

# Utjecaj otpora kotrljanja na učinak rudarske mehanizacije

---

**Perić, Magdalena**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:676307>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**UTJECAJ OTPORA KOTRLJANJA NA UČINAK RUDARSKE MEHANIZACIJE**

Završni rad

Magdalena Perić

R4369

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/  
URBROJ: 251-70-11-23-2  
U Zagrebu, 11.09.2023.

**Magdalena Perić, studentica**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 03.07.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### UTJECAJ OTPORA KOTRLJANJA NA UČINAK RUDARSKE MEHANIZACIJE

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv.prof.dr.sc. Tomislav Korman nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Tomislav Korman

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)

## UTJECAJ OTPORA KOTRLJANJA NA UČINAK RUDARSKE MEHANIZACIJE

Magdalena Perić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Transport je jedna od važnijih operacija tijekom eksploatacije rudnika. U vrijeme kada se potrošnja energije reducira što je više moguće tako i u rudarstvu se provode brojna istraživanja i studije kako bi se ta potrošnja smanjila što više. U radu su opisani, općenito, potrošnja energije u rudarskim procesima te čimbenici koji mogu utjecati na nju. Jedan od njih je i otpor kotrljanja. Opisano je što je to otpor kotrljanja, od čega se sve sastoji, koji faktori utječu na njega te problemi koji se mogu javiti kod eksploatacije. Ukazano je na bitne sustave koji se moraju pri projektiranju dobro ispitati i odrediti kako bi dugoročno dali dobra rješenja koja mogu svesti njegov utjecaj na minimum, kao i načini na koji se to može postići.

Ključne riječi: otpor kotrljanja, koeficijent otpora kotrljanja, potrošnja energije, transport, kamion

Završni rad sadrži: 27 stranica, 2 tablice, 12 slika, 0 priloga, i 10 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr.sc. Tomislav Korman, izvanredni profesor

Ocjenjivači: Dr.sc. Tomislav Korman, izvanredni profesor RGNF  
Dr.sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF  
Dr.sc. Mario Klanfar, izvanredni profesor RGNF

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. POTROŠNJA ENERGIJE U RUDARSTVU</b> .....	2
<b>3. OTPOR KOTRLJANJA</b> .....	3
3.1. Utjecaj guma na otpor kotrljanja .....	3
3.2. Mjerenje otpora kotrljanja .....	5
<b>4. OTPOR KOTRLJANJA KOD RUDARSKE MEHANIZACIJE</b> .....	8
4.1. Transportne ceste.....	9
4.1.1. Projektiranje cesta .....	9
4.1.1.1. Integrirani pristup.....	10
4.1.2. Održavanje transportnih cesta .....	10
4.2. Brzina kamiona .....	11
<b>5.UTJECAJ OTPORA KOTRLJANJA NA POTROŠNJU GORIVA</b> .....	12
5.1. Potrošnja goriva kod kamiona.....	13
5.1.1. Trajanje ciklusa .....	16
<b>6. UPRAVLJANJE I SMANJENJE OTPORA KOTRLJANJA</b> .....	17
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	19
<b>8. LITERATURA</b> .....	20

## Popis slika

<b>Slika 2-1.</b> Prikaz potrošnje energije za industrije sirovina u EU u 2017.g. (T. Bide.,2020.).....	2
<b>Slika 3-1.</b> Sile koje djeluju na kotrljajuću gumu (J.P.Coffe,2015.) .....	3
<b>Slika 3-2.</b> Prikaz razlike u konstrukciji između (a) radijalne i (b) dijagonalne gume (J.P.Coffe,2015.).....	5
<b>Slika 3-3.</b> Odnos koeficijenta otpora kotrljanja i tlaka u gumama (A.Soofastaei i sur.,2015.) .....	6
<b>Slika 3-4.</b> Shema mjerenja otpora kotrljanja na terenu (N.P.Widodo i sur.,2009.) .....	8
<b>Slika 4-1.</b> Odnos između otpora kotrljanja i intervala održavanja ceste (A.Soofastaei i sur.,2015.)	10
<b>Slika 4-2.</b> Odnos brzine kamiona i koeficijenta otpora kotrljanja kod hrapavih i glatkih površina (A.Soofastaei i sur.,2015.).....	11
<b>Slika 5-1.</b> Utjecaj otpora kotrljanja na izvedbu radova na kopu. Kamion koji se kreće putem s većim otporom kotrljanja mora proizvesti više snage iz motora i potrošiti više goriva za svladavanje otpora.(Thompson, 2021).....	12
<b>Slika 5-2.</b> Ključni parametri potrošnje energije kamiona (A.Soofastaei i sur.,2016.).....	14
<b>Slika 5-3.</b> Otpor nagiba (A.Soofastaei i sur.,2016.).....	16
<b>Slika 5-4.</b> Shematski prikaz teretnog kamiona i čimbenika koji utječu na performanse kamiona (A.Soofastaei i sur.,2016.).....	15
<b>Slika 5-5.</b> Prikaz trajanja jednog ciklusa kamiona (A.Soofastaei i sur.,2016.).....	16

## Popis tablica

<b>Tablica 4-1.</b> Parametri koji utječu na otpor kotrljanja (A.Soofastaei i sur.,2015.).....	9
<b>Tablica 5-1.</b> Tipične vrijednosti otpora kotrljanja (A.Soofastaei i sur.,2016.).....	14

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$R_c$	/	koeficijent otpora kotrljanja
$TR$	/	stanje transportne ceste
$GR$	%	nagib odvozne ceste
$F_c$	L/100 km	potrošnja goriva kod kamiona
$SFC$	kg/kWh	specifična potrošnja goriva kamiona
$FD$	%	gustoća goriva
$P$	kW	snaga kamiona
$W$	%	ukupni otpor kretanju vozila
$r$	mm	radijus kotača kamiona
$T$	Nm	okretni moment
$LF$	%	faktor opterećenja motora

## 1. UVOD

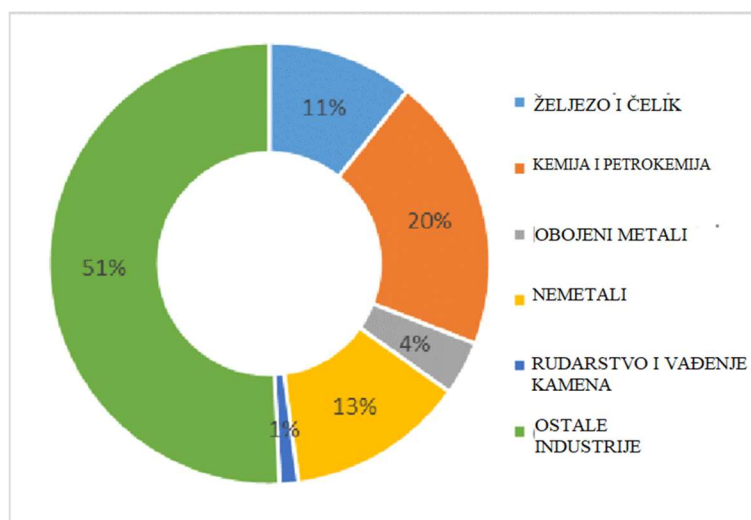
Transport kao dio rudarske operacije ima značajan ekonomski i ekološki utjecaj. Ako uzmemo u obzir da se veći dio rudarskih operacija odvija pomoću kamiona i bagera, važno je odrediti i parametre koji mogu utjecati na kvalitetu transportnih cesta kao i samu učinkovitost rudarske mehanizacije. Jedan od najznačajnijih parametara je upravo i otpor kotrljanja, što je i tema ovog završnog rada. Posljednjih nekoliko desetljeća ulažu se veliki naponi kako bi se smanjila potrošnja energije u rudarstvu, a samim time bi se uštedila i značajna ekonomska sredstva koja bi se mogla uložiti u optimizaciju opreme i tehnike.

