotača i tračnice zbog prisilnog skretanja vozila, kao i zbog centrifugalne sile koja djeluje na vozilo u zavoju.

Klizanje kotača, kao posljedica različitih putova pri vožnji u zavoju, ublažuje se konusnom izvedbom oboda kotača. U zavoju se kotači na vanjskoj tračnici kotrljaju na većem promjeru, a na unutarnjoj na manjem promjeru. Utjecaj centrifugalne sile u zavoju na povećano trenje između grebena vijenca kotača i vanjske tračnice smanjuje se nadvišenošću tračnice. Paralelnost kolnih slogova onemogućuje njihovo radijalno postavljanje u zavoju. Ugradnjom okretnih postolja u kojima su kolni slogovi blizu, taj utjecaj na otpore se smanjuje.

Čimbenici koji utječu na otpor u zavoju:

- polumjer zavoja
- razmak tračnica
- proširenje tračnica u zavoju

- nadvišenje vanjske tračnice
- broj osovina
- razmak i izvedba pomičnosti osovina
- stanje vijenca kotača i tračnica
- koeficijent trenja
- brzina vožnje

Točno izračunavanje otpora u zavoju ovisno o svim navedenim utjecajima vrlo je složeno. Budući da taj otpor ima relativno mali udio u ukupnim otporima vožnje, njegovo precizno određivanje nije od posebnog značaja.

Prilikom računanja opora u zavoju koriste se jednadžbe u kojima je glavna veličina polumjer zavoja. Na HŽ-u se za računanje specifičnog otpora u zavoju vučnih i vučenih vozila koriste Röcklovi izrazi:

$$w_r = \frac{650}{R - 55} [daN/t] - \text{za polumjer } R > 300 \text{ m}$$

$$w_r = \frac{500}{R - 30} [daN/t] - \text{za polumjer } R < 300 \text{ m}$$

Za četveroosovinska kola s okretnim postoljima često se koristi Woodov izraz:

$$w_r = 0,2 + \frac{180 + 98L_o}{R} [daN/t]$$

Pri čemu je:

R [m] – polumjer zavoja

L<sub>o</sub> [m] – razmak osovina okretnih postolja

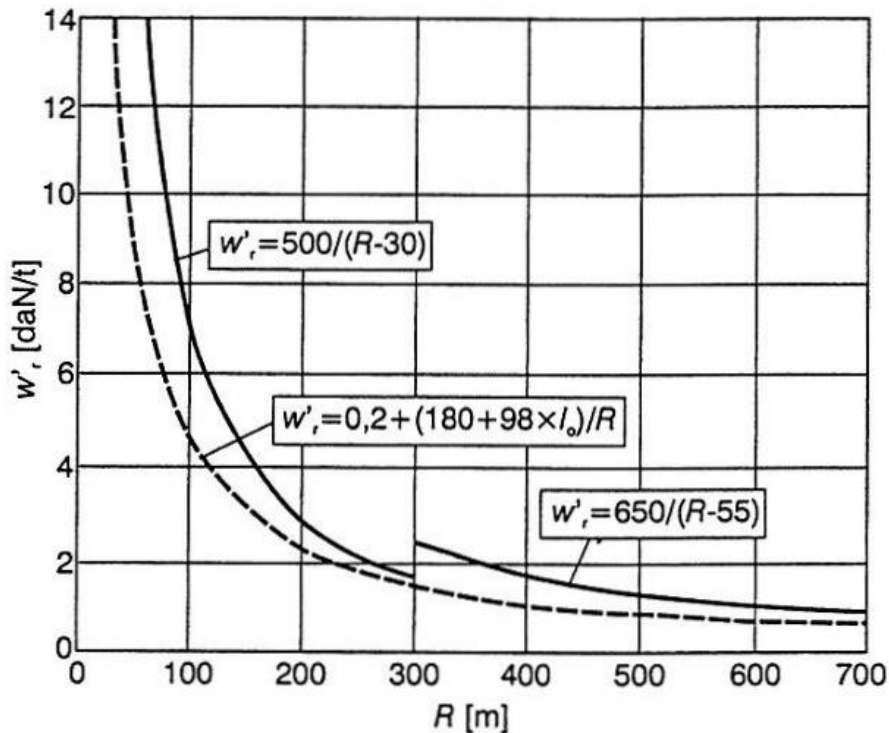
Ukoliko je duljina vlaka veća od duljine zavoja, otpor treba računati samo za dio vlaka koji se nalazi u zavoju. Specifični otpor se u tom slučaju računa prema izrazu:

$$w'_r = w_r \cdot \frac{L_r}{L}$$

Pri čemu je:

L<sub>r</sub> [m] – duljina zavoja

L [m] – duljina vlaka



Slika 2. Ovisnost otpora u zavoju prema navedenim jednadžbama za  $L_0 = 3\text{m}$

Izvor: Zavada, Josip: Željeznička vozila i vuča vlakova, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 2004.

Kako bi smanjili otpor u zavoju, trošenje vijenca kotača i tračnica, često se izvodi podmazivanje grebena vijenca kotača ili unutarnje strane glave tračnice. Uređaj za podmazivanje ugrađuje se na vučno vozilo ili podmazivanje vrši radnik prikladnim uređajem. Podmazivanje je značajno samo na zavojitim prugama gdje trošenje dolazi do izražaja [1].

## 2.4. Otpor ubrzanja

Otpori ubrzanja pojavljuju se prilikom pokretanja vlaka kao i prilikom svake promjene brzine. Da bi se postiglo povećanje brzine vlaka, odnosno savladavanje otpora ubrzanja  $W_a$ , potreban je višak vučne sile  $F$ , s obzirom na vučnu silu  $s$  kojom se savladavaju otpori ustaljene vožnje  $W_u$ . Ustaljena vožnja je vožnja gdje nema promjene brzine.

Vučnu silu potrebnu za savladavanje otpora ubrzanja računamo pomoću izraza:

$$F_a = W_a = F - W_u$$

Otpor ubrzanja računamo prema izrazu:

$$W_a = \left( m + \sum \frac{J_o}{r^2} + \sum \frac{J_i}{r^2} \cdot p_i^2 \right) \frac{dv}{dt} [N]$$

Pri čemu je:

- $m$  [kg] – masa vlaka  
 $J_0$  [kgm<sup>2</sup>] – polarni moment tromosti kolnog sloga  
 $r^2$  [m] – polumjer kotača  
 $J_i$  [kgm<sup>2</sup>] – polarni moment tromosti i-tog rotirajućeg dijela na vozilu  
 $p_i$  – prijenosni dio i-tog dijela koji rotira  
 $v$  [m/h] – brzina kretanja vlaka  
 $t$  [s] – vrijeme

Kako bi pojednostavnili proračun otpora, radi otežanog određivanja polarnih momenata svih rotirajućih dijelova na vozilima, kao i njihovih prijenosnih odnosa, navedeni izraz svodimo na jednostavniji oblik. Pretpostavljamo da se cijeli vlak giba paralelno od jedne točke prema drugoj te da se zbog toga povećava masa vlaka prilikom proračuna.

