

STRUČNI RAD

SLAVKO VESKOVIĆ*, IGOR STANKOVIĆ

OPTIMIZACIJA CIKLIČNOG REDA VOŽNJE: PRIMER ŽELEZNICA U HOLANDIJI

OPTIMIZATION OF CYCLIC SCHEDULE: CASE STUDY RAILWAYS IN THE NETHERLANDS

Datum prijema rada: 11.8.2025. god.

Datum prihvatanja rada: 8.9.2025. god.

UDK: 656.2 + 519.8

REZIME:

Ciklični red vožnje znači da linije na kojim saobraća voz koriste fiksne intervale, ciklična vremena. Npr. u Holandiji koristi se ciklični red vožnje za period od jednog sata, takozvani jednosatni red vožnje (One-Hour Timetable). Jednosatni red vožnje je red vožnje za jedan sat, koji je konstruisan tako da se pokreće konstantni broj vozova u toku jednog sata. Prednost cikličnog reda vožnje najviše se ogleda sa stanovišta putnika jer se u uvek istom minutu od početka sata pokreće odgovarajući voz i tako svakog sata u toku dana. Za operatora glavna prednost je što treba da rasporedi vozove u samo jednom ciklusu koji se ponavlja. Raspored rada osoblja uglavnom nije cikličan. U radu su definisani ciljevi izrade cikličnog reda vožnje na železnici, a zatim je detaljnije obrađen primer cikličnog reda vožnje na železnicama u Holandiji. U zaključku su istaknute prednosti cikličnog reda vožnje (npr. lako pamćenje vremena polaska i dolaska vozova, lako i efikasno obezbrđivanje većeg broja presedanja putnika iz voza u voz), kao i mane ovog reda vožnje (nema velikog broj direktnih linija između gradova, smanjena fleksibilnost ovog red vožnje).

Cljučne reči: železnički saobraćaj, ciklični red vožnje, jednosatni red vožnje, modeli optimizacije reda vožnje, ciklično sekvenciranje, planiranje reda vožnje, železnički operateri

SUMMARY:

Cyclic timetable means that the lines on which the train operates use fixed intervals, cyclic times. For example in the Netherlands, a cyclic timetable is used for a period of one hour, the so-called One-Hour Timetable. A one-hour timetable is a timetable for one hour, which is constructed so that a constant number of trains run in one hour. The advantage of the cyclical schedule is mostly reflected from the passenger's point of view, because the appropriate train starts at the same minute from the beginning of the hour, and so every hour during the day. For the operator, the main advantage is that he only needs to schedule the trains in one repeating cycle. The work schedule of the staff is generally not cyclical. The paper defines the goals of creating a cyclic timetable on railways, and then elaborates an example of a cyclic timetable on railways in the Netherlands. In the conclusion, the advantages of the cyclic timetable are highlighted (e.g. easy to remember the departure and arrival times of trains, easy and efficient handling of a large number of passenger transfers from train to train), as well as the disadvantages of this timetable (there is no large number of direct lines between cities, reduced flexibility of this timetable).

Keywords: Railway traffic, Cyclic Timetable, One-Hour Timetable, Timetable Optimization Models, Cyclic Sequencing, Timetable Planning, Railway Operators

* Slavko Veskočić, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305, veskos@sf.bg.ac.rs

1. UVOD

U železničkom sistemu, red vožnje predstavlja listu vremena kada je planiran dolazak određenog voza ili polazak sa predviđene lokacije. Red vožnje je obećanje operatora putnicima, obavestavajući ih kada i gde određeni voz dolazi ili dolazi.

Razlika u vremenima između polaska iz jedne stanice i dolaska u sledeću stanicu je vozno vreme između ove dve stanice. Vreme između dolaska u stanicu i uzastopnog odlaska između iste stanice je vreme zadržavanja. Vreme zadržavanja omogućava putnicima da uđu i izađu iz vozova.

U mnogim evropskim zemljama, koristi se cikličan red vožnje. Ciklični red vožnje znači da linije na kojim saobraća voz koriste fiksne intervale, ciklična vremena. Npr. u Holandiji koristi se ciklični red vožnje za period od jednog sata, takozvani jednosatni red vožnje (One-Hour Timetable). Jednosatni red vožnje je red vožnje za jedan sat, koji je konstruisan tako da se pokreće 60 vozova u toku jednog sata.

Prednost cikličnog reda vožnje najviše se ogleda sa stanovišta putnika: oni trebaju da zapamte u kom minutu od početka sata kreće njihov voz i tako će biti svakog sata u toku dana. Dok je za operatora glavna prednost što treba da rasporedi samo jedan ciklus koji se ponavlja. Raspored rada osoblja uglavnom nije cikličan.

2. PREGLED RELEVANTNE LITERATURE

U poslednjih dvadesetak godina mnogo autora se bavilo problematikom cikličnog reda vožnje, a naročito u Holandiji, odakle su potekli prvi značajniji radovi (Univerzitet DELFT - Delft University of Technology). Tako na primer, W. P. Peeters u svojoj doktorskoj disertaciji [1] definiše pojam optimizacije cikličnog reda vožnje železnice kao proces koji opisuje matematičke modele i metode rešenja za konstruisanje visokokvalitetnih cikličnih redova vožnje železnice. U cikličnom redu vožnje, voz za određeno odredište napušta određenu stanicu u isto vreme svakog ciklusa, recimo svakih pola sata, svaki sat ili svaka dva sata. Ciklični redovi vožnje se široko koriste u evropskim železnicama.

Oni nude jasan i transparentan proizvod korisnicima železnice, kojima je potrebno samo da zapamte minute sata u kojem njihovi redovni vozovi polaze. Zbog važne uloge planiranja reda vožnje za železničke operatere i upravnike železničke infrastrukture, modeli i metode za optimizaciju cikličnih redova vožnje železnice pružaju vredan alat za ove organizacije. U tezi je predstavljen matematički model za optimizaciju cikličnih železničkih redova vožnje i proučavaju se teorijski aspekti koji stoje iza modela. Istraživani aspekti uključuju ciklično sekvenciranje, periodične napetosti, cikluse u grafovima, ciklične baze grafova, algoritme za konstruisanje cikličnih baza i ravni preseka za model. Razvijene teorijske ideje su testirane na nekim realnim slučajevima cikličnog železničkog reda vožnje. Teza dalje razvija nekoliko proširenja osnovnog modela.