Otpor kotrljanja se pokazao kao bitan faktor u tome te se proučavao desetljećima. Pošto se radi o dosta složenom sustavu u kojem imamo jako puno utjecajnih čimbenika i svaki od njih se mora detaljno proučiti i vidjeti kako i na koji način doprinosi otporu kotrljanja, možemo djelovanjem na njih poboljšati sami učinak prvenstveno kamiona koji su sastavni dio svakog rudnika bio on površinski ili podzemni. Upravo iz navedenih razloga odlučeno je pobliže istražiti što je to otpor kotrljanja, glavne parametre koji utječu na njega, te njegov utjecaj na učinak rudarske mehanizacije. U radu je dat osvrt i na neke bitne faktore u rudarstvu koji mogu dugoročno utjecati na otpor kotrljanja te se pri projektiranju moraju dobro istražiti kako bi se utjecaj otpora kotrljanja gledajući dugoročna rješenja mogao svesti na minimum.



## 2. POTROŠNJA ENERGIJE U RUDARSTVU

Potrošnja energije svojstvena svakoj komercijalnoj aktivnosti, postala je sve prisutnija u javnoj svijesti. Rudarstvo i prerada minerala su dva industrijska sektora za koja se smatra da su veliki potrošači energije. Općenito je prihvaćeno da 70% energije potrošene u ova dva sektora odlazi na transport i usitnjavanje pogotovo kod određenih ruda, kao što su ugljen i željezna ruda koje zahtijevaju ogromne količine transporta rasutog tereta što u krugu rudarske eksploatacije predstavlja 30% ukupne potrošene energije. S globalne točke gledišta proizvodnja čelika troši znatno više energije nego proizvodnja bilo kojeg drugog metala (J.P.Coffey,2015.). Dakle, za različite mineralne sirovine kao i industrije u Europskoj uniji imamo različitu potrošnju energije što možemo vidjeti na slici 2-1. U budućnosti se očekuje povećanje potrošnje energije u rudarstvu. To povećanje je rezultat uklanjanja otkrivke iznad ležišta koja su mnogo dublja od trenutnih i koja postaju ekonomski održiva. Ovaj učinak može biti toliko jak da će se apsolutne cijene metala morati prilagoditi kako bi mogle održavati samu proizvodnju (J.P.Coffey, 2015.).



Slika 2-1. Prikaz potrošnje energije za industrije sirovina u EU u 2017.g. (T. Bide.,2020.)

Pošto većina energije koja se koristi u rudarstvu dolazi iz neobnovljivih izvora kao što su fosilna goriva, industrija ima jako velik utjecaj i na emisiju ugljikovog dioksida upravo zbog velike potrošnje energije. Zato se posljednjih godina intenzivno radi na smanjivanju potrošnje same energije. Kao što smo mogli vidjeti veliki udio energije odlazi na transport gdje imamo jako velike troškove. Kako bi što efikasnije i ekonomičnije transportirali rudu, detaljnim proučavanjem smo došli do zaključka da veliku ulogu ima otpor kotrljanja i njegov utjecaj na samo transportno sredstvo.

### 3. OTPOR KOTRLJANJA

Teorija otpora kotrljanja istraživana je, s ciljem poboljšanja performansi vozila, približno jedno stoljeće. Otpor kotrljanja definiramo kao silu suprotnu smjeru kretanja kotača pri kretanju. Može se izračunati nakon procjene koeficijenta kotrljanja. Koeficijent otpora kotrljanja u svom najosnovnijem obliku može se izraziti preko slijedeće jednadžbe:

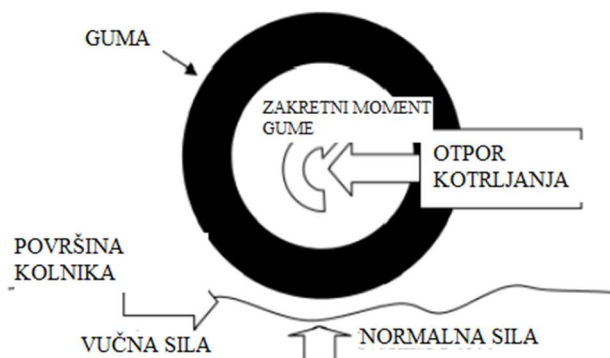
$$R_C = \frac{\text{Opterećenje gume (kN)}}{\text{Sila otpora kotrljanja(kN)}} \quad (3-1)$$

gdje je:  $R_C$  – koeficijent otpora kotrljanja [ / ]

Pošto trenutno ne postoji dostupna relacija koja povezuje tlak u gumama, brzinu, otpor kotrljanja i koeficijent otpora kotrljanja, jednadžbu (3-1) možemo primjenjivati samo u jedinstvenim situacijama. Otpor kotrljanja je rezultat složenog sustava koji uključuje mnoge parametre. Iako se tako često izražava, otpor kotrljanja nije sila već skalarna količina izgubljene energije po prijađenom metru. Na otpor kotrljanja utječu brojni parametri, a neki od ključnih su: gume, fizičko mehanička svojstva tla te samo opterećenje vozila (J.P.Coffe,2015.).

#### 3.1.Utjecaj guma na otpor kotrljanja

Gume igraju ključnu ulogu kod otpora kotrljanja tijekom vožnje bilo kojeg vozila. To je jedini dio vozila koji dolazi u dodir s tlom i ta interakcija je dosta složena. Tijekom kotrljanja na gumu djeluju mnoge sile (Slika 3-1.).

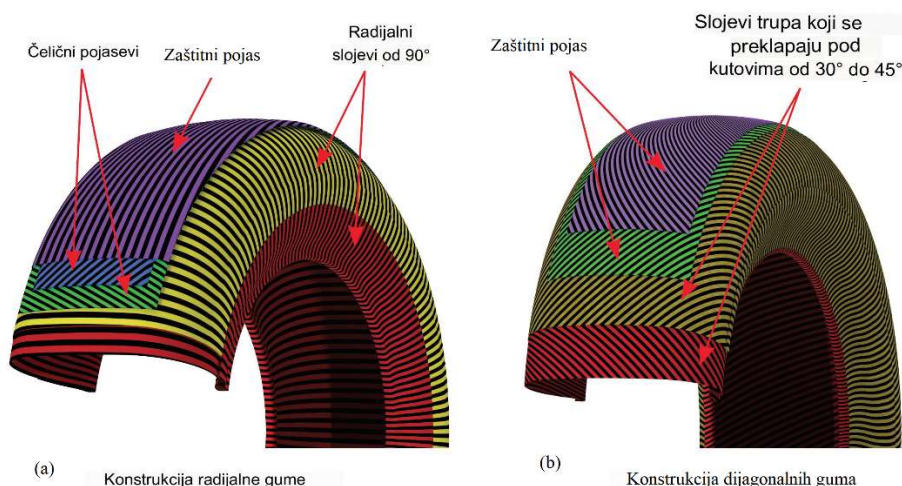


Slika 3-1. Sile koje djeluju na kotrljajuću gumu (J.P.Coffe,2015.).

