

UDK: 533.06:656.255:624.195(047)=861
COSATI: 20-04, 13-06, 13-13

Aerodinamički fenomeni koji se javljaju pri kretanju vozova kroz tunel

Mirjana Puharić, dipl.inž.¹⁾

Obrađeni su neki aerodinamički nestacionarni fenomeni, koji su se javili povećanjem brzine kretanja vozova u tunelima. Date su fluktuacije pritiska nastale kao posledica udarnih talasa i refleksije udarnih talasa o zidove tunela, merenih na zidovima tunela i na vozu, kao i unutar voza. Obrađena je i pojava „sonic boom” efekta i mere za njegovo otklanjanje.

Ključne reči: Vozovi velikih brzina, tuneli, „sonic boom” efekat.

Uvod

JOŠ krajem 19. veka projektantima vozova je jedna od glavnih preokupacija bila smanjenje ukupnog otpora voza radi poboljšanja performansi vuče (s obzirom na ograničenu snagu lokomotiva na paru) i redukcije potrošnje energije.

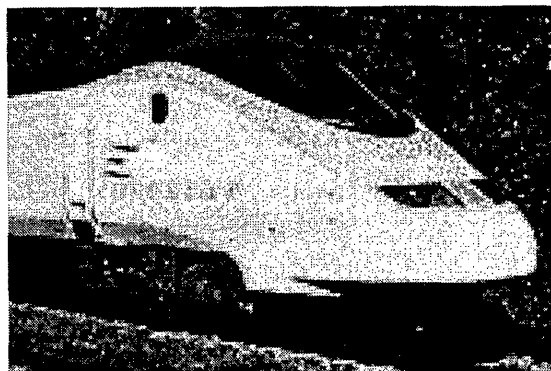
Aerodinamički otpor, kao jedna od komponenata ukupnog otpora, postaje prvorazredan sa povećanjem brzine vozova. Aerodinamičari koji su se bavili automobilima, a naročito avionima, našli su se u situaciji koja je za njih bila neuobičajena. Prvi razlog za to je bila velika dužina voza. Odnos dužine i širine automobila je 2.5 do 2.7, a kod železničkih vozila je 6 ili 7. Za kompoziciju, koja se sastoji od više vagona, ta vrednost doseže često 50, 100, pa i više. Koeficijent aerodinamičkog otpora za avione i automobile se daje u odnosu na površinu poprečnog preseka, što bi za železničku kompoziciju bilo neprirodno. Aerodinamički otpor kod železničkih vozila se daje u odnosu na dužinu kompozicije ili u odnosu na broj kola.

Osim toga, železničke kompozicije zbog komoditeta eksploatacije, moraju se kretati podjednako u oba smera. Ovaj problem ne postoji kod aviona, a kod automobila se pri kretanju unatrag ne traži aerodinamički kvalitet. Voz se kreće konstantno u prisustvu tla, susedne instalacije i osoba koje se kreću u blizini pruge, kao i kroz tunele, što je takođe bila novina za aerodinamičare.

Značajniji problemi nastali povećanjem brzina kretanja vozila

Jedan od značajnih problema koji se javio povećanjem brzine kretanja veza je nestacionarni fenomen vezan za efekat pritiska vazduha, tj. udarnog talasa pri mimoilaženju vozova na otvorenoj pruzi i pri prolasku kroz tunel, bez i sa mimoilaženjem. Promena pritiska u tim slučajevima izaziva zamor stakala prozora i vrata, kao i dodatna opterećenja konstrukcije. Mimoilaženje vozova u tunelu izaziva promene pritiska na bubnoj opni putnika, koja može biti neugodna. Specijalni oblici tunela mogu smanjiti snagu udarnog talasa koji stvara voz i na taj način poboljšati komfor putni-

ka. Rezultat prvih istraživanja je nosni profil voza *Eurostar*, koji je optimiziran za kretanje kroz tunel La Manš.



