

ENERGETSKA EFIKASNOST VOZOVA VISOKIH BRZINA¹

ENERGY EFFICIENCY OF HIGH SPEED TRAINS

Datum prijema rada: 25.11.2017. god.
UDK: 656.1/.2(082)(0.034.4)

REZIME

U kontekstu generalne strategije smanjenja potrošnje energije razmotren je udeo sektora transporta, posebno železnice. Data je uporedna analiza energetske efikasnosti (EE) raznih modova transporta, u tom okviru posebna pažnja je posvećena železnici visokih brzina (ŽVB). Sistematizovani su pravci poboljšanja EE u pojedinim podsistemima ŽVB, pri čemu se detaljno razmatraju mobilni deo, u interakciji sa sistemom napajanja, pruga sa stanovišta njene geometrije i EE, kao i metode optimalne eksploatacije. Posebna pažnja je posvećena aerodinamici vozova kao jednog od glavnih činilaca EE vozova visokih brzina (VVB). Sve te dimenzije EE se posmatraju kroz njihovu sinergiju, uz obilje konkretnih analiza i podataka. Značajni činioci ekološkog aspektu EE, izraženom preko emisije CO₂, buke i uklapanja ŽVB u okruženje, takođe su detaljno razmotreni. **Ključne reči:** potrošnja energije, komfor, avio-transport, aerodinamički otpor, geometrija koloseka, emisija CO₂

SUMMARY

In the frame of general policy of energy consumption we consider share of transport sector, particularly railways. It is presented a comparative analysis of energy efficiency (EE) in versatile transport modes and means, among which a particular attention is devoted to high speed railways (HSR). Methods of improving EE in main subsystems of HSR are systematically clustered, where the rolling stock is widely considered, in its interaction with power supply subsystem, and the track geometry in regard to its influence on EE. Particular attention is given to aerodynamics of high speed trains (HST), as a very influential factor of EE in HST. All these dimensions of EE are considered through their synergic interrelations, described by many actual analyses and illustrating data. Important factors of environmental aspect of EE, regarded through CO₂ emissions, noise and incorporation of HSR in environment, are considered in detail as well. **Key words:** Energy consumption, Comfort, Air transport, Drag, Track geometry, CO₂ Emission

1. UVOD

Ubrzani rast svetske populacije, tranzicija mnogih nerazvijenih država u države u razvoju kao i u razvijene [1], izaziva rast potrošnje energije širom sveta, čak uz određeni pad njene proizvodnje. Emisija CO₂ iz fosilnih goriva sledi ovakve trendove,

tako da svi ovi faktori čine urgentnim stvaranje strategija ušteda energije i njene efikasnije potrošnje [2], [3], [13], [14].

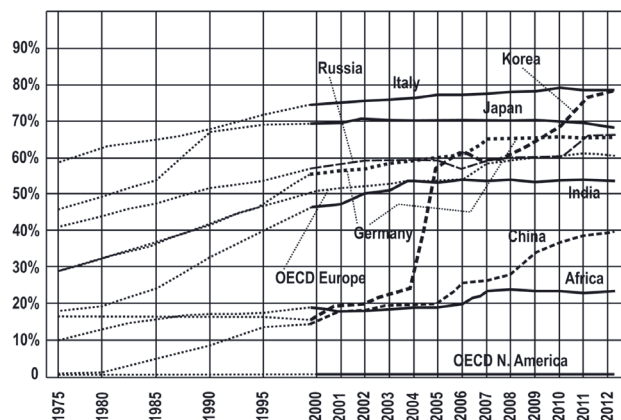
Elektrifikovana železnička mreža predstavlja praktično isključivu infrastrukturu za VVB. Samo električna vuča može obezbediti količinu energije

* Prof. dr Ranko Babić, dipl. inž. elek, Visoka železnička škola strukovnih studija, Beograd, Zdravka Čelara 14, babic57@mts.rs

¹ Ovaj rad je u skraćenoj verziji prezentovan na VI međunarodnom simpozijumu Novi Horizonti saobraćaja i komunikacija 2017. koji je održan 17. i 18. novembra 2017. godine na Saobraćajnom fakultetu u Doboju Univerziteta u Istočnom Sarajevu pod naslovom: Methods of improving energy efficiency in High speed trains

dovoljnu za tu svrhu. Takođe, ona poseduje mnoge neupitne prednosti, pre svega energetska efikasnost: parne lokomotive (5–7%), električne lokomotive (EL) sa gasnom turbinom (10%), dizel-EL (26-30%), EL napajane iz termoelektrana (34–36%), EL napajane iz hidroelektrana (40–42%) [4], [5]. Jednostavno rečeno, ne postoje dizel VVB. Dizel-električne mašine kao pokretači VVB nisu pogodno ekološko rešenje, a posebne probleme stvara težina i skladištenje goriva, kao i sigurnost od požara [6], [7], [8], [9].

Stanje elektrifikovanosti železnica u EU je ilustrovano sledećim podacima (avgust 2012.): EU27 (52,3%), Francuska (52,4%), Nemačka (58,8), Španija (59,6), Poljska (60,2), Austrija (68,0), Italija (70,7), Švedska (71,4), Holandija (76,1), Belgija (85,5), Švajcarska (99,3) [10], dok je na železnicama Srbije 62,5% [11]. Udeo elektrifikovanih železničkih pruga u vodećim industrijskim zemljama u svetu, od 1975. prikazan je na Sl. 1 [12], [13]



Slika 1. Tok elektrifikacije železnica u vodećim industrijskim državama od 1975. do 2012.

Udeo transportnih usluga za različite vidove transporta, koji se odnosi na putnički/teretni (drumski: 82,7/8,8%, avionski: 10,6/0,7%, vodni: 0,3/81,5%, železnički: 6,3/9%), jasno pokazuje sadašnje stanje u transportu [12], [27]. Termin „vodni” se odnosi na transport brodovima (okeanski/morski i vodnim putevima unutar kopna: kanali, reke, jezera itd.).

Tabela 1. daje podatke o udelu finalne potrošnje energije u sektorima vodećih industrijskih zemalja [12]. Tabela 1 takođe pokazuje koliki se delovi energije u sektoru transporta troše u raznim vidovima transporta, među njima i železnica

(skraćeno označavaju: RF – Ruska Federacija, NRK – Narodna Republika Kina, In./Gr. – Industrija/ Građevinarstvo, Dom. – Domaćinstva, Cev. - Cevovodi).

Tabela 1. Ukupna utrošena energija, po sektoru i po transportnom vidu (%)

	Svet	Evropa	SAD	Japan	Rusija	Indija	Kina
Udeo po sektorima							
In./Gr.	36,9	29,3	23,8	37,3	44,9	39,4	54,0
Dom.	23,1	23,6	17,3	14,7	23,4	35,2	21,6
Ostalo	11,9	14,8	15,5	21,2	10,0	10,0	9,2
Trans.	28,1	32,3	43,4	26,8	21,7	15,3	15,2
Udeo po transportnim sektorima							
Žel.	2,1	1,3	2,0	2,1	5,7	5,0	4,7
Drum.	74,7	72,2	79,9	77,2	46,8	85,3	73,7
Avio	10,3	12,4	10,9	11,3	12,9	7,2	7,2
Voda	9,5	12,7	4,1	8,5	2,6	2,4	10,7
Cev.	2,4	/	/	/	28,8	/	/
Drugo	1,0	1,4	3,1	0,9	3,2	0,1	3,7

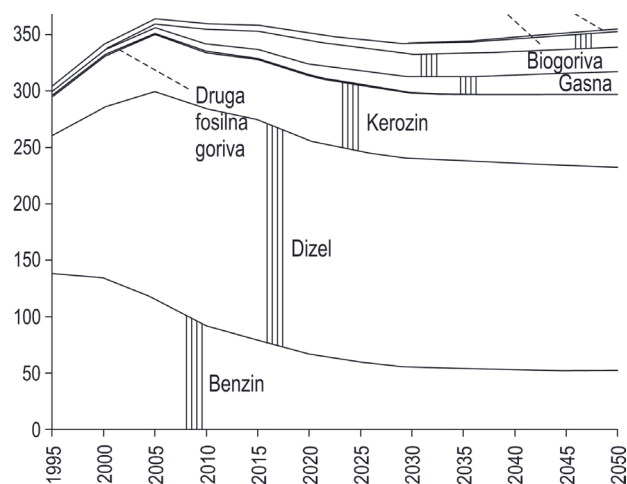
Pri tome se udeo pojedinih modova u ukupnom teretnom kontinentalnom saobraćaju u EU-28, u periodu 2009–2014, praktično ne menja: železnice 16,9–18,4 %, kontinentalni vodni saobraćaj (reke, kanali i jezera) 6,1–6,7 % i drumski 77,1–74,9 % [14].

Ako se prethodne brojke uklope u strateške planove i trendove postaje jasan opseg zahvata u pravcu energetske efikasnosti (EE) i CO₂ emisija (tabela 2, sl. 2, sl. 3). [13], u kom kontekstu i treba posmatrati energetska efikasnost železnice, a u njenom okviru i brze železnice. U tabeli 2. sektor „Tercijarno” predstavlja uglavnom uređaje i opremu

Tabela 2. Potrošnja krajnje energije po tipu i sektoru (%)

Potrošnja krajnje energije po tipu				
	2010.	2020.	2030.	2050.
Elektricitet	21	22	25	28
Nafta	39	36	35	32
Gas	24	23	22	22
Termo	5	5	5	5
Čvrsto	4	4	3	1
Ostalo	7	10	10	11
Potrošnja krajnje energije po sektoru				
Transport	31	31	32	33
Industrija	9	9	10	10
Rezidenti	27	26	27	27
Tercijarno	17	16	17	17
Ener. int. ind.	16	17	15	13

za IT, razonodu, domaćinstvo itd. Primećuje se značajan udeo energetske intenzivne industrije (Ener. int. ind.).



