Kretanje vozila u konvojima „platooning“: ekološki aspekti

OLGA N. BOGDANOV, Univerzitet u Beogradu,

Računarstvo u društvenim naukama, Beograd

NATAŠA Z. BOJKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

MARIJANA T. PETROVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

Pregledni rad

UDC: 502.131.1:656.136

DOI: 10.5937/tehnika2003355B

Zaštita životne sredine aktivno postaje jedan od glavnih ciljeva Agende održivog razvoja, pa se stoga nalazi u fokusu sve većeg broja naučnih radova i publikacija. U kontekstu kretanja vozila u „platooning“ konvojima životna sredina zauzima značajno mesto, s obzirom na to da su neki od glavnih ciljeva ove transportne tehnologije upravo ušteda potrošnje goriva i smanjenje emisije štetnih gasova. Oba cilja ostvariva su prilikom optimizacije brzine kretanja vozila u konvoju, ali zavise i od broja vozila koja čine konvoj, puta po kojem se kreću, težine/mase koju prenose, kao i vremenskih uslova. Ovaj rad pružiće uvid u simulacije i istraživanja sprovedena u realnim uslovima u oblasti „platooning“ tehnologije kretanja vozila, u čijem fokusu će biti predstavljeni uticaji ovog transportnog rešenja na životnu sredinu – njegova ekološka komponenta.

Ključne reči: platooning, održivi razvoj, potrošnja goriva, simulacije, terenski testovi

1. UVOD

U konceptu održivog razvoja zaštita životne sredine zauzima značajno mesto, budući da se promovise kroz više pojedinačnih ciljeva održivog razvoja, sadržanih u Agendi 2030 [1]. Transportni sistem je od presudnog značaja za društvo i ekonomiju, a najveći udeo u ukupnom transportu zauzima drumski prevoz tereta, koji čini gotovo 60% celokupnog teretnog transporta, i potražnja za njim sve više raste [11]. Kao posledica rasta obima transporta generiše se sve veća potrošnja goriva, kao i emisija gasova sa efektom staklene bašte. Prema izveštajima Evropske komisije, drumski transport predstavlja oko 27% ukupne potrošnje energije u Evropskoj uniji [6]. Takođe, istraživanja pokazuju da gasovi koje vozila emituju čine čak 20% ukupne emisije ugljenika, od čega četvrtina potiče od teških vozila [13]. Troškovi goriva zauzimaju veliki deo ukupnih troškova prevoza; trošak goriva predstavljao je oko 30% troškova životnog ciklusa posedovanja i upravljanja kamionom [12].

U ovom radu je dat pregled i sistematizacija nalaza studija (simulacija i/ili terenskih testova) koje su se bavile pitanjima optimalne organizacije konvoja (brzina, broj, vozila, odstojanje i sl.) i potencijalnim uštedama u potrošnji goriva. Na početku biće definisan pojam „platooning“-a, kao predstavljeni njegovi tehnološki i operativni aspekti. Istraživanja koje će biti prikazana uključice, kako simulacije, tako i istraživanja testirana u realnim uslovima, da bi na kraju njihovi rezultati bili sistematizovani i upoređeni. Fokus rada biće usmeren na predstavljanje uticaja kretanja vozila u „platooning“ konvojima na životnu sredinu – uštedu goriva, smanjenje emisije štetnih gasova i upotrebe neobnovljivih energetskih izvora.

2. „PLATOONING“ - CILJEVI I DEFINICIJE

„Platooning“ tehnologija kretanja vozila podrazumeva „skup vozila koja formiraju 'drumski voz', tako što se kreću u jednoj koloni, čime se smanjuje otpor vazduha“. Dakle, značaj ove tehnologije ogleda su u mogućnosti smanjenja ukupne potrošnje goriva [16]; razvijanjem tehnologije „ekološke vožnje“ može se povećati efikasnost upotrebe goriva, uz pomoć optimizacije brzine kretanja vozila u konvoju [18].

Ovo transportno rešenje, dovodi do ekonomičnije potrošnje goriva, usled smanjenog aerodinamičkog otpora, s obzirom na to da prilikom formiranja konvoja,

Adresa autora: Olga Bogdanov, Univerzitet u Beogradu, Računarstvo u društvenim naukama, Beograd, Studentski trg 1

e-mail: olga_bogdanov@live.com

Rad primljen: 14.05.2020.

Rad prihvaćen: 29.05.2020.

kamioni putuju u tandemu, sa veoma malim odstojanjem [18]. Ciljevi autonomizacije kamiona su ušteda energije i povećani transportni kapaciteti, kao i eventualno smanjenje troškova transportnog osoblja bespilotnim upravljanjem vozilima [15].

„Platooning“ doprinosi uštedi energije na tri načina [15]: smanjenje aerodinamičkog otpora, posebno pri velikim brzinama; izgladivanje prolaznih tokova saobraćaja (engl. „smoothing of traffic flow transients“) i povećanje kapaciteta puta usled obezbeđivanja više prostora za okolni saobraćaj.