Leo G. Kroon i dr. [2] ističe da su železničke operacije u realnom vremenu podložne stohastičkim poremećajima. Međutim, železnički red vožnje je deterministički plan. Stoga, red vožnje treba da bude dizajniran na takav način da može što bolje da apsorbuje stohastičke poremećaje. U tom cilju, red vožnje sadrži vremenske razmake između vozova i dodatke u vremenima vožnje i vremenima zadržavanja. Ovaj rad prvo opisuje stohastički model optimizacije koji se može koristiti za pronalaženje optimalne raspodele dodataka u vremenu vožnje jednog voza na više uzastopnih putovanja duž iste linije. Cilj ovog modela je minimiziranje prosečnog kašnjenja voza. Model se zatim proširuje tako da se može koristiti za poboljšanje datog cikličnog reda vožnje za više vozova na zajedničkoj železničkoj infrastrukturi. Računski rezultati su pokazali da se prosečno kašnjenje vozova može značajno smanjiti primenom relativno malih izmena reda vožnje. Posebno može da bude korisna raspodela dodataka za vreme rada na drugačiji način od onog koji je uobičajen u praksi.

Daniel Sparing i Rob M.P. Goverde [3] razvili su model optimizacije vremena ciklusa za generisanje stabilnih periodičnih železničkih redova vožnje. Kako putnici u vozu očekuju visok stepen pouzdanosti od železničke mreže sa minimalnim kašnjenjima, tokom procesa izrade reda vožnje, planeri moraju da uravnoteže ciljeve maksimi-

ziranja ponuđenog kapaciteta i otpornosti na kašnjenja. Ovo se često radi u dvostepenom procesu gde se prvo pronalazi izvodljiv red vožnje za datu strukturu pruge, a zatim se procenjuje stabilnost ovog reda vožnje i vrše se lokalne modifikacije reda vožnje. U ovom radu opisan je metod optimizacije za pronalaženje izvodljivog periodičnog reda vožnje koji obezbeđuje maksimalnu stabilnost za heterogene železničke mreže. Model je sposoban da obrađuje fleksibilne narudžbe vozova, vremena vožnje i zadržavanja, kao i lokacije preticanja. Koristi se minimalno vreme ciklusa periodičnog reda vožnje kao indikator stabilnosti i definiše problem optimizacije sa ovim minimalnim vremenom ciklusa kao ciljnom funkcijom koju treba minimizirati. Takođe predstavljene su metode smanjenja dimenzija i iterativni pristup optimizaciji kako bi se poboljšao proces matematičke optimizacije. Pokazana je primenljivost pristupa studijama slučaja na centralnom delu železničke mreže u Holandiji.

Prema Zhang Yongxiang i dr. [4] rešavanje problema cikličnog reda vožnje vozova ima za cilj da sinhronizuje ograničene operativne resurse prema glavnom periodičnom rasporedu transportnih usluga. Uvođenjem proširene konstrukcije vremenskog prostora mreže, ovaj rad predlaže novi tip preformulacije modela celobrojnog programiranja za problem cikličnog reda vožnje vozova na dvokolosečnoj železničkoj pruzi na makroskopskom nivou. Ova metoda preformulacije takođe obećava da će se primeniti u širem skupu problema rutiranja i rasporeda sa periodičnim zahtevima aktivnosti. Takođe, autori očekuju da bi ova tehnika proširenja prostorno-vremenske mreže, kao posebna verzija metoda razdvajanja promenljivih u literaturi o dualnoj dekompoziciji, potencijalno mogla da premosti praznine u modeliranju između cikličnih i necikličnih redova vožnje. Konkretno, postojeći model matematičkog programiranja za problem periodičnog rasporeda događaja (PESP) transformisan je u model toka mreže sa više vrsta robe sa dve povezane mreže rasporeda i ograničenjima kapaciteta sporednih koloseka. Pored toga, usvojene su dve metode dualne dekompozicije, uključujući Lagranžovu relaksaciju i Metodu naizmeničnog smera množilaca (ADMM), da bi se dualizovala ograničenja kapaciteta sporednih koloseka. Za svaki podproblem specifičan za

voz u iterativnom okviru primalne i dualne optimizacije, razvijena je poboljšana verzija dinamičkog programiranja unapred kako bi se pronašao vremenski zavisani glavni raspored sa najnižim troškovima u vremenski-prostornoj mreži tokom više perioda. Takođe, razvijene su heurističke metode motivisane ADMM-om sa prilagođenim parametrima kazne kako bi se dobila dobra rešenja gornje granice. Na osnovu realnih slučajeva sa koridora železničke pruge za velike brzine Peking - Šangaj, upoređene su numeričke performanse između predložene preformulacije i PESP modela koji uključuje standardni rešavač optimizacije.

Michael Kümmling i dr. [5] bave se problemom periodičnog zakazivanja događaja (PESP) zasnovanom na periodičnim mrežama događaja i proširuju ga ograničenjima simetrije. Moć modeliranja PESP-a razmatra se za automatsko izračunavanje izvodljivih periodičnih redova vožnje železnice. Uključujući opisana proširenja, moguće je potpuno modeliranje integrisanih redova vožnje u redovnim intervalima. Kodiranje PESP-a u iskaznu logiku omogućava korišćenje efikasnih SAT rešavača za rešavanje PESP-a. Međutim, takođe je moguća optimizacija redova vožnje linearnim programiranjem. Pošto su skoro svi problemi reda vožnje iz stvarnog sveta preograničeni, opisane su metode za automatsko rešavanje konflikata. Pošto još uvek nedostaju efikasni algoritmi za rešavanje konflikata za velike isprepletene železničke mreže, predstavljeno je nekoliko strategija za efikasno rešavanje konflikata i inteligentno razlaganje problema reda vožnje i razmatran je kompromis između vremena izračunavanja i smanjenja prostora rešenja. Ove strategije omogućavaju brzo prilagođavanje i malim promenama. Opisane metode su implementirane u softverskom sistemu TAKT. Primenjen je poboljšani TAKT na studiju reda vožnje i predstavljene su neke ključne brojke i rezultati.

