

Savremeni trendovi u dizajnu vozova velikih brzina

SNEŽANA D. GOLUBOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

BOŠKO P. RAŠUO, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

VOJKAN J. LUČANIN, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

Pregledni rad

UDC: 629.4.016.56

Povećanje konkurentnosti železničkih transportnih sistema u odnosu na druge vidove transportnih sistema u poslednjih šezdeset godina rezultat je intenzivnog razvoja novih generacija brzih vozova. Ove vrste vozova ne samo da zadovoljavaju potrebe za povećanom brzinom prevoza, a tako i kraće vreme putovanja, već i zahteve za povećanje pouzdanosti, sigurnosti i direktne primene energetske efikasnosti na sam sistem transporta. Sa povećanjem brzine vozova, povećavaju se i otpori kretanja, pri čemu pri brzinama većim od 200 km/h udeo otpora vazduha postaje najdominantniji član. Jedna od najefikasnijih mera za smanjenje otpora vazduha, kao i ostalih negativnih posledica koje nastaju pri kretanju velikim brzinama, je razvoj aerodinamičkog oblika voza. U ovom radu su predstavljena neka od konstrukcionih rešenja koja utiču na aerodinamičke karakteristike vozova velikih brzina, pre svega oblik čeonog dela, kao i sličnosti i razlike pojedinih podsistema neophodnih za funkcionisanje savremenih železničkih sistema vozova velikih brzina. Analizirana su dva pristupa rešavanja problema aerodinamičkog oblika voza i odgovarajuće infrastructure na primeru Japana i Francuske. Razmatrana su dva modela voza velikih brzina, Shinkansen (Japan) i TGV odnosno AGV (Francuska.)

KLJUČNE REČI: vozovi velikih brzina, aerodinamički oblik voza, Shinkansen, TGV, bionika

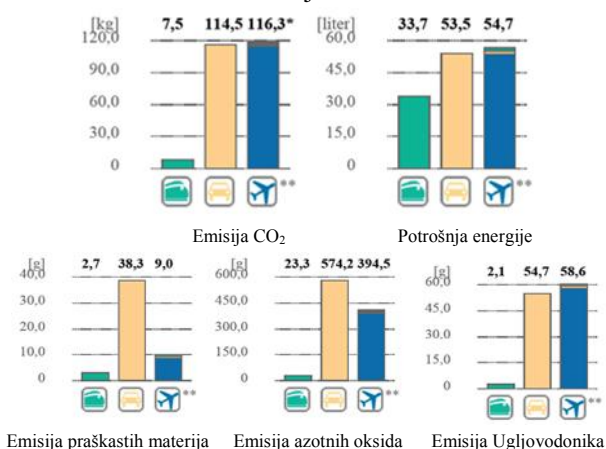
1. UVOD

Strategije razvoja savremenih železničkih transportnih sistema u poslednjih šezdeset godina odnosi se na razvoj novih generacija brzih vozova, zadovoljavajući pri tome dva osnovna kriterijuma, minimalno vreme vožnje i minimalnu potrošnju pogonske energije [1]. Za razliku od konvencionalnih, vozovi velikih brzina saobraćaju sa znatno većim brzinama (preko 200km/h), i čine deo železničkog sistema sa specijalizovanim vozilima i prugama. Prvi takav sistem počeo je sa radom 1964. godine u Japanu na relaciji Tokio-Osaka, i voz velikih brzina nazvan Shinkansen koji je zbog svog dizajna u svetu bio poznat kao "bullet train" (metak voz) koji se kretao brzinom od 210 km/h [2]. Nakon Japana, razvijene zemlje Evrope počele su sa istraživanjem i razvojem vozova velikih brzina i sistema koji ih podržavaju, odgovarajućih tehnoloških specifičnosti koji ispunjavaju njihove posebne uslove

transporta. Francuska je 1981. godine pustila u rad liniju Pariz – Lion, sa novim modelom voza velikih brzina, TGV (fr. Train à Grande Vitesse) koji se kretao 260 km/h [3]. U tri za osvajanjem brzih pruga i vozova velikih brzina uključili su se i Italija, Nemačka, Španija kao i zemlje van Evrope, Kina, Tajvan, Turska, Južna Koreja, USA. Ekspanzija u razvoju brzih vozova pokazuje i činjenica da je na većini brzih pruga tokom 2012. godine ostvarena brzina veća od 300 km/h, a da se do 2020. godine očekuje povećanje dužina brzih pruga za čak 25.000 km na svetskom nivou [4] ali i da se dramatično poveća povezanost brzih pruga. Kraće vreme putovanja kao rezultat ovako velikih brzine kretanja uslovljeno je izraženu konkurentnost železničkog saobraćaja u odnosu na ostale vrste saobraća pogotovo na relacijama od 100 - 1000 km. Konkurentnost železničkih sistema vozova velikih brzina se posebno ogleda i u primeni energetske efikasnosti i u mogućnostima masovnog prevoza na dužim relacijama, bezbednost i pouzdanost u prevozu sa niskom cenom održavanja, lokacije železničkih stanica u centrima većih gradova, mala potrošnja pogonske energije u odnosu na masu prevezenog tereta, minimum zagađenja i iskorišćenja

Adresa autora: Snežana Golubović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16
Rad primljen: 26.01.2015.
Rad prihvaćen: 02.02.2015.