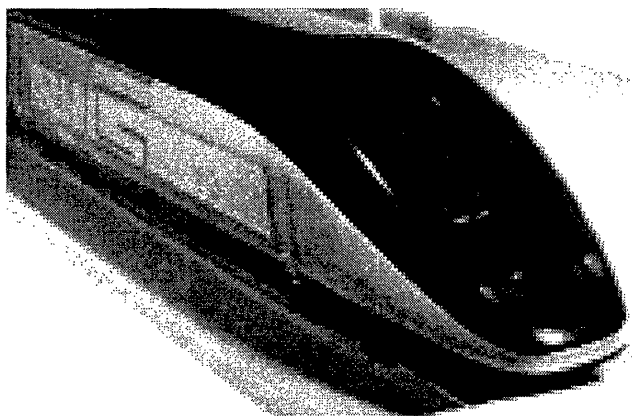
Slika 1. TGV Eurostar

Visoki zahtevi komfora putnika su usloveli razvijanje zaptivenih vozila, a u postojećim putničkim vagonima razvijanje uklopnih elemenata koji omogućavaju naknadno zaptivanje. Udarni talas, nastao kretanjem voza velikih brzina, podnose ulazni portali tunela (portal je zamišljena linija gde počinje ili završava tunel i građevina na ulazu ili izlazu iz tunela), bliske instalacije i tela malih dimenzija koje se nalaze u blizini pruge.

U novije vreme većina zbivanja u istraživanju i razvoju u oblasti TGV* se dešava oko novog francuskog programa vozova velikih brzina - TGV NG (Nouvelle Generation).

Nova istraživanja su pokrenuta na osnovu velikobrzinskih testova izvedenih 1989. i 1990. god., koji su pokazali da bi bilo korisno istražiti mogućnost primene vozova brzina 350 km/h i 400 km/h. Zvaničan projekat, na čijem su čelu *SNCF* i *GEC-Alsthom* (glavni nosioci ugovora za TGV), stupio je na scenu 31. maja 1990. god., samo dve nedelje posle postizanja svetskog rekorda u brzini voza.

* (Train Grande Vitesse - Voz velikih brzina)



Slika 2. TGV NG (nova generacija)

Cena programa u prvih pet godina je bila 535 miliona francuskih franaka (oko 100 miliona dolara). Od te cifre 55% je obezbedio *GEC-Alstom*, 28% francuska vlada a 17% *SNCF*. Cilj programa je da se prototip pogonske grupe za TGV NG nađe na šinama do 2000. godine.

Pojedinačna vožnja voza kroz tunel

Kretanje voza kroz tunel spada u domen nestacionarne aerodinamike. Za takve slučajeve potrebno je precizirati interakciju između voza i njegove okoline. Prostor između zidova tunela i voza nije velik, usled čega voz istiskuje deo vazduha, a ostatak vazduha ga opstrujava. Brzina vazduha se povećava i raste trenje po površini voza. Između čeonog i repnog dela voza se pojavljuje dopunska razlika pritisaka izazvana trenjem, što povećava koeficijent otpora, a samim tim i otpor kretanja. Osim toga, u tunelima velikih dužina dopunska količina energije utrošena na savladavanje otpora kretanja pretvara se u kinetičku energiju vazduha, a kao rezultat toga u toplotnu energiju. Pored ovoga, dodavanje iz-

vora toplote (grejna tela u vozu) izaziva probleme povećanja temperature vazduha i problem odvođenja toplote.

Prva merenja pritisaka u realnim uslovima su izvedena na kompoziciji TGS u oktobru 1969. god., pri prolazu kroz tunel *Bachées* na liniji Paris-Bordo. Eksperimentalni voz sa gasnom turbinom TGS se kroz tunel kretao brzinom 190 km/h.