Prema tome vrijedi:

$$Wa = m(1 + \xi) \cdot a [N]$$

Pritom je:

- $a = dv/dt$  [m/s<sup>2</sup>] – ubrzanje vlaka  
 $\xi$  – koeficijent rotirajućih masa

Koeficijent rotirajućih masa  $\xi$  ima vrijednosti:

- $\xi = 0,15 - 0,35$  - za električne i diesel-električne lokomotive  
 $\xi = 0,08 - 0,18$  - za električne i diesel-električne motorne vlakove  
 $\xi = 0,03 - 0,06$  - putničke vagoni  
 $\xi = 0,08 - 0,12$  - za prazne teretne vagoni  
 $\xi = 0,03 - 0,04$  - za natovarene teretne vagoni  
 $\xi = 0,06 - 0,08$  - za kompletne vlakove .

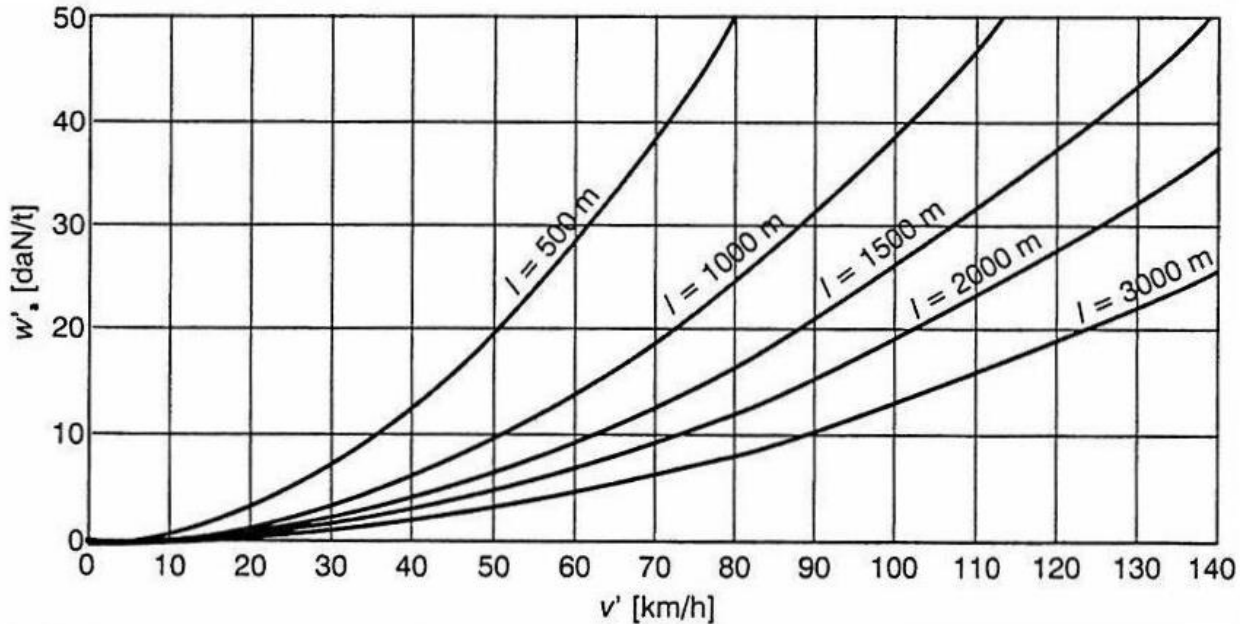
Prosječne vrijednosti ubrzanja pri polasku su:

- $a = 0,02 \div 0,10$  m/s<sup>2</sup> - za teške teretne vlakove  
 $a = 0,20$  m/s<sup>2</sup> - za lake teretne vlakove  
 $a = 0,30$  m/s<sup>2</sup> - za lake putničke vlakove  
 $a = 0,40$  m/s<sup>2</sup> - za lake brze vlakove  
 $a = 0,40 \div 0,60$  m/s<sup>2</sup> - za motorne vlakove .

Prilikom usporavanja vlaka, otpor ubrzanja ima negativan predznak i djeluje kao vučna sila u naspram ostalih otpora vožnje.

Za konstantno ubrzanje i kretanje vlaka od 0 do brzine  $v$ , gdje veličina  $s$  označava prijeđeni put, također vrijedi izraz:

$$a = \frac{v^2}{2s} \text{ [m/s}^2\text{]}$$



Slika 3. Ovisnost specifičnog otpora vlaka o brzini vožnje na putu  $s$

Izvor: Zavada, Josip: Željeznička vozila i vuča vlakova, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 2004.

Vrijedno je napomenuti kako u slici iznad, nisu u obzir uzeti ostali otpori vožnje. U stvarnim uvjetima biti će postignuta manja brzina vožnje, odnosno za istu brzinu vožnje biti će potrebna veća vučna sila zbog većih iznosa otpora[1].

## 2.5. Dodatni otpori

Osim ranije navedenih stalnih i povremenih otpora, postoje i dodatni otpori:

- otpor pokretanja
- otpor u tunelu
- otpor vjetra[1]

### 2.5.1. Otpor pokretanja

Otpor pokretanja posebno je izražen kod vozila koja su izvedena sa kliznim ležajevima. Prilikom stajanja istiskuje se i cijedi ulje s kliznih površinama što dovodi do suhog trenja pri pokretanju. Ono je izraženije što je vrijeme stanja duže te specifični otpor pokretanja može iznositi do 25 [daN/t]. Otpor pokretanja naglo gubi na svojoj vrijednosti nakon pokretanja, odnosno potpuno nestaje nakon 1,5 -2 okretaja kotača. Iz navedenih razloga vozila u novije vrijeme koriste kotrljajuće ležajeve čime se navedeni otpor višestruko smanjuje.

Također važan čimbenik u otporu pokretanja je povećana deformacija kotača i tračnice u njihovom dodiru prilikom stajanja vozila. Vrijednost otpora pokretanja može doseći veliki iznos, što je posebno izraženo kod teških teretnih vlakova. To iziskuje odgovarajuću vučnu silu koja može nadmašiti silu adhezije. U tim slučajevima izbjegava se istovremeno pokretanje cijelog vlaka na način da se kvačila između vagona postavljaju na način da se odbojnici dodiruju bez napona. Prije pokretanja pristupa se postupku stlačivanja vlaka kratkotrajnim potiskom prema unatrag, kako bi se pojedinačno poredala vozila redom, od prvog do posljednjeg u sastavu.