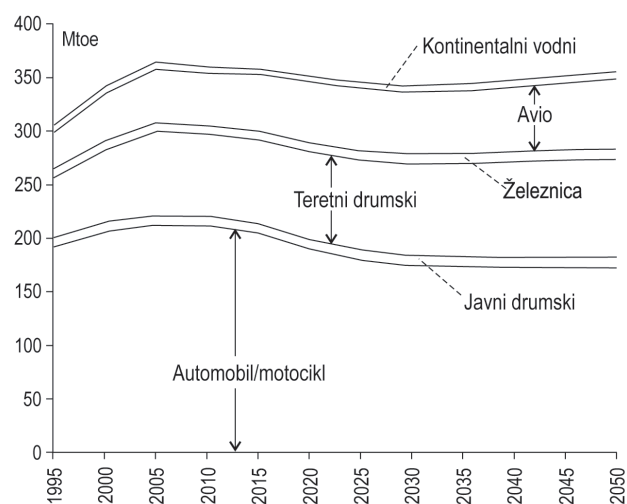
Slika 2. Potrebe krajnje energije u transportu po tipu goriva (Mtoe – Megatona naftnog ekvivalenta (eng. oil equivalent))

Glavni pokretač trenda opadanja ukupnih potreba/zahteva za primarnom energijom je napredak u smanjenju potreba za krajnjom energijom - kod krajnjih korisnika. Oni su utkani npr. u politike energetske efikasnosti EU, među njima i u Direktivi za energetske efikasnosti (eng. Energy Efficiency Directive - EED), Direktivi o energetske efikasnosti objekata (eng. Energy Performance of Buildings Directive - EPBD) itd. [13], da ne spominjemo tzv. Zelenu inicijativu Evropske investicione banke, između ostalog i u sektoru transporta [15].

Električne lokomotive su veoma moćne mašine te time i zahtevni potrošači energije. Njihova snaga ide i do 13120 kW (4E5K, jednočasovno opterećenje, od 2014 do danas) [16], [17]. Uobičajene vrednosti su oko 4000 kW (npr. klasična 441 (ASEA), B'o B'o konfiguracije, 80 t težine (mase), permanentne/1h snage 3860/4080 kW [18]). Električna struja napajanja za jedan pogonski motor je 1180/1250/1700 A (premanentna/1h/3min) [18], ili za sva četiri električna motora 4720/5000/6800 A.

Lokomotivska vuča kod tradicionalnih vozova znači upotrebu jedne ili dve lokomotive u kojima se nalaze svi vučni motori. U modernim VVB, međutim, vučni motori se postavljaju u skoro svakom vozilu radi boljeg rasporeda vučne sile, a time i udobnije vožnje. Raspoređivanjem vučne snage u više osovina omogućava vozovima da brže ubrzavaju/

usporavaju. Koncentrisanje vučne snage u samo dve ili tri osovine, posebno pri polascima, može izazvati proklizavanje točkova tj. obrtanje u mestu.



Slika 3. Potrebe krajnje energije u transportu po vrsti transporta

Uzevši generalno, železnice visokih brzina zahtevaju i pruge i vozove posebnih odlika. Zato se u odnosu na klasične železnice ne govori o konvencionalnim vozovima (lokomotiva i vagoni) nego o voznim sastavima (zbog posebnog odnosa snaga/težina a i drugih tehničkih razloga), koji se kreću brzinama iznad 250 km/h po namenskim prugama, sa potpuno drugačijom signalizacijom, jer je ona klasična neupotrebljiva pri visokim brzinama. Pri tome, treba istaći da konvencionalne pruge, čak i posle suštinske nadogradnje, nisu sposobne da podrže brzine veće od 200 do 220 km/h.

Prema tome, brze železnice uz tehničke i terminološke novine, ako se sveobuhvatno posmatraju, predstavljaju suštinski novu dimenziju železnice.

Tako npr. V(ultra)VB Zefiro, konfigurisan kao sastav (kompozicija-garnitura) sa 16 kola, obično ima 32 vučna motora, tako da je polovina ukupnog broja osovina pogonjena (svako od kola se kreće na dva dvoosovinska obrtna postolja – kolišta (eng. two-axle bogies)). Svaki vučni motor razvije snagu od 600 kW, tako da je instalisana snaga čitavog voza preko 19 MW. U ovim VUVB više se koriste motori sa permanentnim magnetima nego asinhroni motori [19], [20].

2. OSNOVNI FAKTORI EE ŽELEZNIČKOG TRANSPORTA

Poboljšanja u EE ne tiču se samo (brzih) željeznica već imaju generalni zahvat, koji se odnosi na čitavu ekonomiju i društvo, a u okviru toga i na transport uopšte. Strateške projekcije, ali i razrađeni operativni dugoročni ciljevi, govore o važnosti takvih nastojanja [13]. Daćemo samo one koji se odnose na oblast transporta, a iz toga se može sagledati širina zahvata uopšte.

EE železničkog transporta, upoređena sa ostalim vidovima transporta, data je u tabeli 3, koja predstavlja sažetak podataka iz nekoliko izvora [21–35]. Date vrednosti su zasnovane na prosečnoj statistici javnog prevoza, a u slučaju auta se odnose na jednu osobu (oznaka eqlg predstavlja ekvivalent litara benzina). „Coach” je britanski izraz za putnički vagon.

Tabela 3. Energija za 100 km po putniku

Tip trans.	Hod	Trčanje	Bičiki	Avion	Auto	Motocikli	Velomobil
kWh	7.5	8.5	2.50	51.8	62.8	51.2	0.50
eqlg	0.8	0.9	0.25	5.3	6.4	5.2	0.05
Tip trans.	Putnički vagon	Reg. voz	Voz	VVB	Tramvaj	Autobus	El. auto
kWh	20.9	19.8	15.1	14.0	5.80	47.7	50.8
eqlg	2.1	2.0	1.5	1.4	0.6	4.8	5.2

Kao pozadinu tabele 3. uputno je konsultovati sliku [15, str. 6], (*Veličina i struktura tzv. spoljašnjih troškova kod osnovnih vidova transporta, u EUR po 1000 putnika-km*) koja pokazuje ukupne eksterne troškove pojedinih oblika transporta ali, sa strukturom njihove raspodele po pojedinim komponentama njihovog uticaja na okolinu. Iako nema neposredne veze sa utroškom energije jasno je da se ovi troškovi prelivaju i na energetske input doprinoseći ceni transporta. Rečeno na drugi način, u tabeli 4. vidimo efikasnost osnovnih vidova transporta po jedinici uložene energije. Izraz „Commuter train” preveden je kao „Lokalni voz”.

Ovako povoljni pokazatelji za vozove ne predstavljaju poslednju reč kada se radi o potrošnji energije. Postoji još mnogo prostora da se oni još poboljšaju. Kada su u pitanju putnički vozovi to

Tabela 4. Energetska efikasnost modova transporta po jedinici energije (putnik-km/1 kWh)

Tip transporta	VVB	Brzi voz	Lokal. voz	Reg. voz	Autobus	Automobil	Avion
p-km/1 kWh	170	106	90	54	54	39	20

uključuje dva dominantna faktora: otpor vazduha i energiju potrebnu za ubrzavanje do konstantne putne brzine. Pored ova dva faktora i otpor (trenje) kotrljanja ima određeni uticaj, a takođe određeni udeo ima i energija za komfor (grejanje putničkog prostora, osvetljenje, naginjanje tela vagona itd.). Avio-prevoz ovde nije razmatran pošto umnogome nadmašuje vrednosti drugih vidova prevoza (transporta) [24].

Mada sa povećanjem brzine raste i potrošnja energije, čak do 63 %, stalnim poboljšanjima, u modernim putničkim vozovima, uvedenim u eksploataciju 2002-2005, ona je smanjena za tipično 25-30 % po sedište-km ili po putnik-km, kada se uporedi sa starijim vozovima sa lokomotivskom vučom iz 1994. To je ostvareno kroz strategije smanjenja potrošnje energije [36], objedinjene u tri područja: vozila, eksploatacija/osoblje, zahtevi korisnika/komfor ili taksativno:

Vozila – efikasniji koncepti vuče, povećana elektrifikacija železničke mreže, redukcija mase (manja masa voza po sedištu), poboljšanje aerodinamike i redukcija trenja (uključujući otpor vazduha); smanjenje gubitaka konverzije, regenerativno kočenje i akumuliranje energije; smanjenje tzv. „hotelske” potrošnje

Eksploatacija/osoblje – redukcija „praznih” putovanja, fleksibilni sastavi vozova, energetske efikasno upravljanje vozom, energetske efikasan red vožnje, viša svest o energetske efikasnosti kod osoblja

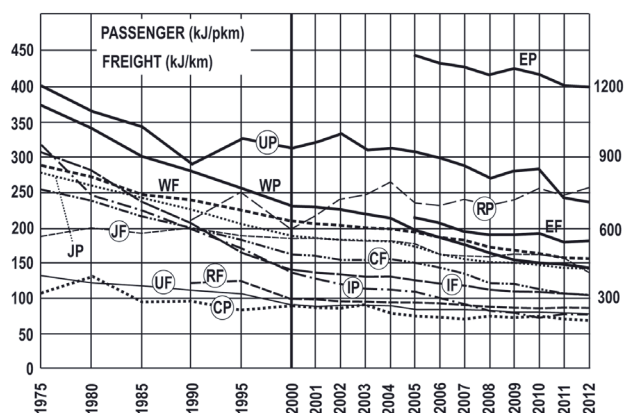
Zahtevi korisnika železničkih usluga – povećanje faktora transportnog opterećenja (eng. load factor), marketinške strategije za povećanje zahteva.