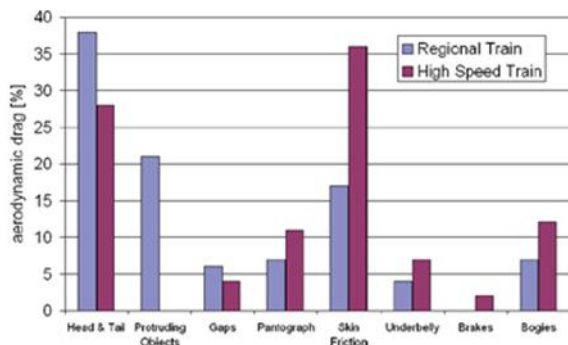
okoline po putniku i slično. Na slici 1 [5] prikazana je komparacija emisije CO₂, potrošnje energije i emisije izduvnih gasova u okruženje, TGV voza u odnosu na automobil i avion na relaciji Paris - Barselona.



Slika 1 - Štetni uticaji vozova, automobila i aviona

2. OPTIMIZACIJA OBLIKA ČELA VOZA

Istraživanja na konvencionalnoj železnici vezana za povećanje brzine vozova, kao najbitnijeg faktora kako bi se postiglo kraće vreme vožnje (putovanja), bazirala su se na povećanju snage pogonske grupe. Iako su postignuti određeni rezultati, povećanjem brzine pojavili su se energetske gubici kao i loše performanse vozila. Negativne posledice povećanja brzine rezultat su nestacionarnog strujanja oko voza, a koje nije uzimano u obzir u ovim istraživanjima. Istraživanje faktora koji negativno utiču na aerodinamičke karakteristike vozova kao što je turbulentno strujanje pri velikim brzinama pri čemu se energija strujanja konvertuje u aerodinamički otpor, buku i vibracije, pritisak koji se javlja pri mimoilaženju vozova i pri ulasku voza u tunel, bilo je od ključne važnosti za razvoj vozova velikih brzina ali i poboljšanje konvencionalnih vozova.



Slika 2 - Aerodinamički otpor (aerodynamic drag) kod konvencionalnih vozova (Regional Train) i vozova velikih brzina (High Speed Train) u zavisnosti od komponenta voza

Na slici 2 može se videti razlika u vrednostima aerodinamičkog otpora kod konvencionalnih vozova i

vozova velikih brzina u zavisnosti od uticaja određenih komponenti konvencionalnih vozova i vozova velikih brzina [6].

Aerodinamičke osobine vozova velikih brzina vezane su prvenstveno za oblik voza [7], ipak u toku kretanja ovih vozova, što je slučaj i kod konvencionalnih vozova, najveći otpor vazduha izaziva oblik čela voza [1]. Odnosno, otpor koji nastaje kao rezultat uticaja čela voza čini približno 10% od ukupnog otpora sredine [8].

Na osnovu izraza (1) za osnovni otpor vazduha [1]:

$$F^{osn} = c_x \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A [N] \quad (1)$$

gde je:

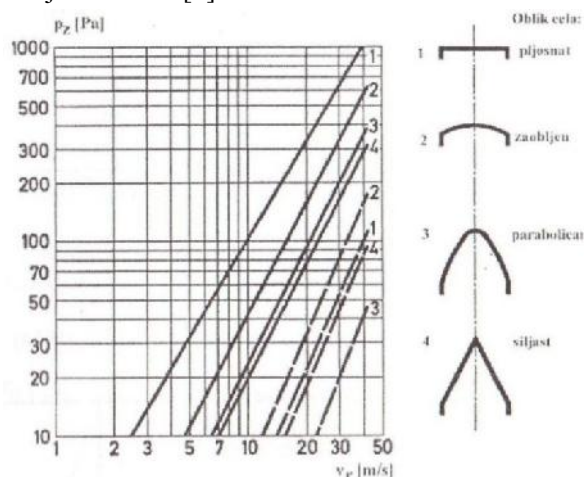
c_x – aerodinamički koeficijent otpora oblika tela koje se kreće kroz vazduh,

$\rho [kg/m^3]$ – gustina vazduha,

$v^2 [m/s]$ – brzina kretanja tela kroz vazduh,

$A [m^2]$ – površina karakterističnog preseka tela koje se kreće kroz vazduh, vidi se da se otpor vazduha F^{osn} , znatno menja sa promenom dinamičkog pritiska tj. porastom brzine, a kako se u zavisnost od vrste i tipa vozila, proizvod $c_x \cdot A$ određuju eksperimentalnim putem u realnim uslovima i aerotunelima, sila otpora vazduha u mnogome zavisi i od oblika, u ovom slučaju voza, odnosno njegove čelne površine, zapravo i sa najmanjom promenom oblika voza menja se otpor vazduha.

Promena otpora vazduha u zavisnosti od oblika čela voza, a time i promena ukupnog otpora, pokazana je na slici 3 [9].