Gubici energije zbog interakcije guma s tlom i samog otpora koji se pri tome pojavljuje može se podijeliti u tri kategorije:

- Trenje između gume i ceste (2-10%)
- Otpor zraka unutar i izvan gume (1,5-3,5%)
- Unutarnja histereza gume (90-95%)

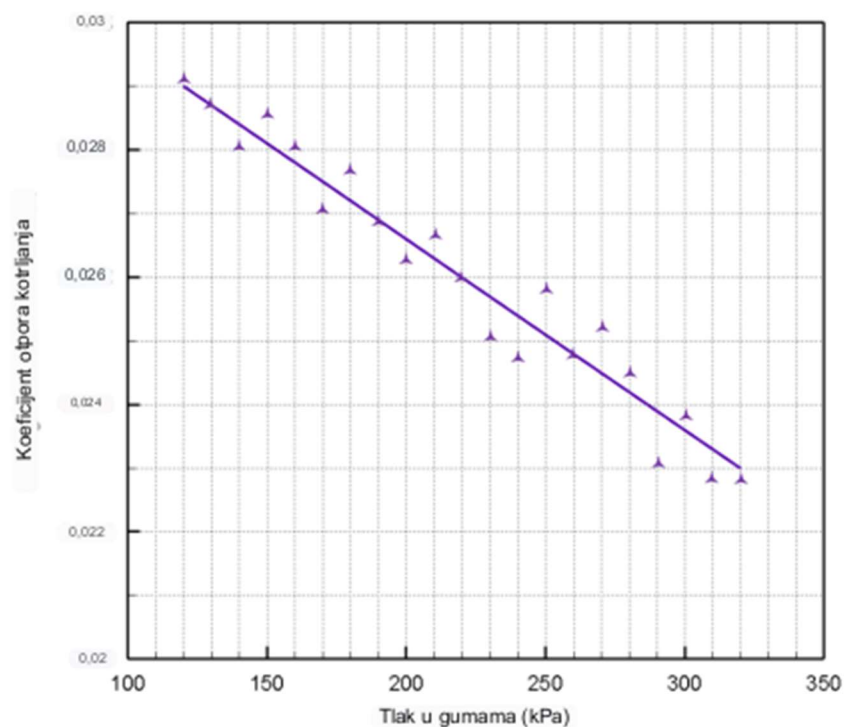
Potencijal za poboljšanja u tehnologiji guma vidljiv je tek nedavno u prošlosti. Procjenjuje se da su gubici pri kotrljanju smanjeni do 70% implementirajući radijalne konstrukcije guma u posljednjih nekoliko desetljeća. Evolucija radijalnih guma dogodila se zahvaljujući poboljšanju gumenih smjesa što znači da guma više nije tako kruta i da se bolje prilagođava površini ceste. Fleksibilnost se postiže čeličnim pojasevima unutar radijalne gume koji idu okomito na rub i ne nastavljaju se kroz bočne stjenke. Ova razlika u kontaktnoj površini znači da guma može bolje prolaziti kroz teksturu kolnika. Naknadno, histereza se smanjuje zbog veće kontaktne površine što rezultira manjim savijanjem bočnih stjenki gume koje su potrebne da bi se prilagodile površini ceste, što rezultira manjim nakupljanjem topline i gubitkom energije. Nadalje, sva proizvedena toplina se lakše rasipa kroz tanje bočne stjenke radijalnih guma, što je značajno zbog niske difuzije gumenih smjesa koje se koriste u izradi guma. Stoga radijalna guma jednake veličine općenito poboljšava otpor kotrljanja i trakciju, no to ovisi o korištenju ispravnog radnog tlaka (J.P.Coffe,2015.).



**Slika 3-2.** Prikaz razlike u konstrukciji između (a) radijalne i (b) dijagonalne gume (J.P.Coffe,2015.)

Osim tipa gume, na otpor kotrljanja bitno utječe i temperatura i tlak u gumama. Istraživanjem je otkriveno da povećanje tlaka u gumama utječe na smanjeni koeficijent otpora kotrljanja (Slika 3-3.). To odgovara smanjenju otpora kotrljanja pri višim tlakovima

u gumama, a guma koja je izložena višim temperaturnim okolinama ima kraći vijek trajanja (J.P.Coffe,2015.). Tlak u gumama lako se mijenja na rudniku i relativno lako podešava. Treba napomenuti da tlak u gumama nije konstantan tijekom rada kamiona i zapravo na njega utječe temperatura gume. Ova se temperatura mijenja tijekom normalnog rada kamiona i tako utječe na tlak u gumama tijekom transporta materijala. Osim navedenih čimbenika koji direktno utječu na otpor kotrljanja, bitnu ulogu ima i podloga po kojoj se kreću vozila. Treba paziti na vrstu materijala koji se ugrađuje pri izgradnji transportnih cesta kao i o uvjetima koji su na njoj, što nama u rudarstvu prilikom obavljanja rudarskih radnji bitno utječe i na same troškove eksploatacije (A.Soofastaei i sur.,2015.).



**Slika 3-3.** Odnos koeficijenta otpora kotrljanja i tlaka u gumama (A.Soofastaei i sur.,2015.)

### 3.2. Mjerenje otpora kotrljanja

Otpor kotrljanja, na temelju određenog kamiona i tipa ceste, se može odrediti pomoću natovarenog kamiona kojeg vuče drugo vozilo koje isto može biti ili kamion ili grejder te se mjeri vučna sila potrebna za pomicanje natovarenog vučnog kamiona konstantnom malom brzinom.

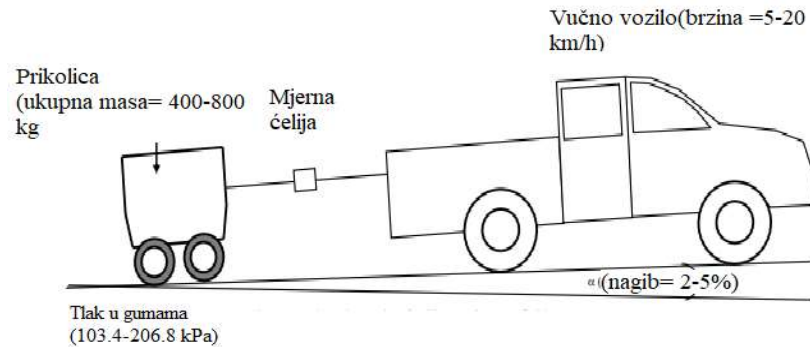
Autori D.D. Tannant i B. Regensburg predložili su sljedeći način ispitivanja otpora kotrljanja koji se sastoji od:

- teretni kamion
- locirati prikladno mjesto s blagim nagibom kako bi se osiguralo kontinuirano očitavanje dinamometra te zapisati lokaciju i opis materijala
- sastaviti remen i dinamometar na tlu i postaviti kamion i vučno vozilo (grejder) tako da operater može vidjeti dinamometar
- spojiti remen na kamion i vučno vozilo
- mjenjač kamiona staviti u neutralni položaj i signalizirati operateru vučnog vozila da polako zateže remen i da polagano počne povlačiti kamion
- očitati mjerač dinamometra nakon postizanja ustaljenog gibanja
- odrediti uspon (nagib) tla prijeđenog tijekom ispitivanja koristeći libelu, šipku i lanac

Iako određivanje otpora kotrljanja pomoću opreme koja se inače koristi u rudniku daje pouzdane vrijednosti, takvi su postupci skupi i opterećuju opremu. Alternativni pristup je korištenje lake prikolice za provođenje testa i korelaciju rezultata s testovima koji koriste opremu za vuču u rudniku. Budući da je manje skupa za rukovanje, lagana prikolica mogla bi se koristiti za češće prikupljanje dodatnih podataka i pružiti ulogu nadzora kako bi se ukazalo na znakove propadanja ceste (D.D. Tannant, B. Regensburg, 2001.).