Vanjska temperatura također utječe na otpore pokretanja te su oni veći što je temperatura niža, što valja uzeti u obzir u zimskom razdoblju[1].

### 2.5.2. Otpor u tunelu

Otpor u tunelu posljedica je povećane turbulencije zraka, a ovisi o sljedećim čimbenicima:

- površini poprečnog presjeka tunela
- duljini tunela
- čelnoj površini vučnog vozila
- brzini vožnje.

Otpor u tunelu računamo izrazom:

$$W_t = 5 \frac{L_t \cdot S_l}{S_t \cdot S_l} \cdot \left(\frac{v}{10}\right)^2 [daN/t]$$



Pritom je:

- $L_t$  [km] – duljina tunela  
 $S_č$  [m<sup>2</sup>] – čelna površina vučnog vozila  
 $S_t$  [m<sup>2</sup>] – površina poprečnog presjeka tunela  
 $v$  [km/h] – brzina vlaka u tunelu

Površina poprečnog presjeka tunela  $S_t$  iznosi 28-30 m<sup>2</sup> za jednokolosječne te 57 – 60 m<sup>2</sup> za dvokolosječne pruge[1].



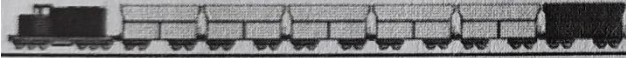
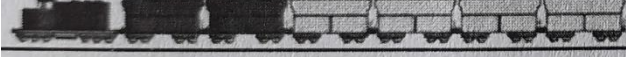
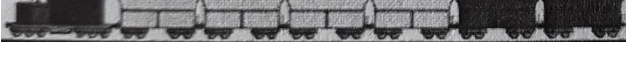
### **2.5.3. Otpor vjetra**

Otpor vjetra uzima se u obzir prilikom računanja preko dodatka brzine  $\Delta v$  brzini vožnje ovisno i brzini i smjeru vjetra. Uobičajeni dodatak iznosi  $\Delta v = 10 - 15$  km/h.

Vjetar povećava otpore zraka i otpore kotrljanja zbog povećanog trenja između vijenca kotača i tračnica ukoliko se radi o bočnom vjetru koji stvara bočnu silu na vlak. Najveći dodatni otpor izaziva vjetar koji ima značajnu uzdužnu i bočnu komponentu, odnosno kada puše pod kutom 30 - 60° u odnosu na uzdužnu os vlaka[1].

### 3. METODOLOGIJA IZRAČUNA OTPORA VLAKA U ZAVOJU U OVISNOSTI OD MASE I BRZINE

Metodologija izračuna otpora u zavoju tračničkih vozila osmišljena je za izvođenje eksperimenta na umanjenom modelu teretnog vlaka. Formirani model služi za istraživanje utjecaja vrijednosti otpora u zavoju. Gravitacijskom metodom se određuju stalni otpori lokomotive, te praznog i natovarenog vagona. Razmatrane kombinacije sastava vlaka su: prazan vlak (PPPPPP), jedan natovaren vlak naprijed i nazad (TPPPPP i PPPPPT) i dva natovarena vagona naprijed i nazad (TTPPPP i PPPPTT). Otporne sile željezničkih vozila posebno lokomotiva, predstavljaju fenomen obilježen kompleksnom strukturom. Otpor u zavoju općenito ovisi o različitim utjecajnim parametrima kao što su: zavoju radijusa, kolosijek, širenje kolosijeka, visinu, vrstu kotača, vrstu željeznice, krutost kotača, udaljenost između postolja, udaljenost između osovina, broj osovina, koeficijent trenja, brzina vozila, masa vozila, raspored vlakova i tako dalje [3],[4],[5].

LOKOMOTIVA // VAGONI	I	II	III	IV	V	VI
	P	P	P	P	P	P
	T	P	P	P	P	P
	P	P	P	P	P	T
	T	T	P	P	P	P
	P	P	P	P	T	T

Slika 4. Raspored praznih P i natovarenih T vagona u sustavu vlaka vučenog lokomotivom

Izvor: Tepić, Jovan: Vuča vozova, FTN Izvadoštvo, GRID, Novi Sad, 2008.

### **3.1. Osnovni podaci eksperimenta**

Eksperimentalno istraživanje je provedeno s umanjenim modelom omjera 1:87 [2].

#### **3.1.1. Šest-osovinski model lokomotive**

Model lokomotive T 155 – EMD SD 35 u omjeru 1:87, proizveden od firme Mehano Slovenija, koja predstavlja umanjeni model ELECTRO-MOTIVE DIVISION USA dizel-električne lokomotive. Model mase lokomotive je 0,502 kg. Model je pogonjen 8W/16V istosmjernim motorom. Motor se nalazi u središtu mase modela lokomotiva i povezan je s oba okretna postolja preko kardanskih vratila[2].

#### **3.1.2. Četiri osovinski FALNS 121 model teretnih vagona**

Šest identičnih T 215 modela vagona u omjeru 1:87 proizvedene od firme Mehano Slovenija. Masa praznog vagona iznosi 0,0835 kg. Svaki vagon koji je napunjen ima težinu od 0.154 kg. Stoga je ukupna masa napunjenog vagona zajedno sa svojom težinom u praznom stanju jednaka do 0,2375 kg [2].

#### **3.1.3. Eksperimentalna staza s promjenjivim nagibom $\alpha$**

Eksperimentalna staza s promjenjivim nagibom je namijenjena za određivanje konstantnih sila otpora lokomotiva i vagona pomoću gravitacijske metode [2].

#### **3.1.4. Horizontalna ravna eksperimentalna staza**

Horizontalna ravna eksperimentalna staza treba biti duljine 1 metar, prilagođen omjeru 1:87 u kojemu se vrše sva mjerenja [2].

#### **3.1.5. Horizontalna zakrivljena eksperimentalna staza**

Staza takvog tipa treba imati radijus 457.22mm / 360°, prilagođena omjeru 1:87 u kojemu se vrše sva mjerenja [2].

### 3.2. Cilj eksperimenta

Ukupna masa vlaka  $m_U$  uključuje masu lokomotive  $m_L$  i masu vlaka  $m_V$ . Masa vlaka je određena brojem teretnih vagona  $N$  i njihovim opterećenjem: praznim vagonom  $m_P$  ili napunjenim vagonom  $m_T$ . Iz toga možemo reći da otpor vožnje u zavoju  $W_R$  ovisi o sljedećim čimbenicima:  $W_R = f(R, m_P, m_T, N, v)$ . Eksperimenti su namijenjeni za pružanje podataka o brzini vlaka i otpora vlaka, za vlakove specifične mase i aranžmana. Znajući konstantni otpor vlaka (izračunom primjene gravitacijske metode) konstantnu brzinu vlaka, može se lako izračunati otpor vožnje u zavoju[2],[6].

