

Primljen / Received: 26.3.2012.

Ispravljen / Corrected: 17.7.2012.

Prihvaćen / Accepted: 20.7.2012.

Dostupno online / Available online: 30.7.2012.

# Uvjeti za simultano formiranje višegrupnih teretnih vlakova

## Autori:



Ivan Belošević, dipl.ing.prom.  
Sveučilište u Beogradu  
Prometni fakultet  
i.belosevic@sf.bg.ac.rs



Prof.dr.sc. Miloš Ivić, dipl.ing.prom.  
Sveučilište u Beogradu  
Prometni fakultet  
m.ivic@sf.bg.ac.rs



Mr.sc. Milana Kosijer, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Beogradu  
Prometni fakultet  
m.kosijer@sf.bg.ac.rs

Prethodno priopćenje

Ivan Belošević, Miloš Ivić, Milana Kosijer

## Uvjeti za simultano formiranje višegrupnih teretnih vlakova

Formiranje višegrupnih teretnih vlakova predstavlja jedan od kompleksnijih problema željezničkog prometa. Višegrupni vlakovi se sastoje od većeg broja grupa vagona koje treba sortirati u kompoziciju prema redoslijedu međukolodvora na pruzi. U radu je prikazana analiza tehničko-tehnoloških uvjeta koji bitno utječu na efekte primjene metoda simultanog formiranja vlakova. Razmatrani su efekti pojedinih metoda značajni za planiranje kolosiječnih kapaciteta i kvalitetu rada kolodvora. Istraživanje u ovom radu doprinosi procesu planiranja u cilju poduzimanja odgovarajućih mjera prije izgradnje kolodvora.

### Ključne riječi:

ranžirni kolodvori, formiranje teretnih vlakova, simultane metode, željeznička infrastruktura, simulacijski model

Subject review

Ivan Belošević, Miloš Ivić, Milana Kosijer

## Conditions for simultaneous formation of multigroup freight trains

The multigroup freight train formation is regarded as a challenging problem in railway transport. Multigroup trains are composed of a number of wagon groups that have to be arranged according to the order of intermediate stations. The analysis of technical and technological conditions that significantly influence the effects of simultaneous train formation methods is presented. The effects of various methods of significance for track capacity planning and train station service level analysis are considered. The research presented in the paper is expected to contribute to the process of planning measures to be taken prior to construction of train stations.

### Key words:

marshalling yards, freight train formation, simultaneous methods, railway infrastructure, simulation model

Übersichtsarbeit

Ivan Belošević, Miloš Ivić, Milana Kosijer

## Bedingungen für eine simultane Formierung von Mehrgruppen-Lastzügen

Die Formierung von Mehrgruppen-Lastzügen stellt eines der komplexeren Probleme des Eisenbahnverkehrs dar. Mehrgruppenzüge setzen sich aus einer größeren Waggongruppe zusammen, die man in eine Komposition nach der Reihenfolge der Zwischenstationen sortieren muss. In der Arbeit ist die Analyse der technisch-technologischen Bedingungen dargestellt, die bedeutend auf die Effekte der Anwendung der Methode der simultanen Zugformierung Einfluss nehmen. Es wurden die Effekte einzelner Methoden in Erwägung gezogen, die für die Planung von Gleiskapazitäten und die Arbeitsqualität des Bahnhofs von Bedeutung sind. Die Forschung in dieser Arbeit trägt dem Planungsprozess zum Zwecke der Umsetzung entsprechender Maßnahmen vor dem Ausbau des Bahnhofs bei.

### Schlüsselwörter:

Rangierbahnhöfe, Formierung von Lastzügen, simultane Methoden, Eisenbahninfrastruktur, Simulationsmodell

## 1. Uvod

U tijeku svog povijesnog razvoja željeznica se od izdvojenih pruga koje povezuju lokalna industrijska središta razvila u složeni sustav s težnjom formiranja jedinstvene kontinentalne željezničke mreže. Ovakvim umrežavanjem pruga, kolodvori su dobivali ključnu ulogu za učinkovito funkcioniranje željezničkog prometa. Istodobno u njima se pojavljivao čitav niz problema iz dimenzioniranja infrastrukturnih kapaciteta i planiranja tehnologije rada, a koji ujedno predstavljaju i osnovne optimizacijske probleme u željezničkom prometu.

Problem ranžiranja, kao jedna od osnovnih karakteristika teretnog željezničkog prometa, vezan je za specijalizirane ranžirne kolodvore. Formiranje višegrupnih vlakova predstavlja jedan od složenijih problema ranžiranja. Višegrupni vlakovi se sastavljaju od većeg broja grupa željezničkih vagona koje treba razvrstati prema redosljedu međukolodvora na pruzi. Sam proces ranžiranja je jedinstven za ovaj vid prometa i daje mogućnost prilagođavanja željeznice potrebama privrede. Nažalost, ranžiranje ima i svoje nedostatke: zahtijeva dodatne kolosiječne kapacitete i povećava zadržavanje vagona, što kao krajnju posljedicu ima povećanje transportnih troškova i smanjenje kvaliteta usluge. Opća je procjena da su angažirani kapaciteti u ranžirnim kolodvorima neravnomjerno iskorišteni. Ovakvu konstataciju potvrđuju rezultati analiza rada tih kolodvora [11], uz podatak da je znatno veći broj kolodvora čiji su kapaciteti nedovoljno iskorišteni od broja kolodvora čiji su kapaciteti preopterećeni. To znači da postoji nesklad između kolosiječnih kapaciteta, primijenjene tehnologije ranžiranja i opsega rada za koje su ti kolodvori projektirani.

Formuliranje i klasifikacija metoda za formiranje višegrupnih vlakova započeli su sredinom 20. stoljeća na stručnim skupovima i u časopisima koji su se bavili praktičnim problemima željeznice [1, 16]. Nedugo zatim pojavili su se prvi znanstveni radovi vezani za ranžirne kolodvore, definiranje njihovih struktura i preradne moći [2, 14, 15]. Na ove prve znanstvene postavke problema ranžiranja nadovezali su se radovi [4, 5] u kojima su matematički formulirane metode formiranja višegrupnih vlakova. U novijim istraživanjima [6, 7] pokazano je da problem formiranja višegrupnih vlakova pripada klasi NP (nedeterministički u polinomijalnom vremenu) teških problema. Razvojem simulacijskih tehnika omogućeno je analiziranje učinaka primijenjenih metoda u realnim uvjetima rada mijenjanjem različitih parametara okruženja. Simulacijski modeli metoda formiranja višegrupnih vlakova predstavljaju temu radova [9, 13]. U radu [9] provedena je analiza učinaka metoda uzastopnog formiranja, dok je u radu [13] ispitana mogućnost primjene različitih metoda u više ranžirnih kolodvora Republike Slovačke.

U ovom radu analizirani su tehničko tehnološki uvjeti koji bitno utječu na posljedice primjene metoda simultanog

formiranja višegrupnih vlakova. U dosadašnjim istraživanjima nije bilo dovoljno zanimanja za radne uvjete kao ni za uvjete projektiranja ranžirnih postrojenja koji u nekim slučajevima dovode u pitanje mogućnosti realizacije teorijski formuliranih planova formiranja. U ovom radu izgrađeni su simulacijski modeli zasnovani na stvarnim tehničkim i tehnološkim uvjetima koji su omogućili odgovor na pitanje koji su i kakvi kolosiječni kapaciteti potrebni za primjenu navedenih metoda i kakvi se učinci očekuju u promatranom procesu formiranja vlakova prije nego što se kolodvor izgradi i počne upotrebljavati.

## 2. Opis problema

Višegrupni vlakovi formiraju se od dvije ili više grupa vagona, koje su posebno, svaka za sebe, izranžirane prema odredištima za koje se upućuju. Formiranjem višegrupnih vlakova smanjuje se zadržavanje vagona radi prikupljanja i omogućava koncentracija manevarskog rada na manji broj ranžirnih kolodvora. Ta koncentracija manevarskog rada dovodi do povećanog angažiranja kolosiječnih kapaciteta, manevarskih sredstava i osoblja u njima, ali s druge strane omogućava racionalizaciju kapaciteta i tehnologije rada u usputnim i odredišnim kolodvorima gdje se manevriranje svodi na izdvajanje već formiranih grupa vagona.