Kao primjer terenskog ispitivanja možemo navesti ispitivanje koje je provedeno u rudniku ugljena (N.P. Widodo i sur.,2009.). Ispitivanje se provodi pomoću prikolice s četiri kotača, dizelskog vozila kao vučnog automobila i mjernih ćelija kao uređaja za mjerenje sile (slika 3.4). Mjerenja su provedena na rudarskoj neasfaltiranoj cesti na tri različite lokacije s različitim vrstama materijala: cesta za pregled rudnika, cesta na odlagalištu i zbijena cesta za odvoz. Sva mjerenja su provedena u relativno suhim uvjetima. Prije samog ispitivanja određena su fizičko-mehanička svojstva materijala : gustoća, veličina zrna, kohezija i CBR. Materijali na prvoj i drugoj lokaciji pokazali su relativno veću čvrstoću na smicanje. Međutim, površina ceste na trećoj lokaciji prekrivena je slojem od drobljenog kamena što joj u konačnici povećava nosivost ceste. Masa prazne prikolice je 100kg, dok joj je zapremnina 0,6 m<sup>3</sup>. Ispitivanje se provelo za tri različite tipove guma (radijalne, dijagonalne i traktorske), pri različitim opterećenjima (400-800kg), brzinama (5,10,20 km/h), tlaku u gumama (103.4-206.8 kPa) i nagibu (2-5%) na sve tri lokacije. Ispitivanje se sastoji od

pripreme i osiguranja ceste za ispitivanje, utovara tereta u prikolicu, spajanja mjerne ćelije (dinamometra) na spojnu cijev koja povezuje prikolicu sa vučnim automobilom i postavljanja brzine vozila. Mjeri se sila u vremenskom intervalu od 3 s. (N.P.Widodo i sur.,2009.)



**Slika 3-4.** Shema mjerenja otpora kotrljanja na terenu (N.P.Widodo i sur.,2009.)

Kalibracija mjernih ćelija provedena je očitanjem vrijednosti kada je mjerna ćelija opterećena specifičnim opterećenjem. Rezultati su pokazali da mjerna ćelija i opterećenje imaju linearan odnos. Jednadžba linearne regresije korištena je za izračunavanje vučne sile. Otpor kotrljanja je izračunat iz izmjerene sile povlačenja ispravljene sa stupnjem otpora, dok je koeficijent otpora kotrljanja dobiven dijeljenjem otpora kotrljanja s ukupnim primijenjenim opterećenjem. Pokazano je da koeficijent otpora kotrljanja varira prema promjenama stanja guma, radnim parametrima te lokaciji ispitivanja. Dobivene su vrijednosti od 0.027 do 0.081 što u usporedbi s rezultatima Taboreka (1975) pripadaju materijalima srednje tvrdog tla (0.06-0.08)(N.P.Widodo i sur.,2009.).

## 4. OTPOR KOTRLJANJA KOD RUDARSKE MEHANIZACIJE

Otpor kotrljanja je važan faktor u produktivnosti, trajanju ciklusa, potrošnji goriva, održavanju i sigurnosti rada kamiona u površinskim rudnicima. Odgovoran za gubitke energije u transportu materijala, poželjno je razumijevanje otpora kotrljanja kako bi se njime moglo bolje upravljati i time poboljšati učinkovitost rudarske operacije. Studija u području otpora kotrljanja može se primijeniti i na sektor upravljanja gumama u površinskim rudnicima. Gume i dalje predstavljaju veliki trošak u radu kamiona, a otpor kotrljanja utječe na njih na više načina. Nakupljanje topline u gumama kamiona vodeći je uzrok propadanja gume a glavi uzročnik tomu je otpor kotrljanja koji se javlja. Ovo nakupljanje topline može potencijalno dovesti do kvara gume te opasne i skupe nezgode. Kao što je već spomenuto na otpor kotrljanja utječu brojni parametri, a možemo ih svrstati u četiri velike grupe, a to su: cesta, gume, sustav i vremenske neprilike. Svaki od tih parametara možemo kategorizirati kao parametar dizajna (D), konstrukcije (C), rada (O) ili održavanja (M) (Tablica 4.1.) Tijekom jednog istraživanja svakom parametru dodijeljena je ocjena između 0 i 100 koja predstavlja utjecaj određenog parametra na otpor kotrljanja, pri čemu 0 nije utjecajan, a 100 vrlo utjecajan. Rezultati istraživanja pokazuju da promjer gume ima najmanji utjecaj na otpor kotrljanja s rezultatom od 40%. Kvarovi, stanje guma, temperatura guma, ponašanje vozača i temperatura okoline dobili su rang od približno 50%. Utvrđeno je da održavanje, tlak u gumama i brzina kamiona imaju najveći utjecaj na otpor kotrljanja, s rezultatima između 80 i 90%. Svi preostali parametri su postigli između 50 i 70% (A.Soofastaei i sur.,2015.).

**Tablica 4-1.** Parametri koji utječu na otpor kotrljanja (A.Soofastaei i sur.,2015.)

	Skupina	Kategorija				Parametar
		D	C	O	M	
<b>Otpor kotrljanja</b>	Cesta	✓			✓	Hrapavost
		✓			✓	Nedostatci
		✓	✓		✓	Custoća materijala
				✓		Sadržaj vlage
					✓	Održavanje ceste
	Guma	✓		✓	✓	Prodor gume
		✓				Promjer gume
				✓	✓	Tlak u gumama
			✓		✓	Starije gume
				✓	✓	Pumpanje guma
	Sustav			✓		Temperatura gume
				✓		Brzina kamiona
	Vrijeme			✓		Ponašanje vozača
				✓		Vlažnost
				✓		Oborine
				✓		Temperatura

\* D:Dizajn C:Konstrukcija O:Operativno M:Održavanje

## **4.1. Transportne ceste**

Za transport koji se odvija pomoću kamiona bitan faktor je razvijena prometna mreža. Dobro isplanirana i projektirana cesta svakako utječe na sigurnost, produktivnost i troškove rudnika. No, osim dobro izgrađene ceste važan faktor svakako je i održavanje iste. Dobro izgrađena i održavana cesta ima dosta prednosti za izvođenje rudarske operacije, a neke od njih su:

- Sigurniji uvjeti vožnje i smanjenje opasnosti u prometu,
- Smanjeni operativni troškovi kamiona., kraće trajanje ciklusa, niži trošak transporta po toni materijala,
- Smanjeni troškovi održavanja ceste, manja šteta od vode zbog nakupljanja, smanjenja prašine i dulje vrijeme trajanja ceste,
- Manje opterećenje pogonskog sklopa, guma, okvira i ovjesa-poboljšan vijek trajanja guma i naplataka.