3. TEHNIČKI I OPERATIVNI ASPEKTI

„PLATOONING“-A

Kada je u pitanju tehnologija koja se primenjuje u „platooning“-u, značajno je istaći da postoji veliki broj rešenja u smislu da se tehnologije koje omogućavaju funkcionisanje „platooning“-a za kamione uvode na drugačije načine. U nastavku rada, biće predstavljen jedan od tehnoloških pristupa koje izdvajaju autori Tsugawa, Sabina i Shladover u studiji iz 2016. godine [15].

Pristup se odnosi na „Automatizovani 'platooning' konvoj kamiona“, koji je razvijen u okviru projekta „Energy ITS“ i se sastoji se od tri kamiona teška 25 tona i jednog lakog kamiona, bočno i uzdužno automatizovanih. Konvoj je vozio brzinom od 80 km/h, sa odstojanjem od 10 i 4 metra na stazi za testiranje. Glavne funkcije „platooning“ konvoja su ostanak u traci (engl. „lane keeping“), kontrola brzine, izbegavanje sudara i držanje odstojanja između vozila. Funkcija držanja odstojanja doprinosi uštedi energije, dok sa druge strane, ostale funkcije doprinose povećanju sigurnosti i smanjenju opterećenja vozača. Kako bi ovo bilo moguće, svaki kamion mora biti opremljen senzorom za bočno upravljanje, koji se sastoji od dva uređaja koji imaju istu konfiguraciju i funkciju. Bočna kontrola može ugroziti preglednost, usled krivina na putu. Druga karakteristika je sistem preglednosti (engl. „vision system“), koji se sastoji od dve vrste senzora: CCD (engl. charged-coupled device) kamere i aktivne preglednosti (engl. „active vision“). Aktivna preglednost uključuje laserski skener i elektronski prijemnik [15].

Sledeći neophodni element sistema odnosi se na senzor za uzdužnu kontrolu (engl. „Sensing for Longitudinal Control“). „Svaki kamion je opremljen radarom od 76 GHz i dvodimenzionalnim LIDAR-om (namenjenom za detekciju svetla i dometa). Ovi radari se koriste za detekciju problema na prvom kamionu i merenje odstojanja među kamionima [15]. Takođe, svaki od kamiona u konvoju mora biti opremljen opremom za „komunikaciju“.

Komunikacija se odnosi na to da se podaci iz svakog kamiona moraju u realnom vremenu deliti među svim kamionima u konvoju, dok komunikaciona

jedinica i elektronska kontrolna jedinica za upravljanje vozilima komuniciraju međusobno. „Podaci koji se dele među kamionima uključuju referentnu brzinu, referentno ubrzanje, brzinu svakog kamiona, kočioni signal“, kao podatke o upravljanju konvojem, kao što su informacije o položaju kamiona unutar konvoja, poziciji prepreka i svakog pojedinačnog kamiona [15].

Na osnovu sprovedenog eksperimenta zaključeno je da ovaj sistem ima pozitivne ekološke karakteristike. Pored ekoloških aspekata, o kojima će detaljnije biti reči u narednom poglavlju, „platooning“ doprinosi i povećanju bezbednosti saobraćaja kroz smanjenje ljudskih grešaka (na primer smanjenjem umora vozača) [7].

4. ISTRAŽIVANJA UTICAJA „PLATOONING“-A NA ŽIVOTNU SREDINU I POTROŠNJU ENERGIJE

Kao glavne prednosti „platooning“ tehnologije izdvajaju se: smanjenje potrošnje goriva, smanjenje emisije gasova, niži troškovi rada, poboljšana bezbednost i efikasnost saobraćaja. Prve dve potencijalne prednosti često se vide kao najvažnije i dokazane su u brojnim laboratorijskim, simulacionim i terenskim testovima.

Kako bi se utvrdio konkretan uticaj „platooning“-a na životnu sredinu potrebno je sprovesti niz eksperimenata/projekata i simulacija usmerenih na testiranje efekata ovog transportnog rešenja. Proučavanje ekonomičnosti potrošnje goriva kamionskih konvoja dobilo je na značaju još krajem prošlog veka i danas se mogu izdvojiti tri različita testa koji se u ovoj oblasti najčešće koriste [18]: 1) aerodinamični tunel (engl. „wind tunnel test“); 2) test puta/koloseka (engl. „road/track test“) i 3) metode simulacije (engl. „simulation methods“). Prednost simulacija je u mogućnosti da se procene uštede energije na pojedinačnim kamionima ili konvojima mogu kombinovati sa procenama potrošnje energije drugih vozila i time steći uvid u ukupne uštede na nivou sistema [15].

Pored smilacija važan izvor saznanja o koristima „platooning“ sa ekološkog aspekta predstavljaju testovi sprovedenih u realnim uslovima.

4.1. Simulacije i teorijska objašnjenja „Platooning“-a

Simulacioni modeli su veoma zastupljeni u razmatranju pozitivnih efekata „platooning“-a u kontekstu zaštite životne sredine i pokazuju da nije neophodno sprovesti konkretan eksperiment kako bi se testirali njegovi uticaji na okolinu [22, 25, 18]. U daljem tekstu prikazane su dve simulacije ove transportne tehnologije, koje su odabrane na osnovu toga što pokazujući različite aspekte njegovog funkcionisanja, dolaze do sličnih rezultata. Iako kamioni putuju gotovo istom brzinom, konvoji se sastoje od različitog broja vozila, kao i različitih teretnih opterećenja [17, 15].