L.Kroon i dr. [6] u ovom radu opisuju modele i tehnike operacionih istraživanja (OR) koje se mogu koristiti za određivanje (cikličnih) redova vožnje železnice. Razmatrana su dva aspekta reda vožnje železnice: (i) određivanje vremena dolaska i polaska vozova na stanicama i drugim relevantnim lokacijama kao što su raskrsnice i mostovi, i (ii)

dodeljivanje svakog voza odgovarajućem peronu i odgovarajućim dolaznim i odlaznim rutama na svakoj stanici. Štaviše, razmatrani su i aspekti robusnosti oba podproblema.

Vromans Michiel J.C.M. navodi da je pouzdanost je jedan od ključnih faktora u transportu, kako za putnike tako i za teret [6]. U ovom radu ispituje se pouzdanost u javnim železničkim sistemima. Pouzdanost železničkih usluga je složena stvar, jer postoji mnogo uzroka prekida i barem isto toliko uzroka kašnjenja koja se šire u prostoru i vremenu. Jedan od načina za povećanje pouzdanosti je smanjenje širenja kašnjenja usled međuzavisnosti između vozova. Učinjen je pokušaj da se smanje ove međuzavisnosti smanjenjem razlika u vremenu vožnje po deonici pruge, tj. kreiranjem homogenijih redova vožnje. Zbog složenosti železničkih sistema, korišćena je simulacija cele mreže za analizu alternativnih redova vožnje. Izložen je izveštaj o teorijskim i praktičnim slučajevima. Pored poređenja različitih redova vožnje, izvedeni su i opšti principi reda vožnje.

3. CILJEVI U IZRADI REDA VOŽNJE

Kada je reč o ciljevima prilikom izrade reda vožnje možemo izdvojiti tri ciljne grupe:

- zadovoljni potrošači,
- stvaranje stabilnog i čvrstog železničkog sistema i
- kontrolisanje troškova.

Ovi ciljevi mogu biti konfliktni. Na primer, putnik će biti izuzetno zadovoljan ako uvek ima direktnu vezu između dve stanice, bez usputnih zaustavljanja, i u tačno željeno vreme. Ali, takav sistem bi koštao izuzetno mnogo operatere, ukoliko je to operativno moguće.

3.1. Vreme putovanja

Jako bitan faktor pri odabiru vrste prevoza je vreme putovanja. Međutim, postoji ograničena sloboda u pružanju mogućnosti brzog prevoza sa nekoliko presedanja, s obzirom da su železničke linije unapred pretpostavljene i fiksne. Ipak, kroz pauze i vremena ukrštanja, red vožnje ima izmene u odnosu na već predviđeno vreme putovanja.

Cilj reda vožnje je da ponudi korisnicima brzo putovanje s obzirom na ukrštanja i pauze u stanicama, odnosno vreme čekanja. Umesto da se samo zadovoljavaju osnovni zahtevi, cilj reda vožnje je da zadovolji i ove dodatne zahteve ukoliko je to moguće. Dakle, umesto da se proverava da li ima dovoljno vremena za ulazak i izlazak putnika i obezbeđenja pojedinih veza između vozova, ovi zahtevi trebaju da budu uključeni u red vožnje ukoliko je moguće da bi se u što većoj meri odgovorilo na zahteve putnika.

3.2. Robustnost reda vožnje

Drugi važan faktor je zadovoljstvo putnika robusnošću reda vožnje. U redu vožnje koji samo ispunjava bezbednosne uslove, vozovi se mogu slediti minimalnom vremenskom razlikom. Međutim, to izaziva da mala kašnjenja jednog voza mogu znatno uticati na ostale vozove, što dalje utiče na celokupnu mrežu. Dakle, drugi cilj je da se konstruiše složeni red vožnje koji bi imao određena „puffer“ vremena, pored minimalnih vremena sleđenja dva voza (iz bezbednosnih razloga između dva voza ostavlja se slobodan prostorni odsek, tj. vremenska razlika koja osigurava da ne dođe do sustizanja vozova), da bi se regulisali mali poremećaji koji mogu nastati u redu vožnje.

3.3. Troškovi

Kao treći cilj prilikom pravljenja reda vožnje javljaju se troškovi. Glavne komponente troškova železničkog sistema čine infrastruktura, vozna sredstva i osoblje. Postoji samo nekoliko izbora da bi se uticalo na smanjenje ovih troškova. Infrastruktura i vozne linije su unapred pretpostavljene i na njih se ne može uticati, dok se vozni park i osoblje raspoređuju u kasnijoj fazi. Međutim, treba težiti ka tome da se konstruiše red vožnje koji bi koristio minimalan broj vozni garnitura.

4. PRIMER CIKLIČNOG REDA VOŽNJE U HOLANDIJI

U mnogim Evropskim zemljama, putnički vozovi saobraćaju prema unapred utvrđenom cikličnom ili periodičnom redu vožnje. Naime, svaka linija putničkog voza saobraća po cikličnom redu vož-

nje, npr. vozovi na jednoj liniji saobraćaju na svakih 30, 60 ili 120 minuta. Ukoliko putnički vozovi saobraćaju prema cikličnom redu vožnje, onda je red vožnje koji koriste teretni vozovi isto ciklični.