U dosadašnjem konceptu teretnog željezničkog prometa višegrupni vlakovi su prije svega bili zastupljeni u segmentu lokalnog prometa kroz kategoriju sabirnih vlakova. Cilj je sabirnih vlakova dostavljati i prikupljati vagona po međukolodvorima i dalje ih prevoziti do sljedećeg ranžirnog kolodvora. Početni kolodvor formira sabirni vlak tako što vozila za svaki međukolodvor izdvaja u posebnu grupu, a grupe raspoređuje u vlak prema redosljedu međukolodvora. U skladu s novim prometnim konceptom, željeznički transport se mijenja radi uspostavljanja jedinstvenog transportnog sustava. Uspostavljanjem novog koncepta, višegrupni vlakovi sve više dobivaju na značenju i u segmentu daljinskog prometa. Daljinski višegrupni vlakovi imaju ulogu u povezivanju većeg broja terminala u regiji kako bi se osiguralo da mali protoci robe budu povezani na dijelu prijevoznog puta i tako formiraju cjelovite blok-vlakove.

Višegrupni vlakovi imaju značajnu ulogu i u industrijskom željezničkom prometu, koji predstavlja važnu kariku u transportnom lancu između industrije i javnog transporta. Industrijske željeznice karakterizira razvijena mreža kolosijeka s velikim brojem manipulativnih mjesta, koja je nerijetko podijeljena u veći broj rajona koje opslužuju industrijski ranžirni kolodvori. Uloga industrijskih ranžirnih kolodvora je u formiranju industrijskih vlakova u kojima se vagoni grupiraju prema redosljedu manipulativnih mjesta radi što bržega i jednostavnijega njihovog dostavljanja.

## 2.1. Metode simultanog formiranja višegrupnih vlakova

Metode za formiranje višegrupnih vlakova u osnovi se dijele na metode uzastopnog formiranja vlakova i metode simultanog formiranja vlakova. Metode uzastopnog formiranja su češće zastupljene na željeznicama i kod njih se po završetku formiranja jednog vlaka prelazi na formiranje sljedećeg.

Za razliku od prethodne grupe metoda, simultane metode se koriste za istodobno formiranje više višegrupnih vlakova. Specifičnost simultanih metoda, prije svega se očituje u primijenjenoj tehnologiji prikupljanja vagona prema redosljedu pripadajućih međukolodvora, odnosno prema grupama vagona koje pripadaju međukolodvorima istog rednog broja za različite vlakove, a ne prema vlakovima. To dovodi do razlike u angažiranim kolosiječnim kapacitetima, a samim tim i u učincima izvršenja cjelokupnog procesa formiranja. Simultane metode mogu umnogome poboljšati parametre rada kolodvora, jer pružaju mogućnost istodobnog formiranja više vlakova, što omogućava njihovu pravovremenu otpremu iz ranžirnih kolodvora i dopremu vagona na određišta. U radu se analiziraju tri simultane metode: elementarne, trokutne i geometrijske (slika 1.) [5].

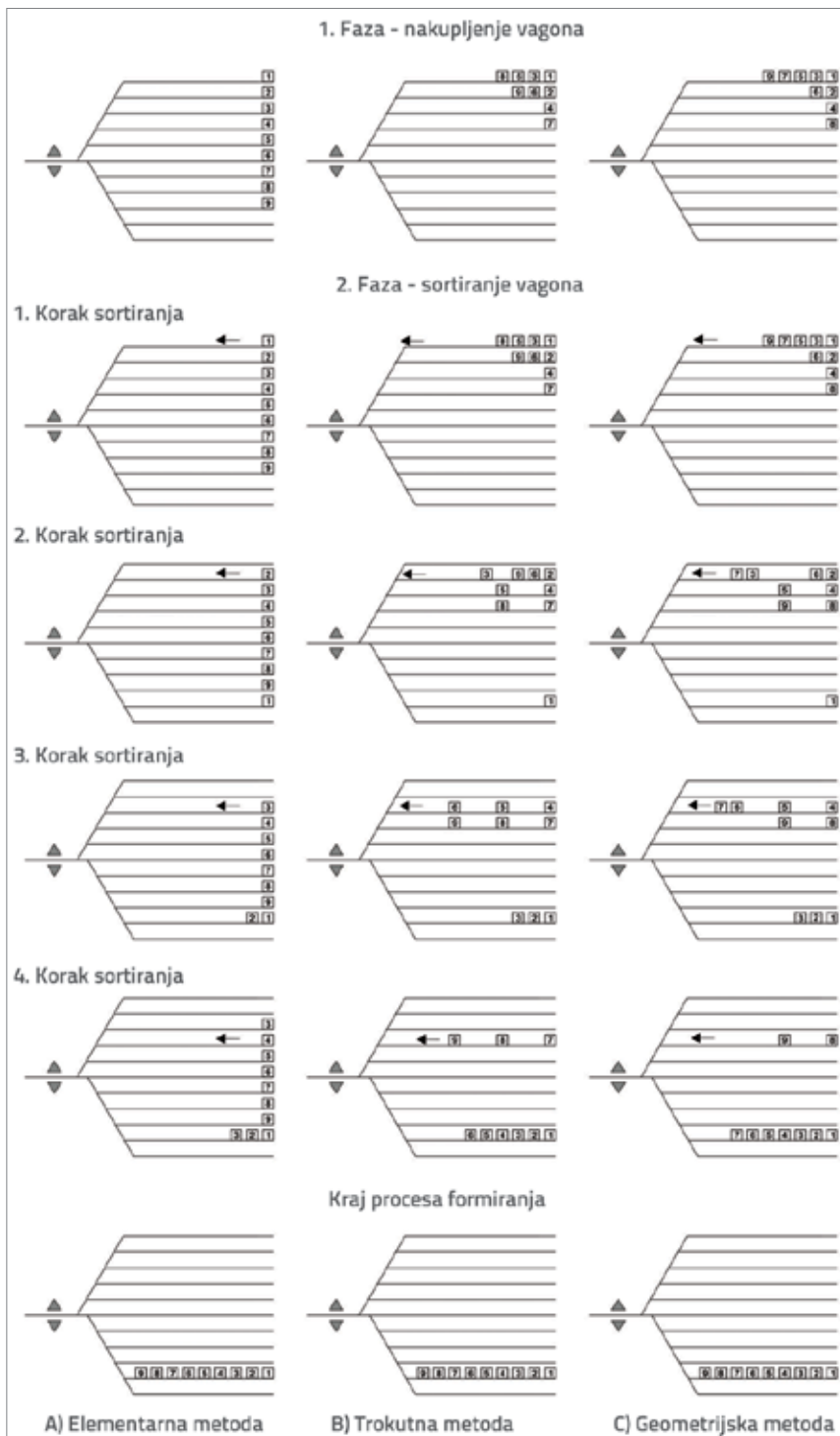
Simultane metode su prvi put primijenjene na francuskim željeznicama 1917. godine, kada je trebalo formirati brojne vlakove za opskrbljivanje francuske vojske tijekom Prvog svjetskog rata [1].

### 2.1.1. Elementarna simultana metoda

Elementarna simultana metoda (slika 1-A) sastoji se iz dvije faze. U prvoj se fazi prikupljaju vagoni prema međukolodvorima upućivanja u vlakovima. Prikupljanje vagona se obavlja tako da se vagoni za sve prve, za sve druge i sve daljnje međukolodvore, izdvajaju na kolosijeku koji je unaprijed određen za taj međukolodvor, iako oni pripadaju različitim vlakovima. Teorijski minimalan broj kolosijeka za prikupljanje ( $n_k$ ) jednak je maksimalnom broju međukolodvora ( $g_{max}$ ) u nekom od vlakova za formiranje (1). Pravilo prikupljanja grupe vagona  $g_j$  ( $j=1, \dots, g_{max}$ ) po kolosijecima dano je u izrazu (2), gdje  $g_k$  predstavlja redni broj međukolodvora u vlakovima za koje se vagoni prikupljaju na kolosijeku  $k$ :

$$n_k = g_{max} \quad (1)$$

$$g_k = g_j, \quad k = j = 1, \dots, g_{max} \quad (2)$$



Slika 1. Postojeće simultane metode formiranja višegrupnih vlakova

Nakon završenog prikupljanja otpočinje druga faza formiranja u kojoj se vagoni izvlače s kolosijeka prikupljanja i razvrstavaju (grupiraju) prema pripadajućim vlakovima. Elementarna simultana metoda omogućava formiranje većeg broja višegrupnih vlakova uz minimalan opseg manevarskog rada (broj izvlačenja je za sve grupe jednak i iznosi točno jedno izvlačenje po vagonima ( $h=1$ ), a broj pomicanih vagona s kojima je obavljen proces formiranja višegrupnih vlakova odgovara ukupnom broju vagona u svim vlakovima).