### 3.3. Mjerna oprema i uređaji

Eksperimentalna staza sadrži signale sa rezolucijom od 5mm. Kretanje vlaka je snimljeno pomoću SONY TRV 19 digitalne kamere koja zabilježi 25 slika u sekundi. Vrijeme tijekom gibanja vlaka se mjeri pomoću sata s razlučivošću od 0.01 sekunde koji uključuje:

MICROCHIP 16 F 877 mikrokontroler

Dva OMRON fotoelektrična senzora s rasponom osjetljivosti od 300mm do 400mm

Ampermetar s mjernim rasponom od 1,5 A s klasom točnosti od 0,1.

Precizno istosmjerno napajanje baterije je programirano i koristi se u eksperimentu. Glavne značajke su: dobro kontroliranje voltaže u rasponu od 1,5 do 2,5 V istosmjernog napajanja i maksimalne struje od 1,5 A [2].

### 3.4. Određivanje konstantnog otpora

Konstantni otpor vlaka definiran je kao zbroj konstantnog otpora povezan s lokomotivom  $W_{SL}$  i vagonima: prazni vagoni  $W_{SP}$  ili natovareni vagoni  $W_{ST}$ . Konstantni otpori su određeni posebnim mjerenjima primjenom gravitacijskom metodom vlaka koji vozi po stazi s nagibom koja glasi[7]:

1. Konstantni otpor lokomotive

$$W_{SL} = m_L \cdot (g \cdot \operatorname{tg} \alpha - \alpha_L)$$

2. Konstantni otpor praznih vagona

$$W_{SP} = m_{LP} \cdot (g \cdot \operatorname{tg} \alpha - \alpha_P)$$

3. Konstantni otpor natovarenih vagona

$$W_{ST} = m_T \cdot (g \cdot \operatorname{tg} \alpha - \alpha_T)$$

### 3.5. Određivanje pogonske sile na ravnoj stazi

Eksperimenti su namijenjeni za dobivanje ovisnosti pogonske sile i konstantne brzine vlaka, za vlakove različitih aranžmana vozeći po horizontalnoj stazi pod radnim uvjetom stalnog i stabilnog napajanja motora. Deset ponavljanja za svaku varijantu je predloženo da se provede u svrhu statičke analize.

Tijekom statičkog gibanja vlaka duž vodoravne staze pogonska sila lokomotive je jednaka konstantnom otporu ( $F_V = W_S$ ). Budući da se vlak sastoji od lokomotive i raznih brojeva praznih i napunjenih vagona, pogonska sila glasi [2]:

$$F_V = W_S = W_{SL} + N_P \cdot W_{SP} + N_T \cdot W_{ST}$$

Na primjer za vlak koji se sastoji od jednog natovarenog vagona i pet praznih vagona formula bi glasila:

$$F_V = W_S = W_{SL} + 5 \cdot W_{SP} + 1 \cdot W_{ST}$$

### 3.6. Određivanje otpora u zavoju

Otpori vožnje vlaka u zavoju se temelje na usporedbi dobivenih rezultata ukupnog otpora za vlak koji vozi duž ravne i zakrivljene staze pod istim radnim uvjetima. Istosmjerna motorna voltaža mora biti jednaka neovisno dali se radi o zakrivljenoj ili ravnoj stazi. Predloženo je tridesetak ponavljanja kako bi se osiguralo dovoljno podataka za kvalitetnu statističku analizu. Otpor u zavoju se određuje na temelju smanjenja veličine brzine vlaka u zavoju u usporedbi brzine vlaka na ravnoj stazi. Razmatrani utjecajni parametri su raspored vlakova i brzina gibanja vlakova u zavoju. Otpor u zavoju za određeni raspored vlakova glasi[8]:

1. Šest praznih vagona (PPPPPP):

$$W_{R(6P)} = W_{S(6P)} - W_{U(6P)} = F_{V(6P)} - (W_{SL} + 6 \cdot W_{SP})$$

2. Jedan natovaren i pet praznih vagona (TPPPPP):

$$W_{R(T5P)} = F_{V(T5P)} - (W_{SL} + 1 \cdot W_{ST} + 5 \cdot W_{SP})$$

3. Pet praznih i jedan natovaren vagon (PPPPPT):

$$W_{R(5PT)} = F_{V(5PT)} - (W_{SL} + 5 \cdot W_{SP} + 1 \cdot W_{ST})$$

4. Dva natovarena i četiri prazna vagona (TTPPPP):

$$W_{R(2T4P)} = F_{V(2T4P)} - (W_{SL} + 2 \cdot W_{ST} + 4 \cdot W_{SP})$$

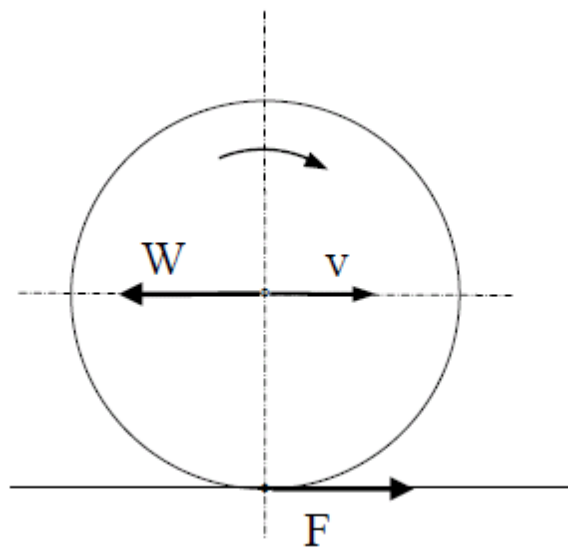
5. Četiri prazna i dva natovarena vagona (PPPPTT):

$$W_{R(4P2T)} = F_{V(4P2T)} - (W_{SL} + 5 \cdot W_{SP} + 2 \cdot W_{ST})$$

## 4. VUČNA SILA I SNAGA VUČNOG VOZILA

### 4.1. Snaga vučnog vozila

Prilikom kretanja vlaka, pojavljuju se svi ranije analizirani otpori koji se protive tom kretanju. Kako bi postigli određenu brzinu vlaka, odnosno kako bi savladali navedene otpore, vučno vozilo mora na obodu pogonskih kotača ostvariti vučnu silu jednaku otporima.



Slika 5. Prikaz vučne sile, otpora i vektora brzine na obodu kotača

Izvor: Zavada, Josip: Željeznička vozila i vuča vlakova, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 2004.