Jednu od simulacija u oblasti „platooning“-a [17] sproveo je tim istraživača 2015. godine. Cilj istraživanja je bio da se utvrdi optimalna brzina kojom konvoj treba da se kreće kako bi uštedeo na potrošnji goriva. Kamioni u ovoj simulaciji se kreću brzinom između 70 i 90 km/h, a uz pomoć algoritma aproksimacije baziranog na „Monte Carlo“ simulaciji, vrše se proračuni za hiljade kamiona i procenjuju uštede goriva [17].

Prvi deo usmeren je na modelovanje konvoja kamiona kao hibridnog sistema, da bi se drugi deo fokusirao na potrošnju goriva. Potrošnja goriva se izračunava u odnosu na pređenu udaljenost, i posmatra kao „polinom brzine prvog reda“ [17]. U simulaciju je uključeno nekoliko kamiona „vođa konvoja“ (engl. „coordination leader“) i kamiona u statusu „pratilac konvoja“ (engl. „coordination follower“); vođa održava konstantnu brzinu, dok pratilac na početku puta bira brzinu koja mu omogućava da se pridruži konvoju. Nakon toga, oba kamiona putuju paralelno, dok ne dođe do odvajanja, odnosno dok pratilac ne promeni brzinu kojom putuje (slika 1). Optimalnu brzinu autori određuju prvo tokom prve i poslednje faze vožnje, zanemarujući da kamioni mogu da se voze samo na zajedničkim delovima puta.

Slika 1 - Brzina kamiona „vođe konvoja“ i kamiona „pratilaca konvoja“ [17, str. 410]

Ova simulacija podrazumeva vršenje selekcije kamiona „vođa konvoja“ koji se pridržavaju podrazumevanog profila brzine, dok se svi ostali pridružuju vođama koji im najviše „odgovaraju“, u smislu da im donose najveću uštedu goriva. Rezultati pokazuju da je koordinacija od ključnog značaja kada putuje mali broj kamiona i da može značajno doprineti uštedi goriva, kao i da relativno mala prilagođavanja brzine mogu biti dovoljna za postizanje uštede. Potrošnja goriva po pređenom putu je nelinearna usred postojanja opsega brzina koje kamion može postići [17].

Druga studija [14] sprovedena u istoj oblasti koristi pristup na bazi optimizacije brzine kretanja vozila. Simulirano je kretanje na putu dužine 10 kilometara kako bi se dokazalo da vozila poput kamiona, kada putuju na smanjenoj udaljenosti, mogu ostvariti manju potrošnju goriva kroz smanjen aerodinamični otpor. U svom radu

autori objašnjavaju da „platooning“ simulacija ne bi trebalo da se oslanja na kombinacije vozila sa „Cruise Control“ (CC) i „Adaptive Cruise Control“ (ACC) sistemima jer, „na tipičnom putu, sa različitim topografijom, ovi sistemi mogu dovesti do prevelikog ubrzavanja i kočenja na uzbrdicama i nizbrdicama“ (V2V)¹ [14]. Autori ističu da problemi izazvani upotrebom CC i ACC sistema mogu dovesti do povećanja potrošnje goriva na putevima koji nisu potpuno ravni. U ovoj simulaciji merena je minimizacija potrošnje goriva, koja se oslanja na generisanje optimalne brzine. Koristićena su dva tipa konvoja; jedan je homogen, vozila imaju masu od 30 tona, dok u heterogenom konvoju učestvuju lakša vozila teške kategorije na početku, a teža na kraju, i obrnuto. Oba konvoja putovala su brzinom od 80, 60 i 90 km/h, dok je razmak među vozilima bio najmanji mogući i iznosio 40 metara, odnosno 15, prilikom formiranja konvoja.

Rezultati sprovedene simulacije ukazuju da testirana metoda generisanja optimalne brzine ima pozitivne efekte kako u heterogenim, tako i u homogenim konvojima. U homogenim konvojima potrošnja goriva smanjena je za 16%, dok u heterogenim taj procenat iznosi 17%. Interesantan zaključak autora ove simulacije je da komunikacija među vozilima nije neophodna, već je potrebno uspostaviti optimalne brzine pre početka putovanja. Ovaj pristup nije opšte primenljiv i pre svega može biti od koristi kompanijama koje koriste uvek iste kamione, na istim relacijama (putevima) i sa sličnim opterećenjem [14].

4.2. Istraživanja uticaja „platooning“-a u realnim uslovima

Jedan od prvih terenskih testova ideje „platooning“-a je sproveden u okviru studije koja je deo T-TAP projekta Evropske unije, nastalog sredinom 1990-ih godina [15]. To je bio eksperiment u kome su učestvovala dva kamiona povezana posebno dizajniranim uređajem - elektronskim spojem za priključak; a rezultati su potvrdili da se ovim načinom kretanja postiže ušteda u potrošnji goriva [4].