Odabir odgovarajućih materijala vrlo je važan za izgradnju cesta. Odabir se temelji na svojstvima materijala kao što su granulacija, tlačna čvrstoća, i krutost. Materijal će se možda morati zdrobiti kako bi se zadovoljila određena raspodjela veličine čestica. Površinski sloj zahtijeva najbolji dostupni materijal, jer je izložen najvećim atmosferilijama i najvećim dinamičkim opterećenjima zbog kretanja kamiona (D.D. Tannant, B. Regensburg,2001.).

### **4.1.1. Projektiranje cesta**

Mnoge transportne ceste u rudnicima projektirane su empirijski oslanjajući se isključivo na lokalnom iskustvu. Iako empirijski pristup daje rješenja za transportne ceste, općenito je nezadovoljavajući jer ima potencijal za prevelike izdatke, kako za troškove izgradnje tako i za operativne troškove (D.D. Tannant, B. Regensburg,2001.).

#### **4.1.1.1. Integrirani pristup**

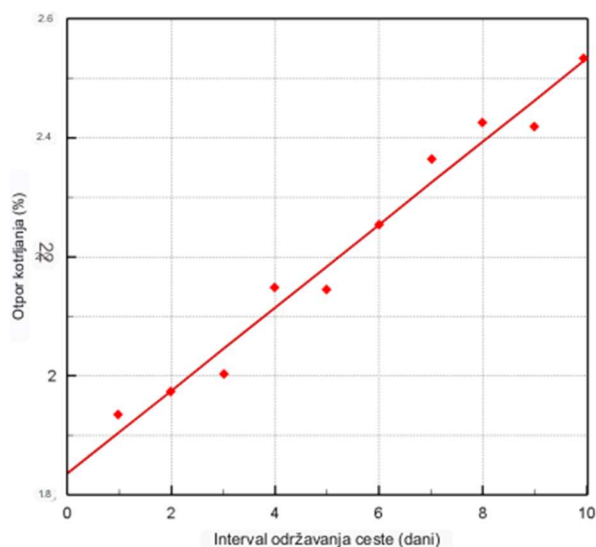
Osim empirijskog imamo i integrirani pristup. Ako je jedna komponenta dizajna manjkava, ostale komponente neće raditi sa svojim maksimalnim potencijalom što dovodi do poteškoća i povećanja troškova. Rješenje nije u redovitom održavanju, nego u tome da svaka komponenta mora biti ispravno obrađena prilikom projektiranja. Početna točka prilikom projektiranja najčešće je geometrijski dizajn. Odnosi se na izgled i poravnanje ceste u



vodoravnoj (širina ceste, radijus zavoja) i okomitij (nagibi rampe, poprečni pad/nagib) ravnini te zahtjevima za zaustavljanje i preglednost. Konačan cilj je proizvesti optimalno učinkovit i siguran geometrijski dizajn. Nakon geometrijskog slijedi konstrukcijski (strukturni) dizajn. Njegov cilj je osigurati snagu transportne ceste da izdrži opterećenje kamiona bez pretjeranog održavanja. Funkcionalni dizajn usredotočen je na odabir habajućeg sloja materijala za pokrivanje gdje je potreban najprikladniji izbor koji minimizira povećanje otpora kotrljanja na površini ceste (D.D. Tannant, B. Regensburg,2001.).

#### 4.1.2. Održavanje transportnih cesta

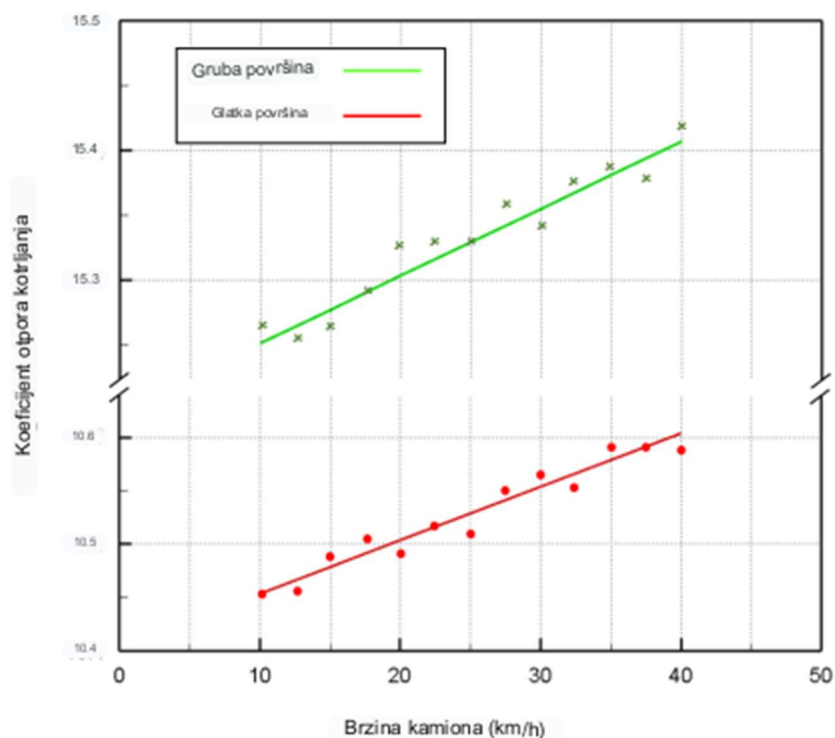
Održavanje cesta odnosi se na procese koji se poduzimaju na rudničkim cestama za popravak oštećenja i drugih problema s površinom ceste. Također se odnosi na postupke koji se poduzimaju kako bi se smanjila vjerojatnost pojave ovih nedostataka i povećala opća kvaliteta površine ceste. Interval održavanja određen je brojnim čimbenicima uključujući plan rudnika, financijske zahtjeve i ograničenja, dostupnost osoblja i kvalitetu/stanje transportne ceste (A.Soofastaei i sur.,2015.) . Cijeli ovaj proces određuje se još u projektnoj fazi jer neki rudnici nemaju dovoljno sredstava za redovito održavanje pa pri projektiranju se uzima i taj faktor te se određuje najpovoljnije rješenje. Što su ceste bolje izgrađene, to će biti sporija stopa propadanja i manje će biti potrebno održavanje. Odnos između intervala održavanja i otpora kotrljanja za određeno mjesto rudnika prikazano je na slici 4-2. Ova slika pokazuje da dulje vremensko razdoblje između održavanja rezultira povećanim otporom kotrljanja (A.Soofastaei i sur.,2015.)



Slika 4-1. Odnos između otpora kotrljanja i intervala održavanja ceste (A.Soofastaei i sur.,2015.)