Raspoloživa vučna sila određenog vučnog vozila nije dovoljan uvjet da se željeno kretanje vlaka i ostvari, već je za to nužna mogućnost prijenosa te sile na dodiru između pogonskih kotača i tračnica. Potrebno je da sila adhezije, bude veća ili jednaka potrebnoj vučnoj sili. Vučna sila na obodu kotača mora savladati otpore kretanja vučenih kako i samog vučnog vozila. Sila na kuki vučnog vozila bit će manja od vučne sile na obodu kotača za veličinu otpora vučnog vozila, stoga pod pojmom vučne sile mislimo na silu na obodu pogonskih kotača vučnog vozila.

Kreće li se vlak brzinom  $v$  [m/s], pri čemu se ostvaruje vučna sila  $F$  [N] za savladavanje otpora vožnje, vučno vozilo mora razviti snagu na obodu kotača koju računamo izrazom:

$$P_k = F \cdot v [W]$$

Brzina vožnje se definira i propisuje za pojedine vrste vlakova i dionice pruga, ovisno radi li se o ravničarskim dionicama ili dionicama sa značajnim usponima i zavojima[1].

## 4.2. Vučna sila lokomotive

Osnovna karakteristika vučnog pogona sa izlaznim veličinama na vratilu vučnog motora je:

$$N_m = \varphi(m)$$

i ona određuje veličinu okretnog momenta u zavisnosti od brzine okretaja. Odgovarajuće rezultante vrijednosti na obodu kotača pogonskih osovina mogu biti:

$$F_v = \varphi_1(v) \quad \text{i} \quad F_v = \varphi_1(v).$$

Sa prijenosnikom snage između vučnog motora i kotača pogonskih osovinskih slogova, čiji je prijenosni odnos  $\sigma$  i stupanj iskorištenosti  $\eta_p$ , vučna sila na obodu kotača ovog osovinskog sloga je :

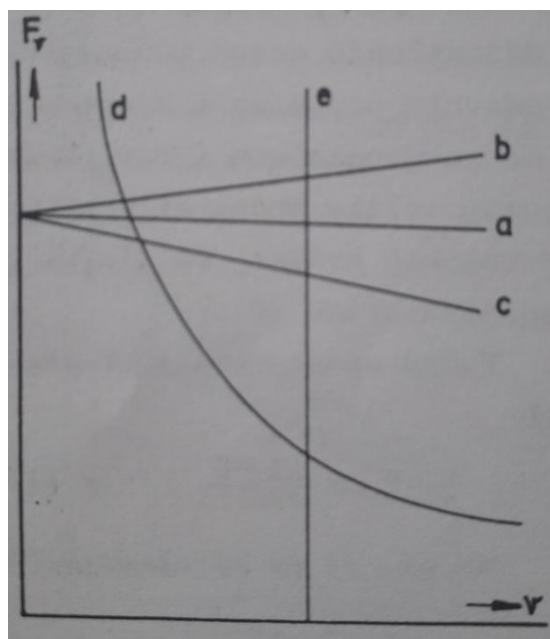
$$F_t = \eta_p \cdot \sigma \cdot \frac{2 \cdot M_m}{D_t} = \frac{2}{D_t} M_o$$

$M_m$  - moment na vratilu motora

$M_o$  – moment na osovini sloga.

Ukupna vučna sila vozila  $F_v$  je suma vučnih sila na obodu kotača pogonskih osovinskih slogova  $F_v = \sum F_t$ .

U koordinatnom sustavu momenata, odnosno vučne sile i brzine, ucrtani su karakteristični oblici zavisnosti  $F_v = \varphi(v)$ .





Slika 6. Prikaz koordinatnog sustava momenata, odnosno vučne sile vozila i momenta motora

Izvor: Dinić, Dimitrije: Vuča vozova, Zavod za novinsko-izviđačku i propagandnu djelatnost JŽ, Beograd, 1985.

Linija (a) odgovara karakteristici sa stalnom vrijednošću vučne sile pri promjeni brzine. Linija (b) je sličnog oblika zavisnosti, samo sa izvjesnim povećanjem vučne sile pri porastu brzine, dok po liniji (c) vučna sila pravolinijski pada sam brzinom. Dok se linija (d) mijenja hiperbolično promjenom vučne sile i brzine. Za vuču vlakova pogodna je karakteristika koja osigurava zavisnu promjenu vučne sile i brzine, da se uz odgovarajuće ograničenje snage pogonskog motora omogući pokretanje vlaka na mjerodavnim usponima i njegova vuča najvećim dozvoljenim brzinama na horizontalnom i ravnom djelu trase. Ovi zahtjevi traže velike vučne sile pri polasku i relativno male vučne sile kod velikih brzina. Linija koja najviše zadovoljava ove zahtjeve je linija (d) [9].

## 5. VRSTE KOČENJA

### 5.1. Neizravne kočnice

Neizravnim automatskim kočenjem koje se najviše i koristi mogu se ostvariti sljedeće vrste kočenja:

- Postupno kočenje
- Potpuno kočenje
- Brzo kočenje
- Kočenje u slučaju opasnosti
- Prisilno kočenje

Postupno, potpuno i brzo kočenje može se ostvariti pomoću kočnika kojim upravlja strojovođa, a kočenje u slučaju opasnosti i prisilno kočenje djelovanjem nekog drugog uređaja.

Postupno kočenje postiže se postavljanjem ručice kočnika u položaj postupnog kočenja, pri čemu se djelomice ispušta zrak i smanjuje tlak u glavnom vodu. Početno smanjenje tlaka u glavnom vodu mora biti barem 0,5 bara.

Potpuno kočenje postiže se smanjenjem tlaka u glavnom vodu za 1,5 bara odgovarajućim položajem ručice kočnika, pritom se ostvaruje najveće sila kočenja.

Brzo kočenje postiže se ispuštanjem zraka iz glavnog voda do atmosferskog tlaka postavljanjem ručice kočnika u položaj brzog kočenja, tako se postiže najveća sila u najkraćem vremenu.

Kočenje u slučaju opasnosti nastaje ispuštanjem zraka iz glavnog voda do atmosferskog tlaka kada se aktivira kočnica za slučaj opasnosti, slavina za slučaj opasnosti ili kada se otvori čelna slavina.

Prisilno kočenje nastaje ispuštanjem zraka iz glavnog voda do atmosferskog tlaka, bez upotrebe kočnika, iz sljedećih razloga:

- Aktiviranje uređaja za kontrolu budnosti strojovođe
- Aktiviranja autostop-uređaja
- Kidanja vlaka
- Kvara na glavnom vodu
- Aktiviranja nekoga drugoga zaštitnog uređaja na vučnom vozilu[1]

## **5.2. Izravne kočnice**

Izravnom neautomatskom zračnom kočnicom ostvaruje se kočenje koje po svom djelovanju odgovara kočnici vrste P, a mogu se ostvariti sljedeće vrste kočenja:

- Postupno kočenje
- Potpuno kočenje

Postupno kočenje ostvaruje se postavljanjem ručice kočnika u položaj postupnoga kočenja. Pri čemu se u kočne cilindre upušta određena količina stlačenog zraka do tlaka koji je manja od najvećeg.