Slika 3 - Uticaj oblika čela voza na ukupan otpor vozila

U ukupnom osnovnom otporu pored otpora vazduha, figuriše i otpor kotrljanja točkova, otpor u ležištu osovinskog sklopa, otpor pri različitim oscilatornim kretanjima pa je tako i usvojen univerzalni analitički izraz (2) za određivanje ukupne i specifične osnovne otpore [9]:

$$F_R^{osn} = a + bV + cV^2 [N] \quad (2)$$

gde su a , b , i c konstante koje se određuju eksperimentalnim putem a V je brzina kretanja. U navedenom izrazu član “ a ” odnosi na otpore kotrljanja i trenja u ležajevima, član “ b ” odnosi na otpore usled različitih oscilatornih kretanja, a član “ c ” na otpor vazduha [9].

Ovi koeficijenti nisu konstatni, već variraju u zavisnosti od vrste i tipa voza, pruge, trenja itd. Na osnovu otpora koje obuhvataju, ovako definisane konstante a , b , i c nisu pouzdane u primeni kod vozova velikih brzina [10]. Ekperimentalnim ispitivanjima vozova velikih brzina, odnosno vozova različitih oblika, ili oblika čela voza, vozova sa različitim brojem vagona, vozova koji se kreću u drugačijim okruženjima, ispitivani na otvorenom putu ili tunelu, prugama itd. definisani su i različiti analitički izrazi za određivanje ukupne i specifične osnovne otpore karakteristične samo za ispitivane vrste vozova.

Tako jedan od izraza za definisanje ukupnog otpora kod Shinkansen vozova je [9]:






$$F_R^{osn} = 1,65 + 0,0246 \cdot V + 0,000158 \cdot V^2 [kN]$$

Dok Francuska železnica za slučaj voza TGV – A (MK+10P+MK) koriste izraz:

$$F_R^{osn} = 2,5 + 0,03256 \cdot V + 0,000573 \cdot V^2 [kN]$$

Utvrđeno je da kod vozova velikih brzina pri brzini od 200 km/h otpor sredine može da dostigne i 80% vrednosti ukupnog otpora kretanja [9]. Konstruktivne i konceptijske mere koje se preduzimaju za smanjenje otpora sredine su [1]: integracija obrtnih postolja u sanduk vozila, zatvaranje štitnicima prostora između donjeg dela vozila i pruge, integracija pantografa i električne opreme na krovu sa krovom vozila, oblikovanje čela voza prema principima aerodinamike, spoljna površina vozila treba da bude kontinuiranog toka.

Koliko oblik čela voza (nos voza) utiče na otpor vazduha a tako i na ukupan otpor, govori i činjenica da se otpor vazduha smanjuje približno 50% kada se promeni oblik čela voza sa tupog u aerodinamički [11], tako je i cilj istraživanja mnogih proizvođača vozova velikih brzina u svetu, definisanje otpimalnog oblika čela voza koji uključuje minimalni koeficijent otpora.

Облик	Коефицијент Отпора
Лопта → 	0.47
Полу-Лопта → 	0.42
Коцка → 	1.05
Аеропрофил → 	0.04
Полу-аеропрофил → 	0.09

Slika 4 - Koeficijenta otpora različitih oblika

Na slici 4 pokazano je kako koeficijenta otpora direktno zavisi od oblika [12]. Ovi oblici predstavljaju osnovu za optimizaciju oblika čela voza.

Rezultati istraživanja ukazuju da otpor može biti značajno smanjen sa dugim i vitkim čelom voza, a pokazalo se da su ovakvi oblici najefikasniji i za poboljšanja stabilnosti usled bočnog vetra Na lici 5 prikazani su različiti modeli oblika čela voza [8].



Slika 5 - Modeli čela voza

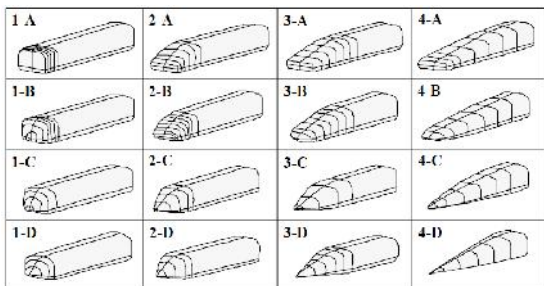
Optimizacije geometrije čela voza, kao što je već navedeno, ne samo da se razmatra u slučaju kretanja voza na otvorenoj pruzi bez mimoilaženja sa drugim vozovima već i u slučaju mimoilaženja, pri kretanju voza u zatvorenom tj. u tunelima, sa ili bez mimoilaženja [13].

Pogotovo u slučaju kretanja vozova velikih brzina u tunelu javljaju se aerodinamički otpori koji su znatno komplikovaniji i ozbiljniji nego pri kretanju voza na otvorenom. U prilog ovome pokazuje vrednost ukupnog otpora voza koji se kreće u tunelu brzinom od 200 km/h, koji ima približnu vrednost otpora koji se javlja pri kretanju voza na otvorenom pri brzini od 300 km/h.