### 2.1.2. Trokutna metoda

Teorijska osnova trokutne metode je detaljno predstavljena u radu [4]. Ovdje se prikazuju samo osnovni pokazatelji trokutnog razvrstavanja. Principijelno i ta se metoda sastoji od dvije faze (slika 1-B). U prvoj se fazi prikupljaju vagoni, a u drugoj razvrstavaju, jednim dijelom (na kolosijecima za nakupljanje) prema međukolodvorima upućivanja u vlakovima, a drugim dijelom (na kolosijecima za formiranje vlakova) prema vlakovima kojima pripadaju i redosljedu međukolodvora koje opslužuju. Veza između maksimalnog broja međukolodvora u nekom od vlakova ( $g_{max}$ ) i potrebnog broja kolosijeka za prikupljanje vagona ( $n_k$ ) prikazana je u izrazu (3):

$$n_k = \begin{cases} \sqrt{2g_{max} - \frac{1}{2}}, & \sqrt{2g_{max} - \frac{1}{2}} \in N \\ \lceil \sqrt{2g_{max} - \frac{1}{2}} \rceil, & \sqrt{2g_{max} - \frac{1}{2}} \notin N \end{cases} \quad (3)$$

Pravilo prikupljanja grupa vagona  $g_j$  ( $j = 1, \dots, g_{max}$ ) po međukolodvorima i kolosijecima  $k$  dano je u izrazu (4), pri čemu se na kolosijeku  $k$  na mjestu  $i$  prikupljaju vagoni za međukolodvore [4]:

$$g_{k,i} = \frac{k(k-1)}{2} + ik + 1 + \frac{(i-1)(i-2)}{2}, \quad k = 1, \dots, n_k, \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4)$$

Za razliku od elementarne metode kod trokutnog formiranja na jednom se kolosijeku prikupljaju vagoni za više od jednoga međukolodvora. To zahtijeva složeniji plan razvrstavanja, a samim tim i porast opsega manevarskog rada, bilo da je u pitanju broj izvlačenja po vagonima ili broj pomicanih vagona. Broj izvlačenja iznosi 2 za sve wagone koji pripadaju istom međukolodvoru, izuzev vagona opisanih izrazom (4a) koji predstavljaju "čeoone grupe" (čeoone grupe vagona predstavljaju grupe vagona za međukolodvore s najmanjim rednim brojem na svakom kolosijeku i za njih je  $i=1$ ) na kolosijecima  $k$  i koje se izvlače jednom ( $h=1$ ). Praktično, to znači da ovi vagoni proces formiranja prolaze kao kod elementarne simultane metode. Što se tiče broja pomicanih vagona s kojima je obavljen proces formiranja višegrupnih vlakova, on je veći od ukupnog broja vagona u svim vlakovima, jer se s nekim vagonima obavljaju po dva izvlačenja.

$$g_{k,1} = \frac{k(k-1)}{2} + 1 \quad (4a)$$

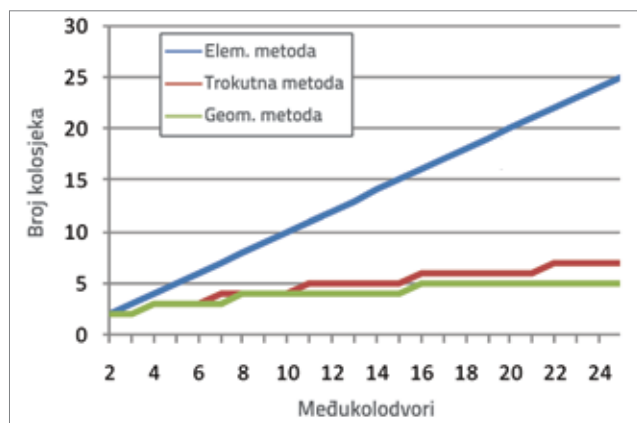
### 2.1.3. Geometrijska metoda

Daljnje razvijanje simultanih metoda postignuto je formuliranjem geometrijskog razvrstavanja (slika 1-C). Ovom metodom je postignuto daljnje smanjenje potrebnog broja kolosijeka za odvijanje procesa formiranja vlakova. Detaljan opis geometrijske metode je dan u radovima [5, 10]. Veza između maksimalnog broja međukolodvora u nekom od vlakova ( $g_{max}$ ) i potrebnog broja ranžirnih kolosijeka ( $n_k$ ) na kojima se obavlja prikupljanje vagona i njihovo razvrstavanje prema grupama koje pripadaju istom međukolodvoru dana je izrazom (5), a opća zakonitost na osnovi koje se obavlja prikupljanje vagona na kolosijecima izrazom (6).

$$n_k = \begin{cases} \log_2(g_{max} + 1), & \log_2(g_{max} + 1) \in N \\ \lceil \log_2(g_{max} + 1) \rceil, & \log_2(g_{max} + 1) \notin N \end{cases} \quad (5)$$

$$g_{k,i} = 2^{k-1} + 2^k (i - 1), \quad k = 1, \dots, n_k, \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (6)$$

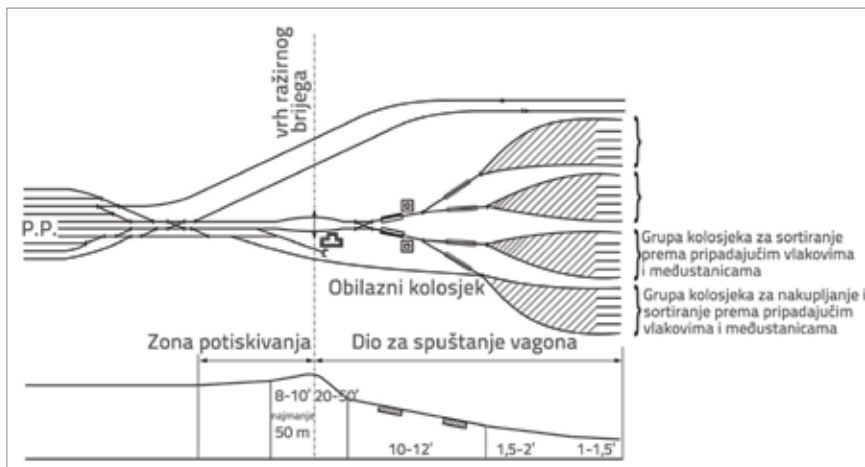
Smanjenje broja kolosijeka po toj metodi utječe na povećanje opsega manevarskog rada, kako ukupnog broja izvlačenja tako i broju pomjerenih vagona. Broj izvlačenja jednih vagona u zavisnosti je od rednog broja međukolodvora kojemu vagoni pripadaju i može iznositi najviše  $h = \lceil \log_2 g \rceil$ . Kao i kod trokutne metode, i u ovoj metodi najmanji broj izvlačenja imaju "čeoone grupe" vagona koji se izvlače jednom ( $h=1$ ). Za razliku od trokutne metode, broj izvlačenja ostalih grupa nije ograničen na neku jedinstvenu vrijednost, već se mijenja s promjenom broja međukolodvora u vlaku. U slučaju geometrijskog razvrstavanja čeoona grupa kolosijeka  $k$  je grupa  $g_{k,1} = 2^{k-1}$ . Na slici 2. je usporedno prikazan potreban broj kolosijeka u ovisnosti o broju međukolodvora u vlaku za spomenute simultane metode.