Ne mnogo nakon ovog testa, kalifornijski program PATH započeo je svoja istraživanja o pravljenju konvoja teških kamiona. U ovom programu sva vozila u konvoju su bila u potpunosti automatizovana, uključujući i vodeće. Na primer, 2004. godine u okviru PATH programa je vršeno ispitivanje potrošnje goriva sa dva kamiona povezana elektronskim sistemom za upravljanje [5].

Ovo istraživanje sprovedli su Browand, McArthur i Radović 2003. godine [5]. Kamioni su povezani elektronskim sistemom za upravljanje i putuju u tandemu,

¹V2V - bežična komunikacija između vozila (eng. „vehicle-to-vehicle wireless communication“)

na razdaljinama od 3, 4, 6, 8 i 10 metara. Podaci o potrošnji goriva obračunati su na osnovu putovanja u oba u smeru, kako bi se izbegli efekti nagiba puta i vetra. Prosečna ušteda goriva koja se postigla varira od oko 11% na razmaku od 3-4 metra, do oko 8% pri razmaku od 8 do 10 metara. Takođe, važno je napomenuti da je istraživanje obuhvatilo sprovođenje dva testa potrošnje goriva; prvi test je sproveden je u oktobru 2003. godine i koristi dva identična vozila koja vuku prikolicu slične spoljne geometrije, od kojih je jedna prazna, a druga prikolica sadrži Laboratoriju za istraživanje mobilnih emisija (engl. „Mobile Emissions Research Laboratory“). Traktor putuje brzinom od 22.4 m/s. Drugi test sproveden je decembra 2003. godine i koristi dve prazne prikolicе, pri čemu je brzina kamiona nešto veća – 24,6 m/s [5].

Oba testa sprovedena su na aerodromskoj pisti dužine oko 2400 metara, na kojoj je prisutan nagib, koji je ravnomerno raspoređen prema gore - od severa ka jugu. Istraživanje je pokazalo da je potrebna veća potrošnja goriva na putanji od juga ka severu. Jedno od ograničenja predstavlja i dužina piste odnosno nedovoljan prostor za skretanje vozila na oba kraja piste (vozila se moraju zaustaviti, okrenuti i ponovo krenuti). Kako bi se poništili svi neželjeni efekti, staza mora biti određena na osnovu proseka odvojenih staza na severu i jugu. „Prosek smera severa prema jugu zahteva preklapanje segmenta piste gde je 10 kamiona (počevši od oba kraja) postiglo ciljnu brzinu“ [5].

Rezultati testiranja ukazuju da izmerena ušteda goriva na razmaku od 10 metara iznosi 10%, odnosno 6% za vučni (engl. „trail truck“) i kamion koji je vodeći (engl. „lead truck“). U opsegu razmaka od 3 do 10 metara, ušteda potrošnje goriva kreće se od 10 do 12% za vučni kamion i 5-10% za kamion koji je vodeći, pri čemu su veće vrednosti uštede primetne pri manjim odstojanjima između vozila (slika 2).

Slika 2 - Ušteda goriva oba kamiona koja putuju u tandemu, kao deo izolacione potrošnje goriva [5, str. 16]

Drugim rečima, prosečna ušteda goriva pri odstojanju od 6 do 10 metara je oko 8%, odnosno 0,0316 litara po kilometru. Na taj način bi „ukupna ušteda goriva za oba kamiona bila 0,0632 litara po kilometru, odnosno 6,32 litre na 100 kilometara“ [5].

U Nevadi (SAD) je 2010. godine sproveden eksperiment u kome je „platooning“, pored uslova konstantne brzine, testiran i kroz profile ubrzanja i usporavanja, kao i pridruživanja i udaljavanja kamiona iz konvoja. U eksperimentu su učestvovala tri kamiona i sproveden je na ravnom putu, dužine 5 km; odstojanja između kamiona varirala su između 10 i 4 m i svaki kamion je bio opremljen komunikacijom opremom [9]. Maksimalna brzina konvoja određena je u funkciji lokacije. Planiranje putanje izvršeno je na osnovu trenutne brzine i željene maksimalne brzine, uzimajući u obzir mogućnosti ubrzanja/ usporavanja kamiona pri određenoj brzini. Cilj ovog eksperimenta bio je usmeren na ispitivanje stabilnosti konvoja prilikom promene brzine.

Takođe, testirana je i mogućnost pridruživanja i udaljavanja kamiona iz konvoja. Za ovaj eksperiment vodeći kamion prati svoju prethodno definisanu brzinu i virtuelno odstojanje. Očekuje se da će se drugi i treći kamion istovremeno pridružiti/udaljiti sa svoje trenutne na novu udaljenost, koju zadaje prvi kamion. To znači da će treći kamion morati da se udalji (poveća odstojanje između vozila) ili približi (smanji odstojanje) u odnosu na prvi u dvostruko većoj meri, u poređenju sa drugim kamionom. Eksperiment je pokazao da ukupno vreme udaljavanja iznosi 25 sekundi, dok ukupno vreme približavanja traje 35 sekundi (slika 3) [9].