Zapravo pri ulasku odnosno izlasku brzog voza iz tunela javlja se aerodinamičko-akustički fenomen, odnosno pojavljuje se talasni pritisak koji se potiskuje čelom voza. Tako komprimovani vazduh prilikom izlaska iz tunela se iznenada širi pri čemu se javlja intenzivan prasak koji se može čuti i kilometrima daleko.

Utvrđeno je da ovaj fenomen koji negativno utiče pre svega na putnike ali i na sredinu u kojoj se kreće voz pri izlasku iz tunela, može biti umanjeno izradom aerodinamičkog oblika čela voza, tj. izradom kosog tj. nagnutog čela voza [11]. Na slici 6 [7] predstavljeni su različiti modeli čela voza, zakošeni i izduženi koji su dobijeni ispitivanjima promene otpora vazduha u zavisnosti od ovih oblika u subsoničkom aerotunelu.

Čelo Shinkansen vozova najviše podesećaju na model C i D dok čelo TGV vozova na modele A i B.



Slika 6 - Modeli čela voza ispitivani u aerotunelu

3. SISTEMI BRZIH PRUGA I BIONIČKI KONCEPT OBLIKA VOZOVA VELIKIH BRZINA

U periodu od skoro pola veka brzina vozova porasla je skoro više od dva puta. Da bi se postigle tako velike brzine, tokom ovog vremena razvijeni su različiti aerodinamički oblici vozova kao i specijalno izgrađene pruge i tuneli. Direktiva Evropske unije 96/46/EC, Aneks 1 [14], jasno definiše sistem brzih pruga kao skup od tri elementa:

- Infrastrukture koja se odnosi na tunele i na pruge specijalno izgrađene za brze vozove ili poboljšane pruge po kojima se kreću i konvencionalni vozovi.
- Maksimalne brzine odnosno minimalne brzine od 250 km/h u slučaju da se voz kreće na specijalno izgrađenim prugama za tu vrstu vozova, odnosno 200 km/h u slučaju kada se voz kreće na postojećim poboljšanim tj. unapređenim prugama. Treba napomenuti da mnogi konvencionalni vozovi mogu da postignu brzinu od 200 km/h ali se ne smatraju vozima velikih brzina.
- Radni uslovi koji se odnose i na kompatibilnost voznog parka sa pratećom infrastrukturom radi postizanja adekvatne sigurnosti i kvaliteta usluga u toku kretanja voza tj. putovanja.

Međutim Međunarodna unija železnica (UIC) smatra da ne postoji jedinstven standard definicija brzih pruga i vozova velikih brzina, a i mnogi železnički sistemi širom sveta imaju svoje domaće standarde koji se razlikuju od međunarodnih. Svakako jedinstven je stav da železnički sistem brzih pruga uključuje vozove velikih brzina i pruge namenski izgrađene za velike brzine.

Kao što je već navedeno, za postizanje ovih velikih brzina odgovoran je aerodinamički oblik vozova velikih brzina kako bi se smanjio otpor vazduha. Različiti aerodinamički oblici vozova velikih brzina nastali su nakon mnogobrojnih ispitivanja u aerotunelima ali i u realnim uslovima. Mnogi proizvođači vozova velikih brzina inspiraciju za aerodinamičkim oblicima vozova nalaze u prirodi. Kopiranje prirode svakako nije

moгуće ali bioničke metode pomažu pri razumevanju načina razvoja i konstruisanja od strane prirode [12]. Na taj način moguće je izdvojiti pojedine delove i uzeti ih kao osnovu za razvoj tehničkih konstrukcija u ovom slučaju vozova velikih brzina.

Najupečatljiviji primer primene bioničkih rešenja u dizajnu vozova velikih brzina je Shinkansen serija 500 voz, slika 7, koji je deo železničkog sistema proizveden u Japanu i danas čini oko 40% sistema za prevoz putnika u svetu [15]. Cilj razvoja ovakvog tipa voza bio je da se relacija između Tokija i Hakata u Japanu pređe za 2 sata i 20 minuta, što je zahtevalo brzinu od 350 km/h a da se pri tome zadrži tačnost, udobnost, efikasnost i bezbednost po kojima su Shinkansen vozovi poznati [16].



Slika 7 - Shinkansen serije 500

Prilikom kretanja ovih vozova pri brzinama od 350 km/h javlja se značajni problemi koje je trebalo rešiti a koji uključuju buku, vibracije i pritisak koji se javlja pri ulasku odnosno izlasku voza iz tunela. Rešenje za smanjenje ovih negativnih efekata nađeno je u specifičnom aerodinamičkom obliku čela voza i pantografa a po uzoru na oblike tela ili delove tela nekih životinja. Kako bi se smanjila aerodinamička buka, dizajniran je pantograf po uzoru na krila i perja sove [15]. Zapravo, pantograf je dizajniran da ima oblik krila sove, uključujući male proreze kako bi se smanjila buka i vibracije pantografa. Noseći okvir pantografa preoblikovan je da podseća na telo pingvina kako bi se smanjio otpor vazduha. Zapravo telo pingvina je u obliku vretena koje omogućava da se bez napora kreće kroz vodu i po nekoliko stotina kilometara dnevno a bez potrošnje velike količine energije [12]. Najočigledniji bionički element dizajna je čelo voza koje je projektovano po uzoru na kljun ptice vodomara (Kingfisher) slika 8.