Jedna od prednosti cikličnog reda vožnje je ta da putnici mogu upamtiti vreme dolaska njihovog voza u stanicu. Štaviše, lako se može napraviti veliki broj prelaska putnika iz voza u voz. Mana ovog reda vožnje je da se ne može obezbediti veliki broj direktnih linija između gradova, što znači da ovaj red vožnje nije fleksibilan. Još jedna mana ovog reda vožnje je činjenica da potpuno ciklični red vožnje može biti poprilično neefikasan: vozovi moraju saobraćati i sa malim brojem putnika. Dakle, u praksi postoje izuzeci potpuno cikličnog reda vožnje. Na primer, može da postoji neki dodatni voz koji saobraća tokom najveće saobraćajne gužve, kao i da frekvencija može biti smanjena tokom kasnih večernjih sati. Samo nekoliko Evropskih zemalja (npr. Francuska i Španija) nemaju cikličnost u njihovim redovima vožnje.

Prilikom planiranja redova vožnje uzima se u obzir:

- zadržavanje vozova u stanicama,
- promena smera vozovima,
- povezivanje vozova,
- unapred utvrđeni polasci i dolasci vozova i
- bezbednosni propisi.

Na slici 1. prikazane su linije na kojima saobrać 5 pari vozova u jednom časovnom cilusu na mreži pruga u Holandiji¹. To su sledeći vozovi:

Voz 500 – je takozvani „Severo-istočni“ međugradski voz koji saobraća između Roterdama i Haga, preko Utrehta, Groningema i Leuwardena.

Voz 800 – je međugradski voz između Harlema i Maastrichta.

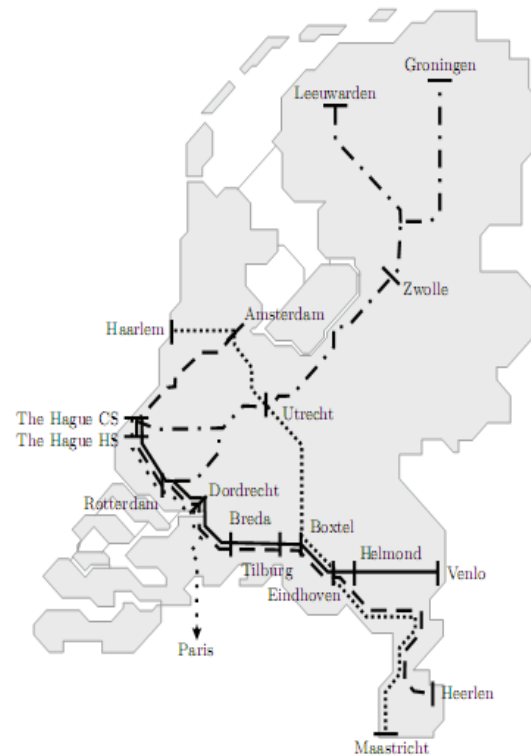
Voz 1900 – je međugradski voz između Haga i Venla.

¹ Izloženi primer je sačinjen na osnovu kompleksnog predloga cikličnog reda vožnje izloženog u doktorskoj disertaciji L.W. Pitera "Cyclic Railway Timetable Optimization" odbranjenoj 2003. godine na Univerzitetu Erasmus u Roterdamu.

Voz 2500 – je međugradski voz između Haga i Herlena.

Voz 9300 – je voz velikih brzina Talis koji saobraća između Amsterdama i Pariza.

- - - 500 The Hague/Rotterdam - Groningen/Leuwarden
- 800 Haarlem - Maastricht
- 1900 The Hague - Venlo
- - - 2500 The Hague - Heerlen
- 9300 Amsterdam - Paris



Slika 1. Rute vozova 500, 800, 1900, 2500 i 9300 [1]

U primeru na slici 1 dati su i „suprotni“ vozovi 1900 i 2500, koji su obeleženi kao 1901 i 2501 (vozovi u suprotnom pravcu). Za sve primere uzeto je ciklično vreme vožnje T od 60 minuta.

Vozno vreme i vreme zadržavanja vozova u stanicama

Ograničenje vremena vožnje voza blisko je povezano sa ograničenjem zadržavanja voza u stanicama, jer zajedno oblikuju vreme vožnje voza od početne do krajnje stanice. Vozno vreme za voz 1900 može da se odredi na osnovu podataka iz Tabele 1. Za potrebe planiranja, vreme zadržavanja međunarodnih vozova u stanici je obično postavljeno na intervalu $[1, 5]_{60}$, što znači da minimalno

zadržavanje voza u stanici iznosi jedan minut, a maksimalno 5 minuta za ciklus rada vožnje u trajanju od 60 minuta. Skup ograničenja voza 1900 dat je u Tabeli 1.

Tabela 1. Ograničenja vremena vožnje voza i vremena zadržavanja voza 1900 u stanicama [1]

$a(1900)_{\text{The Hague HS}}$	-	$d(1900)_{\text{The Hague Central}}$	=	$[3]_{60}$
$d(1900)_{\text{The Hague HS}}$	-	$a(1900)_{\text{The Hague HS}}$	∈	$[1,5]_{60}$
$a(1900)_{\text{Rotterdam}}$	-	$d(1900)_{\text{The Hague HS}}$	=	$[18]_{60}$
$d(1900)_{\text{Rotterdam}}$	-	$a(1900)_{\text{Rotterdam}}$	∈	$[1,5]_{60}$
$a(1900)_{\text{Dodrecht}}$	-	$d(1900)_{\text{Rotterdam}}$	=	$[17]_{60}$
$d(1900)_{\text{Dodrecht}}$	-	$a(1900)_{\text{Dodrecht}}$	∈	$[1,5]_{60}$
$a(1900)_{\text{Breda}}$	-	$d(1900)_{\text{Dodrecht}}$	=	$[17]_{60}$
$d(1900)_{\text{Breda}}$	-	$a(1900)_{\text{Breda}}$	∈	$[1,5]_{60}$
$a(1900)_{\text{Tilburg}}$	-	$d(1900)_{\text{Breda}}$	=	$[13]_{60}$
$d(1900)_{\text{Tilburg}}$	-	$a(1900)_{\text{Tilburg}}$	∈	$[1,5]_{60}$
$a(1900)_{\text{Eindhoven}}$	-	$d(1900)_{\text{Tilburg}}$	=	$[25]_{60}$
$d(1900)_{\text{Eindhoven}}$	-	$a(1900)_{\text{Eindhoven}}$	∈	$[1,5]_{60}$
$a(1900)_{\text{Helmond}}$	-	$d(1900)_{\text{Eindhoven}}$	=	$[9]_{60}$
$d(1900)_{\text{Helmond}}$	-	$a(1900)_{\text{Helmond}}$	∈	$[1,5]_{60}$
$a(1900)_{\text{Venlo}}$	-	$d(1900)_{\text{Helmond}}$	=	$[21]_{60}$