Slika 2. Potreban broj kolosijeka kod simultanih metoda

### 3. Tehničko-tehnološki uvjeti za primjenu simultanih metoda formiranja višegrupnih vlakova

Prva faza simultanog formiranja višegrupnih vlakova (tzv. faza prikupljanja vagona prema međukolodvorima) i dio druge



Slika 3. Shematski prikaz ranžirnog kolodvora

faze (tzv. faza razvrstavanja vagona prema međukolodvorima) odvijaju se na kolosijecima ranžirnog ili ranžirno-otpremnog parka, dok se drugi dio druge faze (tzv. faza sortiranja vagona prema pripadajućim vlakovima i međukolodvorima) može obavljati, za sve metode na kolosijecima ranžirnog ili ranžirno-otpremnog parka, a za elementarnu metodu čak i na kolosijecima otpremnog parka. Teorijski, za preradno postrojenje mogu se koristiti i izvlačnjak i ranžirni brijeg, ali zbog karaktera rada (istodobno formiranje većeg broja vlakova) u praksi se koristi ranžirni brijeg. Za formiranje višegrupnih vlakova može se koristiti ranžirni brijeg preko kojeg se odvija i primarni ranžirni rad na rastavljanju vlakova (slika 3.), ili zaseban pomoćni ranžirni brijeg na izlaznoj strani ranžirnog parka. Pomoćni ranžirni brijeg može imati manju visinu što pojednostavljuje njegovu konstrukciju.

Kao što je već rečeno, simultane metode zahtijevaju dvije grupe ranžirnih kolosijeka (grupu za nakupljanje i sortiranje vagona prema pripadajućim međukolodvorima i grupu za sortiranje vagona prema pripadajućim vlakovima i međukolodvorima). S aspekta planiranja i projektiranja željezničkih kolodvora bitno je analizirati tehničke i tehnološke uvjete za praktičnu realizaciju metoda formiranja. U tehničke uvjete ubrajaju se potreban broj i dužine kolosijeka, način ostvarivanja veza kolosijeka za nakupljanje i ranžirnog brijega te maksimalna veličina sastava pri izvlačenju. Tehnološki uvjeti predstavljaju tehnološke operacije koje treba nužno izvršiti kako bi se provelo formiranje višegrupnih vlakova. Jedan od osnovnih tehnoloških pokazatelja jest vrijeme trajanja tehnološkog ciklusa.

### 3.1. Broj kolosijeka

Minimalan broj kolosijeka potreban za prikupljanje i razvrstavanje vagona prema međukolodvorima ( $n_k$ ) definiran je u prethodnom poglavlju (u okviru teorijskih postavki), dok je broj kolosijeka za razvrstavanje vagona prema vlakovima i međukolodvorima jednak broju vlakova

$$n = n_k + m \quad (7)$$

$$n = n_k + m - 1 \quad (8)$$

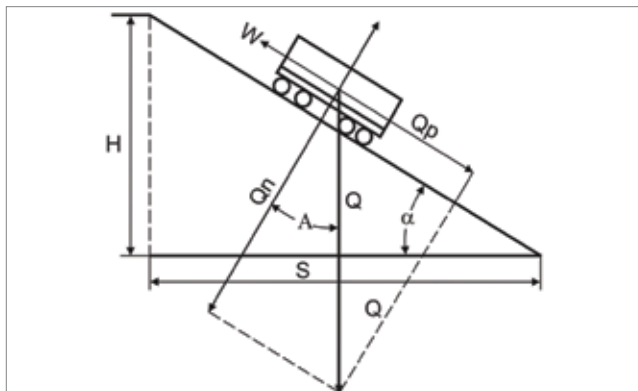
### 3.2. Dužine kolosijeka

Dužine kolosijeka za prikupljanje i sortiranje vagona prema međukolodvorima izravno ovise o veličini toka vagona višegrupnih vlakova i primijenjenoj metodi simultanog formiranja. Posljedica toga su neujednačene dužine kolosijeka, a u nekim slučajevima i potrebne velike dužine pojedinih kolosijeka. Da bi se omogućilo međusobno povezivanje kolosijeka, njihove dužine moraju biti ujednačene i prilagođene uvjetima uporabe, što znači da će se relativno kratki kolosijeci morati produžiti, a suviše dugački kolosijeci podijeliti na dva ili više kolosijeka primjereno uvjetima uporabe. Dužine kolosijeka za sortiranje vagona prema vlakovima i međukolodvorima trebaju omogućiti smještanje formiranih kompozicija vlakova koje čekaju na otpremu. Dužine višegrupnih vlakova se ne razlikuju znatno od dužina jednogrupnih vlakova tako da se te dužine uklapaju u planirane dužine kolosijeka ranžirnog parka.

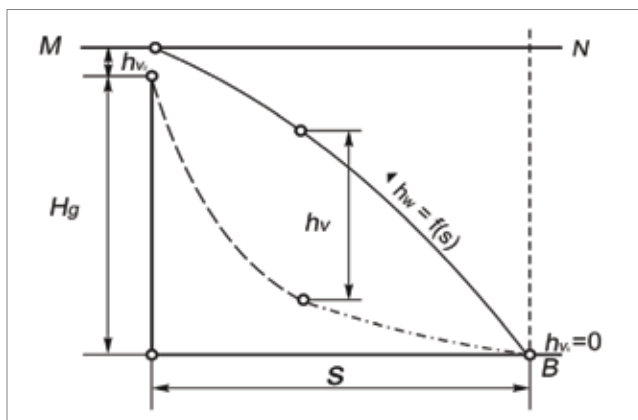
Pri upotrebi ranžirnog brijega, željeznički vagoni se u procesu ranžiranja kreću pod djelovanjem sile gravitacije koja treba omogućiti dolazak vagona na ranžirne kolosijeke. Kako u procesu formiranja ne bi došlo do zastoja zbog potrebe sabijanja vagona, poželjno je omogućiti dolazak vagona do kraja ranžirnih kolosijeka. To praktički znači da dužine kolosijeka za nakupljanje vagona trebaju biti u skladu s visinom ranžirnog brijega. Visina ranžirnog brijega umnogome utječe na konstrukcijske i uporabne karakteristike ranžirnih kolodvora, a samim tim i na troškove izgradnje, održavanja i ranžiranja.

Matematički model kretanja vagona niz ranžirni brijeg može se postaviti kao prinudno kretanje materijalne točke na strmoj ravnini pod djelovanjem sile (slika 4.). Na osnovi tako formuliranog modela kretanja vagona, maksimalna dužina ranžirnog kolosijeka za nakupljanje

vagona može se dobiti primjenom metode energetskih visina [12]. Metoda energetskih visina opisuje promjenu ukupne energije koju posjeduju vagoni tijekom kretanja (slika 5.). Puna energetska visina odgovara energiji koju vagoni imaju na vrhu ranžirnog brijega. Tijekom ranžiranja energija vagona se smanjuje uslijed savladavanja ukupnih otpora (9). Ukupan otpor predstavlja sumu svih otpora koji djeluju na vagonu tijekom kretanja (osnovni otpor vagona  $W_{gr}$ , otpor od sredine  $W_{sr}$ , otpor od skretnice  $W_{skrt}$ , otpor od krivine  $W_k$ ).