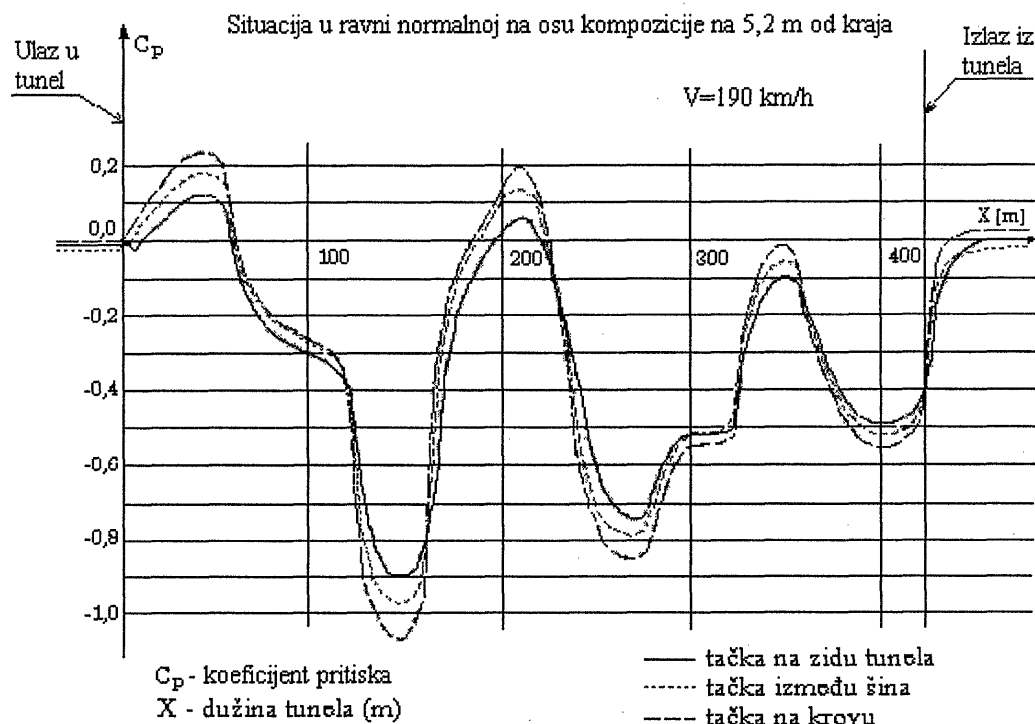
Merenje pritiska u tunelu pokazuje veoma značajne fluktuacije pritisaka nastale sukcesivnim refleksijama, sl.3.

Ulaženje i izlaženje voza iz tunela velikim brzinama praćeni su impulsnim prelaznim procesima, pri kojim se obrazuje serija talasa različitog pritiska, koji se u tunelu rasprostiru brzinom zvuka. Na ulazu nosnog dela voza dolazi do sabijanja vazduha, a na izlazu nosnog dela i kraja voza do pada pritiska. Ti talasi se odbijaju od portala tunela i njihov znak se menja: talas povišenog pritiska postaje talas sniženog pritiska. Vazduh se, u ovom slučaju, ne može smatrati nekompresibilnim.

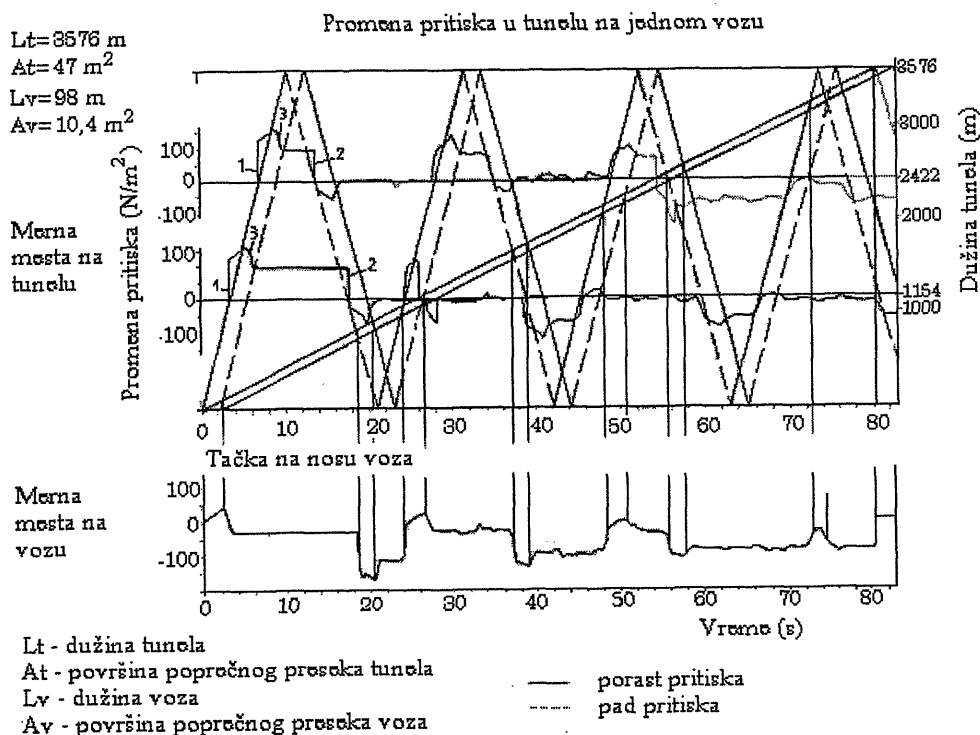
Primer pojedinačne vožnje voza kroz tunel je pokazan na sl.4. Na jednoj ordinati je data dužina tunela, a na drugoj pritisak. Na gornjem delu slike je prikazana promena pritiska merena u tunelu, a u donjem delu slike promena pritiska na vozu. Merna mesta na tunelu se nalaze na udaljenosti 1154 m i 2422 m od ulaznog portala, a na vozu na samom vrhu nosa voza.