Ograničenja izneta u tabeli znače:

1. red

a (arrival) – dolazak voza 1900 u stanicu Hag HS, d (departure) – polazak voza 1900 iz stanice Hag Central,

Razlika između dolaska voza 1900 u stanicu Hag HS i polaska voza 1900 iz stanice Hag Central je 3 minuta u časovnom (60 minuta) ciklusu reda vožnje.

2. red

razlika između polaska voza 1900 iz stanice Hag HS i dolaska voza 1900 u stanicu Hag HS je u intervalu od 1 do 5 minuta u časovnom (60 minuta) ciklusu reda vožnje. Itd...

Ograničenje promene smeru voza

Nakon što voz 1900 stigne u Venlo, garnitura osta-

je u toj stanici još neko vreme i nakon toga može da se koristi za saobraćanje voza u suprotnom smeru. Na taj način voz 1900 postaje voz 1901 i saobraća iz stanice Venlo. Nakon što voz 1901 stigne u stanicu Hag, i ostane tamo neko vreme, kompozicija voza koristi se za dalje saobraćanje do Herlena. Pa u Hagu voz 1901 postaje voz 2500. Nakon dolaska voza 2500 u Herlen, kompozicija se vraća u Hag kao voz 2501 i nakon toga opet saobraća kao voz 1900.

Ukoliko pretpostavimo da vreme promene smeru voza od Venla do Herlena je podešeno na $[20; 50]_{60}$, a vreme promene smeru voza od Haga je podešeno na $[15; 40]_{60}$. Tako da je minimalno vreme od 20 minuta potrebno da bi se kompozicija pokrenula ponovo. Granica od 50 minuta označava da vozna kompozicija ne može da stoji dugo u stanici. U Tabeli 2 data su vremena promene smeru vožnje voza za Hag i Venlo.

Tabela 2. Vreme promene smeru vozovima 1900, 2500 i 2501 u Hagu, Venlu i Herlenu [1]

$d(1901)_{\text{Venlo}}$	-	$a(1900)_{\text{venlo}}$	€	$[20,50]_{60}$
$d(2500)_{\text{The Hague CS}}$	-	$d(1901)_{\text{The Hague CS}}$	€	$[15,40]_{60}$
$d(2501)_{\text{Heerlen}}$	-	$d(2500)_{\text{Heerlen}}$	€	$[20,50]_{60}$
$d(1900)_{\text{The Hague CS}}$	-	$d(2501)_{\text{The Hague CS}}$	€	$[15,40]_{60}$

Ograničenja povezivanja vozova

Postoje dva tipa povezivanja vozova: povezivanje vozova u svrhu transfera putnika i kombinovano povezivanje vozova.

Primer povezivanja vozova u svrhu transfera putnika

Voz 1900 se povezuje sa vozom 800 u Ajndhovenu. Tokom saobraćanja između Haga i Venla voz 1900 se nekoliko puta povezuje sa vozom 800. Prvo povezivanje vozova dozvoljava putnicima voza 1900, iz pravca Haga, prelaz u voz 800 u pravac Maastrichta. Drugo povezivanje vozova omogućava da putnicima prelaz iz voza 800, iz pravca Harlem, u voz 1900 u pravcu Venla.

U praksi, vreme povezivanja od $[2, 5]_{60}$ koristi se za povezivanje između međugradskih vozova. Putnici moraju da pređu iz voza u voz veoma brzo, u periodu od 2 minuta. Vreme od 5 minuta je određeno ukoliko je u pitanju transfer većeg broja putnika. Transfer putnika se može obaviti u dva minuta, i ovo vreme se dodaje na minimalno vreme putovanja voza. Kapacitet infrastrukture mora omogućiti sastajanje dva voza u jednoj stanici radi prelaska putnika ($[2, 5]_{60}$). U tabeli 3 prikazano je povezivanje vozova 1900 i 800 u Ajndhovenu.

Tabela 3. Ograničenja povezivanja putnika između vozova 800 i 1900 u Ajndhovenu

$d(1900)_{\text{Eindhoven}}$	-	$a(800)_{\text{Eindhoven}}$	€	$[2,5]_{60}$
$d(800)_{\text{Eindhoven}}$	-	$a(1900)_{\text{Eindhoven}}$	€	$[2,5]_{60}$

Primer kombinovanog povezivanja vozova

Najbolji primer kombinovanog povezivanja vozova na holandskim železnicama je prikazan na vozu 500. Ruta voza 500 prikazana je na slici 1. Dva voza dolaze u Utrecht, jedan iz Roterdama i jedan

iz Haga. Po dolasku u Utrecht, vozovi se spajaju u jedan voz i nastavljaju dalje ka Zvoleu. Po dolasku u Zvole, kominovani voz se rastavlja i formiraju se u dva voza. Jedan od ovih vozova ide ka Groningemu, a drugi ka Leuwardenu. Tako da možemo posmatrati voz 500 kao tri voza:

- 500 Hag – Groningem,
- 501 Rotterdam – Utrecht i
- 502 Zvole – Leuwarden.

Ukrštavanje vozova u Utrechtu zahteva povezivanje između dolaska voza 501 i odlaska voza 500. Analogno tome, razdvajanje dva voza u Zvoleu mogu se osnovati nakon vremena dolaska voza 500 i vremena odlaska voza 502.