Slika 4. Matematički model kretanja vozila niz ranžirni brijeg



Slika 5. Energetska visina vagona tijekom kretanja niz ranžirni brijeg

$$H_g + h_{v_0} - \sum h_w - h_{v_k} = 0 \tag{9}$$

gdje je:

- $H_g$  – visina ranžirnog brijega
- $h_{v_0}$  – energetska visina koja odgovara početnoj brzini,
- $h_{v_k}$  – energetska visina koja odgovara brzini na kraju kolosijeka
- $\sum h_{w_0}$  – izgubljena energetska visina na svladavanje otpora i ona se može detaljnije prikazati izrazom (10):

$$\sum h_w = h_{w_o} + h_{w_{sr}} + h_{w_{skr}} + h_{w_k} \tag{10}$$

Uz pretpostavku da je veličina specifičnog osnovnog otpora i specifičnog otpora sredine stalna na putu kretanja  $S$  koji se sastoji iz djela kolosiječnih veza  $S_{sl}$  i drugog dijela koji se može

iskoristiti za smještanje vagona  $S_{skt}$  dobivamo sljedeći izraz energetske visine (11):

$$H_g + h_{v_0} - 10^{-3} [S_{sl}(w_o + w_{sr}) + S_k(w_o + w_{sr}) + h_{w_{skr}} + h_{w_k}] - h_{v_k} = 0 \tag{10}$$

Iz ove jednadžbe konačno se dobiva dužina ranžirnog kolosijeka u zavisnosti od visine ranžirnog brijega (12).

$$S_k = \frac{H_g + h_{v_0} - h_{v_k} - 10^{-3} [S_{sl}(w_o + w_{sr}) + h_{w_{skr}} + h_{w_k}]}{(w_o + w_{sr})} \tag{11}$$

### 3.3. Povezivanje ranžirnih kolosijeka i ranžirnog brijega

Povezivanje ranžirnih kolosijeka i ranžirnog brijega može se ostvariti planiranjem jednog ili dva obilazna kolosijeka koji se projektiraju paralelno s ranžirnim brijegom. Svaki se obilazni kolosijek izravno povezuje s jednim snopom ranžirnih kolosijeka. U jedan snop može biti povezano 6, 8, 10 ili 12 kolosijeka ("Smjernice za projektiranje ranžirnih kolodvora", Njemačke savezne željeznice, 1964.). U slučaju potrebe nakupljanja vagona na kolosijecima koji nisu izravno vezani s obilaznim, izvodi se njihovo izvlačenje preko izlazne strane ranžirnog parka i povratnim kretanjem preko jednog od kolosijeka iz izravno vezanog snopa. U ovom slučaju tehnologija rada se usložnjava što utječe na produženje vremena formiranja.

### 3.4. Maksimalna masa sastava

Manevarske lokomotive predstavljaju resurs čije karakteristike utječu na mogućnost primjene razmatranih metoda. To se ogleda prije svega na ograničavanje maksimalne mase sastava pri izvlačenju zbog vučnih karakteristika lokomotiva. Kako je vrijeme izvlačenja u linearnoj ovisnosti o broju vagona koji se izvlače, dobiva se da je najcjelovitija strategija objedinjenog izvlačenja svih vagona s kolosijeka. Iz tog razloga ukupna masa vagona koji se nakupljaju na jednom kolosijeku ne smije prijeći maksimalnu dopuštenu masu sastava, proračunanu na osnovi vučne sile lokomotive (13):

$$Q_{sas} = \frac{F_v}{(\sum w + i_{sv})} - Q_l \tag{13}$$

gdje je:

- $Q_{sas}$  – masa sastava [t]
- $Q_l$  – masa lokomotive [t]
- $F_v$  – vučna sila manevarske lokomotive [N]
- $\sum W$  – suma specifičnih otpora koji djeluju na sastav prilikom izvlačenja [N/kN]
- $i_{sv}$  – svedeni nagib na dionici izvlačenja [‰].

### 3.5. Tehnološki ciklus

Vrijeme zauzetosti ranžirnog brijega svim manevarskim operacijama pri razvrstavanju sastava koji se izvlači

s kolosijeka nakupljanja predstavlja tehnološki ciklus. Utvrđivanje potrebnog vremena za izvršenje jedne manevarske operacija može se utvrditi pomoću normativa, utvrđenih vučnim proračunima ili kronometarskim snimanjima [3]. Pri upotrebi normativa, polazna pretpostavka je da se vrijeme manevariranja može izraziti linearnom zavisnošću oblika (14):

$$t_{man} = a + bx_{sas} \quad (14)$$

gdje je:

- $t_{man}$  – vrijeme trajanja tehnološke operacije [min]
- $x_{sas}$  – broj vagona u sastavu
- $a, b$  – normativni parametri linearne zavisnosti.

Normiranje ukupnog vremena trajanja svih manevarskih i tehnoloških operacija može se ostvariti objedinjavanjem, pa se tako tehnološki ciklus može proračunati (15):

$$T_c = A + Bx_{sas} \quad (15)$$

gde je:

- $T_c$  – tehnološki ciklus [min]
- $A, B$  – normativni parametri, u koje je uračunano vrijeme praznog kretanja lokomotive po sastav, sabijanje i kvačenja sastava, izvlačenje sastava s ranžirnog kolosijeka, naguravanje i razvrstavanje sastava.

#### 4. Simulacijski modeli metoda simultanog formiranja višegrupnih vlakova

Simulacijski modeli izrađeni za potrebe ovog rada projektirani su da modeliraju tehnološki proces rada koji odgovara realnim uvjetima pri primjeni simultanih metoda. Osnovni cilj provođenja simulacije je da se preko simulacijskih modela dobiju realni pokazatelji procesa formiranja, zasnovani na tehničko-tehnološkim uvjetima koji predstavljaju ograničenja sa stajališta uporabe i projektiranja ranžirnih postrojenja.

Za izradu tako koncipiranih simulacijskih modela usvojeni su slijedeći ulazni parametri:

- Maksimalna dužina jednog kolosijeka za nakupljanje vagona, koja je ograničena uvjetom projektiranja ranžirnog brijega, jednaka je dužini nakupljanja 50 vagona prosječne dužine. Za proračun maksimalne dužine kolosijeka visina ranžirnog brijega je usvojena na osnovi analize postojećih ranžirnih kolodvora Željeznica Srbije i regije. Osnovni su otpori vagona uzeti prema strukturi voznog parka na promatranim željezničkim mrežama, a ostali potrebni parametri (npr. otpor sredine) usvojeni su prema smjernicama za projektiranje ranžirnih kolodvora njemačkih saveznih željeznica.
- Maksimalan je broj vagona u sastavu s aspekta vučnih karakteristika manevarske lokomotive prosječno 43 opterećena vagona. Za potrebe rada usvojene su vučne

karakteristike manevarskih lokomotiva koje se koriste u spomenutim ranžirnim kolodvorima.

- vremena trajanja operacija koja su sadržana u tehnološkom ciklusu normirana su na osnovu statističkog uzorka koji je dobiven provedenim snimanjima na mreži pruga Željeznica Srbije [8]. Ta su snimanja pokazala da se za vremena trajanja tehnoloških operacija može pretpostaviti eksponencijalna raspodjela, s matematičkim očekivanjima trajanja tehnoloških operacija prikazanim u tablici 1., a koja su dobivena kao srednje vrednosti statističkog uzorka. Vremena su manevarskih vožnji utvrđena na osnovi vučnih proračuna, pa je tako dobiveno da se vrijeme trajanja tehnološkog ciklusa može predstaviti funkcionalnom ovisnošću oblika  $T_c = 19,1 + 0,7 x_{sas}$ .

Tablica 1. Eksponencijalna raspodjela tehnoloških operacija

Tehnološka operacija	Matematičko očekivanje M (X)
Kvačenje vagona	0.70
Otkvačivanje vagona	0.33
Sortiranje vagona	0.23

U okviru proračunske simulacije izvršena je analiza osjetljivosti metoda na promjenu kako veličine toka vagona koji treba istodobno formirati tako i na broj međukolodvora u višegrupnim vlakovima. Analizirani su uvjeti dolaska tokova vagona u rasponu od 50 do 250 vagona po ciklusu formiranja. Testiranje utjecaja broja međukolodvora u formiranim vlakovima obavljeno je mijenjanjem broja međukolodvora u rasponu od 5 do 20, pri čemu je pretpostavljena ravnomjerna raspodjela vagona po međukolodvorima. Ovaj široki raspon međukolodvora za formiranje usvojen je kako bi odgovarao i uvjetima formiranja sabirnih vlakova (broj međukolodvora za koje se formiraju sabirni vlakovi najčešće ne prelazi 10), ali i uvjetima formiranja industrijskih vlakova (broj manipulativnih mjesta može iznositi 20 pa čak i više). Da bi se dobili relevantni pokazatelji, izvedeno je po 30 simulacija za svaki analizirani slučaj uvjeta rada.

Simultane metode formiranja višegrupnih vlakova ne ovise o broju vlakova koje treba formirati, što isključuje potrebu analize utjecaja promjene broja formiranih vlakova. Kao što je već poznato na osnovi teorijskih razmatranja, broj vlakova koje treba formirati utječe samo na potreban broj kolosijeka druge grupe kolosijeka (kolosijeka za razvrstavanje vagona prema vlakovima i međukolodvorima).