Slika 3 - Istovremeno udaljavanje praćeno istovremenim spajanjem drugog i trećeg vozila na unapred određenu udaljenost [9, str. 12]

Za procenu uticaja na potrošnju goriva testovi su izvedeni pri jednakoj brzini, a uticajni faktori koji su testirane bili su: položaja unutar konvoja i odstojanje

između vozila. Svi testovi izvedeni su pri jednakoj brzini. Ispitivanje je izvršeno na nadmorskoj visini od 1800 m, gde je gustina vazduha samo 80% gustine na nivou mora, što implicira da bi trebalo očekivati da uštede u vezi sa aerodinamičnim otporom budu znatno veće na nivou mora. Testovi potrošnje goriva vršeni su u danu bez vetra i podaci su upoređeni u oba smera, kako bi se poništili njegovi potencijalni efekti. Rezultati su pokazali da je ušteda goriva prvog kamiona, manja u odnosu na ostala dva; vodeći kamion ostvaruje uštedu od 4,3% goriva, dok kod drugog taj broj iznosi drugi 10%, a treći kamion štedi 14% goriva [9]. Dakle, dokazano je da svi kamioni u konvoju štede gorivo kada se voze na malom odstojanju. Budući da su ovi rezultati mereni na nadmorskoj visini od 1800 metara, relativne uštede bi trebale biti još značajnije, jer bi ukupan aerodinamički otpor trebalo da bude oko 25% veći, nego što je bilo na ispitivanom mestu [9].

Sledeće istraživanje koje će biti predstavljeno sprovedeno je 2018. godine [10]. Istraživanje je uključilo tri kamiona teške kategorije sa prikolicama. Primarni cilj bio je usmeren na ispitivanje potrošnje goriva konvoja kamiona na duže i kraće relacije. Koristeći konfiguraciju prikolice pomoću aerodinamičkih tretmana (engl. „side skirts and boat-tails“), konvoj je testiran na odstojanjima od 4 metra do 87 metara [10].

Korišćen je „Cruise Control“ (CC) sistem koji se koristi za automatizovanu kontrolu vozila, kako bi vozaču pomogao u regulisanju brzine, sa tim da vozač zadržava odgovornost za održavanje bezbednog odstojanja u odnosu na ostala vozila. Stoga je korišćen i „Adaptive Cruise Control“ (ACC) sistem koji ima video kameru za posmatranje odstojanja i kontrole relativne brzine. Problem ovog sistema kontrole je njegova nestabilnost pri kretanju tri ili više vozila, koji je prevaziđen je uvođenjem kooperativnog ACC sistema sa inovativnim vidom komunikacije među vozilima. Tako, „bežična komunikacija koja emituje vodeće vozilo svim vozilima koja ga slede efikasno uklanja problem kumulativnog kašnjenja, dok je kašnjenje povezano sa V2V komunikacijom dovoljno malo da se može zanemariti“ [10].

Sistem kontrole povratnih informacija mora da garantuje brzi odziv i stabilnost, za svako pojedinačno vozilo. Koncept je osmišljen tako da koegzistira sa drugim vozilima odnosno ne zahteva fizičku odvojenost od ostatka saobraćaja. Kontrolni sistem na svakom vozilu upravlja interakcijama sa drugim vozilima, kao što su praćenje drugih vozila sa manuelnim upravljanjem i reagovanjem na preostrojanje vozila.

Istraživanje pokazuje da se ušteda energije ostvaruje kroz stvaranje što manjih razmaka između vozila, čime se utiče na aerodinamički otpor. Prostor za protok

vazduha iz vodećeg vozila obezbeđuje područje slabije brzine vazduha, u odnosu na sledeće vozilo, što rezultira manjim aerodinamičkim otporom. Kako se vozilo „probija“ kroz vazduh, stvara se područje visokog pritiska preko njegove prednje površine, usled stagnacije vazduha u ovim oblastima, a sa povećanjem statičkog pritiska; „ovo područje visokog pritiska izbija ispred vozila i, kad se dovoljno približi drugom vozilu, povećava bazni pritisak na prednjem vozilu gurajući ga napred“ [10].

Vozila su putovala pri brzini od 89 km/h i 105 km/h, a mase vozila iznosile su od 14000 kg do 29400 kg. Rezultati istraživanja pokazali su da je, za raspon posmatranih uslova ispitivanja, izmerena neto ušteda goriva za konvoj koja iznosi između 5 i 8%, u poređenju sa situacijom da tri vozila putuju nezavisno. Najveće uštede goriva ostvarene su na najkraćem rastojanju, od 17 metara. Autori ove studije [10] takođe ističu da „brzina nije imala značajan uticaj na procenat uštede goriva, dok je smanjenje težine poboljšalo procenat uštede goriva“.

4.3. „SARTRE“ projekat

Jedan od najvažnijih projekata u oblasti „platooning“-a je SARTRE², koji je započet 2009. godine i sufinansiran je od strane Evropske komisije u okviru FP7. Projekat je osmišljen na osnovu postojećih rezultata i iskustava, kao i na analizi izvodljivosti „platooning“ konvoja, predstavljajući ga kao realni koncept kretanja. Studija je bila usmerena na analizu „ljudskog faktora“, koji je uključen u tehnologiju „platooning“-a [8]. Cilj je bio da se ispita funkcionisanje konvoja na javnim autoputevima uz potpunu interakciju sa drugim vozilima.