Slika 8 - Vodomar (Kingfisher)

Oblik glave i kljuna ove ptice omogućava joj da klizi kroz vazduh i precizno zaroni u vodu. To je najefikasnija životinja na zemlji pri prelasku iz polja niskog pritiska (vazduha) u polje visokog pritiska (vode). Vodomar pri ulasku iz vazduha u vodu tj. prilikom zaranjanja ima minimalan koeficijent otpora sa malo prskanja što je pravi primer evolutivne adaptacije. Imajući u vidu oblik glave i kljuna ove ptice, najmodernija tehnologija primenjena u dizajniranju voza Shinkansen seriju 500 sa čelom voza koje je suženo u odnosu na ranije serije i dugo skoro 15 metara (50 feet), čini da ovaj voz proizvodi mnogo manje buke pri izlasku iz tunela, a pri kretanju koristi 15% manje električne energije i ako se kreće 10% brže u odnosu na ranije modele Shinkansen vozova [17]. Ovako oblikovano čelo voza, ali i zadnji deo voza, umanjuje otpor vazduha i promene pritiska kada voz ulazi tj. izlazi iz tunela. Ceo voz je gladak, osim na krovu, delovi koji su apsolutno neophodni tj. pantograf, kao što je već navedeno, je jednostavnog i specifičnog dizajna, kompaktnih dimenzija, a sve u cilju smanjenja izvora buke [18].

Intenzivnim tehnološkim razvojem Shinkansen je promovisao i druge serije takozvanih "bullet trains" koji se kreću i brzinama od skoro 300 km/h a koji se odlikuju karakterističnim čelom voza i dizajnom. Da bi se smanjili otpori koji se javljaju pri ovim brzinama u dizajnu dominiraju zakrivljene linije i a čelo voza je nagnuto pod ostrim uglom kako bi se olakšalo strujanje vazduha preko njega. Još jedan primer Shinkansen voza je serije E5, slika 9, kod koga je čelo voza nalik pačijem kljunu koji takođe ima dobre aerodinamičke karakteristike, dok je celo obrtno postolje prekriveno kako bi se obezbedila manja buka i manji otpor. Čelo voza ove serije je duže u odnosu na seriju E2, slika 9, za čitavih 9 metara [19].



Slika 9 - Shinkansen vozovi serije E2 (levo) i E5 (desno)

Ono šta je karakteristično za Shinkansen vozove je jako dug nos (čelo voza). Shinkansen voz sa izduženim čelom serija N700, slika 10, sa maksimalnom brzinom od skoro 330 km/h, u odnosu na prve serije Shinkansen vozova troši čak 35% manje energije [20]. Tehnološke

inovacije koje su primenjene na ovom vozu su svakako čelo voza koje je dizajnirano kako bi se postigle optimalne aerodinamičke performanse pri velikim brzinama, nizak nivo buke zbog aerodinamičkog oblika pantografa, kontrolni uređaji protiv vibracija, uređaji za regulaciju nagnjanja koji omogućava vozilima da se kreću bez smanjenja brzine u krivinama, i obnovljivi (regenerativni) kočioni sistem za pretvaranje kinetičke energije u električnu energiju [20].



Slika 10 - Shinkansen voz serije N700

U cilju smanjenja aerodinamičke buke i otpora, konfiguracija prednjeg dela voza treba da je sa dugim (izduženim) čelom voza sa glatkom površinom, a srednji deo voza treba da bude dizajniran bez ikakvih značajnih grubih površina. Tako aerodinamički oblikovan voz može da proizvodi veoma nizak nivo buke pri kretanju naročito u tunelima. Kako je Japan pionir u razvoju vozova velikih brzina a tako i pruga koje su namenjene za kretanje ove vrste vozova, na nekim relacijama su izgrađeni tuneli koji su nešto manjeg prečnika u odnosu na prečnike tunela koji se sada grade ali i u odnosu na prečnike tunela u Evropi. Ti manji prečnici tunela predstavljaju problem pri kretanju vozova brzinama koje su znatno veće od predviđenih za vreme kada su ti tuneli građeni. U nekim slučajevima usled naglog porasta pritiska pri ulasku brzog voza u ove tunele javlja se takav udarni talas da oštećuje tunele. Pokazalo se da postepeno evoluiranje dužine nosa predstavlja rešenje za ovu vrstu problema [19], što je od presudne važnosti s obzirom da zbog planinskih oblasti Shinkansen mora da se kreće po tunelima koji čine 60% dužine pruge u Japanu. U Francuskoj ovaj procenat tunela u dužini pruge ima vrednost jednocifrenog broja [7].