##### 4.1. Analiza rezultata

U okviru analize rezultata predstavljeni su izlazni rezultati simulacije koji su značajni za planiranje kolosiječnih kapaciteta. Također, analizirani su i pokazatelji kvalitete rada kolodvora, odnosno funkcioniranja sustava primjenom promatranih

metoda simultanog formiranja višegrupnih vlakova. Osnovni razlog ovakvog izbora pokazatelja jest omogućavanje ocjene novoprojektiranih rešenja ranžirnih kolodvora s ciljem poduzimanja odgovarajućih mjera prije nego što se kolodvor izgradi i pusti u rad. Pri analiziranju rezultata najprije su razmotrene teorijske vrijednosti pokazatelja koje ne uzimaju u obzir uporabnih i projektantska ograničenja. Nakon toga, analizirane su i vrijednosti pokazatelja koje se javljaju u realnim uvjetima rada koji uključuju navedena ograničenja. Provođenje simulacija nad teorijskim modelima i modelima koji sadrže realne uvjete rada omogućavaju njihovu međusobnu usporedbu i analizu.

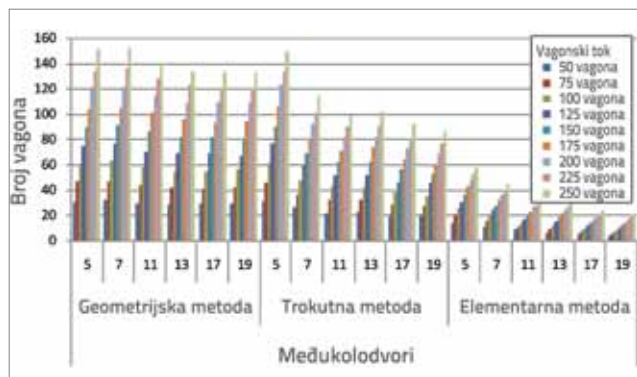
#### 4.1.1. Angažiranje kolosiječnih kapaciteta

U pokazatelje koji su značajni za planiranje kolosiječnih kapaciteta prije svega se ubrajaju broj i dužine kolosijeka potrebnih za realizaciju procesa formiranja. Osim ta dva osnovna pokazatelja, potrebno je sagledati i ujednačenost potrebnih dužina dobivenih kolosijeka. Za mjeru ujednačenosti uzeto je srednje odstupanje od maksimalne vrijednosti. Ovaj pokazatelj rasipanja predstavlja mjeru odstupanja dužina kolosijeka u odnosu na kolosijek s najvećom dužinom.

Teorijski potreban broj kolosijeka za nakupljanje i razvrstavanje prema broju međukolodvora dobiva se na osnovi formulacija ovisnosti (1), (3), (5) koje su opisane u okviru teorijskih postavki metoda (poglavlje 2.1.). Pojedinačne teorijske dužine kolosijeka neposredno ovise o ukupnom broju vagona na formiranju. Na slici 6. može se vidjeti da maksimalna dužina kolosijeka raste s veličinom toka vagona, dok povećanje broja međukolodvora dovodi do malih promjena u tim dužinama. Međusobnom usporedbom metoda uočava se da elementarna metoda zahtijeva znatno manje pojedinačne teorijske dužine kolosijeka. Teorijske dužine pojedinačnih kolosijeka kod geometrijske metode, zapravo su nešto veće u usporedbi s trokutnom metodom. Sve dužine su izražene u broju vagona koja se mogu smjestiti na kolosijek.

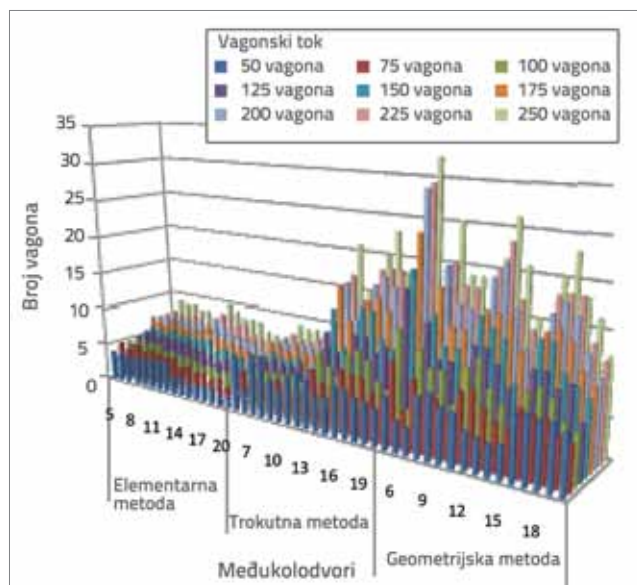
Osim najveće dužine kolosijeka, za adekvatno planiranje kolosiječnih kapaciteta, potrebno je razmotriti i dužine ostalih kolosijeka koji ulaze u sastav kolosiječnih grupa. Na slici 7. su prikazane vrijednosti srednjeg odstupanja kolosijeka u odnosu na kolosijek sa maksimalnom dužinom. Trokutnu i geometrijsku metodu karakterizira velika neujednačenost kolosijeka, što se posebno primjećuje za slučajeve sa 5, 8, 9, 18, 19 i 20 međukolodvora. Neujednačenost kolosijeka za te brojeve međukolodvora izravna je posljedica načina razvrstavanja vagona kod spomenutih metoda.

Dubljom analizom rezultata pojedinačnih teorijskih dužina kolosijeka (slika 6.) uočljivo je da su dužine kolosijeka nužne za formiranje višegrupnih vlakova pri korištenju trokutne i geometrijske simultane metode izuzetno velike (zahtijevaju smještaj 80-150 vagona), što je neprihvatljivo s aspekta uporabe. Razlog je taj što na kolosijecima takve dužine vagona s vrha



Slika 6. Pojedinačne teorijske dužine kolosijeka

ranžirnog brijega ne bi stizala do odredišta (kraja kolosijeka) te bi bilo nužno obavljati dodatni manevarski rad, a to bi znatno usporavalo završetak cijelog procesa. Zbog toga je nužno, radi uspostavljanja realnih relacija dužina ovih kolosijeka, iste ograničiti. To ograničenje trebalo bi biti takvo da prosječna dužina ovih kolosijeka odgovara dužini za nakupljanje jednog vlaka, a pojedinačna odstupanja da su u granicama ± 250-300 m. Potvrda ovakvog stajališta može se vidjeti i u rezultatima stvarnih srednjih odstupanja dužina kolosijeka prikazanih na slici 7.