Potpuno kočenje ostvaruje se postavljanjem ručice kočnika u položaj potpunog kočenja. Pritom se u kočne cilindre upušta potrebna količina stlačenog zraka do postizanja najvećeg tlaka. Potpunim kočenjem postiže se najveća sila kočenja[1].

## **5.3. Ostale vrste kočnica**

Kočenje pogonskim kočnicama koristi se pri smanjenju brzine, za održavanje brzine na padovima pruge da se smanji trošenje i zagrijavanje kočnih elemenata zračne kočnice. Njima se povećava i sila kočenja pri istodobnom kočenju zračnom kočnicom.

Kočenje tračničkom kočnicom uključuje se pri brzom kočenju, kočenju u slučaju opasnosti i prisilnom kočenju. Tračnička kočnica često se može aktivirati i neovisno o drugim kočnicama[1].

## 6. KOČENJE

### 6.1. Kočna masa

Kočna masa je pokazatelj učinka kočenja praznog ili natovarenog vozila, a izražava se i na vozilima ispisuje u tonama. Ona predstavlja osnovnu veličinu za proračun učinka kočnice. Stoga su propisani osnovni parametri koji utječu na efikasnost kočnice, a koji se moraju osigurati u svih kočnica ovisno o tipu vozila, kao što su:

- tlak u kočnom cilindru
- vremena kočenja i otkačivanja
- volumen pomoćnog spremnika
- veličina kočnih cilindara
- način reguliranja razmaka kočnih umetaka u otkočenom stanju
- vrste, dimenzije i značajke kočnih umetaka
- dužine zaustavnih putova, odnosno postoci kočenja za razne vrste vozila[1]

#### 6.1.1. Određivanje kočne mase putničkih kočnica

Putničke kočnice su brzo djelujuće kočnice koje se brzo ostvaruju najveću silu kočenja od trenutka aktiviranja (vrijeme od 3 do 5s). Kočna masa takvih kočnica određuje se na temelju ispitivanja, koja je propisana objavom UIC-544. Ispitivanje se može provoditi na dva načina:

1. s vlakom od 60 osovina i vagonima istog tipa, koji vuče ne kočena lokomotiva
2. odbacivanjem pojedinačnih vagona[1].

#### 6.1.2 Određivanje kočne mase teretnih kočnica

Teretne kočnice su sporo djelujuće kočnice koje relativno sporo razvijaju najveću kočnu silu od trenutka aktiviranja (vrijeme od 18 do 30s). Sporo djelujuće kočnice ograničuju brzinu kretanja vlaka na 80km/h pa se njihova kočna masa određuje računanjem prema objavi UIC-544, s pomoću izraza[1]:

$$B = \frac{F_{\check{c}}}{9.81} \cdot z \cdot \frac{10}{7} \cdot \gamma [t]$$

Gdje je:

$F_{\check{c}} [kN]$  – sila jedne čeljusti za vrijeme vožnje

Z – broj čeljusti kočnice

$\gamma$  – kočni koeficijent

## 6.2. Zaustavni put

Zaustavni put vlaka predstavlja prijeđeni put od trenutka uočavanja zatvorenog signala, prepreke na pruzi, ili nekog drugog razloga za zaustavljanje do potpunog zaustavljanja vlaka. Taj put se sastoji od pripremnog zaustavnog puta i puta kočenja vlaka:

$$l_z = l_{zp} + l_{zk} [m]$$

$l_{zp}$  – pripremni zaustavni put

$l_{zk}$  – put kočenja

Zaustavnom putu odgovara i određeno zaustavno vrijeme. To je vrijeme koje protekne od trenutka uočavanja razloga za zaustavljanje do potpunog zaustavljanja vlaka.

$$t_z = t_{zp} + t_{zk} [m]$$

$t_{zp}$  – pripremno vrijeme

$t_{zk}$  – vrijeme kočenja

Pripremno vrijeme se sastoji od vremena reagiranja vozača  $t_{rv}$  i vremena reagiranja kočnica  $t_{rk}$  :

$$t_z = t_{rv} + t_{rk} [m]$$

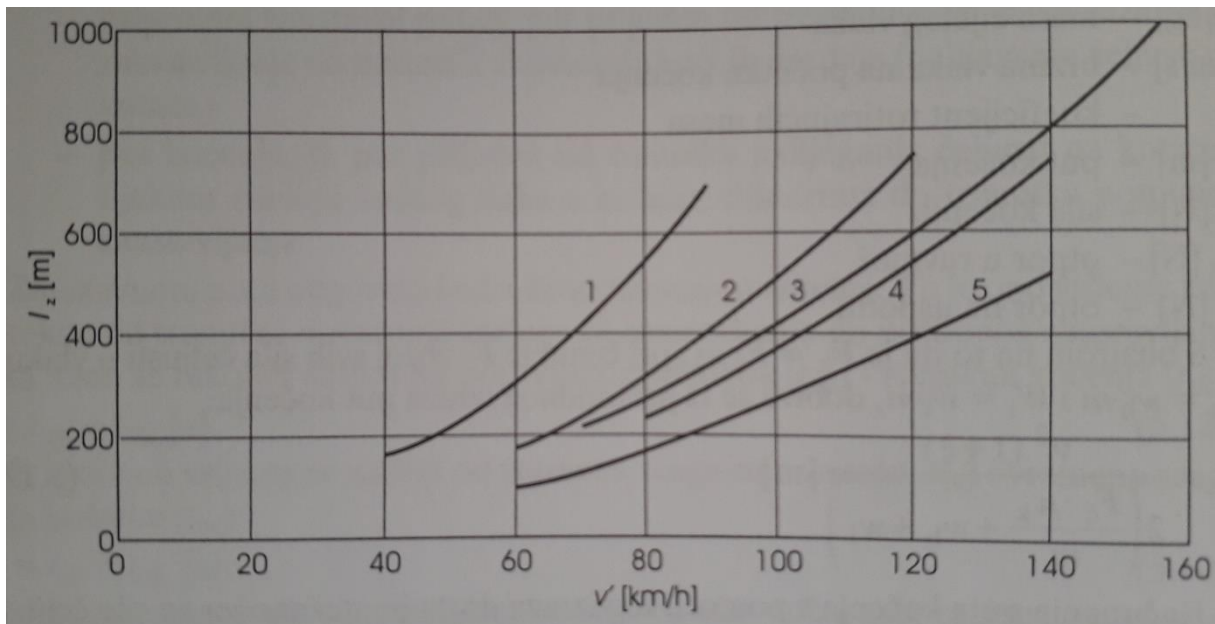
Vrijeme kočenja  $t_{zk}$  sastoji se od vremena porasta tlaka u kočnim cilindrima  $t_{pt}$  i vremena od trenutka postizanja maksimalnog tlaka u kočnim cilindrima do zaustavljanja vlaka  $t_{maxt}$  :

$$t_{zk} = t_{pt} + t_{maxt} [m]$$

Vrijeme porasta tlaka u kočnim cilindrima ovisi o vrsti i tipu kočnica. Za putničke kočnice ono iznosi 3 do 5 sekundi, a za teretne kočnice 18 do 30 sekundi.