Rezultat ovih napora je označen negativnim nagibom kriva na sl. 4. Radi poređenja vrednosti iz tabele 4. i sl. 4. korišćena je konverzija 1 kJ = 0,0002778 kWh or 1 kWh = 3600 kJ.

Novi tipovi električnih mašina mogu da poboljšaju efikasnost (eliminiraju potrebu za rashladnim

ventilatorima) do 3 %. Da bi se smanjila potrošnja energije koriste se motori sa permanentnim magnetima, kojima treba 4 % manje energije nego asihronim motorima [6].

To su ekoaktivni proizvodi i tehnologije koji povećavaju održivost železničkog prevoza pri čemu ispunjavaju potrebe železničkih operatora. Tzv. Mitrac tehnologija štedi energiju kroz povećanje efikasnosti samog motora, a indirektno kroz smanjenje njegovog volumena i mase. Dodatne ekološke pogodnosti su postignute time što se veći deo kočenja ostvaruje elektronski, doprinoseći tako smanjenju buke i kvalitetu vazduha u tunelima [37]. Pomenimo ovde i snažne vučne motore od 1,2 MW za teretne lokomotive i VVB [38].



Slika 4. Specifična potrošnja energije na železnicama vodećih industrijskih zemalja sveta od 1975. godine²

Novi materijali, među njima posebno kompozitni, sve se više koriste u konstrukciji komponenata voza, redukujući masu voza, a sledstveno i energiju potrebnu za vuču do 4%. Razvijena su jedinstvena aluminijumska kućišta kola sa redukovanom težinom pri čemu su u potpunosti očuvani zahtevi bezbednosti [39].

Moderni vozovi imaju kola veće širine i dužine (3,45 m spoljne širine) omogućavajući povećanje sedišnog kapaciteta za oko 25 % u odnosu na kola standardne veličine. Ovo znači sastav od npr. troje kola umesto klasičnog voza sa 4 vagona, plus lokomotiva, i manju masa voza kao i manji aerodinamički otpor. Zahvaljujući ovom faktoru

² Oznake XY na dijagramu sa X označavaju zemlju (E – EU(28), U – USA, J – Japan, R – Ruska Federacija, I – Indija, C – Kina, W – svet) a sa Y jedinice transporta (P – putnik, F – teret). Skala na desnoj strani se odnosi samo na USA, i izražava jedinice P i F.

potrošnja energije je smanjena za 26%, gledano po putniku ili po toni tereta.

Poboljšanjem aerodinamike železničkih kola, u odnosu na ranije vozove, može se smanjiti potrošnja energije do 8 % kod regionalnih vozova i do 15 % kod VVB. Savremeni vozovi imaju glatkiju spoljašnjost (krovovi, zidovi), koja uključuje aerodinamičke prelaze na spojevima vagona, a posebno su pokriveni prostori ispod donjeg postroja kola gde je smeštena većina opreme koja bi izazivala vrtloženja, a time i veliki otpor. Oni takođe imaju duže i profilisane nosove na prednjem i zadnjem kraju. Samo ovaj faktor redukuje potrošnju za daljih 22%.

Električni moderni vozovi i VVB odlikuju se regenerativnim kočenjem ili rekuperacijom. Ova energija može biti korišćena kako interno u samom vozu, za funkcionisanje pomoćnih sistema (npr. za osvetljenje, za klimatizaciju, otvaranje i zatvaranje vrata, ili uopšte za punjenje baterija radi kasnijeg korišćenja kada je to moguće) tako i spolja – slanjem nazad u mrežu elektrovođe preko pantografa da napaja druge vozove na istoj deonici napojnog voda. Ukoliko ne postoji posebna oprema za efikasan prihvrat rekuperovane električne energije u samom vozilu, deo te povraćene energije se gubi kroz disipaciju - troši se u kočionim otpornicima (reostatsko kočenje) montiranim na krovu vozila ili voz prelazi na frikciono kočenje. Povraćena energija predstavlja i do 17 % od one dobijene preko pantografa [36], [39].

Današnji vozovi stvaraju manje gubitaka energije u visećem napojnom kablju, kao i u stabilnim postrojenjima elektrovođe, zahvaljujući sistemu napajanja pogonskih električnih (indukcionih) motora pomoću usavršenih poluprovodničkih konvertora. Ovi konvertori omogućavaju naizmeničnoj struji napajanja da bude potpuno u fazi sa linijskim naponom, što, sa svoje strane, minimizuje struju koja se vuče sa napojnog voda te se time minimalizuju gubici energije, koji rastu sa kvadratom struje.

Pasivan utrošak energije (stajanje na polazištu/odredištu, pre polaska i po prispeću, na stajalištima) procenjuje se na oko 2 % od ukupne utrošene energije, u proseku.

Utrošak energije varira sa godišnjim dobom. Niske temperature povećavaju potrebu za grejanjem

u vozovima (vrata se često otvaraju, posebno u regionalnim i lokalnim vozovima). Gustina vazduha je veća na niskim temperaturama te prouzrokuje veći otpor vazduha. Pri istom vazдушnom pritisku gustina vazduha je oko 10 % veća na -7°C nego na $+20^{\circ}\text{C}$, prouzrokujući time 10% veći otpor vazduha. Ovo poslednje je posebno važno za VVB koji se kreću brzinama oko 200 km/h i većim, pošto ovi vozovi više od 50 % primljene energije troše na otpor vazduha [36].

Transportni kapacitet ili faktor transporta (eng. load factor) veoma je važan parametar kada se razmatra utrošak energije. On se izražava u t-km, voz-km, kola-km, sedište-km ili putnik-km. Za putničke vozove obično se definiše kao odnos između aktuelnog broja putnika i broja postojećih sedišta-km, koji je proporcionalan broju sedišta u vozu.

Stvarni faktor transporta značajno varira u zavisnosti od vrste voza i uslova njegove eksploatacije (dan, nedelja ili godišnje doba, različitost deonica linije, veća ili manja nastanjenost područja). Vozovi u područjima velikih gradova (lokalni ili tzv. **komuteri (commuter trains)**, regionalni vozovi, aerodromski vozovi) obično imaju vrlo izražene špiceve u krivoj faktora transporta (udarni časovi).

Prosečni faktor transporta je obično sasvim umeren: od 20 do 40%. Savremeni VVB, sa konkurentnim vremenom putovanja i cenama karata, imaju prosečan faktor od 50 do 70 %, uporediv sa većinom nacionalnih avionskih linija. Sporiji konvencionalni vozovi na dugim linijama obično imaju skroman faktor transporta.

Tako, više putnika rezultovaće u većoj potrošnji energije. Ovo je najvažnije za vozove sa čestim zaustavljanjima i sledstvenim ubrzavanjima do visoke brzine.

Povećana potrošnja energije kao rezultat povećane mase voza zbog dodatnih putnika je, međutim, mala. Za voz sa maksimalnim brojem putnika koji sede (320 putnika je oko 26 tona) potrošnja energije poraste tek za 3%.

Razmotrimo detaljnije pitanje transportnog kapaciteta železnice kada je u pitanju običan teret i „teret“ u vidu putnika.

Čelik-čelik kontakt između točka i šine omogućava vrlo mali otpor kotrljanja i veliku nosivost, osovinsko opterećenje do 35 t, obično 22,5 za opšti teretni transport [40], [41], [42]. Ukupna masa vagona, postignuta sa dvo- ili troosovinskim kolištima [43], je $60+25=85$ t. Korišćenje tone kao ne-SI jedinice doprinosi stvaranju bolje predstave o veličini.

Efekt vođenja sistema točkovi/šine omogućava ređanje šinskih vozila u vozove, dajući ogroman transportni kapacitet, npr. 11.845 t (137 kola, 2,7 km dužine) [44], ili čak do 82.000/99.734 t (teret/voz), sa 682 kola, (7,3 km dužine), vučen sa 8 lokomotiva [45].

Korisno je napraviti poređenje sa maksimalnim kapacitetom drumskih teretnih vozila. Tako npr. troosovinski šleper strukture [(1-3)-(3)], sa osovinskim opterećenjama od 9,1 t (duple gume), pri čemu je opterećenje upravljačke osovine 5,5 t, za različite razmake osovin (2,4–3,7 m) ima ukupnu težinu 37,5–54,3t. Kod duplog šlepera konfiguracije [(1-2)-(3)-(2)] težina ide do 62,5 t [46].

Transportni kapacitet putničkih vozova je sasvim drugo pitanje, zato što „teret“ traži udobno putovanje. Ako platforma vagona nosi 60 t u teretnom modu, u putničkom modu sa 72 mesta nosi tek 6 t putnika. To je dobra ilustracija koliko je putnik zahtevna „transportna jedinica“, što posebno dolazi do izražaja kod VVB.

To znači da je potrošnja energije, sa stanovišta vuče i otpora vazduha, skoro nezavisna od aktuelnog broja putnika, tj. od faktora transporta. Ali ako se izrazi po putniku ili po putnik-km onda je utrošak energije veoma zavistan od aktuelnog faktora, približno obrnuto srazmeran njegovoj veličini.

Za dugolinijski saobraćaj VVB faktor transporta je dosta visok, tipično 55–60 % u Skandinaviji, i u ovom segmentu tržišta potrošnja energije je oko 0,08 kWh po putnik-km. Za brze regionalne vozove faktor transporta varira od tipičnih 20 % do 40 %, pri čemu potrošnja energije varira od 0,07 kWh po putnik-km (za najviši faktor) do 0,18 kWh/putnik-km [39]. Međutim, smatramo da je u navedenim referencama potrošnja shvaćena u užem smislu, samo sa stanovišta energije za vuču, a ne i energije za pomoćnu opremu i tzv. HVAC potrebe.