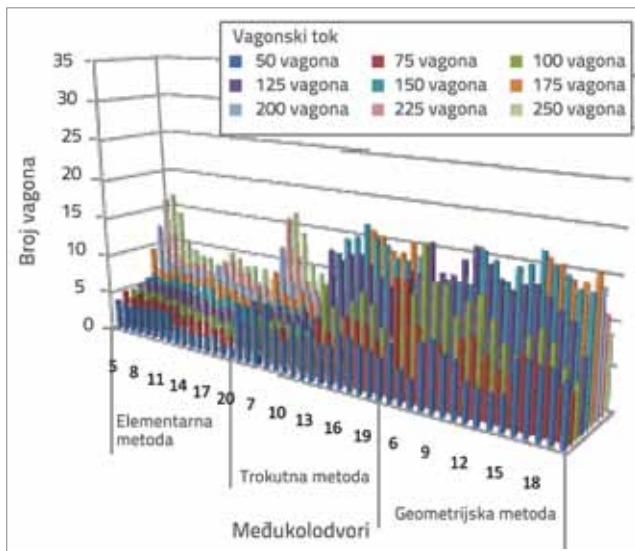


Slika 7. Teorijsko srednje odstupanje dužina kolosijeka

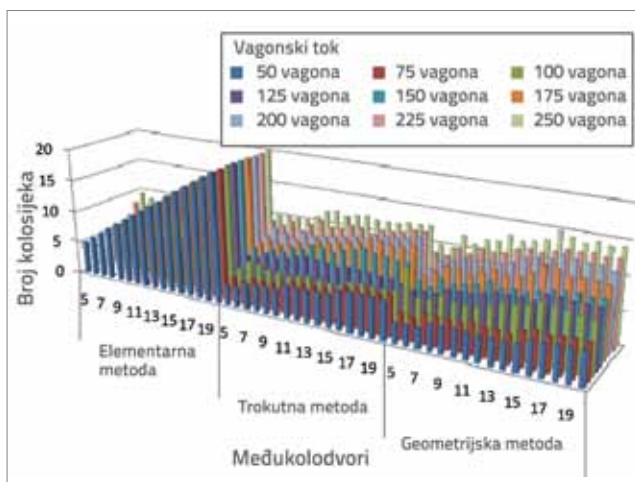
Kao što je već napomenuto, za veliki broj slučajeva teorijske dužine kolosijeka su mnogo veće od dopuštenih vrijednosti, što dovodi do promjene u stvarnoj strukturi kolosiječnih kapaciteta. Ta promjena se ogleda u neizbježnom povećanju broja kolosijeka. Ograničenjem dužina kolosijeka i povećanjem broja kolosijeka dolazi se do ujednačavanja dužina kolosijeka pri primjeni trokutne i geometrijske metode (slika 8.). Na drugoj strani elementarna metoda ima potpunu ujednačenost kolosijeka na razini teoretskih postavki koja se narušava u slučajevima većeg broja vagona na formiranju (preko 200



vagona). Stvaran broj kolosijeka za prikupljanje i razvrstavanje vagona prema grupama prikazan je na slici 9.



Slika 8. Stvarno srednje odstupanje dužina kolosijeka



Slika 9. Stvaran broj kolosijeka

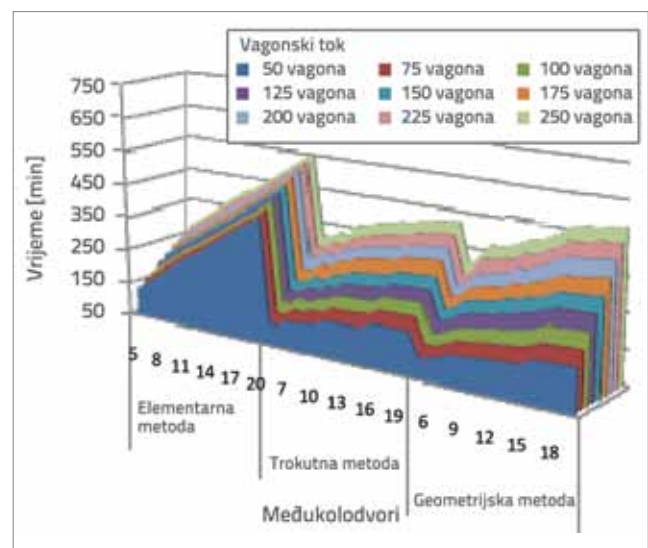
Na osnovi dobivenih rezultata simulacije uočava se relativna ujednačenost potrebnog broja kolosijeka prema broju međukolodvora. Na ukupan broj kolosijeka u uporabnim uvjetima dominantan je utjecaj veličine vagonškoga toka. Za manje vrijednosti broja vagona na formiranju (do 100 vagona) stvaran broj kolosijeka ostaje u granicama teorijskih formulacija. Uz daljnje povećanje vagona na formiranju, broj potrebnih kolosijeka raste pri čemu trokutna metoda formiranja zahtijeva najmanji broj kolosijeka. Iako teorijski geometrijska metoda angažira najmanji broj kolosijeka, zbog velikih pojedinačnih dužina kolosijeka, stvaran broj kolosijeka postaje znatno veći. Pri primjeni elementarne metode broj kolosijeka i njihove dužine ostaju u granicama teorijskih formulacija. Samo u slučaju jakih tokova vagona (preko 200 vagona), a manjeg broja međukolodvora (do 6) broj kolosijeka

se neznatno povećava u odnosu na teorijski broj. Na osnovi dobivenih rezultata može se isključiti mogućnost primjene elementarne metode u uvjetima velikog broja međukolodvora jer se javlja potreba za velikim brojem kolosijeka relativno malih dužina.

#### 4.1.2. Kvaliteta rada kolodvora

U grupu pokazatelja kvalitete rada kolodvora mogu se svrstati pokazatelji: utrošeno vrijeme za izvršavanje procesa formiranja, ostvareni opseg manevarskog rada s vagonima ili angažiranje manevarskih lokomotiva. U radu je analizirano vrijeme potrebno za formiranje svih vlakova i ostvareni opseg manevarskog rada s vagonima. Vrijeme potrebno za formiranje predstavlja vrijeme od trenutka kada počinje prvo izvlačenje vagona ili grupe vagona koji su nakupljeni, pa do trenutka kada su sastavi razvrstani i formirani prema redosljedu međukolodvora. Ostvareni opseg manevarskog rada s vagonima obuhvaća:

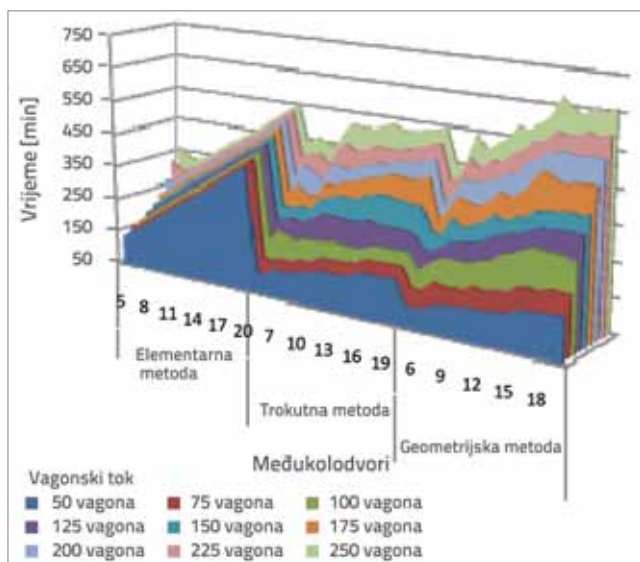
- **ukupan broj izvlačenja**, odgovara broju kolosijeka na kojima je obavljeno nakupljanje i sortiranje vagona prema međukolodvorima,
- **ukupan broj pomicanih vagona**, obuhvaća sve vagone pomicana u fazi razvrstavanja i
- **prosječan broj pomicanja po vagonima**, predstavlja odnos ukupnog broja pomicanih vagona i veličine vagonškoga toka na formiranju višegrupnih vlakova.



Slika 10. Teorijsko vrijeme formiranja

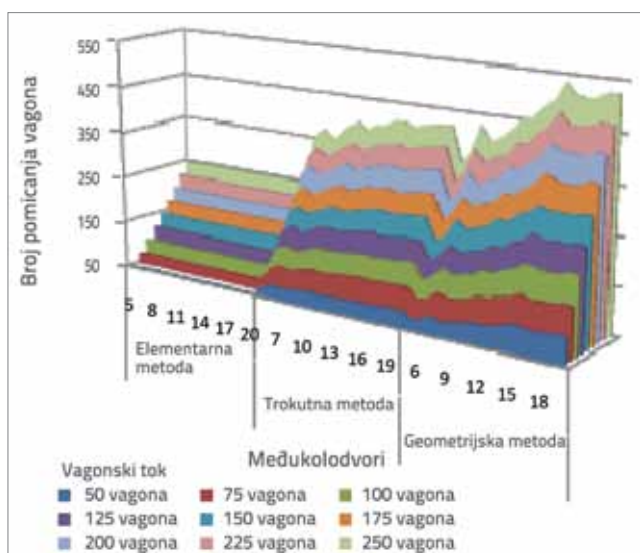
Teorijski i stvarna ukupna vremena formiranja vlakova prikazana su na slikama 10. i 11. Na osnovi izraza (14) vremena formiranja vlakova izravno ovise o broju vagona s kojima treba obaviti rad. Također, vremena formiranja vlakova ovise o broju izvlačenja, odnosno prate porast broja međukolodvora za formiranje. Uporabna ograničenja utječu da vrijeme formiranja zadrži trend ovisnosti u odnosu na veličinu toka vagona, ali umanjuju ovisnost vremena formiranja o broju međukolodvora. Razlog je

tome činjenica da broj izvlačenja (odnosno kolosijeka na kojima se obavlja nakupljanje) u realnim uvjetima rada ne ovisi u tolikoj mjeri o broju međukolodvora kao u teorijskim formulacijama, što se posebno odnosi na slučajeve rada s velikim brojem vagona.