Ispitivanjima u aerotunelima i realnim uslovima ustanovljeno je da i najmanja promena aerodinamičkog oblika čela voza ima za posledicu potpuno drugačije strujne slike i raspodele pritisaka. Oblik voza a posebno oblik čela voza utiče na aerodinamičke sile, pa u slučaju kada je nos izdužen (primer Shinkansen vozova) aerodinamičke sile su manjeg intenziteta nego u slučaju kada je nos zakošen [7].

Kao što su Šinkansen vozovi u Japanu, u Francuskoj je razvijena linija vozova velikih brzina poznata kao TGV (fr. Trains à Grande Vitesse). Ovaj tip voza, za razliku od Shinkansen vozova ima zakošeno čelo, slika 11, a trenutno drži rekord u probnoj vožnji od 574,8 km/h iz 2007 godine sa posebno modifikovanim modelom za ovu namenu, dok je radna brzina oko 320 km/h [3].

Jedna od bitnih karakteristika TGV vozova, pored velikih brzina a tako i kratkih vremenskih intervala u putovanjima, je da su dizajnirani da budu kopatibilni i sa konvencionalnim prugama sa maksimalnom brzinom od 220 km/h.



Slika 11 - TGV

Uvođenjem ovih vozova ne nekim deonicama, vazdušni i drumski saobraćaj na tim putnim pravcima je znatno smanjen [14] a u odnosu na ostale vozove ovo je prednost jer TGV vozovi mogu da saobraćaju na više destinacija i da koriste i gradske stanice. Pored konvencionalne pruge TGV vozovi koriste i specijalno izgrađenu prugu nazvanu LGV (fr. Ligne à Grande Vitesse) namenjenu samo za kretanje vozova velikih brzina.

Zbog velikih krivina koje su karakteristične za ovu prugu mogu se postići tako velike brzine. Pored standardnih modela dizajniran je i TGV dupleks koji zbog visine voza ima nagnuto čelo što u nekim slučajevima može imati negativan efekat u vidu povećanog otpora [8].

Tokom 2008. godine proizveden je AGV model (fr. Automotrice à grande vitesse) koji predstavlja najnoviju generaciju TGV vozova i kreće se brzinom od 360 km/h. Za razliku od ranijih verzija TGV vozova, ovaj model ima raspoređene motore ispod svakog vagona [3]. Na modifikovanom modelu TGV voza koji je korišćen 2007. godine za probnu vožnju i koji je postigao navedeni rekord u brzini, korišćeni su neki osnovnih koncepta AGV modela [21].

AGV, slika 12, projektovan kao međunarodno interoperabilno vozilo, svakako predstavlja nastavak filozofije dizajniranja TGV vozova u kombinaciji sa revolucionarnim inovacijama brzih pruga.



Slika 12 - AGV

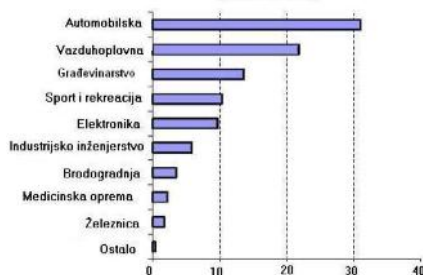
Svaki vagon deli obrtno postolje sa susjednim vagonima stvarajući polukrutu vezu između vagona, što se karakteriše odličnom stabilnošću u ekstremnim uslovima. Na osnovu analiziranih scenarija sudara čelo voza je jedinstveno dizajnirano tako da zadovoljava zahteve pasivne sigurnosti što obezbeđuje sigurnost putnika i vozača kao i zahteve zaštite životne sredine [22]. Kako se AGV kao i TGV može kretati i po konvencionalnoj pruzi i LGV pruzi, pantogarf je specijalno dizajniran u smislu lukova različitih širina i od drugačijeg materijala što ga čini prilagodljivim za različite putanje. Takođe pantograf je opremljen i sistemom za elektronsku kontrolu u realnom vremenu obezbeđujući konstantan pritisak lukova na kontaktnu mrežu. Ovako koncipiran pantograf korišćen je u posebno modifikovanom modelu TGV voza koji je postigao rekordnu brzinu od 574,8 km/h [22].

Posebne karakteristike pruge koje se koriste za kretanje vozova velikih brzina u Francuskoj i Japanu su jedan od faktora koji određuju razliku u aerodinamičkim karakteristikama Shinkansen i TGV tj. AGV vozova. Kao što je već navedeno, razvoj aerodinamičkih karakteristika čela Shinkansen vozova uslovljeno je geografskim faktorima odnosno mnogobrojnim tunelima. U Francuskoj to nije slučaj, pa čelo TGV voza značajno je drugačije od čela Shinkansen vozova. Iako noviji TGV tj. AGV vozovi, sa gotovo istim oblikom čela voza, nemaju potrebu za nekim novim inovativnim rešenjima kao što je to slučaj kod Shinkansen modela [23].