U razmatranju prirode faktora transporta (load factor) vrlo je zanimljivo uzeti u obzir i njegove dimenzije koje stoje u pozadini. U tom smislu je značajan dijagram [47] koji pokazuje promenu broja putnika (tj. putnik-milja) u SAD, u periodu 1960-2005, sa strukturom po modovima transporta (auto, avion, autobus i železnica). U vezi s tim takođe je zanimljiv dijagram koji pokazuje intenzitet putovanja po kopnu (auto, autobus, voz), u putnik-km po glavi stanovnika u najrazvijenijim državama sveta: Japan (10.000 pkm/capita), Nemačka (12.000), Velika Britanija i Francuska (po 13.000), Australija (14.000), Kanada (16.000) i SAD (preko 24.000) [47]. Još je instruktivnija modalna struktura putovanja, gde se vidi da u SAD putnici praktično koriste samo automobile, dok u Japanu skoro 30 % putnika koristi železnice. U tome vidimo odraz mentaliteta ali ne manje i geografsko-socijalnih faktora.

Što se tiče prethodno pomenute HVAC (eng. heating, ventilation and air conditioning) potrošnje, jasno je da ne ide čitava preuzeta energija u vuču, već oko 20–25 % ide u pomoćnu opremu (ventilacija i hlađenje pogonske opreme, snabdevanje kočnica komprimovanim vazduhom, tzv. „hotelsko opterećenje” (tj. HVAC), osvetljenje, utičnice za napajanje, informacioni displeji, otvaranje/zatvaranje vrata itd.). Hotelska potrošnja iznosi 10-15 %. Inženjeri su uspeli da za HVAC postignu do 80% obnovljivosti energije. Ukupno, naponi su rezultovali u padu od 25 % energije koju godišnje troši taj sistem [6].

3. EE PROJEKTI KRITERIJUMI ZA VVB

VUVB (npr. Zefiro) kombinuje najviši kapacitet i ekskluzivni komfor. Sa vršnom brzinom od 380 km/h on je konkurentan avio-prevozu na distancama do 700 km. Sa kapacitetom do 1300 mesta po vozu, oni mogu prevesti dvostruko više putnika nego najveći putnički avion na svetu, Erbas A380 [48].

Treba napomenuti da i konstruktori putničkih aviona prate trendove energetske efikasnosti. Tako se npr. za koncept Silent Aircraft eXperimental ili SAX-40, koji je u početku bio zamišljen da ostvari suštinsku redukciju buke, ispostavilo da se odlikuje značajno smanjenom potrošnjom, čak do 25 % u odnosu na sadašnje putničke avione. U odnosu na 124 PM/G kod Boinga 777, SAX-40 ima 101, što

znači smanjenje od 23 %. Radi poređenja, Toyota Prius hibridni automobil na gradskom autoputu ima 96 PM/G (putnik-milja po US galonu, (3,785 l.) koji se razlikuje od britanskog (4.55 l)). Predviđa se dodatno poboljšanje efikasnosti ako se projektovanje usmeri u pravcu minimizacije potrošnje i emisije [49].

Efikasan oblik avionskog trupa, širokog sa blagim prelazima u krila, pruža dodatni uzgon, povoljan u uslovima krstarenja, poboljšavajući parametar odnosa [(Mahov broj) x (uzgon/otpor)] za čitavih 15 % u odnosu na postojeće avione mešovite konstrukcije krila-trup, te time poboljšava letne osobine na niskim brzinama graničnog uzgona, čak do 25 % u odnosu na današnje avione. Procenjuje se da nivo buke u naseljima neće prelaziti 63 dBA za tipične letove, što je uporedivo sa ambijentalnom bukom u urbanom okruženju tokom dana [49].

Za vozove čije brzine prelaze u područje iznad 300 km/h neki drugi aspekti energetske efikasnosti dolaze do izražaja. Oni su uglavnom povezani sa geometrijom pruge i otporom vazduha.

U ovom smislu, VUVB predstavlja avion na zemlji, a po komforu i više od toga. Svojim superiornim komforom VUVB upravo kompenzuje razliku u brzini u odnosu na avion. Tako npr. krstareća brzina aviona iz serije Erbas A320 je Mach 0,78 (829 km/h), a MMO (eng. Maximum operation Mach number) Mach 0,82 (871 km/h) [50] dok je kod serije Erbas A380 MMO M0,89 (945 km/h) [51]. Za razmatranje pitanja komfora konsultovati [52] i [53]. Naravno da ove odnose brzina ne bi trebalo posmatrati linearno. Činjenica da su aerodromi najčešće prilično udaljeni od šireg jezgra grada i da je potreban dodatni prevoz, često upravo železnicom, pomera ove odnose u korist V(U)VB.

Saobraćajna efikasnost VVB se posebno ispoljava kroz poređenje sa drugim sredstvima transporta – tabela 5.

Tabela 5. Udeo modova putničkog transporta pre i posle uvođenja VVB (%)³

(%)	VVB	Automobil	Autobus	Avion
P-B	24/50	61/43	8/5	7/2
M-S	33/84	67/16	///	///

³ na relacijama Pariz–Brisel (320 km/1,25 h) i Madrid–Sevilja (471 km / 2,15 h) [15]

3.1. Geometrija pruge i efikasnost

Trajektorija pruge predstavlja kompromis između topografije terena i transportnih osobnosti železnice. Osnovne značajke tog kompromisa su: gradijent (nagib), horizontalna i vertikalna krivina, kant (nadvišenje), kao jednodimenzionalne veličine, i komfor putnika [54] kao veoma kompleksna veličina, koja se u smislu veze se ovim parametrima i svodi na svoj mehanički aspekt - ubrzanje. Treba istaći da su svi ovi parametri međusobno tesno povezani. Posredno sa tim u vezi je i energetska efikasnost kretanja voza. Ubrzanje, posmatrano po svim stepenima slobode pomeranja putnika, jedan je od osnovnih parametara komfora putnika.

Avion navedenom brzinom može da leti pravolinijski i da leteći u slobodnom prostoru pravi zaokrete vrlo male krivine tako da putnici ne osećaju praktično nikakvo ubrzanje (isključujući ono pri poletanju i pri turbulencijama). Ostvariti pravolinijsku prugu je praktično nemoguće zbog neravnomernosti u reljefu.

VVB mora da održava brzinu što konstantnijom, posebno na krivim sekcijama trajektorije pruge. Da bi dostigao komfor koji prevazilazi avionski, VVB mora da se kreće vrlo glatko, sa podnošljivim ubrzanjima. Zato se železnička trasa mora vrlo pažljivo planirati i graditi.

Drugi razlog održavanja što konstantnije brzine VVB je minimizovanje potrošnje energije na ubrzanja voza posle krivih sekcija trajektorije pruge između destinacija, na kojoj je predviđeno tek nekoliko zaustavljanja [55].

Zato pruga mora imati odgovarajuće vrednosti kako nagiba, bilo pozitivnog ili negativnog, tako i krivine, kako horizontalne tako i vertikalne. To se najbolje može predstaviti poređenjem trase pruga za različite brzine (Sl. 5) [54]. Trasa sporije pruge doslednije prati konfiguraciju terena idući za dozvoljenim minimumom krivina radi smanjenja troškova izgradnje. Brza pruga ima svoje vrednosti krivina, određene komforom putnika, i ona, figurativno rečeno, mora da prilagodi teren svojoj geometriji.

Idealan slučaj ravne i prave pruge se retko kad može postići usled terenskih uslova. Drugim rečima, na neravnom terenu takva dispozicija

pruge je veoma skupa i predstavlja niz mostova i tunela. Kompromis je trajektorija sastavljena od pravolinijskih i krivih sekcija, pri čemu radijusi krivina moraju da imaju pogodne vrednosti, što zavisi od maksimalne brzine planirane za pojedine sekcije [56].

Dobar primer za to je brza pruga (250 km/h) između Ankare i Instanbula, čija deonica od 158 km je izvedena na veoma kompleksnom terenu, sa 33 vijadukta (ukupne dužine 10,3 km) i 39 tunela (ukupne dužine 39 km), i troškovima izgradnje od 2,27 milijardi USD [57-60].

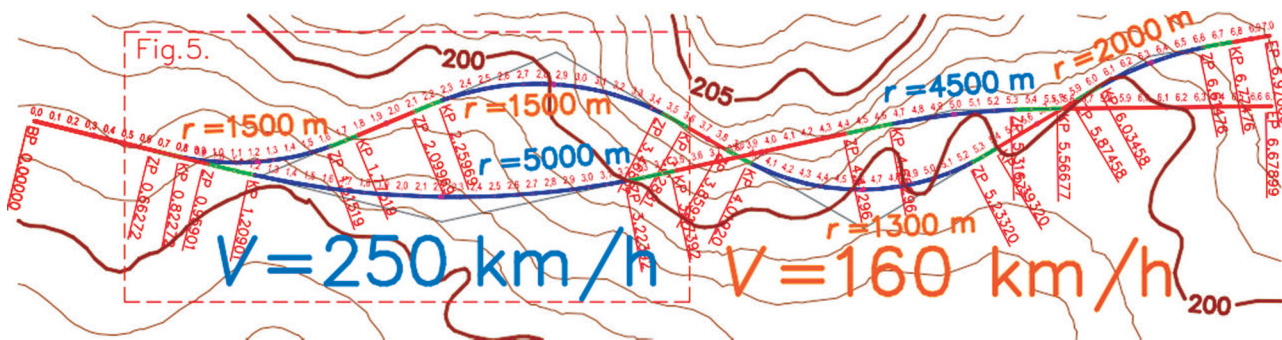
Cene gradnje sistema brzih pruga u Evropi prosečno iznose 12-30 M EUR po 1 km nove pruge, bolje rečeno trase, a njenog održavanja 70.000 EUR po 1 km godišnje. Naravno da sistem brze pruge uključuje i VVB, kao pokretni deo linije VB, koji predstavlja skupi deo sistema, sa prosečnom cenom 20-25 M EUR (vozni sastav sa 350 mesta), a njegovo održavanje košta 2 EUR/km, pa uzimajući prosečno pređenih 500.000 km godišnje dolazimo do 1M EUR [15].