Slika 11. Stvarno vrijeme formiranja

Međusobnom usporedbom metoda simultanog formiranja može se zaključiti da su vremena formiranja primjenom geometrijske i trokutne metode manja u uvjetima manjeg opsega rada i većeg broja međukolodvora. Elementarna metoda ima manje vrijeme formiranja vlakova u uvjetima rada s većim brojem vagona. Usporedbom trokutne i geometrijske metode uočava se prednost trokutne metode koja se ogleda u manjoj ovisnosti o broju međukolodvora vagona.

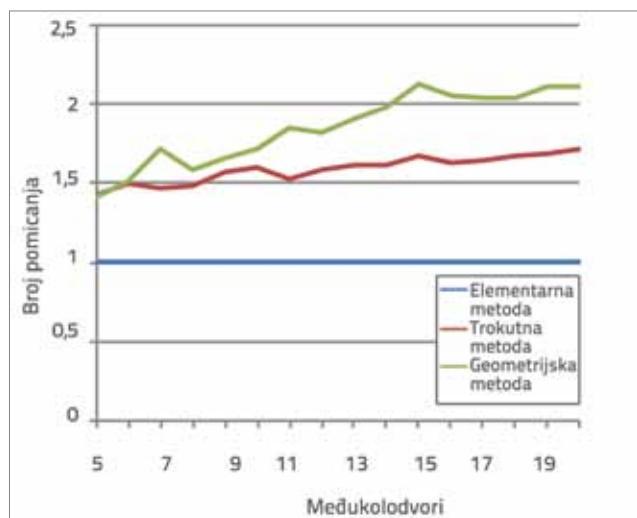


Slika 12. Ukupan broj pomicanih vagona

Uporabni uvjeti rada ne utječu na ukupan broj pomicanih vagona tijekom formiranja vlakova, pa samim tim i u realnim uvjetima

ostaje na razini teorijskoga. Na slici 12. lako se može uočiti ovisnost ukupnog broja pomaknutih vagona o primijenjenoj metodi, ali i o veličini vagonoskoga toka i broja međukolodvora.

Do sličnih zaključaka se može doći i analizom prosječnog broja pomicanja jednoga vagona (slika 13.). Elementarnom se metodom formiranje vlakova izvodi tako da se svi vagoni u procesu razvrstavanja pomiču samo jednom. Geometrijska metoda ima trend rasta broja pomicanja po vagonima s porastom broja međukolodvora koje nadilazi dva pomicanja za veći broj grupa (preko 15 grupa). Trokutna metoda ima nešto umjereniji trend rasta koji ne prelazi dva pomicanja po vagonima u procesu razvrstavanja. Kad je u pitanju analiza pokazatelja ukupnog broja izvlačenja, tada za njega u cijelosti odgovara prethodna analiza rezultata vezana za broj kolosijeka.



Slika 13. Prosječan broj pomicanja po vagonima

### 5. Zaključak

Dosadašnje projektiranje i tehnološko planiranje različitih kolodvora najčešće se izvodilo odvojeno, bez detaljnog razmatranja njihovih međusobnih uvjetovanosti. To je dovelo do toga da se tek u procesu uporabe uoče mogući nedostaci projektantskih rješenja. Ti nedostaci se najviše ogledaju u neprilagođenim kapacitetima stvarnim potrebama rada. Na osnovi provedenih analiza ne može se dati jedinstven odgovor na to koja je metoda formiranja višegrupnih vlakova najcjelovitija. Broj grupa vagona na formiranju i veličina toka vagona umnogome utječe na proces razvrstavanja vagona. Elementarna simultana metoda ima najbolje ukupne učinke pri formiranju vlakova koji se sastoje od manjeg broja grupa s velikim brojem vagona. Simulacijski modeli su pokazali da trokutno i geometrijsko formiranje zahtijeva relativno isti broj kolosijeka ali da su ukupne potrebne dužine kolosijeka veće pri primjeni geometrijske metode. Ujednačenost dobivenih dužina kolosijeka kod ove dvije metode varira i umnogome ovisi o broju grupa formiranja, dok za isti broj grupa vagona dolazi do odstupanja u ujednačenosti kolosijeka s promjenom veličine

toka vagona. Analizom rezultata može se doći do zaključka da metode imaju značajne razlike u pogledu parametara kvalitete rada kolodvora, što posebno dolazi do izražaja u uvjetima velikog broja vagona na formiranju.

Budući da je broj simultanih metoda formiranja gotovo neograničen, daljnje istraživanje treba usmjeriti na formuliranje matematičkih modela za nalaženje optimalnih planova koji zavise od broja grupa na formiranju i veličine vagonoskoga toka. Ti bi matematički modeli, osim osnovnih ograničenja redoslijeda sortiranja grupa, u sebi

trebali sadržavati i tehničko-tehnološke uvjete koji su u ovom radu razmatrani u okviru simulacijskih modela.

## Zahvala

Ovaj rad je realiziran uz podršku Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta, evidencioni broj 36012: "Istraživanje tehničko-tehnološke, kadrovske i organizacione osposobljenosti Železnica Srbije sa aspekta sadašnjih i budućih zahtjeva Europske Unije".

## LITERATURA

- [1] Bourgeois, M.; Valette, M.: *Formation des trains de detail par la methode de la formation simultanée*, Revue générale des Chemins de fer, 3-4(1940), 131.
- [2] Crane, R.; Brown, F.; Blanchard, R.: *An Analysis of a Railroad Classification Yard*, Journal of the Operations Research Society of America, 3(1955)3, 262 – 271.
- [3] Čičak, M.; Vesković, S.: *Organizacija železničkog saobraćaja II*, Saobraćajni fakultet, Beograd 2005.
- [4] Daganzo, C.; Dowling, R.G.; Hall, R.W.: *Railroad Classification Yard Throughput: The case of multistage triangular sorting*, Transportation Research Part A, 17A(1983)2, 95-106.
- [5] Daganzo, C.: *Static blocking at railyards: Sorting implications and track requirements*, Transportation Science, 20(1986)3, 189-199.
- [6] Dahlhaus, E.; Horak, P.; Mille, M.; Ryan, J.: *The train marshalling problem*, Discrete Applied Mathematics, 103(2000)1-3, 41-54.
- [7] Eggermont, C.; Hurkens, C.; Modelski, M.; Woeginger, G.: *The hardness of train rearrangements*, Operations Research Letters 37(2009)2, 80-82.
- [8] Grupa autora: *Studije i projekti rađeni na katedri za eksploataciju železnica*, Institut Saobraćajnog fakulteta, Beograd 1975-1995.
- [9] Ivić, M.; Marković, M.; Marković, A.: *Effects of the application of conventional methods in the process of forming the pick-up trains*, Yugoslav Journal of Operations Reseach, 17(2007)2, 245-256.
- [10] Ivić, M.; Marković, A.; Milinković, S.; Belošević, I.; Marković, M.; Vesković, S.; Pavlović, N.; Kosijer, M.: *Simulation model for estimating effects of forming pick-up trains by simultaneous method*, Proceedings of 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Prague 2010.
- [11] Ivić, M.: *Optimizacija strukture i kapaciteta kolosečnih parkova tehničkih teretnih stanica - doktorska disertacija*, Saobraćajni fakultet, Beograd 1992.
- [12] Marković, M.; Ivić, M.: *Bezbednost, proračun i ispitivanje grbine*, Saobraćajni fakultet, Beograd 2005.
- [13] Márton, P.: *Experimental evaluation of selected methods for multigroup train formation*, Communications, 2(2005), 5-8.
- [14] Petersen, E.R.: *Railyard Modeling: Part I. Prediction of Put-Through Time*, Transportation Science, 11(1977)1, 37-49.
- [15] Petersen, E.R.: *Railyard Modeling: Part II. The Effect of Yard Facilities on Congestion*, Transportation Science, 11(1977)1, 51-59.
- [16] Pentiga, K.J.: *Teaching simultaneous marshalling*, The Railway Gazette, 1959.