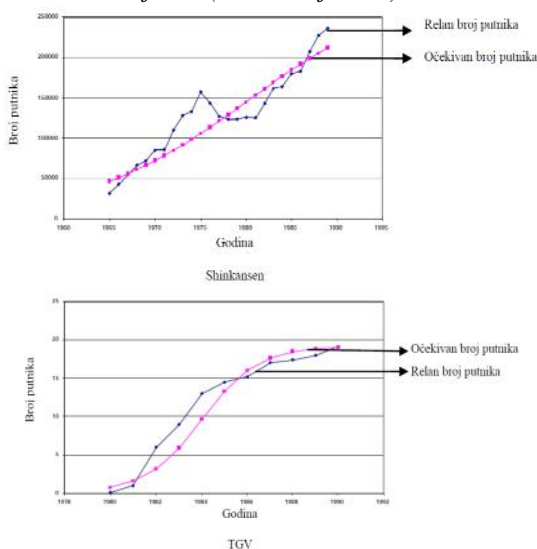
Međutim zbog mešovitog saobraćaja na većini deonica po kojima se kreću TGV tj. AGV vozovi, zbog sila koje se javljaju pri mimoilaženju vozova i od bočnog vetra, stabilnost ovih vozova je od presudnog značaja [24]. Možda glavna razlika Shinkansen i TGV vozova odnosi se na sposobnosti TGV vozova da se kreću po konvencionalnim prugama što značajno smanjuje troškove izgradnje i održavanja. Posebno izgrađena pruga u Japanu koju koriste samo Shinkansen vozovi je značajno skuplja od železničkih sistema brzih pruga koje se koriste po svetu. Izgradnja mnogobrojnih tunela čini najveći trošak u izgradnji ovih

pruga. Pruga je širokog koloseka i sastoji se od kontinuirano zavarenih šina koje se koriste da bi se smanjile vibracije i krivljenje [14]. Pruga je na nekim deonicama izdignuta na posebnim vođicama a održavanje se obavlja noću kada je pruga zatvorena za saobraćaj. Ovako podignutom prugom izbegavaju se saobraćajni prelazi a ostali deo pruge je ograđen, što ovu prugu čini jednom od najbezbednijih. Deonice gde je pruga izdignuta su u gusto naseljenim oblastima, izgrađena kako bi se smanjili troškovi otkupa zemljišta na ovim deonicama, a prostor ispod pruge se koristi za javnu i komercijalnu upotrebu [20]. Cena izgradnje Francuske LGV pruge je svedena na minimum jer se ne grade tuneli i vijadukti već je pruga nešto strmijeg nagiba. Ipak kako TGV koristi i konvencionalne pruge, na tim deonicama tokom dana se kreću brzi vozovi dok se noću kreću transportni vozovi [14].

Još jedan bitan element u konstrukciji vozova velikih brzina je njihova masa koja ima značajan uticaj na potrošnju energije. Od skorije mnogi vozovi, među kojima je i Shinkansen, imaju telo od legura aluminijuma, čime je povećana energetska efikasnost lakšim i izdržljivijim telom voza [18]. Da se kompozitni materijali još uvek malo koriste u železničkoj industriji može se videti na slici 13 [12].



Slika 13 - Upotreba kompozitnih materija u različitim industrijama (vrednost je u %)



Slika 14 - Realan i očekivan broj putnika tokom godina Shinkansen i TGV vozova

Iako različiti, definisanje oblika vozova kao i čitavog sistema Shinkansen i TGV vozova treba posmatrati kao značajan doprinos u tehničkim i ekonomskim dostignućima. Da su oba sistema pouzdana i sigurna za transport putnika, predstavljeno je na slici 14, na kojoj se vidi odnos broja očekivanih putnika tokom godina u odnosu na realan broj putnika [23].

Realan broj putnika kod Shinkansen vozova koji je veći od očekivanog povezan je sa efektivnošću ovih vozova što se vidi u godišnjem proseku kašnjenja ovih vozova svega oko 0,6 minuta po vozu i to samo u ekstremnim uslovima (jaka kiša, tajfun, velika količina snega...) [20].

4. ZAKLJUČAK

Razvojem brzih pruga razvijale su se i druge tehnologije brzih pruga i vozova velikih brzina. Jedna od takvih je Maglev (Magnetic Levitation) koji se kreće pod dejstvom elektromagnetne sile, takoreći lebdi nad posebno izgrađenim šinama [25]. Ipak većina vozova velikih brzina koristi druge tehnologije koje je lakše primeniti bez potrebe za izgradnjom novih pruga pa je i lakše u budućnosti uspostaviti vezu između gradskih centara.

Pored aerodinamičkog oblika voza, i ostale mere kao što su inteligentno upravljanje masom i optimizacija obrtnog postolja biće od velike pomoći za dizajniranje vozova sa malim otporom i neosetljivim na spoljna opterećenja, a sa povećanom primenom energetske efikasnosti [8]. Inovativno rešenje za povećanje energetske efikasnosti je i pokušaj korišćenja solarne energije na vozovima velikih brzina (Italijanski projekat PVTRAIN). Solarni paneli su postavljeni na krovovima vagona i lokomotiva a akumulirana energija korišćena je za osvetljenje i klimatizaciju u vozu [26].