## 4.2.Brzina kamiona

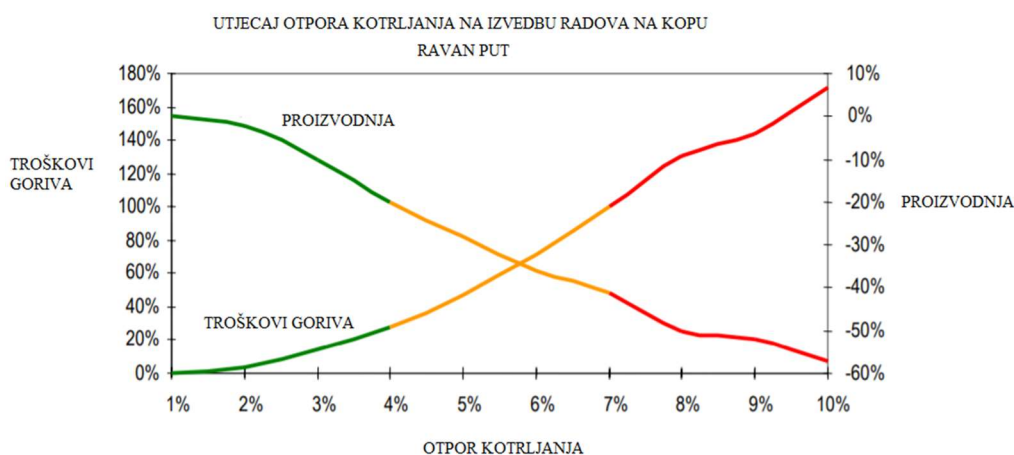
Brzina kamiona potpada pod operativno svojstvo sustava i odnosi se na brzinu kojom se kamion kreće preko površine ceste. Na brzinu kamiona utječe niz različitih čimbenika uključujući nosivost, uvjete na cesti, stanje guma, ponašanje vozača i nagib ceste za prijevoz. Rezultati prikazani na slici 4-2 dobiveni su za približno 100 guma za teretna vozila, testiranih u ispitivačkom postrojenju Tehničkog sveučilišta u Gdanjsku. Dobiveni su za dvije različite površine bubnja, reprezentativne za glatke i hrapave površine ceste. Testirane gume sastojale su se od niza različitih marki i geometrijskih dimenzija. Konačni rezultati pokazuju da povećanje brzine kamiona rezultira povećanim koeficijentom otpora kotrljanja. Utvrđeno je da je odnos isti i za grube i za glatke površine ceste (A.Soofastaei i sur.,2015.).



**Slika 4-2.** Odnos brzine kamiona i koeficijenta otpora kotrljanja kod hrapavih i glatkih površina (A.Soofastaei i sur.,2015.)

## 5.UTJECAJ OTPORA KOTRLJANJA NA POTROŠNJU GORIVA

Kao što smo do sada spomenuli, redukcija potrošnje energije postaje sve više bitna na globalnoj razini pogotovo nakon povećanja cijena goriva 1970-tih, ali i nedavnih povećanja. Rudarstvo kao grana industrije je među vodećima u količini potrebne i potrošene energije. Razlog tome je obavljanje operacija kao što su istraživanje, eksploatacija, transport te oplemenjivanje koje same po sebi zahtijevaju dosta energije. Trenutna ulaganja u poboljšanje rudarske opreme rezultirala su značajnim smanjenjem potrošnje energije. Velika količina energije također se može uštedjeti poboljšanjem rudarskih tehnologija i sustava upravljanja energijom. Ušteda energije također je povezana sa smanjenjem miliona tona emisija plinova zbog korištenja naftnih derivata kao glavnog izvora energije. Naravno vrsta goriva koji se koristi u rudniku ovisi o vrsti rudarske metode i opremi koja se koristi. Servisni kamioni, utovarivači, buldozeri, hidraulični bageri, damperi i pomoćna oprema, kamioni i mobilna oprema za održavanje, primjeri su dizelske opreme koja se koristi u rudarskim operacijama. Kamioni se u površinskim rudnicima koriste za prijevoz rude i otkrivke iz površinskog kopa do deponije, odlagališta ili do sljedeće faze rudarskog procesa. Koriste se u kombinaciji s drugom opremom ovisno o proizvodnom kapacitetu i rasporedu rudnika. Kamioni koji se koriste pri transportu u površinskim rudnicima troše veliku količinu energije i to je potaknulo proizvođače kamiona i velike rudarske korporacije da provedu niz istraživačkih projekata o energetskej učinkovitosti prijevoza kamiona (A.Soofastaei i sur.,2016.). Ekonomski utjecaj otpora kotrljanja na izvedbu radova možemo vidjeti na slici 5-1.



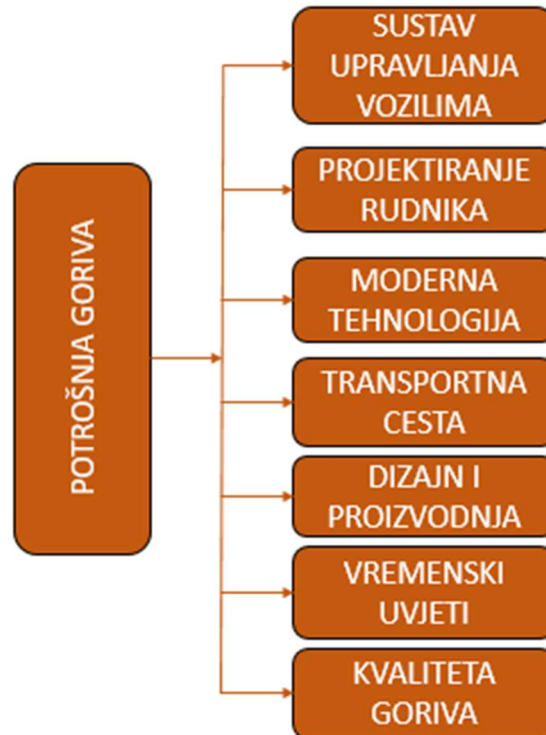
**Slika 5-1.** Utjecaj otpora kotrljanja na izvedbu radova na kopu. Kamion koji se kreće putem s većim otporom kotrljanja mora proizvesti više snage iz motora i potrošiti više goriva za svladavanje otpora.(Thompson, 2021)

## 5.1. Potrošnja goriva kod kamiona

Potrošnja goriva kamiona je funkcija različitih parametara, od kojih su najznačajniji identificirani i kategorizirani u sedam glavnih skupina (Slika 5-2.). Ključni parametri koji utječu na potrošnju energije kamiona uključuju upravljanje korisnim teretom, model kamiona, GR (otpor nagiba) i RR (otpor kotrljanja). BTR (eng. Best truck ratio) se definira kao omjer stvarno potrošene energije i teoretskog najboljeg korištenja energije od strane vučnih kamiona. Također je pokazano da model kamiona i stanje transportne ceste utječu na BTR i potrošnju dizela. U jednoj studiji, učinci GVW (koji predstavlja zbroj težine praznog kamiona i korisnog tereta), maksimalne brzine kamiona ( $V_{max}$ , koji predstavlja model kamiona pri fiksnoj nosivosti) i TR (koji predstavlja stanje transportne ceste) su testirani na potrošnju goriva kamiona.. TR je jednak zbroju RR i GR kada se kamion kreće u usporedbi s nagibom transportne ceste. (5-1)

$$TR = RR + GR \quad (5-1)$$

Za tipične transportne ceste, otpor kotrljanja je 2% ako je cesta tvrda i dobro održavana, na rubu i blizu kraja odlagališta, kvaliteta ceste se pogoršava i očekuje se da će otpor kotrljanja porasti na 3%; tijekom vlažnih razdoblja kada su uvjeti na cesti lošiji, otpor kotrljanja može porasti na 4%; konačno, pod vrlo lošim uvjetima, otpor kotrljanja može porasti na 10–16%, međutim, to bi bilo samo na vrlo malim dionicama transportnog puta i za kratka razdoblja rada kamiona. U ovoj se studiji smatra da transportna cesta ima iste uvjete kao i suha zemlja, ali ne i čvrsto zbijena cesta i stoga se u analizi koristi otpor kotrljanja od 3%. Tipične vrijednosti za otpor kotrljanja prikazane su u tablici 5-1. (A.Soofastaei i sur.,2016.)