Radijus krivine, koja izaziva lateralno ubrzanje, kompleksan je faktor u vezi sa komforom putnika, mogućim pomeranjem tereta u vagonima, rizikom od prevrtanja i iskliznuća ili sa labavljenjem spojeva šina-prag, što se sve može umanjiti pravilnim kombinovanjem krivine i kanta. Ukoliko je saobraćaj mešoviti (VVB i teretni), što je čest slučaj zbog ekonomičnosti, parametri koloseka nisu optimalni što prouzrokuje narušavanje komfora putnika na zastojima i pri niskim brzinama, ali i rizik od iskliznuća teretnih vozova zbog visokog kanta.

Različiti su uslovi za projektovanje koloseka u slučaju (a) vozova svih tipova (uključujući teške teretne vozove), (b) VVB i lake teretne vozove i (c) samo VVB (putnički, laki ekspresni za prevoz robe i pošiljaka).

Što je viša brzina to su stroži projektantski kriterijumi za geometriju koloseka, a takođe i za deformacionu otpornost donjeg postroja [54].

Velike brzine, a sa njima i velike mase, uz poštovanje putnicima tolerantnog ubrzanja/usporjenja, donose sasvim nove vrednostu u eksploataciji. Tako VVB treba 10-20 km puta da bi ubrzao od 0 do 300



Slika 5. Izgled trajektorija pruge za brzine od 160 km/h i 250 km/h na istom koridoru jasno pokazuje potrebne radijuse krivina radi održavanja što konstantnije brzine [54].

km/h. Uobičajene dužine kočenja su: 1900 m za 200 km/h, 3100 za 250 km/h, 4700 m za 300 km/h, 5800 m za 330 km/h, 6700 m za 350 km/h [15].

Za teške teretne vozove najveći dozvoljeni gradijent je 10‰, ili 12,5‰ ukoliko srednja vrednost gradijenta ne prelazi 10‰ duž svakog kilometra.

Sledeći parametar, blizak gradijentu, jeste vertikalna krivina, kojom se ostvaruje postepeni prelaz između sukcesivnih gradijenata u profilu pruge. Pri većoj krivini (manjem poluprečniku) vertikalno ubrzanje na temenu krive može postati preveliko, posebno kod VVB, te izazvati iskliznuće, smanjiti marginu prema prevrtanju vozila pod dejstvom bočnog vetra ili pogoršati komfor putnika. Preporuke za horizontalne i vertikalne krivine su date u tabeli 6 [55], [61]. U ovim referencama se takođe mogu naći preporuke koje se primenjuju u Nemačkoj i Japanu. Dalje preporuke u vezi sa geometrijom koloseka se mogu naći u [62], [63]. Kant takođe zavisi od toga kakav se sistem vešanja primenjuje u železničkim vozilima: elastični ili sa pasivnim ili aktivnim naginjanjem.

Tabela 6. Preporučene i minimalne vrednosti za radijuse horizontalne i vertikalne krivine (u km)

Brzina [km/h]	200	250	280	300	330	350
Prep. hor. rad.	3,2	5,0	6,3	7,2	9,7	9,8
Min. hor. rad.	1,9	3,0	3,7	4,3	5,2	5,8
Prep. vert. rad.	17	26,5	33	38	46	52
Min. vert. rad.	6,4	10	12,5	14,5	17,5	19,6

Sistem naginjanja kola u krivinama umnogome može da nadomesti određenu veličinu krivine i kanta pruge te da time pruži isti osećaj komfora putniku pri kretanju voza većom brzinom po postojećim prugama, dakle onim koje su pravljene

za niže brzine. Pri tome se sistem naginjanja izvodi kao sistem sa uštedom energije.

Ukratko, VVB, figurativno posmatran kao avion koji „leti” po tlu, da bi konkurisao avionu koji leti konstantnom brzinom pravolinijski kroz prostor, mora takođe da se kreće što konstantnijom brzinom. S obzirom da konfiguracija terena redovno zahteva zakrivljene deonice, to se krivine moraju kombinovati sa kantom da bi se uticaj centrifugalne sile (tj. lateralnog ubrzanja) smanjio do podnošljivosti tako da putnik nema osećaj da tolikom brzinom putuje po krivini. Ovoj efekat se dodatno redukuje vagonima sa aktivnim naginjanjem. Osim što se sam sistem aktivnog naginjanja izvodi kao sistem sa uštedom energije ne treba izgubiti iz glavni faktor smanjenja potrošnje energije koji stoji u pozadini ovog sistema. Sa ovakvim sistemom VVB manje menja brzinu i time manje troši energiju na ubrzavanja posle prilagodnih usporenja pred krivinama.

Prediktivni sistem upravljanja aktivira naginjanje na određenoj daljini pre ulaska u krivinu, na osnovu podataka o trasi koji su prethodno smešteni u memoriji računara u vozilu, čime se eliminišu kašnjenja u reakciji sistema naginjanja tako da se vozilo naginje lagano i glatko.

Poređenjem prirodnog i kontrolisanog naginjanja jasno se uočava prednost ovog drugog jer se njime rešava pojava kašnjenja u naginjanju pri ulasku u krivinu tako da se vozilo može kretati većom brzinom u krivinama. To su potvrdila i ispitivanja izvedena u Japanskim železnicama pri čemu je ustanovljena vrednost indeksa komfora vožnje od 5 °/sec kao granice za prihvatljivi komfor putnika [64].

Kada se govori o brzjoj pruži, odnosno njenoj trasi, posebno u smislu sl. 5, mora se uzeti u obzir i smanjenje dužine pruge zbog smanjenja faktora meandriranja trajektorije u odnosu na dužinu koridora kojim ona ide. Kao pogodan pokazatelj može se upotrebiti tzv. sinusoidnost, koja se najčešće koristi u opisivanju meandriranja reka, ali i svih ostalih slučajeva sa sličnom geometrijom, kao odnos dužina stvarne putanje i najkraćeg rastojanja između dve tačke [65, 66].

Što je brzina pruge viša to je njena sinusoidnost manja. Građenjem novih, brzih, pruga uz postojeće, znatno se skraćuje dužina pruge, te time i cena njene izgradnje. Procenti skraćivanja se kreću u širokom rasponu (15–70 %), što zavisi od mnogih faktora. U tome ne treba prevideti faktor smanjenja potrošnje energije, i to u mnogim aspektima eksploatacije brzih železnica.

Promena geometrije pruge usled njenog ubrzanja skriva još jedan značajan faktor uštede, koji možda nema toliko izraženu neposrednu vezu sa energetsom efikasnošću ali i te kako ima sa ekologijom i ukupnim uštedama pri izgradnji brzih pruga. To je tzv. građevinski zahvat zemljišta. Poređenje se auto-putem jasno pokazuje prednosti brzih pruga tabela 7 [15].

Tabela 7. Upporedni parametri auto-puta i dvokolosečne pruge

	Auto-put 2x3 trake	Brza pruga 2 koloseka
Širina saobraćajnice	75 m	25 m
Kapacitet prevoznog sredstva	1,7 putnika/auto	666 putnika/voz
Intenzitet prometa	4500 auto/h	12 voz/h
Transportni kapacitet	2x7650 putnika/h	2x8000 putnika/h

3.2 Aerodinamika VVB i efikasnost

Čak do 60 % od vučne sile može se potrošiti na otpor vazduha i trenje. Aerodinamičnost voza mora takođe pružiti i stabilnost na bočni vetar, koja se smanjuje kako brzina raste.

Današnji inženjeri (npr. Bombardier) svoje napore koncentrišu na četiri osnovna područja: čeonu vozilo sa aerodinamičnim nosom; gornji i donji spojleri na vagonima; vetrobrani za pantografe; aerodinamički štitnici oko kolišta, između kola

i prostor ispod kola. Smanjenje otpora za 25 % rezultovalo je padom potrošnje energije za 15 %, ali i redukovalo opterećenje vetrom na čeonu vozilo toliko da je omogućilo izbacivanje 5 do 7 tona tereta koji je služio samo kao balast za stabilnost. Aerodinamičko pokrivanje opreme montirane na krovu ne samo da smanjuje ukupni otpor već takođe ublažava „sonične praskove“, koje otkrivena krovna oprema može izazvati kada vozovi ulaze u tunele. Glatkiji krovovi vozila takođe smanjuju celokupnu spoljašnju buku i šum (npr. VVB na 300 km/h stvara 91 dB(A) buke). U unutrašnjosti, putnici su izloženi buci od samo 72 dB(A) zahvaljujući apsorpcionim oblogama [6]. Buci koju stvaraju VVB posvećuje se velika pažnja u istraživanjima [67, 68].