Zajedničku vrednost ukrštanja ili razdvajanja vozova je $(5, 10)_{60}$. Ostavljeno je garantno vreme od 10 minuta za putnike koji ne silaze u Utrechtu. Sistem ograničenja dat je u tabeli 4 (gde je objašnjeno i cepanje voza 500).

Tabela 4. Kombinovanje i razdvajanja voza 500 u Utrechtu i Zvoleu

$d(500)_{\text{Utrecht}}$	-	$a(501)_{\text{Utrecht}}$	€	$[5,10]_{60}$
$d(502)_{\text{Zwolle}}$	-	$a(500)_{\text{Zwolle}}$	€	$[5,10]_{60}$

Unapred utvrđeni polasci i dolasci vozova

Kao primer unapred utvrđenih vremena polazaka i dolazaka vozova uzima se Talisova garnitura 9300 koja saobraća na pruži velikih brzina između Amsterdama i Pariza. Po redu vožnje voz ulazi u Holandiju u :25 a izlazi iz zemlje u povratku u :34. Ulazak voza 9300 u Holandiju označava prolazak progreničnog čvora Holandije, a izlazak iz Holandije označava odlazak voza iz pograničnog čvora. U tabeli 5 prva dva ograničenja označavaju unapred utvrđene polaske i dolaske vozova. Dok su druga dva ograničenja vremena ulaska voza 9300 u Holandiju i vreme izlaska voza iz Holandije.

Tabela 5. Unapred utvrđeni polasci i dolasci voza 9300

$d(9300)_{border}$	=	25
$a(9300)_{border}$	=	34
$d(9300)_{border}$	∈	[23,27]60
$a(9300)_{border}$	∈	[32,36]60

Bezbednosni propisi

Bezbednosni propisi se zasnivaju na obezbeđenju minimalnog vremena, koje mora biti poštovano, između dva voza koji se slede, tj. na definisanom intervalu sleđenja uzastopnih vozova. Vozovi koji putuju u istom pravcu saobraćaju istim brzinama. Sastajanje i preticanje u tom slučaju nije dozvoljeno i time se poštuje minimalno vreme razmaka između dva voza. Voz 1900 iz Haga za Venlo i voz 800 iz Harlema za Mastroiht, koriste istu infrastrukturu. Pretpostavimo da oba voza putuju 10 minuta između Bokstela i Ajndhovena. Minimalno vreme sleđenja između ova dva voza mora biti 3 minuta. Tako da, ukoliko jedan voz napusti stanicu, sledeći voz je može napustiti tek nakon 3 minuta.

U modeliranju cikličnih redova vožnje mora da se uzme u obzir sledeće:

- raspored železničke infrastrukturne mreže,
- planiranje vozova i
- niz zahteva koje zahteva red vožnje, nivo usluga i logistična ograničenja.

Razlikuju se pretpostavke u vezi detalja infrastrukture, pretpostavke o vozovima i pretpostavke o redu vožnje.

4.1. Infrastrukturne pretpostavke

Železnička infrastruktura se sastoji od mreže čvorova i koloseka. Čvorovi predstavljaju lokacije na mreži gde se može vršiti manevrisanje. Naime, čvorovi omogućavaju kordinisano kretanje vozova. Primer čvora je stanica, gde vozovi iz različitih pravaca dolaze i prave pauzu, gde putnici prelaze iz voza u voz, gde se vozovi mogu okrenuti pre njihovog polaska itd. Još neki primeri čvorova su putni prelazi, mostovi, skretnice i ranžirni koloseci.

Koloseci se povezuju na čvorove i omogućavaju da

voz putuje od jednog do drugog čvora. Kada postoje dva paralelna koloseka, to omogućava da svaki voz ima svoj smer. U slučaju četvorokolosečne pruge, dva koloseka se koriste za jedan pravac i dva za drugi pravac.

S obzirom da su čvorovi lokacije gde se vrši koordinacija vozova, po definiciji „mešanje“ vozova nije dozvoljeno na koloseku. To znači da nije dozvoljeno susretanje i prestizanje vozova na koloseku. U praksi, sustizanje i prestizanje vozova se vrši samo u stanicama, rasputnicama i sporednim kolosecima. Sporedni kolosek je odvojen kolosek, koji je povezan na glavni kolosek uz pomoć dve skretnice tj. dva čvora sa obe strane. Brži voz može preći sporiji voz ukoliko sporiji voz pređe na sporedni kolosek. U trenutku sustizanja i prestizanja ova dva voza nisu na istom koloseku.

Ukoliko gledamo stanice kao čvorove na karti, ne možemo uvideti infrastrukturne objekte stanice. Ali sama šema stanice predstavlja veliki i komplikovan model. Na primer, stanica može imati samo platforme da primi vozove koji su posebno naglašeni u redu vožnje.

4.2. Pretpostavke o vozu

Smatramo vozove kao tzv. železničke linije. Železnička linija je direktna veza voza između početne i krajnje stanice preko određene rute. Svaka linija voza ima svoju frekvenciju, koja detaljnije objašnjava broj vozova koji saobraćaju u određenom ciklusu. Na primer, u ciklusu od jednog sata, dve frekvencije znače da svakih pola sata kreće voz iz jednog ka drugom pravcu. Najčešći tip vozova u Holandiji je „međugradski“ voz, lokalni voz i terentni voz. Za svaki voz, vreme vožnje je unapred poznato.

4.3. Pretpostavke o redu vožnje

Red vožnje poseduje određene pretpostavke, mere bezbednosti, nivo usluga koji se treba postići, i ograničenja s obzirom na operativne mogućnosti reda vožnje. Ove pretpostavke su definisane tako da pokriju većinu praktičnih potreba i jedini su uslov koji se uzima u obzir pod pretpostavkama reda vožnje.

Zadržavanje vozova u stanicima. U praksi, postoje ograničenja zadržavanja vozova u stanicima. Postoji minimalno vreme zadržavanja koje je potrebno putnicima da izađu ili uđu u voz. Takođe, vreme zadržavanja se ograničava jer stanice imaju ograničen kapacitet, i svaki minut zadržavanja povećava ukupno vreme putovanja voza.