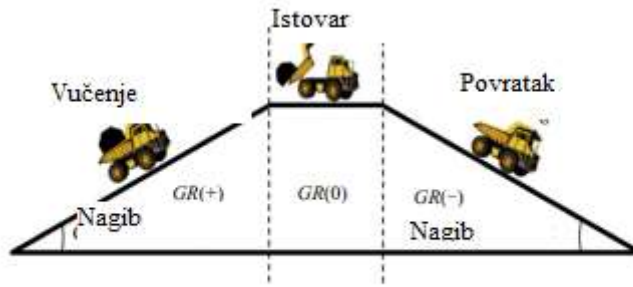


**Slika 5-2.** Ključni parametri potrošnje energije kamiona (A.Soofastaei i sur.,2016.)

**Tablica 5-1.** Tipične vrijednosti otpora kotrljanja (A.Soofastaei i sur.,2016.)

STANJE CESTE	OTPOR KOTRLJANJA (%)
Bitumen, beton	1.5
Zemlja- glatka, tvrda, suha i dobro održavana	2.0
Šljunak- dobro nabijen, suh i bez rastresitog materijala	2.0
Zemlja- suha, slabo zbijena	3.0
Šljunak- suh, slabo zbijen	3.0
Blato s čvrstom podlogom	4.0
Šljunak ili pijesak u nasipu	10.0
Blato s mekom i spužvastom podlogom	16.0

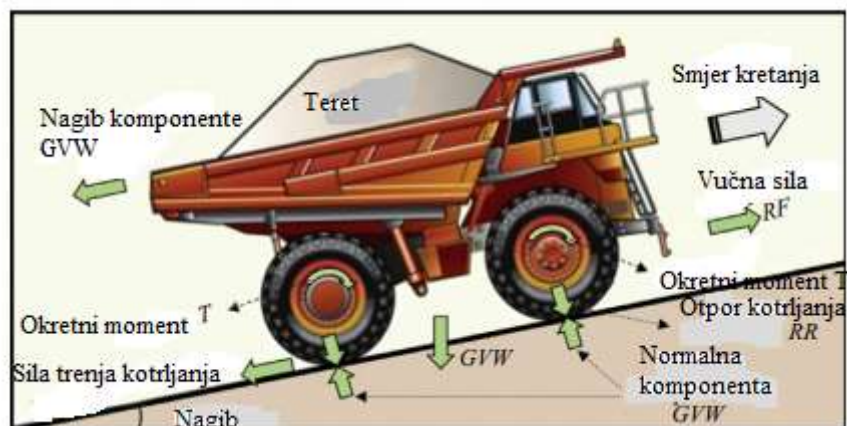
GR je nagib odvozne ceste, mjeri se kao postotak, a izračunava se kao omjer između uspona ceste i horizontalne duljine (slika 5-2.).



Slika 5-3. Otpor nagiba (A.Soofastaei i sur.,2016.)

Slika 5-4. prikazuje shematski dijagram tipičnog vučnog kamiona i ključne čimbenike koji utječu na performanse kamiona, kao što su GVW, otpor kotrljanja (RR), gradijent, sila trenja i vučna sila (RF). Vučna sila je raspoloživa sila između gume i tla za pogon stroja. Povezana je s okretnim momentom (T) na koji je stroj sposoban djelovati na točki kontakta između njegovih guma i tla i radijusa kotača kamiona (r) (5-2).

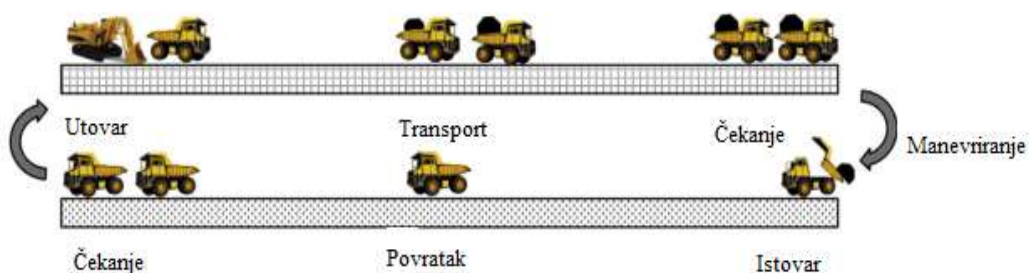
$$RF = \frac{T}{r} \quad (5-2)$$



Slika 5-4. Shematski prikaz teretnog kamiona i čimbenika koji utječu na performanse kamiona (A.Soofastaei i sur.,2016.)

### 5.1.1. Trajanje ciklusa

Na potrošnju goriva svakako utječe i trajanje ciklusa. Ukupno vrijeme ciklusa uključuje: utovar, vožnju punih kamiona, čekanje, vožnju praznih kamiona i istovar. Fiksno vrijeme je zbroj utovara, manevriranja, istovara i uočavanja; vrijeme vožnje je zbroj vremena transporta i povratka; a vrijeme čekanja je vrijeme čekanja u redu za istovar i utovar (A.Soofastaei i sur.,2016.).



Slika 5-5. Prikaz trajanja jednog ciklusa kamiona (A.Soofastaei i sur.,2016.)

Potrošnja goriva kod kamiona može se izračunati preko jednadžbe (5-4):

$$F_C = \frac{SFC}{FD} * (LF * P) \quad (5-4)$$

gdje je: SFC- specifična potrošnja goriva motora pri punoj snazi (0.213–0.268 kg/(kW h)

FD- gustoća goriva (0.85 kg/L za dizel)

LF- faktor opterećenja motora i definiran je kao omjer prosječnog korisnog opterećenja i maksimalnog opterećenja u radnom ciklusu (%)

P- snaga kamiona (kW)

Pojednostavljena verzija jednadžbe (5-4) prema Rung-u je :

$$F_C = 0,3 * (LF * P) \quad (5-5)$$

gdje je : LF- faktor opterećenja motora i definiran je kao omjer prosječnog korisnog opterećenja i maksimalnog opterećenja u radnom ciklusu (%)

P- snaga kamiona (kW)

## 6. UPRAVLJANJE I SMANJENJE OTPORA KOTRLJANJA

Središnji dio cijene transporta kamiona je koncept otpora kotrljanja (ovdje izražen kao postotak bruto mase vozila (GVM)). Otpor kotrljanja također se izražava u kg (ili N) otpora po toni GVM, gdje je  $10 \text{ kg/t} = 1\%$  otpora kotrljanja. To je mjera dodatnog otpora kretanju koji doživljava teretni kamion, a pod utjecajem je savijanja guma, unutarnjeg trenja i što je najvažnije, opterećenja kotača i uvjeta na cesti. Empirijske procjene otpora kotrljanja temeljene na prodiranju guma navode tipično povećanje otpora kotrljanja od 0,6% po centimetru prodiranja gume u cestu, više od 1,5% (sklopovi radijalnih i dvostrukih kotača) do 2% (sklopovi s križnim slojem ili pojedinačnim kotačima ) minimalni otpor. Uz prodiranje gume, progib ili savijanje površine ceste također će generirati slične rezultate, pri čemu se guma kamiona kreće u "gorem stupnju" dok se val otklona gura ispred vozila. Općenito govoreći, kada se koriste grafikoni performansi proizvođača kamiona za ocjenu vuče na gore i na niže imamo sljedeće relacije :