Najduži zaustavni putovi propisani na Hrvatskim željeznicama imaju sljedeće vrijednosti:

- 1500 m – na međunarodnim smjerovima
- 1000 m – na glavnim unutarnjim prugama
- 700 m – na drugim prugama
- 400 m – za zaustavljanje pružnih vozila



Slika 7. Prikaz zaustavnih puteva vlakova

Izvor: Zavada, Josip: Željeznička vozila i vuča vlakova, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 2004.

Da bi rezultati proračuna zaustavnog puta bili što točniji, moraju se uzeti u obzir sljedeći čimbenici: vrste kočnica s njihovim značajkama, vrsta i sastav vlaka, stanje tračnica itd. Pojedine krivulje odnose se na:

- 1 – teretni vlak sa 120 osovina, čeljusti od lijevanog željeza, položaj G
- 2 – putnički vlak sa 60 osovina, čeljusti od lijevanog željeza, položaj p
- 3 – brzi vlak sa 60 osovina, čeljusti od lijevanog željeza, položaj R
- 4 – motorni vlak s disk-kočnicama, položaj P
- 5 – motorni vlak s disk-kočnicama, položaj P i s tračničkim kočnicama[1]

## 7. LOKOMOTIVA SIMENS ES64U4

Lokomotiva Siemens ES64U4 je brza, više sustavna lokomotiva za europske istosmjerne i izmjenične željezničke sustave napajanja. Lokomotiva ES64U4 namijenjena je za tri sustava napajanja.

Izmjenični (AC)	15 kV	16,7 Hz
Izmjenični (AC)	25 kV	50 Hz
Istosmjerni (DC)	3 kV	

Tablica 1. Naponi napajanja za pogon lokomotive ES64U4

Izvor: Siemens d.d. : Tehnički opis lokomotive ES64U4

Lokomotiva ES64U4 se u pogledu tehničkih predispozicija temelji na više sustavnim varijantama vozila serije Rh 1116 Austrijskih željeznica i BR 189 Njemačkih željeznica, a time ujedno i na trenutno najnaprednijim predstavnicima obitelji univerzalnih lokomotiva[10].



Slika 8. Prikaz slike lokomotive simens ES64U4

## 7.1. Proračun otpora vožnje lokomotive Siemens ES64U4 za vuču teretnih vagona (brzina do 120 km/h)

- otpor vožnje lokomotive u ravnini:

$$W_h = 6,5m'_1 + 130z + 0,1m'_1 \cdot v' + 0,3v'^2$$

$$W_h = 6,5 \cdot 84 + 130 \cdot 4 + 0,1 \cdot 84 \cdot 120 + 0,3 \cdot 120^2 = 6,394 \cdot 10^3 \text{ N}$$

- otpor lokomotive na usponu:

$$W_i = \pm G \cdot \frac{i}{1000}$$

$$W_i = (84000 \cdot 9,81) \cdot \frac{25}{1000} = 20,601 \cdot 10^3 \text{ N}$$

- otpor lokomotive u zavoju:

$$w'_r = \frac{650}{R - 55}$$

$$w'_r = \frac{650}{300 - 55} 2,653 \frac{daN}{t} \rightarrow w_r = 0,02653 \text{ N/kg}$$

$$W_r = m \cdot w_r = 2,229 \cdot 10^3 \text{ N}$$

- otpor ubrzanja lokomotive:

$$W_a = m \cdot (1 + \xi) \cdot a$$

$$W_a = 84000 \cdot (1 + 0,25) \cdot 0,1 = 10,5 \cdot 10^3 \text{ N}$$



## 7.2. Proračun otpora vožnje teretnih vagona mase 2000 t (brzina do 120 km/h)

- otpor vožnje teretnih vagona u ravnini:

$$w'_h = 2 + k \cdot \left(\frac{v'}{10}\right)^2$$

$$w'_h = 2 + 0,047 \cdot \left(\frac{120}{10}\right)^2 = 8,768 \text{ daN/t} \rightarrow w_h = 0,08768 \text{ N/kg}$$

$$W_h = m \cdot w'_h = 1,754 \cdot 10^5 \text{ N}$$

- otpor teretnih vagona na usponu:

$$W_i = \pm G \cdot \frac{i}{1000}$$
$$W_i = (2000000 \cdot 9,81) \cdot \frac{25}{1000} = 4,905 \cdot 10^5 \text{ N}$$

- otpor teretnih vagona u zavoju:

$$w'_r = \frac{650}{R - 55}$$

$$w'_r = \frac{650}{300 - 55} = 2,653 \text{ daN/t} \rightarrow w_r = 0,02653 \text{ N/kg}$$

$$W_r = m \cdot w_r = 0,531 \cdot 10^5 \text{ N}$$

- otpor ubrzanja teretnih vagona:

$$W_a = m \cdot (1 + \xi) \cdot a$$

$$W_a = 2000000 \cdot (1 + 0,35) \cdot 0,1 = 2,7 \cdot 10^5 \text{ N}$$

### 7.3. Proračun otpora vožnje lokomotive Siemens ES64U4 za vuču putničkih vagona (brzina do 230 km/h)

- otpor vožnje lokomotive u ravnini:

$$W_h = 6,5m'_1 + 130z + 0,1m'_1 \cdot v' + 0,3v'^2$$

$$W_h = 6,5 \cdot 84 + 130 \cdot 4 + 0,1 \cdot 84 \cdot 230 + 0,3 \cdot 230^2 = 1,887 \cdot 10^4 \text{ N}$$