Drugima rečima, glavno pitanje bilo je: „kako konvoj dopušta vozilu da napusti autoput na neposrednoj raskrsnici prolaskom kroz konvoj– ili, da li je to uopšte dozvoljeno?“ [3]. Da bi se postiglo rešenje koje je bezbedno i pogodno za korisnike, ali i za druge učesnike u saobraćaju, potrebno je pažljivo razmotriti i istražiti sve aspekte.

SARTRE definicija konvoja podrazumeva da konvoje predvodi vozilo kojim upravlja profesionalni vozač, koji mora imati važeću dozvolu i proći kroz dodatnu obuku za vođenje konvoja. Vozila koja prate „vođu“ konvoja su pod automatizovanom uzdužnom i bočnom kontrolom, pa bi stoga ovi vozači bili u mogućnosti da raspolažu „slobodnim“ vremenom tokom vožnje.

Ipak, sledeći vozač u koloni mora biti u stanju da preuzme kontrolu nad vozilom, u slučaju kontrolisanog ili nepredviđenog prekida konvoja. Izazov u takvim si-

²Safe Road Trains for the Environment

tuacijama je odlučiti kada je sigurnije ostati u automatizovanoj kontroli, a kada je bolja solucija ručno upravljanje vozilom [3].

U prvom koraku SARTRE koncept se oslanja na virtuelnu implementaciju uz pomoć simulacionog alata „PELOPS“³. „PELOPS je mikroskopski saobraćajni model i predstavlja kombinaciju detaljnog sub-mikroskopskog modela vozila i mikroskopskog saobraćajnog modela“ [3]. Ovaj model omogućava analitičko ispitivanje uzdužnog dinamičkog ponašanja vozila kao i funkcionisanja saobraćaja, što pored ostalog predstavlja njegovu glavnu prednost, ako se uzme u obzir da pruža mogućnost razmatranja interakcija između vozača, vozila kojim upravlja i ostatka saobraćaja. Kako bi se izveo proces simulacije uticaja „platooning“-a na životnu sredinu, modeli u PELOPS-u su poboljšani na osnovu iskustva stečenog u prethodnim projektima, kao što je KONVOI projekat.

U testiranju postoje dva koncepta upotrebe (engl. „Use Cases“): „Platooning“ i „Back office“. Prvi se se odnose na strukturu konvoja i njegovu primarnu delatnost, dok drugi obuhvataju infrastrukturna pitanja (punjenje, navigacija i sl.). Simulacije zasnovane na definisanom konceptu korisne su u cilju otkrivanja potencijalnih ograničenja sistema ili testiranja njegovih performansi, kao što je na primer testiranje maksimalnog broja vozila u konvoju.

Oba koncepta se implementiraju sa odgovarajućim scenarijima simulacije, kako bi se simulacije koristile za dalje usavršavanje koncepta „platooning“-a. Na primer, „manevar pridruživanja se može dogoditi na različite načine; sa zadnje, bočne ili prednje strane.“ Različiti pristupi i opcije se uključuju u simulaciju i upoređuju se u pogledu performansi i efikasnosti“ [3].

Pored toga, razvijen je i „virtuelni menadžer“, čiji zadatak je da upravlja informacijama od i do vozača, kao što su zahtevi (npr. napuštanje, pridruživanje, itd.), potvrde, otkazivanje ili odbacivanje pridruživanja. Potom virtuelni menadžer izračunava status konvoja i šalje informacije vozaču i upravljačkom timu.

Eksperiment je podeljen na dva dela, jedan se odnosi na procenu performansi, a drugi na subjektivno ocenjivanje. Vozački ispit uključivao je procenu udaljenosti vozila i dužine konvoja, i podeljen u dve glavne sesije; u prvoj sesiji učesnici nisu bili deo konvoja, ali su bili u obavezi da se približe jedni drugima, dok su se u drugoj uključili u konvoj. U prvom slučaju testirano je ponašanje vozača dok su preticali konvoj promerljive dužine i napuštali autoput.

Drugi slučaj testirao je odstojanje vozila u „platooning“-u. Da bi sproveli testiranje, vozač vodećeg vo-

zila (engl. „leading vehicle driver“) vozio je autoputem čekajući vozača potencijalnog pratećeg vozila (engl. „following vehicle driver“), kako bi kreirali konvoj [8]. Vozač pratećeg vozila usmeravao je vozilo ka kamionu, dok ne postigne pravilan položaj, uz pomoć virtuelnog menadžera (VM). Tako su učesnici oslobodili komande vozila, nakon obaveštenja VM, i započeto je smanjenje odstojanja. Sa smanjenjem odstojanja, vozač je osetio da je u opasnosti, pritisnuo taster namenjen tim situacijama, i konvoj je raspušten i (manuelnu) kontrolu su ponovo preuzeli vozači [8].

Kao što je već napomenuto, eksperiment je podeljen na dva glavna dela – jedan za procenu performansi i drugi za dobijanje subjektivnih ocena o „platooning“-u. Učesnici testa su imali priliku da procene iskustvo vožnje u konvoju ili u blizini jednog. Upotrebljena je jednodimenzionalna skala, od 1 do 5, na osnovu koje ispitanici biraju opciju koja im najviše odgovara.