Sistemska projektovanje celog voza je i dalje optimizovana selekcija i evaluacija mnogih eksperimentalnih inženjerskih projekata. Svakako dugoročne strategije razvoja železničkih sistema imaju presudnu ulogu u proizvodnji i razvoju vozova velikih brzina. Aktuelni razvoj brzih pruga u našem okruženju zahteva pre svega razumevanje aerodinamičkih karakteristika vozova velikih brzina, razvijanje nove generacije sistema vozova velikih brzina ali na prvom mestu poboljšanje postojećih konvencionalnih pruga i vozova što predstavlja osnovu povezivanja železničkog saobraćaja Srbije sa zemljama Evropske unije u okruženju, a tako i međunarodnu interoperabilnost.

5. ZAHVALNOST

Ovaj rad je rezultat istraživanja koje je realizovano u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja TR 35006 i TR 35045.

LITERATURA

- [1] A. Radosavljević, V. Lučanin, Osnovni otpor kretanja železničkih vozniha sredstava, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.
- [2] Mamoru Taniguchi, High Speed Rail in Japan: A Review and Evaluation of the Shinkansen Train, University of California Transportation Center, 1992.
- [3] [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/TGV>
- [4] Javier Campos, Gine's deRus, Some stylized facts about high-speed rail: A review of HSR experiences around the world, University of Las Palmas, Spain, 2009.
- [5] <http://www.ecopassenger.org/>
- [6] Alexander Orellano, Stefan Sperling, Aerodynamic Improvements and Associated Energy Demand Reduction of Trains, Bombardier, Center of Competence for Aerodynamics and Thermodynamics, Germany, The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains, Fred Browand, Rose McCallen, James Ross, vol. 41, page.210-231, 2007.
- [7] Raghu S. Raghunathana, H.-D. Kimb, T. Setoguchi, Aerodynamics of high-speed railway train, Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) 469–514.
- [8] Ch. Heine, G. Matschke, The influence of the nose shape of high speed trains on the aerodynamic coefficients, Deutsche Bahn AG, Research and Technology Centre, Germany, 2001.
- [9] V. Lučanin, Teorija Vuče, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [10] Piotr Lukaszewicz, Energy Consumption and Running Time for Trains, Modelling of running resistance and driver behavior based on full scale testing, Doctoral Thesis, Stockholm 2001, ISSN 1103-470X.
- [11] Joong-Keun Choi, Kyu-Hong Kim, Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology 41 (2014) 62-73.
- [12] Prof. dr Boško Rašuo, Bionika u dizajnu, predavanja, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2014.
- [13] M. Puharić, M. Kutin, M. Burzić, Ž. Adamović, Aerotunelska ispitivanja modela vozova velikih brzina, Tehnička dijagnostika, broj 1, 2007.
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_rail
- [15] Eiji Nakatsu, Lecture on Biomimicry as applied to a Japanese Train, April 23, 2012.
- [16] Emma Websdale, 5 Wonderful things inspired by nature, July 8, 2011.
- [17] <http://jncc.defra.gov.uk/page-5224>
- [18] Rolling Stock, chapter 7, Delhi metro Rail Corporation Ltd, Kerala High Speed Rail between Thiruvananthapuram and Ernakulam, Pre Feasibility Report, Sept 2011.
- [19] Mike Fitzpatrick, Japan's long-nosed bullet train stops 'tunnel boom', March 2011.
- [20] The Tokaido Shinkansen, FIDIC Centenary Award, 2013.
- [21] California High-Speed Train Project, Selected Train Technologies, May 2008.
- [22] AGV Full speed ahead into the 21st century, Alstom
- [23] David Levinson, Rail reinvented, A Brief History of High Speed Ground Transportation
- [24] Jorge Munoz Paniagua, Aerodynamic optimization of nose shape of a High – speed train, Doctoral Thesis, Universidad Politecnica de Madrid, 2014.
- [25] <http://en.wikipedia.org/wiki/Maglev>
- [26] <http://www.treehugger.com/cars/5-high-speed-trains-that-are-changing-the-face-of-rail.html>

SUMMARY

MODERN TRENDS IN DESIGNING HIGH-SPEED TRAINS

Increased advantages of railway transportation systems over other types of transportation systems in the past sixty years have been a result of an intensive development of the new generations of high-speed trains. Not only do these types of trains comply with the need for increased speed of transportation and make the duration of the journey shorter, but they also meet the demands for increased reliability, safety and direct application of energy efficiency to the transportation system itself. Along with increased train speed, the motion resistance is increased as well, whereby at speeds over 200 km/h the proportion of air resistance becomes the most dominant member. One of the most efficient measures for reducing air resistance, as well as other negative consequences of high-speed motion, is the development of the aerodynamic shape of the train. This paper presents some construction solutions that affect the aerodynamic properties of high-speed trains, first and foremost, the nose shape, as well as the similarities and differences of individual subsystems necessary for the functioning of modern high-speed rail systems. We analysed two approaches to solving the problem of the aerodynamic shape of the train and the appropriate infrastructure using the examples of Japan and France. Two models of high-speed trains, Shinkansen (Japan) and TGV, i.e. AGV (France), have been discussed.

Key words: *high-speed trains, aerodynamic shape of the train, Shinkansen, TGV, bionics*