- otpor lokomotive na usponu:

$$W_i = \pm G \cdot \frac{i}{1000}$$

$$W_i = (84000 \cdot 9,81) \cdot \frac{25}{1000} = 20,601 \cdot 10^3 \text{ N}$$

- otpor lokomotive u zavoju:

$$w'_r = \frac{650}{R - 55}$$

$$w'_r = \frac{650}{300 - 55} 2,653 \frac{\text{daN}}{\text{t}} \rightarrow w_r = 0,02653 \text{ N/kg}$$

$$W_r = m \cdot w_r = 2,229 \cdot 10^3 \text{ N}$$

- otpor ubrzanja lokomotive:

$$W_a = m \cdot (1 + \xi) \cdot a$$

$$W_a = 84000 \cdot (1 + 0,25) \cdot 0,3 = 3,15 \cdot 10^4 \text{ N}$$

#### 7.4. Proračun otpora vožnje putničkih vagona mase 400 t (brzina do 230 km/h)

- otpor vožnje putničkih vagona u ravnini:

$$w'_h = 2 + k \cdot \left(\frac{v'}{10}\right)^2$$

$$w'_h = 2 + 0,032 \cdot \left(\frac{230}{10}\right)^2 = 18,928 \text{ daN/t} \rightarrow w_h = 0,1893 \text{ N/kg}$$

$$W_h = m \cdot w'_h = 7,571 \cdot 10^4 \text{ N}$$

- otpor putničkih vagona na usponu:

$$W_i = \pm G \cdot \frac{i}{1000}$$

$$W_i = (400000 \cdot 9,81) \cdot \frac{25}{1000} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ N}$$

- otpor putničkih vagona u zavoju:

$$w'_r = \frac{650}{R - 55}$$

$$w'_r = \frac{650}{300 - 55} = 2,653 \text{ daN/t} \rightarrow w_r = 0,02653 \text{ N/kg}$$

$$W_r = m \cdot w_r = 1,061 \cdot 10^4 \text{ N}$$

- otpor ubrzanja teretnih vagona:

$$W_a = m \cdot (1 + \xi) \cdot a$$

$$W_a = 400000 \cdot (1 + 0,04) \cdot 0,3 = 1,248 \cdot 10^5 \text{ N}$$

## 7.5. Proračun snage lokomotive

Snaga lokomotive za vuču teretnih vagona mase 2000 t brzinom od 120 km/h:

$$P = F \cdot v$$

$$P = 1,818 \cdot 10^3 \cdot 33,333 = 6,06 \cdot 10^6 \text{ W}$$

Snaga lokomotive za vuču putničkih vagona mase 400 t brzinom od 230 km/h:

$$P = F \cdot v$$

$$P = 9,458 \cdot 10^4 \cdot 63,889 = 6,043 \cdot 10^6 \text{ W}$$

Iz gornjeg proračuna vidimo da je potrebna snaga lokomotive za vuču teretnih vagona mase 2000 t brzinom od 120 km/h i putničkih vagona mase 400 t brzinom od 230 km/h približno jednaka i iznosi 6,06 MW.

Provedenim proračunom dobivena je približno točna snaga lokomotive, budući da snaga lokomotive Siemens ES64U4 iznosi između 6-6.4 MW.

## 8. ZAKLJUČAK

Prva željeznička vozila bila su opremljena jednostavnijim ručnim kočnicama. Sa vremenom tehnologija se sve više razvijala tako da danas postoje kočni sustavi različitih izvedbi. Svojim razvojem omogućen je sigurniji prijevoz tereta isto tako i sigurniji prijevoz ljudi pri većim brzinama vlaka.

Osnovne kočnice koje se koriste u svim željezničkim vozilima su zračne kočnice. Od svih različitih izvedbi najviše su u upotrebi neizravne (automatske) kočnice koje imaju najbolja svojstva i najveću sigurnost pri primjeni.

Iz analize otpora vožnje vidljivo je da izračunavanje otpora vožnje predstavlja veliki problem zbog vrlo složenih i nepouzdatih veličina i čimbenika koji su vrlo promjenjivi i kompleksni te ih je teško definirati. Današnji analitički izrazi za otpore vožnje suvremenih željezničkih vozila oslanjaju se u biti na empirijski dobivene rezultate mnogobrojnih eksperimenata s vozilima na pruzi u realnim uvjetima, a koji su uglavnom i potvrđeni teoretskim istraživanjima i pokusima. Kod detaljnije analize otpora vlaka u zavoju možemo zaključiti da je ona bazirana na temelju smanjenja brzine u odnosu na brzinu po ravnoj horizontalnoj stazi, te možemo zaključiti da otpor u zavoju možemo prikazati kao razliku između vučne sile  $F_V$  i ukupnog otpora u zavoju  $W_U$ .

## 9. LITERATURA

- [1] Zavada, J.: Željeznička vozila i vuča vlakova, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2004.
- [2] Tepić, J, et. al.: Methodology for Determining of Train Curving Resistances With Respect to Vehicle Mass and Speed, Strojarstvo, Časopis za teoriju i praksu, Vol.51 No.6, Prosinac, 2009.
- [3] Sach, K.: Elektrische Triebfahrzeuge-Band 1, Zweite Aufgabe, Springer-Verlag Wien, New York, 1973.
- [4] Serdar, J.: Lokomotive, Opći dio, Sveučilišna naklada, Liber, Zagreb, 1997.
- [5] Tepić, J.: Istraživanje utjecaja mase i brzine šinskih vozila na vrednost otpora od krivine, Monografija, FTN Izvadništvo, GRID, Novi Sad. 2007.
- [6] Tepić, J.: Vuča vozova, FTN Izvadništvo, GRID, Novi Sad, 2008.
- [7] Tepić, J, Kostalec, M.: Application of gravitational method by determination of rail vehicles constant resistance, Transactions of FAMENA, Vol. 32-2, str. 31.-40., Zagreb, 2008.
- [8] Tepić, J.: Metodologija određivanja otpora krivine voza mešovito sastava, Naučno stručno tematsko savetovanje "Saobraćaj u vanrednim uslovima", str. 173-194, Beograd, 2006.
- [9] Dmitrije, D.: Vuča vozova, Zavod za novinsko-izviđačku i propagandnu djelatnost JŽ, Beograd, 1985.
- [10] Siemens d.d. : Tehnički opis lokomotive ES64U4

## **10. POPIS SLIKA**

Slika 1. Komponente težine vozila na usponu

Slika 2. Ovisnost otpora u zavoju prema navedenim jednadžbama za  $L_0 = 3\text{m}$

Slika 3. Ovisnost specifičnog otpora vlaka o brzini vožnje na putu  $s$

Slika 4. Raspored praznih P i natovarenih T vagona u sustavu vlaka vučenog lokomotivom

Slika 5. Prikaz vučne sile, otpora i vektora brzine na obodu kotača

Slika 6. Prikaz koordinatnog sustava momenata, odnosno vučne sile vozila i momenta motora

Slika 7. Prikaz zaustavnih puteva vlakova

Slika 8. Prikaz slike lokomotive simens ES64U4

## **11. POPIS TABLICA**

Tablica 1. Naponi napajanja za pogon lokomotive ES64U4



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

### IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada

pod naslovom **ANALIZA VELIČINA KOJE ODREĐUJU UČINKOVITOST  
KOČENJA VLAKA**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 9/7/2018

Stjepan Sudar  
(potpis)