Rezultati pokazuju da se svi ispitanici, osećaju bezbednije kada je veće odstojanje vozila u konvoju. Oko 75% ispitanika navelo je da se oseća nelagodno kada je odstojanje manje od 16 metara, ali da je znatno više onih koji se osećaju nesigurno kada je odstojanje manje od 7 metara.

Stoga, za prve vozače bi preporučeno odstojanje unutar konvoja bilo 15 metara, kako bi se osećali prijatnije. Međutim, ovo odstojanje je u suprotnosti sa konceptom isplativosti i bezbednosti „platooning“-a, pa će stoga možda biti neophodna posebna obuka vozača, kako bi stekli poverenje. Takođe, rezultati pokazuju da oko 72,73% učesnika smatra da je vožnja u blizini konvoja, koji se sastoji od pet automobila i jednog vodećeg kamiona, ista kao i uobičajena vožnja, tj. ne vide bilo kakve specifične probleme.

Autori ove studije [8] zaključuju da se konvoj srednje dužine, tj. petnaest automobila i jedan vodeći kamion, može smatrati maksimalnom dužinom koja je prihvatljiva ispitanicima.

5. SISTEMATIZACIJA NALAZA STUDIJA O EKOLOŠKIM EFEKTIMA „PLATOONING-A“

Na osnovu pregleda istraživanja terenskih testova i simulacija predstavljenih u prethodnom poglavlju i sistematizovanih u tabeli 1, mogu se sumirati sledeći ekološki efekti „platooning“-a: vozila koje se kreću u konvoju ostvaruju veću uštedu goriva, nego kada se kreću odvojeno; aerodinamičke konfiguracije prikolice mogu da ostvare veću uštedu goriva od standardnih konfiguracija; ekonomičnost potrošnje goriva se povećava sa smanjenjem odstojanja vozila; kada se mase ili opterećenja povećaju, povećaću se i potrošnja goriva; vozila koja nisu „vodeća“ u konvoju ostvaruju veću uštedu goriva i brzina kretanja konvoja nema značajan uticaj na uštedu goriva [18].

³PELOPS - Program for the Development of Longitudinal Traffic Processes in System Relevant Environment

Tabela 1. Pregled prikazanih istraživanja

Sprovedeno istraživanje/simulacija	Terenski test	Simulacija	Autori i godina	Broj vozila u konvoju	Brzina kretanja/udaljenost	Pređeni put	Rezultati i zaključci istraživanja/simulacije
Ušteda goriva dva kamiona koja putuju u tandemu	X		Browand, F., Mcarthur, J. i Radovich, C., 2003	Od 2 do 10 vozila	Od 22.4 m/s do 24,6 m/s Udaljenost 3, 4, 6, 8 i 10 m	2400m u jednom smeru	Prosečna ušteda goriva varira od oko 11% pri odstojanju od 3-4 metra, do oko 8% pri odstojanju od 8 do 10 metara.
Automatizovana kontrola konvoja	X		Lu, X. i Shladover, S., 2010	3 kamiona	Udaljenost 10 i 4 m	5 km	Vodeći kamion ostvaruje uštedu od 4,3% goriva, drugi 10%, a treći 14%.
Koordinacija kamiona putem paralelnog klasterovanja optimalne potrošnje goriva		X	Van de Hoef, S, Johansson, K. i Dimarogonas, D., 2015	minimum 2 vozila	70 i 90 km/h	nema podataka	„Prateći“ kamioni treba da vrše selekciju kamiona „vođe“ konvoja, kako bi ostvarili najveću uštedu goriva.
SARTRE projekat	X		Larburu, M., Sanchez-Cubillo, J. i Rodriguez, D., 2010/Bergenheim, C., Huang, Q., Benmimoun, A. i Robinson, T., 2010	Do 8 vozila	Oko 90 km/h	*u zavisnosti od dela eksperimenta	Razvoj sistema koji će omogućiti funkcionisanje „platooning“-a pod vođstvom jednog vozila sa profesionalnim vozačem, dok će sledeća vozila biti pod automatiziranom kontrolom.
Strategije vožnje za vozila teške kategorije: optimizacija brzine		X	Torabi, S. i Wahde, M., 2018	2 vozila	80, 60 i 90km/h, Udaljenost - 40 metara	10 km	U homogenim konvojima potrošnja goriva smanjena je za 16%, u heterogenim za 17%.
Ušteda energije teških kamiona uz pomoć „ACC“ sistema	X		Mcauliffe, B., Lammert, M., Lu, X., Shladover, S., Surcel, M. i Kailas, A., 2018	3 kamiona	89 km/h i 105 km/h. Udaljenost 4 – 87 m	nema podataka	Neto ušteda goriva iznosi između 5 i 8%; najveće uštede ostvarene su pri odstojanju od 17 metara

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su sistematizovani ekološki aspekti „platooning-a“ na osnovu pregleda studija koje su uključivale simulacije i/ili terenske testove ovog rešenja. Zaključak je da „platooning“ ima značajan potencijal uštede troškova transporta kroz smanjenje potrošnje goriva, pre svega usled poboljšane aerodinamike.