Povezivanje vozova. Dva voza se povezuju ukoliko postoji planirana veza između njihovih dolazećih i odlazećih vremena u određenom čvoru. Spajanje (povezivanje) vozova je moguće u dva slučaja. Prvi slučaj je, kada ne postoji direktna veza između dva čvora. U tom slučaju, putnicima se nudi odgovarajuće vreme putovanja između dva čvora. Ovakav slučaj se primenjuje u redu vožnje i planira se kratko vreme između dolaska jednog voza i odlaska voza na koji putnici prelaze. Drugi slučaj zahteva povezivanje dva voza koja dolaze u približno vreme. Ovaj slučaj je moguć kada vozovi dele istu deonicu svojih ruta. Spajanjem dva voza u jedan smanjuje se potreba za ljudskim i infrastrukturnim resursima.

Sinhronizovanje vozova. Kada vozovi sa različitih linija dele deo rute, vreme dolaska se sinhronizuje da bi se ponudila veća učestalost na određenom delu pruge. Na primer, ako dve linije imaju frekvenciju jedan, njihovom sinhronizacijom dolazaka povećava se frekvencija na dva na tom delu putanje.

Okretanje voza u stanicima. Vozna kompozicija je skup vagona, koja se mogu samostalno kretati, ili se mogu kretati uz pomoć lokomotive, a koji saobraćaju na određenoj liniji. Kada vozna kompozicija stigne u stanicu, ona se nakon određenog vremena okreće i saobraća u suprotnom smeru. Uobičajeno, vozna kompozicija se okreće i vraća putanjom kojom je prethodno došla, mada može doći i do promene putanje. Pre nego što krene vozna kompozicija iz stanice, potrebno je da se utroši neko vreme da bi se kompozicija očistila, da bi se obavio manevarski rad itd.

Fiksni odlasci i dolasci vozova. Za neke vozove, sloboda biranja odlaska i dolaska je limitirana. Ovo se posebno odnosi na međunarodne vozove. Vreme kada se međunarodni voz nalazi na grani-

ci neke zemlje predstavlja dogovor dve susedne železničke kompanije. Kada voz jednom uđe u zemlju njegova dalja putanja i red vožnje reguliše železnička uprava u toj zemlji, onoliko duga koliko je planirano da voz ostane u njoj pre izlaska iz zemlje ili povratka u zemlju odakle je došao.

Bezbednosni propisi. Konačna, ali veoma važna pretpostavka tokom vožnje voza jesu bezbednosni propisi. Svaka dva voza koja koriste isti kolosek moraju biti odvojena sa minimum jednim „intervalom sleđenja“ (jednim blok odsekom). Iz bezbednosnih razloga zabranjeno je sustizanje i preticanje vozova na istom koloseku.

5. MATEMATIČKA FORMULACIJA CIKLIČNOG REDA VOŽNJE

Većina modela cikličnih redova vožnje zasniva se na metodologiji Upravljanja Periodičnim Problema (Periodic Event Scheduling Problem – PESP), koji su definisali Serafi i Ukovič (1989). Model PESP zasniva se na upravljanju cikličnim događajima $e=1, \dots, E$. Ciklično vreme u redu vožnje označeno je sa T . Ukoliko se događaj odvija u trenutku V , onda se sličan događaj odvija i u svim ostalim trenutcima: $\{ \dots, v - 2T, v - T, v, v + T, v + 2T, \dots \}$.

PESP model je klasičan model planiranja, ali ne može se primenjivati kao model rutiranja. Ukoliko postoji nekoliko opcija rutiranja voza po kolosecima između stanica, onda se pretpostavlja da je jedna od tih opcija primarna i postaje apriori. Na primer, ukoliko postoji 4 koloseka između dve stanice (po dva sa svaki pravac), mora se napraviti selekcija i svakom vozu se mora odrediti kolosek saobraćanja.

U slučaju železničkog reda vožnje, događaji dolaska i odlaska vozova u stanice i na ostalim relevantnim mestima, kao što su skretnice. Promenljivo ve označavamo vreme u kom se događaj e planira u svakim ciklusu. Uobičajeno je da su sva vremena događaja ceo broj. Onda možemo pretpostaviti da je ve u granicama $[0, T - 1]$.

Trajanje događaja počinje i završava se u određenom vreme u redu vožnje. Na primer, voz koji mora da ode iz jedne u drugu stanicu, mora da se zadrži

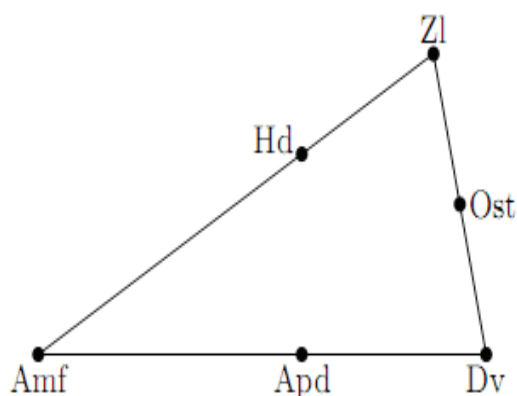
određeno vreme u nekoj stanici, mora postojati određeno vreme sleđenja vozova koji se nalaze na istoj deonici, ili se ta dva voza moraju preći ili ukrstiti, ili imaju transfer putnika ili vagona itd.

Primer cikličnog reda vožnje

U primeru je prikazan trougao između tri grada: Amersforta (Amf) – Deventera (Dv) – Cvolea (Zl) u Holandiji, što je prikazano na Slici 2 i Tabeli 6. Druge relevantne stanice su Apeldorn (Apd), Hardervijk (Hd) i Olst (Ost). [8]

Pretpostavljamo plan saobraćanja od minimum jednog voza u roku od pola sata. U Tabeli 1, opisani su detalji o planu saobraćanja kao i minimalna vremena vožnje. U praksi minimalna vremena vožnje zavise od vrste kola koja se koriste.

U daljem tekstu sa IC predstavlja skraćenicu za intersiti voz (međugradski) a stop označava zaustavljanje voza.