U trenutku $t=0$, tj. trenutku kada vrh nosa voza dođe na ulazni portal tunela, on "ispušta" udarni talas koji dostiže brzinu zvuka i kreće se duž tunela. Ovaj udarni talas je na mernim mestima u tunelu prepoznatljiv po porastu pritiska (oznaka 1 na sl.4).

Na kraju tunela udarni talas se reflektuje i opet brzinom zvuka vraća prema ulaznom portalu. Na postojećim mernim mestima na tunelu taj povratni pritisak se registruje, a na dijagramu sl.4 je označen sa 2.



Slika 3. Promene pritisaka pri prolasku voza kroz tunel



Slika 4. Promene pritiska merene na tunelu i na vozu

Posle ulaska voza u tunel, usled vazdušnog trenja između voza i zida tunela, u celokupnoj dužini voza dolazi do povećanja pritiska koji nastaje kod kraja voza. U momentu kada zadnji deo voza prođe pored mernog mesta ni u tom poprečnom preseku tunela nema više zaprečavanja od strane voza, poprečni presek se proširuje, što uzrokuje smanjenje pritiska. To smanjenje pritiska se, takođe, brzinom zvuka kreće kroz tunel i na dijagramu sl.4 je označeno sa 3.

Kod kretanja voza kroz tunel, a naročito kod mimoilaženja vozova u tunelu, pri određenim odnosima površina poprečnog preseka voza i tunela, kao i pri aerodinamički nepovoljnim oblicima prednjeg dela voza, promene pritiska i pritisak struje vazduha u tunelu mogu toliko porasti da ugrožavaju zdravlje putnika. Zbog toga su standardima propisane granične mere pritiska koje ne smeju biti prekoračene. Kriterijumi promene pritiska u tunelima su propisani u svim zemljama u kojima cirkulišu vozovi velikih brzina, a ovde su dati neki:

Japanese Shin-Kansen:

- maksimalna promena pritiska: 1000 Pa
 - maksimalna stopa promene pritiska: 200 Pa/s
- Uslovi rada: brzina (210, 240 i 270) km/h, vozila hermetična i tunel dvokolosečni.

British Railway:

■ Međugradske linije

- maksimalna promena pritiska 3000 Pa za vreme 3 sekunde
- Uslovi rada: brzina 160 i 200 km/h, vozila nehermetična i tunel dvokolosečni.

■ Linija kroz tunel pod La Manšom

- maksimalna promena pritiska: 2000 Pa za vreme 4 sekunde u jednokolosečnom tunelu.

- maksimalna promena pritiska: 3500 Pa za vreme 4 sekunde u dvokolosečnom tunelu
- Uslovi rada: brzina 225-300 km/h i vozila nehermetična.