- Kretanje kamiona uzbrdo

$$\text{Ukupni otpor (\%)} = \text{nagib (\%)} + \text{otpor kotrljanja (\%)}$$

- Kretanje kamiona nizbrdo

$$\text{Ukupni otpor (\%)} = \text{otpor kotrljanja (\%)} - \text{nagib (\%)}$$

Uzimajući za primjer damper na električni pogon od 376 t (GVM), na cesti s nagibom od 8-10% i osnovnim otporom kotrljanja od 2%, dodatnih 1% otpora kotrljanja će smanjiti brzinu kamiona za 10- 13%. Na ravnijoj cesti s nagibom od 0-2% i osnovnim otporom kotrljanja od 2%, dodatnih 1% otpora kotrljanja će smanjiti brzinu kamiona za između 18-26%. Dakle, mala smanjenja otpora kotrljanja mogu dovesti do značajnih poboljšanja brzine i produktivnosti vozila. Jasno je da se strategija poboljšanja mora temeljiti na formalnoj procjeni rudničkih cesta, kako bi se identificirali projektirani nedostaci kao dio šireg pristupa upravljanju prometom i sigurnosti (čiji je dizajn sastavni dio). S obzirom isključivo na prednosti poboljšanog dizajna cesta, različita rješenja koja povećavaju produktivnost potrebno je promatrati holistički. Na primjer, pomoću trolej kamiona može se poboljšati vrijeme ciklusa i smanjiti trošak po prevezenoj toni, ali prvo je potrebno preispitati dizajn i upravljanje cestom, prije nego što se pribjegne rješenjima koja se ne bave izravno glavnim uzrokom nedostataka - na primjer, velik otpor kotrljanja koji dovodi do smanjene produktivnosti s postojećim sustavom. Stoga je preporučeni pristup



procijeniti u kojoj mjeri postojeća cesta ima prostora za poboljšanje dizajna i, nakon što se optimizira, ta poboljšanja održavati što dulje jer veće troškove može stvarati samo održavanje kamiona nego ulaganja u transportne ceste.

## 7. ZAKLJUČAK

Interes za smanjenjem potrošnje energije prisutan je na globalnoj razini. No, fokus se stavlja prvenstveno na one industrije koje imaju najveći utjecaj na okoliš i samu potrošnju energije. Kao što smo mogli vidjeti rudarstvo, kao bitna grana gospodarstva, spada među najveće potrošače energije ali, dodatna činjenica koja utječe na negativno mišljenje javnosti je ta da većina te energije dolazi iz neobnovljivih izvora energije što kao posljedicu ima povećanu emisiju štetnih plinova u atmosferu. Potaknuti tom činjenicom, ali i time da se žele smanjiti ogromni financijski izdaci koji se pojavljuju u rudnicima, stručnjaci su uložili velika sredstva i napore kako bi se poboljšala efikasnost i ekonomičnost rudnika. Od svih rudarskih operacija, najveći dio troškova odlazi na transport mineralne sirovine i upravo u tom dijelu su uloženi veliki naponi kako bi se što je to više moguće smanjili. Sam transport sastoji se od mnogo dijelova, ali najbitniji među njima je svakako kamion i njegova operativnost i učinkovitost. Da bi se ti parametri doveli u što bolju izvedbu, istraživanjem je otkriveno da otpor kotrljanja također ima jako velik utjecaj na izvedbu kamiona na način da smanjuje brzinu kamiona, nosivost a povećava potrošnju energije, održavanje kamiona i u skladu s tim i same troškove eksploatacije. Pošto vrijednosti otpora kotrljanja i koeficijenta otpora kotrljanja variraju, potrebno je upravo na terenu provesti mjerenja koja će nam dati stvarnu vrijednost koja nam pomaže u proračunima. Mjerenje se provodi tako da se prvo odredi lokacija ispitivanja te se odredi stanje same ceste nakon čega se pristupa samom ispitivanju pomoću vučnog vozila, dinamometra te drugog vozila koji je opterećen određenom masom. Mjerimo vučnu silu te izračunavamo koeficijent otpora kotrljanja i otpor kotrljanja. Otpor kotrljanja može se kontrolirati na rudnicima, posebno kada su naponi usmjereni na najutjecajnije parametre. Preporuča se da se intervali održavanja ceste optimiziraju u skladu s troškovima kako bi se smanjio otpor kotrljanja. U odnosu na tlak u gumama, jasno je da viši tlakovi rezultiraju manjim otporom kotrljanja. Stoga se preporučuje da se tlak u gumama održava u skladu s preporukama proizvođača. Na kraju, povećanje brzine kamiona povezano je s povećanjem otpora kotrljanja, pa pri razmatranju samo otpora kotrljanja poželjno je ispitivati pri nižim brzinama kamiona. Međutim, pri odabiru odgovarajuće brzine kamiona potrebno je uzeti u obzir niz drugih čimbenika, uključujući sigurnosne zahtjeve, vremena ciklus i zahtjeve za produktivnošću. Sve ove izmjene smanjit će otpor kotrljanja i biti korisne pri razmatranju daljnjih operacija transporta i njihove učinkovitosti.

## 8. LITERATURA

ALEGRE, D., DE LEMOS PERONI, R., DA ROSA AQUINO, E., DILLE, F., 2021. A method to assess haul roads rolling resistance using dispatch system data, *Mining Technology*, 130:3, 176-187, DOI: 10.1080/25726668.2021.1935098

Bide, T., 2020. Report on the datasets available relating to social and environmental dimensions of extraction, <http://www.orama-h2020.eu/>

COFFEY, J.P., 2015. Mine Haul Road Rolling Resistance: Influences and Impacts, School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University

KOMANDI, G., 1999. An evaluation of the concept of rolling resistance, Godollo University of Agricultural Sciences, Hungary

SOOFASTAEI, A., KNIGHTS, P., AMINOSSADATI, S., KIZIL, M.S., 2015. Rolling Resistance in Haul truck Operations, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, CRCMining, Australia

SOOFASTAEI, A., KNIGHTS, P., AMINOSSADATI, S., KIZIL, M.S., 2016. Reducing Fuel Consumption of Haul Trucks in Surface Mines Using Artificial Intelligence Models, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, CRCMining, Australia

SOOFASTAEI, A., AREFI, M.M., AMINOSSADATI, S., KIZIL, M.S., 2016. Development of a multi-layer perceptron artificial neural network model to determine haul trucks energy consumption, *International Journal of Mining Science and Technology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.12.015>

TANNANT, D.D., REGENSBURG, B., 2001. GUIDELINES FOR MINE HAUL ROAD DESIGN, School of Mining and Petroleum Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada

WIDODO, N.P., WICAKSANA, Y., KRAMADIBRATA, S., WATTIMENA, R.K., 2009. A Preliminary Field-Study to Determine Rolling Resistance in Surface Coal Mines Conference Paper, Faculty of Mining and Petroleum Engineering, Institute of Technology Bandung, Bandung 40132, Indonesia

WONG, J.Y., 2001. THEORY OF GROUND VEHICLES- Third Edition, Canada, John Wiley & Sons, Inc.