Slika 2. Trougao između Amersforta (Amf) – Deventera (Dv) – Cvolea(Zl) [8]

U tabeli 6 međugradski voz između Amersforta –

Deventera ima pauzu u Apeldornu sa minimalnim vremenom vožnje između Amersforta i Apeldorna od 24 minuta i 10 minuta od Apeldorna do Deventera. On saobraća jednom u toku od pola sata.

Stanice koje nisu upisane u tabeli 6 nisu relevantne. Pa između Amersforta i Cvolea imamo samo jedno zaustavljanje u Hardervijku jer ostala zaustavljanja nisu bitna i uračunata su u minimalno vreme vožnje. IC Amersfort - Cvolea ne staje između ove dve stanice. Minimalno vreme vožnje između Amersforta - Cvolea preko Hardervijka je 15 i 20 minuta.

Prvi tip ograničenja, cikličnog reda vožnje, koji se mora iskoristiti, je tzv. ograničeno vreme vožnje voza. Analogno glavnoj definiciji, $dep(1a)_{Amf}$ je moment polaska dolazećeg voza 1 (IC Amersfort-Deventer) u Amersfort, i $arr(1a)_{Apd}$ je moment dolaska istog voza iz sledeće stanice Apeldorn. Da bi bili sigurni da je određeno vreme vožnje voza, minimalno 24 minuta (u ovom primeru), dobijamo sledeću formulu:

$$24 \leq A_{Apd}^{1a} - D_{Amf}^{1a} + 30 \times Q_{dep(1a)_{Amf}, arr(1a)_{Apd}} \leq 29 \tag{1}$$

6. ZAKLJUČAK

Red vožnje predstavlja tabelu vremena kada je planiran dolazak određenog voza ili polazak voza sa predviđene lokacije. Red vožnje predstavlja obećanje operatora putnicima, koji ih obaveštava kada i gde određeni voz dolazi ili odolazi.

Cilj reda vožnje je da ponudi korisnicima brzo putovanje s obzirom na ukrštavanja i pauze u stanicama, odnosno vreme čekanja. Umesto da se samo zadovoljavaju osnovni zahtevi, cilj reda

Tabela 6. Detalji o planu saobraćanja vozova [8]

Tip voza	Ruta	Zaustavljanja	Minimalna vremena vožnje	Frekvencija	Voz
IC	Amf - Dv	Apd	24+10	1	1a, 1b
IC	Amf - Zl	-	35	2	2a,2b,3a,3b
IC	Zl - Dv	Ost	14+6	1	4a, 4b
stop	Amf - Zl	Hd	28+26	1	5a, 5b

vožnje je da zadovolji i ove dodatne zahteve ukoliko je to moguće. Dakle, umesto da se proverava da li ima dovoljno vremena za ulazak i izlazak putnika, i obezbeđivanje pojedinih veza između vozova, ovi zahtevi trebaju da budu uključeni u red vožnje da bi se u što većoj meri odgovorilo na zahteve putnika.

Na železničkoj mreži u Holandiji u primeni je ciklični red vožnje. Jedna od prednosti cikličnog reda vožnje je ta da putnici mogu upamtiti vreme dolaska njihovog voza u stanicu. Takođe, lako se može napraviti veliki broj presedanja putnika iz voza u voz. Mana ovog reda vožnje je da se ne može obezbediti veliki broj direktnih linija između gradova, što znači da ovaj red vožnje nije fleksibilan. Još jedna mana ovog reda vožnje je činjenica da u potpuno ciklični red vožnje može biti poprilično neefikasan: vozovi moraju saobraćati i sa malim brojem putnika.

U radu su prikazane ograničavajuće okolnosti primene cikličnog reda vožnje sa primerom kako se to sprovodi na prugama Holandskih železnica. Kroz objašnjenje ograničavajućih okolnosti cikličnog reda vožnje prikazani su primeri pojedinih vozova koji saobraćaju na odgovarajućim relacijama. Takođe, su dati ciljevi svake železničke uprave prilikom plana izgradnje reda vožnje.

LITERATURA

- [1] L. W. Peeters, *Cyclic Railway Timetable Optimization*, Erasmus Universiteit Rotterdam, Holland, 2003.
- [2] Leo g. Kroon, Rommert Dekker & Michiel J. C. M. Vromans, *Cyclic railway timetabling: a stochastic optimization approach*, Conference paper, pp 41–66, *Algorithmic Methods for Railway Optimization*, Springer, 2007
- [3] Daniel Sparing, Rob M. P. Goverde, *A cycle time optimization model for generating stable periodic railway timetables*, *Transportation research part b: Methodological*, volume 98, april 2017, pages 198-223
- [4] Zhang Yongxiang, Peng Qiyuan, Yao Yu, Zhang Xin, Zhou Xuesong, *Solving cyclic train timetabling problem through model reformulation: extended time-space network construct and alternating direction method of multipliers methods*, *Transportation Research part b: Methodological*, volume 128, october 2019, pages 344-379
- [5] Michael Kümmling, Peter Großmann, Karl Nachtigall, Jens Opitz, Reyk Weiß, *A state-of-the-art realization of cyclic railway timetable computation*, https://tu-dresden.de/vkstrl/takt_paper2015_pp, PDF
- [6] L. Kroon, D. Huisman, G. Maroti, *Railway timetabling from an operations research perspective*, *Econometric institute report ei2007-22*, 2007.
- [7] Vromans, Michiel J. C. M. & Dekker, Rommert & Kroon, Leo G., 2006. "Reliability and heterogeneity of railway services," *European journal of operational research*, Elsevier, vol. 172(2), Pages 647-665, july 2006.
- [8] M. Vromans, *Reliability of railway systems*, Erasmus Universiteit Rotterdam, Holland, 2005.
- [9] [Http://www.Ieor.Iitb.Ac.In/files/faculty/narayan/cyclic-timetables.Pdf](http://www.Ieor.Iitb.Ac.In/files/faculty/narayan/cyclic-timetables.Pdf)