USA

- maksimalna promena pritiska: 700 Pa za vreme 1,7 sekundi
 - maksimalna stopa promene pritiska: 410 Pa/s
- Uslovi rada: mala brzina (80-100) km/h, vozila nehermetična.

DB NBS (nemačke nove linije)

Na nemačkim železnicama se primenjuje trostepena skala:

- maksimalna promena pritiska: 500 Pa za vreme 1 sekunde
- maksimalna promena pritiska: 800 Pa za vreme 3 sekunde
- maksimalna promena pritiska: 1000 Pa za vreme 10 sekundi

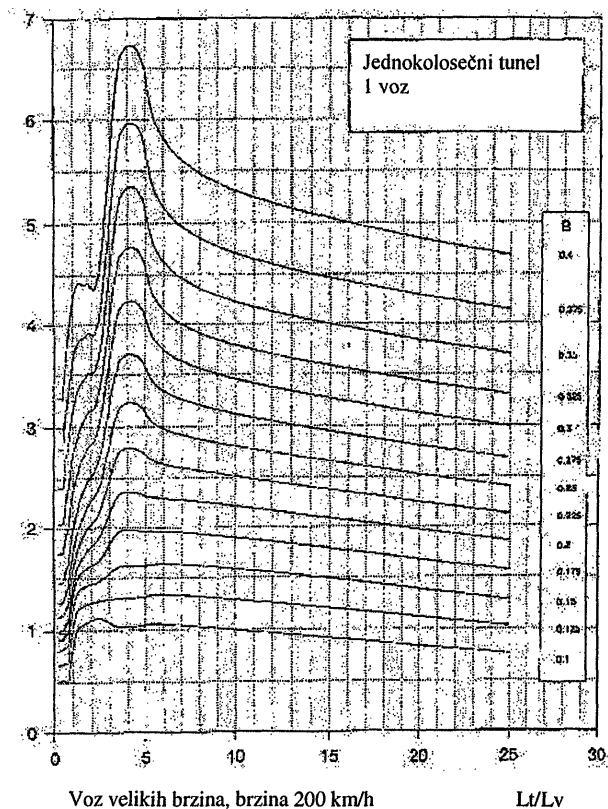
Uslovi rada: brzina (240 i 280) km/h, vozila hermetična i dugi tuneli.

Ove maksimalno dozvoljene promene pritiska se ne odnose na trenutne promene pritiska pri susretu vozova u dvokolosečnim tunelima, već samo za uslove pri pojedinačnim vožnjama i važe samo za česte prolaskе kroz tunel. Pri malim tunnelskim brojevima, tj. kada je učestanost vožnje manja, dozvoljeno je prekoračenje kriterijuma do 50 %.

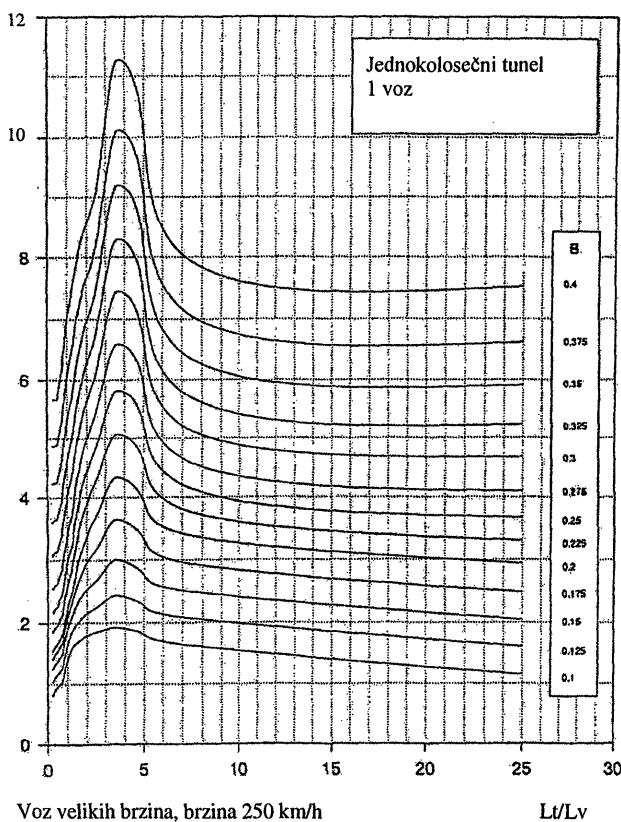
FS (italijanska železnica)

- maksimalna promena pritiska 1500 Pa
 - maksimalna stopa promene pritiska 500 Pa/s
- Uslovi rada: velika brzina, vozila hermetična i umerena veličina tunela.