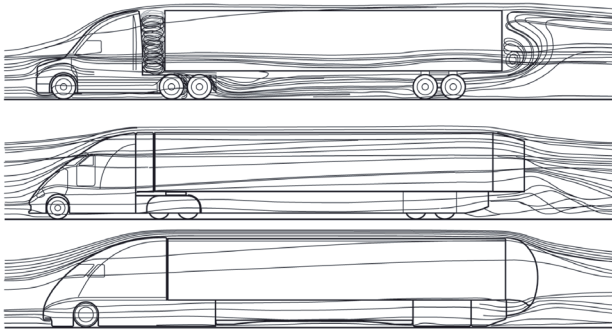
Dugogodišnja istraživanja (Hitači) rezultovala su u efikasnim aerodinamičkim rešenjima produženog nosa vodećih kola koji svojim oblikom redukuje talase pritiska u tunelima (npr. VVB Fastech 360S). Kolišta su potpuno pokrivena aerodinamičkim panelima, dok je buka voza smanjena glatkim stranicama voza sa apsorberima zvuka. Posebna pažnja je posvećena pantografima koji se smeštaju u aerodinamičke kontejnere ili se ispred njih stavljaju štitnici, čime se smanjuje ne samo otpor vazduha već se značajno snižava nivo buke [69].

Ne samo veliki proizvođači kamiona, nego, zahvaljujući izvanrednim softverskim 3D vizualizacionim alatima, čak i mali proizvođači aerodinamičkih dodataka za postojeće kamione, veliku pažnju posvećuju poboljšanju aerodinamike teških kamiona, što ima direktne povoljne posledice na smanjenje potrošnje, efikasnost i pozitivan ekološki efekat (sl. 6) [70]. U tome ne možemo a da ne vidimo uticaj oblikovanja VVB.

Da bi se redukovao transfer energije vazduh/vetar na VVB moraju se rešiti tri fundamentalna problema aerodinamike V(U)VB.

Kretanje na otvorenom – VVB pri kretanju stvaraju osnovni otpor prekidima između kola i prekidom na kraju voza. Ne/linearni kovitlaci koji udaraju u kola stvaraju prelivanje vrtloga i nestabilnost oscilatornim povećavanjem pritiska u kontaktu točak-šina, kao i otpor kotrljanja.

Uticaj nadvožnjaka/podvožnjaka – VVB koji prilazi ili odlazi od nadvožnjaka/podvožnjaka



Slika 6. Oblačenje klasičnog teškog šlepera strukture [(1-2)-(2)] (gore) u aerodinamičke oplate⁴

stvara izraziti porast i pad pritiska. Formira se svojevrsni impuls pritiska, aerodinamički udar (sonični prasak) koji se prenosi na različite zahvatne tačke (aerodinamičke diskontinuitete) duž kompozicije (npr. razmake između kola) kako ova prolazi. Ovaj impuls inicira vibracije i oscilovanja koja se pronose čitavom dužinom voza preko spojeva među kolima.

Ulazi/izlazi tunela – Sličan prethodnom, aerodinamički impuls će se formirati i pri prilaženju voza ulazu u tunel, kao i pri izlasku iz njega. Međutim, pri ulasku voza u tunel pritisak vazduha ograničenog zidovima tunela naglo poraste, slično efektu klipa u cilindru. Pritisak u ovom talasu nastavlja da raste kao funkcija brzine, dužine tunela i njegovih ventilacionih mogućnosti sve dok njegova brzina ne opadne pri približavanju izlasku iz tunela a sa njom naglo opadne i pritisak [71]. Tom značajnom efektu koji izaziva i aerodinamički poremećaj i nagli porast otpora vazduha (u tunelu) istraživači i inženjeri posvećuju veliku pažnju [72–74].

4. DISKUSIJA

Brzi, sigurni, pouzdani i komforni VVB i VUVB danas konkurišu avio-prevozu kao jedan efikasan vid transporta na velikim distancama. VUVB sa brzinama sve do 380 km/h postaju uobičajena pojava.

Čak i velikom vučnom silom, pa bila ona raspodeljena na mnogo osovina, ne može se pokrenuti veliki voz uz nagib ukoliko nema potrebnog trenja (led, mokro lišće itd.). Zato VVB nose suv pesak da bi se u takvim slučajevima

⁴ smanjuje otpor vazduha na 55% (sredina), a dodavanje zaobljenog zadnjeg kraja i potpuno pokrivanje prostora sa točkovima smanjuje silu otpora čak na 37%. Simulacioni 3D softver jasno pokazuje generatore vrtloženja [70]

prosuo ispred pogonskih točkova i time povećao sile trenja, baš kao kod njihovih starih prethodnika.

Sastav VVB sadrži sva putnička kola kao i vodeća/ upravljačka kola, koja imaju aerodinamički nos kao vetrobran za malu kabinu mašinovođe. Ostatak prostora vodećih kola je uređen za putnike.

Redukovanje potrošnje energije implicira optimizaciju aerodinamičkog oblika vozila, čime se neizbežno susrećemo sa dva glavna suprotstavljena zahteva: najbolji oblici po pitanju otpora vazduha nemaju dobru stabilnost na bočni vetar i obrnuto. Takođe, veliki putnički kapacitet je u konfliktu sa optimalnim aerodinamičkim oblikom, pri čemu elegancija i funkcionalnost ne idu uvek ruku pod ruku. Korišćenjem multidisciplinarne i višekriterijumske optimizacione platforme za simulaciju, za VUVB klase 380 km/h, redukcijom otpora vazduha za 20 % ostvarilo se umanjeње potrošnje od oko 10 % [75], [77].

Železnički transport predstavlja konkretno rešenje za održivu mobilnost koja je ekološki povoljna. Smanjivanje aerodinamičkog otpora vozova znači povećanje energetske efikasnosti i dalju redukciju emisije CO₂.

Udeo pojedinih vidova transporta u ukupnoj emisiji CO₂ u tom sektoru u SAD 2005. godine, u iznosu od 6,5 t ekvivalenta/stanovnik ide potpuno na stranu drumskog saobraćaja: 5,70 drumskih vozila (automobili, motocikli i laki kamioni), 0,07 autobusi, 0,02 železnica, 0,70 avio saobraćaj. Zanimljivi su i uporedni podaci o intenzitetu CO₂ emisije za pojedina sredstva transporta, data u gramima CO₂ ekvivalenta po putnik-km: velika kola (šleperi, kamioni) (15 MpG) 312, dugi letovi (poslovna klasa) 296, srednja kola (25 MpG) 191, prosečni lokalni autobus (SAD) 185, motocikl (50 MpG) 153, dugi letovi (ekonomska klasa) 139, mala kola (automobil, manji kamion) (35 MpG) 138, električni auto (mreža SAD) 123, kratki letovi (ekonomik) 120, teška železnica (SAD) 119, hibridni auto (45 MpG) 118, skuter (80 MpG) 101, linijski autobus (SAD) 85, metro (Njujork) 50, električni auto (solarni) 43, školski autobus (SAD) 23, VVB Eurostar (Francuska) 20 [76]. Ovi podaci uključuju direktnu emisiju od sagorevanja goriva, indirektnu emisiju od proizvodnje goriva i emisiju od proizvodnje samih vozila. Pretpostavljeno je

prosečno putničko opterećenje vozila za svaku vrstu, 1,6 za automobile i 1 za motocikle. Potrošnja je, prema izvornoj referenci, data u MpG, miljama po US galonu. VVB Eurostar (E300) putuje od Pariza do Londona (492 km) za 2 h 15 min (300 km/h).

Ako ove podatke pogledamo s druge strane imamo: VVB 4, automobil 14 i avion 17 kg CO₂ na 100 putnik-km [15].

Vozila V(U)VB već tradicionalno se odlikuju linearnim formama radi smanjenja aerodinamičkog otpora, što je stil koji je pozajmljen iz projektovanja aviona. Ali VVB upravo jesu „avioni“ koji „lete“ po tlu. Uz to, postoji velika razlika u gustini vazduha na 10.000 m i pri tlu. Kretanje VVB, ili njegov prolazak, izaziva otpor i vrtloženje vazduha, uveliko pojačano samim prisustvom tla, sa velikim poremećajima oko nadvožnjaka i tunela, ali i ostalih objekata u blizini brzih pruga. Tome treba dodati vetar kao nelinearno opterećenje koje povećava nestabilnost vozila, uz povećanje otpora kotrljanja, potrošnju goriva i oštećenje/habanje točkova i šina. Kod VVB (>200 km/h) ovakva nestabilnost izaziva pojavu periodičnog prijanjanja oboda točkova na šine, prouzrokujući njihova skupa oštećenja u vidu neravnina.

Jedno od rešenja predstavlja postavljanje generatora vrtloga (GV) nepravilnog oblika, sa slučajnim rasporedom duž voza, kojima se redukuju sile otpora, formiranje štetnih harmonika, rezonancija i oštećenja prouzrokovanih naglim podizanjima pritiska od tunela [71]. Izduženi nos vodećeg vozila zahteva posebnu pažnju.

Nasumični rasporedi manjih GV na vrhu lokomotive (čeonog vozila) praćeni su progresivno većim GV sve do najvećeg preseka lokomotive. Manji GV-ovi remete početno stvaranje vrtložnog toka vazduha omogućavajući većim GV, montiranim niz struju, da nastave da podižu i odbijaju vrtloge. Dodatni GV, postavljeni nasumično duž krovova i strana kola, redukujuće bočne vrtloge i time smanjiti aerodinamički otpor. Ako uporedimo glatku aerodinamiku aviona sa opisanim rešenjima, postaje nam jasna veličina aerodinamičkog uticaja tla po kojem se VVB kreće.

Najveći izazov kod korišćenja pantografa za preuzimanje snage sa napojnog voda je održavanje njegovog kontakta u datom opsegu, bez prevelikog

trenja, ali sa dovoljnom silom kontakta kako bi se omogućio pouzdan električni spoj.

Drugo pitanje koje se tiče napojnog voda je situacija kada se zbog vremenskih uslova stvori led na voodovima. U tom slučaju voz angažuje dva pantografa (najčešće na vozu postoji njih nekoliko) gde vodeći skida led sa voda.