Kako bi se ovi efekti i ostvarili u praksi neophodno je dobiti dogovore na brojna pitanja vezana za optimizaciju konvoja (dužina konvoja odnosno broj vozila i odstojanje, tehnike pridruživanja i napuštanja konvoja, optimalna brzina, način komunikacije među vozilima – uz ACC ili ne, via DSCR ili 5G, i mnoga druga.).

Smanjenje potrošnje goriva, iako među najvažnijim, nije i jedini fokus studija o „platooning-u“. Posebna tema je uticaj „platooning-a“ na bezbednost saobraćaja kroz smanjenje „ljudske greške“, odnosno olakšice za vozače vozila koja ne predvode konvoj, kao i mogućnost uvođenja potpuno autonomnih vozila. Bezbedonosni benefiti „platooning-a“ otvaraju brojna pitanja uključujući i brojne socijalne aspekte (kao što je nivo zaposlenost vozača) koje je potrebno sistematizovati u budućim istraživanjima.

LITERATURA

- [1] Agenda 2030, Sustainable Development Goals Knowledge Platform, dostupno na: <https://sustainable-development.un.org/>
- [2] Bae R, Ramakers R, Henning K. i Jeschke S, Organization and operation of electronically coupled truck platoons on german motorways, in *Proceedings of the Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2009/2010*, pp. 427–439, Springer Berlin Heidelberg, Heidelberg, Germany, 2011
- [3] Bergenhem C, Huang, Q, Benmimoun A. i Robinson T, Challenges Of Platooning On Public Motorways, In *17th World congress on intelligent transport systems* (pp. 1-12), 2010
- [4] Bonnet, C. i Fritz H, Fuel consumption reduction in a platoon: experimental results with two electronically coupled trucks at close spacing, in *Proceedings of the SAE Technical Paper Series*, USA, 2000
- [5] Browand F., McArthur, J. i Radovic C, *Fuel Saving Achieved in the Field Test of Two Tandem Trucks*, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA, 2004.
- [6] European Commission. *EU Transport in Figures — Statistical Pocketbook*, Publications Office of the European Union, Brussels, Belgium, 2013.
- [7] Janssen, G. R, Zwijnenberg J, Blankers, I, Kruijff J. D, *Truck platooning: Driving the future of transportation*, 2015.
- [8] Larburu M, Sanchez-Cubillo J, Rodriguez D, Safe road trains for environment: Human factors' aspects in dual mode transport systems, In *ITS World Congress*, Busan, Korea (pp. 1-12), 2010.
- [9] Lu Xiao-Yun & Shladover S, *Automated Truck Platoon Control and Field Test*, In *Road Vehicle Automation*, (pp. 247-261). Springer, Cham, 2014.
- [10] Mcauliffe B, Lammert M, Lu X, Shladover S, Surcel M, Kailas A, *Influences on Energy Savings of Heavy Trucks Using Cooperative Adaptive Cruise Control*, 2018.
- [11] OECD. *International Transport Outlook 2013: Funding Transport*, OECD Publishing/ITF, Paris, France, 2013.
- [12] Schittler M, *State-of-the-Art and Emerging Truck Engine Technologies for Optimized Performance, Emission and Life Cycle Costs*, Daimler Chrysler AG (US), Stuttgart, Germany, 2003.
- [13] Schroten A, Warringa G. E. A, Bles M, *Marginal abatement cost curves for heavy duty vehicles: background report*, CE Delft, Delft, Netherlands, 2012.
- [14] Torabi S, Wahde M, Fuel-Efficient Driving Strategies for Heavy-Duty Vehicles: A Platooning Approach Based on Speed Profile Optimization. *Journal of Advanced Transportation*, 1-12, 2018.
- [15] Tsugawa S, Sabina J, Shladover S, A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1. 1-1, 2016.
- [16] Turri V, Besselink B, Johansson K H, Cooperative look-ahead control for fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 12–28, 2017.
- [17] Van de Hoef S, Johansson K, Dimarogonas D. V, Coordinating Truck Platooning by Clustering Pairwise Fuel-Optimal Plans, In *2015 IEEE 18th international conference on intelligent transportation systems* (pp. 408-415).IEEE 2015.
- [18] Zhang L, Chen F, Ma X, Pan X, Fuel Economy in Truck Platooning: A Literature Overview and Directions for Future Research. *Journal of Advanced Transportation*. 2020. 1-10.

SUMMARY

VEHICLE PLATOONING: ENVIRONMENTAL ASPECTS

Environmental protection is actively becoming one of the main issues of the Sustainable Development Agenda, and is therefore in the focus of various scientific papers and publications. In the context of vehicle platooning, the environment represents an important area, considering that some of the main goals of this transport technology are to reduce fuel consumption and the reduction of harmful gas emissions. Both goals are achievable when optimizing the speed of vehicles in the convoy, but they also depend on the number of vehicles in the convoy, the type of road they travel on, the weight/mass they carry, as well as the weather conditions. This paper will provide insights into platooning simulations and researches conducted in real conditions, which will focus on the impact of this transportation technology on the environment.

Key words: platooning, sustainable development, fuel consumption, simulations, field tests