Suština VVB, a posebno VUVB, jeste njihova brzina, tj. trajanje putovanja. Neke od evropskih zemalja se razlikuju po razmaku šina od 1435 mm (iberijski 1668 mm, ruski 1520 mm) i po naponu napajanja EVP (1,5kVdc, 3 kVdc 15 kV 16,7 Hzac, 25 kV 50 Hzac) [78]. Gubljenje vremena na granicama država radi promene lokomotive (čeonog vozila) na drugi razmak i napon jednostavno anulira prednosti brze železnice. Međufunkcionalnost kroz granicu se postiže kompletima opreme za napajanje podešenim za različite napone i kolištima za različite razmake, postavljenim na istom vozu.

Ne postoji opšteprihvaćena definicija visoke brzine. Npr. Siemens koristi definicije Savezne železničke agencije SAD (U.S. Federal Railway Agency - FRA), koje predviđaju tri kategorije VVB: (1) <145 km/h; (2) 145–200 km/h; i (3) 200–350 km/h.

Za putovanje velikim brzinama, pruga mora biti u takvom stanju da prihvati veća opterećenja, a da pri tome omogući visoko ravnomernu i glatku vožnju uz eliminaciju vibracija.

Izvrstan komfor putnika je ključan faktor u projektovanju i proizvodnji ukoliko se hoće da VVB konkurišu avionima. Ubrzanja predstavljaju pri tome veoma bitan faktor: longitudinalno (oko 0,5 m/s², u toku vožnje, do 1 m/s², što je gornja granica u pogledu komfora putnika; kočiono usporenje je takođe oko 1 m/s²) i lateralno, na VB krivinama (200 km/h znači radijus krivine > 4,5 km, 350 km/h > 6,9 km, sa kantom od 150 mm).

Vozu VB sa dužinom od 428 m, ili 16 kola, sa masom od oko 1000 tona, koja uključuje 1200 putnika i njihov prtljag [17], koji se kreće brzinom od 320 km/h, potrebno je 3,86 km da bi se zaustavio (uz preporučeno usporenje u pogledu komfora putnika) (uporediti sa [15]). Vibracije i buka takođe predstavljaju značajne komponente komfora.

Služba za generalnu kontrolu i istragu Vlade SAD (U.S. Government Accountability Office) procenila je

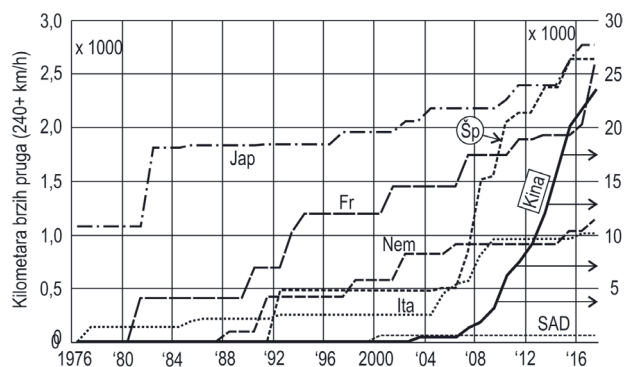
troškove izgradnje dvokolosečne brze pruge, takve da dopušta simultano kretanje vozova najvišom brzinom u oba smera, na 50 miliona USD po milji, koja varira u zavisnosti od vrste voza, terena (i drumske mreže).

Godišnji troškovi održavanja brzih pruga u jednoj studiji EU su procenjeni na 140.000 USD po milji, pri čemu u britanskoj studiji ta cifra iznosi 493.000 USD po milji. Sume su toliko visoke zato što se sa brzinom pruge inspekcija koloseka mora češće sprovoditi, uz uže tolerancije njegove geometrije. Ponovimo podatak o ceni održavanja brzih pruga u EU: 70.000 EUR po 1 km godišnje. Očigledno da i u ovom delu sistema ŽVB ima dosta prostora za optimizaciju, a time i uštede. Automatizacijom nadzora stanja svih najaktivnijih elemenata pruge VB (točkovi, šine/kolosek, zastor/postroj) omogućavaju se znatne uštede, a time i pravovremenska kontrola i intervencije. U tu svrhu služe tzv. Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity Tomography (ERT) za snimanje sastava i svojstava postroja pruge, ali i metode prepoznavanja oblika putem digitalne obrade slika, čime se može vršiti provera stanja zastora/koloseka i šina, zatim termooptičke metode provere stanja točkova itd. Svi ovi postupci podrazumevaju pokretne platforme na kojima se nalazi dotične oprema što omogućava brz pregled pruge [79–81].

5. ZAKLJUČAK

Vozovi (ultra)visoke brzine, zapravo brza železnica, predstavljaju veoma kompleksan sistem i tehnologiju usmerenu ka ostvarenju efikasnog transporta, u smislu vremena, koštanja (potrošnje energije i angažovanja infrastrukture) i komfora putnika, kako bi bila konkurentna avio-transportu, ali da pri tome očuva sve prednosti železničkog transporta (masovnosti i težine), a da prevlada u komforu. Konstantni naponi u prethodne dve decenije rezultovali su u sadašnjoj situaciji – pravoj eri brzih železnica. O tome svedoči i eksponencijalni porast dužine izgrađenih pruga VB (Sl. 7) [82].

Iako brze železnice obuhvataju mnoge podsisteme: infrastrukturu (građevinske radove, prugu, EVP), stanice (lokacija, funkcionalnost, oprema), vozni park (tehnologija, komfor, konstrukcija), upravljanje-eksploatacija (projektovanje i planiranje, kontrola, upravljanje), SS sisteme,



Slika 7. Tok rasta ukupne dužine pruga VB u svetu u navedenom periodu⁵

održavanje, marketing (korisnici, javnost), rukovođenje, pravnu regulativu, potrebno ih je tretirati kao jedinstven i celovit sistem, bez obzira koliko on bio kompleksan.

Suštinski je važno ne zanemariti bilo koju od ovih komponenata, uzeti ih istovremeno u razmatranje i osigurati da je svaka ispravno povezana sa ostalima, sve do naizgled takvih „sitnica“ poput npr. vremena koje korisnici njenih usluga troše pri kupovanju karata, načina na koji ulaze u stanicu ili koliko čekaju taksi po prispeću voza. Jer to vreme mora biti u potpunoj konzistenciji sa onim „glavnim“ vremenom koje je uštedela upravo osnovna odlika ovih železnica – njena brzina – koja je postignuta upotrebom visoke tehnologije i velikih ulaganja. Uštedeti čak i jedan minut doprinosi konkurentnosti.

Dalja istraživanja i eksploatacija ŽVB podrazumevaju detaljno poznavanje svih faktora koji određuju optimalna rešenja u svim njihovim aspektima. Faktori ne utiču na performanse ŽVB i VVB na poseban način već pre kombinovano, sinergično i korelativno. Zbog toga se moraju poznavati takve međurelacije između pomenutih faktora da bi se pronašla i osmislila još bolja rešenja. U tome vidimo značaj ovog rada.

Kao država, mi se ne pripremamo za projektovanje i proizvodnju VVB, mada za kooperaciju sa zemljama koje to uveliko rade svakako imamo potencijale, već pre svega za planiranje i učestvovanje u gradnji ŽVB, što uključuje topografiju naše zemlje. Zbog toga je neophodno dobro poznavanje sistema ŽVB,

⁵ Jap–Japan, Fr–Francuska, Šp–Španija, Nem–Nemačka, Ita–Italija i SAD, za koje važi leva skala. Za Kinu važi desna skala. Uzete su u obzir samo pruge sa brzinama većim od 240 km/h [82]

svakako ne na nivou razvojno-istraživačkih timova svetski vodećih proizvođača VVB, ali i da se ne bude mnogo iza njih u razumevanju svih faktora, kako kao posebnih elemenata tako i kao korelacionih kombinacija, a i načina na koji oni utiču i određuju funkcionisanje sistema ŽVB.

LITERATURA

- [1] *UNDP Human Development Report 2014, Sustaining Human Progress*
- [2] *ENERGY SAVINGS 2020 – How to triple the impact of energy saving policies in Europe*, September 2010.
- [3] *EU ENERGY IN FIGURES 2016*, Statistical pocketbook 2016
- [4] Hay, William W (1982). „*The economics of electrification*”. *Railroad engineering*. 1. New York: Wiley. p. 137.
- [5] <http://www.slideshare.net/utkarshsrivastav3/electric-traction-45321013>
- [6] <http://www.machinedesign.com/news/latest-high-speed-train-technology>
- [7] Krug A., Steam vs. Diesel (<http://www.railway-technical.com/trains/steam-vs-diesel.html>)
- [8] Rhodes J., Steam vs. Diesel: *A comparison of modern steam and diesel in the Class I railroad environment* (<http://www.internationalsteam.co.uk/trains/newsteam/modern50.htm>)
- [9] Takaishi T. et al., *Approach to High Efficiency Diesel and Gas Engines*, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. March 2008, 45 (1).
- [10] <https://www.allianz-pro-schiene.de/en/press/press-releases/2012-19-electric-transport-federal-government-still-has-homework-to-do/>
- [11] *Стратегија развоја железничког, друмског, водног, vazдушног и интермодалног транспорта у Републици Србији од 2008. до 2015. ГОДИНЕ*, „Службени гласник РС”, бр. 4/2008
- [12] *Energy consumption and CO2 emissions*, International Energy Agency, Paris 2015
- [13] *EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050*, European Commission, Publications Office of EU, July 2016
- [14] *Eurostat – Energy, transport and environment indicators*, Publications Office of EU, Luxembourg, 2016, Web ISBN 978-92-79-60137-8
- [15] *Green Initiative*, European Investment Bank, (<http://www.eib.org/projects/sectors/transport/index.htm>)
- [16] Кудинов И.А., Бондарев Н.Н., *Электровоз 4ЭС5К и эффект от его применения*, Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения, Но:1 (69), Год: 2015 Стр: 3–13. (Kudinov I.A., Bondarev N.N., *4ES5K electric locomotive and its exploitation effect*, OJSC VELNII)
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_locomotives
- [18] <https://www.scribd.com/doc/250463959/Elektricne-Lokomotive-Serije-441-1-Deo>
- [19] <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/high-speed-trains.html>
- [20] <http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/038fce86fdc0a3bcc12578730053b5>
- [21] *UK Department for Transport, Transport appraisal and strategic modelling (TASM) research reports and Rail network*, <https://www.gov.uk/government/publications/rail-demand-forecasting-estimation-study-phase-reports>, 21 April 2017
- [22] *Real Prospects for Energy Efficiency in the United States*, Chapter: 3 Energy Efficiency in Transportation, NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING, NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES, Washington, D.C. 2010 (<https://www.nap.edu/read/12621/chapter/1>)

- [23] Stodolsky, F., Gaines, L., *Railroad and locomotive technology roadmap*, (<https://www.osti.gov/scitech/biblio/925067>)
- [24] Peeters P.M., Middel J., Hoolhorst A., *Fuel efficiency of commercial aircraft: An overview of historical and future trends*, National Aerospace Laboratory NLR, November 2005
- [25] Mangan J., *Future of the Sea: Trends in the Transport of Goods by Sea*, UK Government Office for Science, August 2017
- [26] Gellings C. W., Parmenter K. E., *Energy Efficiency in Freight Transportation, EFFICIENT USE AND CONSERVATION OF ENERGY – Vol. II* - Encyclopedia of Life Support Systems
- [27] Rodrigue J-P., Comtois C., *Transportation and Energy* (<https://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch8en/conc8en/ch8c2en.html>)
- [28] Takaishi, Tatsuo; Numata, Akira; Nakano, Ryouji; Sakaguchi, Katsuhiko (March 2008). „*Approach to High Efficiency Diesel and Gas Engines*” (PDF). Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 45 (1). Retrieved 2011-02-04.
- [29] Kondo K., *Recent Energy Saving Technologies on Railway Traction Systems*, IEEJ Trans. 2010; vol. 5, p. 298–303
- [30] 30/28. <https://truecostblog.com/2010/05/27/fuel-efficiency-modes-of-transportation-ranked-by-mpg/>
- [31] <http://sia.planning.unc.edu/pages/courses/EnergyTransportationLandUse/Plan547fall14/TransportationEnergy/>
- [32] Molinski D., *How to Transport Oil More Safely – Each method – pipeline, rail, boat or truck – has its pros and cons*, Wall Street Journal, September 13, 2015
- [33] 33/31. <http://shrinkthatfootprint.com/shrink-your-travel-footprint> (CO2)
- [34] Bouwman, Mirjan E *An environmental assessment of the bicycle and other transport systems*, University of Groningen, Netherlands, 2000
- [35] https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_efficiency_in_transportation#Trains
- [36] Andersson, E., Lukaszewitz, P., *Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains*, Report KTH/AVE 2006, Stockholm
- [37] <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/propulsion-controls/products/traction-drives.html>
- [38] <http://new.abb.com/motors-generators/traction-motors-and-generators/traction-motors>
- [39] <http://www.justmeans.com/blogs/energy-efficient-train-travels-over-230-mph-wins-german-design-award>
- [40] https://ppiaf.org/sites/ppiaf.org/files/documents/toolkits/railways_toolkit/ch1_3.html
- [41] http://www.railway-research.org/IMG/pdf/c1_kalay_semih.pdf
- [42] <https://www.ihha.net/articles/the-35-tonne-heavy-axle-load-testing-continues-at-fast>
- [43] https://nl.dbcargo.com/file/rail-nederland-nl/8380580/VO43wppuWQelgyat3Ob5M_43YPg/5509816/data/freight_wagon_catalog_v2011.pdf
- [44] <http://www.bst-tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/rail/2009/r09t0092/r09t0092.asp>
- [45] https://en.wikipedia.org/wiki/Longest_trains
- [46] <https://novascotia.ca/just/regulations/regs/mvwd.htm>)
- [47] <http://shrinkthatfootprint.com/shrink-your-travel-footprint>
- [48] <http://www.bombardier.com/en/media/newsList/details.40976-bombardier-highlights-high-speed-expertise-at-seminar-in-china.bombardiercom.html>
- [49] Dowling, A., Greitzer, E., Hynes, T., Hileman, J., Spakovszky, Z., *The Silent Aircraft*, Aero-Astro, the annual report/magazine, 2006–2007 issue, MIT Aeronautics and Astronautics Department. © 2007 Massachusetts Institute of Technology

- (<http://web.mit.edu/aeroastro/news/magazine/aeroastro-no4/silentaircraft.html>)
- [50] <http://www.aircraft.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/>
- [51] <http://www.aircraft.airbus.com/comfort/>
- [52] <http://www.aircraft.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/>
- [53] Ed. M. Kingsley-Jones, M. Pilling, *A FLIGHT GROUP SPECIAL REPORT*, Reed Business Information Ltd, Quadrant House, Sutton, June 2005, (<https://www.flightglobal.com/assets/getasset.aspx?itemid=9139>)
- [54] Hodas, S., *Design of Railway Track for Speed and High-speed Railways*, Procedia Engineering, Vol. 91, 2014, pp. 256–261
- [55] M. Lindal, *Track geometry for high-speed railways*, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001
- [56] Vermeij, D. J., *Design of high speed track*, <http://heronjournal.nl/45-1/3.pdf>
- [57] Ankara-Istanbul High-Speed Train Project, Railway Technology (<http://www.railway-technology.com/projects/ankara-istanbul/>)
- [58] <http://turinsaat.com.tr/en/portfolio-item/ankara-istanbul-high-speed-rail-line-2nd-phase-displacement-works-of-conventional-rail-lines-line-8-between-vezirhan-inonusection-2-karakoy-bozuyuk-stations/>
- [59] https://www.researchgate.net/publication/26541314_Evaluation_of_Ankara_-_Istanbul_high_speed_train_project
- [60] Akgungor, A., A., Demirel, A., *Evaluation of Ankara – Istanbul high speed train project*, TRANSPORT – 2007, Vol XXII, No 1, I a–I c, January 2007.
- [61] Banverket, *Spargeometrihandboken (Track geometry handbook)*, BVH 586.40, Banverket, Borlänge, 1996.
- [62] Bugarín, M., Orro, A., Novales, M., *Geometry of High-Speed Turnouts*, <http://trrjournalonline.trb.org/doi/pdf/10.3141/2261-08>
- [63] Lautala, P., Dick, T., *Railway Alignment Design and Geometry*, <http://www.engr.uky.edu/~jrose/RailwayIntro/Modules/Module%206%20Railway%20Alignment%20Design%20and%20Geometry%20REES%202010.pdf>
- [64] http://www.hitachi-rail.com/products/rolling_stock/tilting/index.html
- [65] Esther C. E. et al, *Coevolution of width and sinuosity in meandering rivers*, Journal of Fluid Mechanics, 760, 127–174.
- [66] Dey, S., *Fluvial Hydrodynamics – Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena*, Ch. 9 Fluvial Processes: Meandering and Braiding, p. 529-562, Springer 2014.
- [67] Ed. Krylov, V. V., *Noise and Vibration from High-speed Trains*, Tomas Telford Publ., London 2001.
- [68] *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise*, Munich, Germany, September 2007, Burkhard Schulte-Werning et al (Eds.), Springer Science & Business Media, 2008
- [69] Iwayama, T., *Innovation and Advanced Technology - High Speed Train - („Shinkansen“)*, Presented at XIV Brazil-Japan Joint Economic Committee Meeting, Salvador, Brazil, August 2011 (<https://www.slideshare.net/SistemaFIEB/innovation-and-advanced-technology-high-speed-train-hitachi-brasil-ltda>)
- [70] http://www.solidworks.com/sw/183_ENU_HTML.htm
- [71] <https://contest.techbriefs.com/2014/entries/automotive-transportation/4537>
- [72] Iida, M., Kikuchi, K., Fukuda, T., *Analysis and Experiment of Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel Entrance Hood* (https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmeb/49/3/49_3_761/_pdf)
- [73] Howe, M.S., *Design of a tunnel-entrance hood with multiple windows and variable cross-section*, Journal of Fluids and Structures,

Volume 17, Issue 8, July 2003, Pages 1111-1121

- [74] 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*, Volume 41, March 2014, Pages 62–73
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088677981300196X>)
- [75] www.esteco.com
- [76] <http://shrinkthatfootprint.com/shrink-your-travel-footprint>
- [77] <http://www.esteco.com/modelfrontier/bombardier-uses-modelfrontier-optimize-high-speed-trains>
- [78] https://en.wikipedia.org/wiki/Railway_electrification_system
- [79] <https://www.zetica.com/rail/index.htm>
- [80] <https://www.groundpenetratingradar.co.uk/methods.html>
- [81] Guerriera, M., Parlab, G., Celaurob, C., *Digital image analysis technique for measuring railway track defects and ballast gradation*, *Measurement*, Vol. 113, Jan. 2017, pp. 137–147.
- [82] <https://www.thetransportpolitic.com/2017/07/01/a-generational-failure-as-the-u-s-fantasizes-the-rest-of-the-world-builds-a-new-transport-system/>

(pristup do svih navedenih web adresa ostvaren u periodu 10.11.–8.12.2017.)