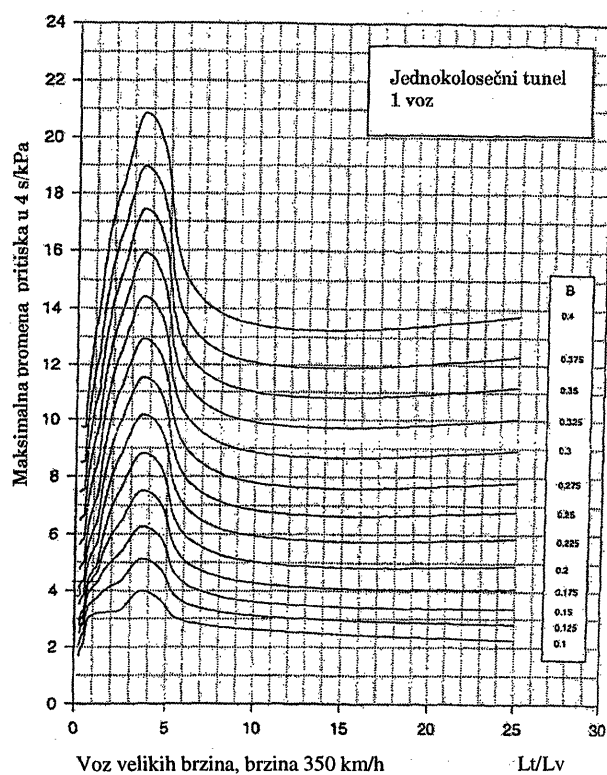
Na slikama 5, 6 i 7 su date zavisnosti propisanih graničnih pritisaka za jednokolosečni tunel, za brzine kretanja voza 200 km/h, 250 km/h i 350 km/h, respektivno.



Slika 5. Maksimalna promena pritiska u kPa za vreme 4 s, zavisno od odnosa dužine tunela i voza



Slika 6. Maksimalna promena pritiska u kPa za vreme 4 s, zavisno od odnosa dužine tunela i voza



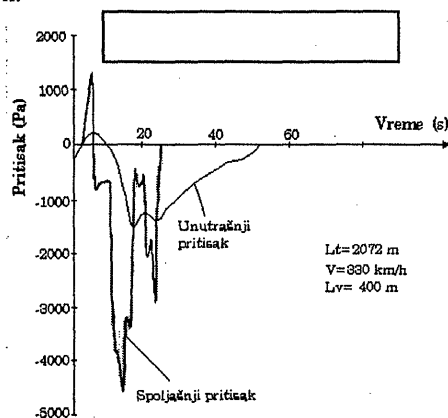
Slika 7. Maksimalna promena pritiska u kPa za vreme 4 s, zavisno od odnosa dužine tunela i voza

Na ordinati je data maksimalna promena pritiska u kPa za vreme 4 sekunde, a na apscisi je dat odnos dužine tunela i voza.

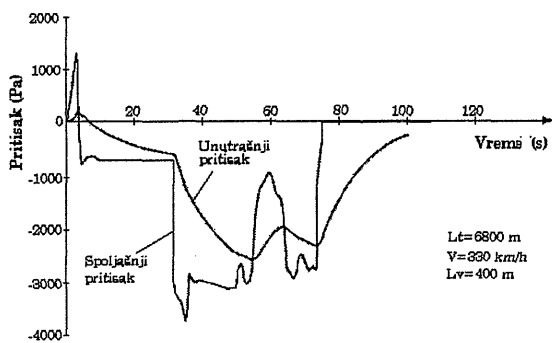
Ovi dijagrami mogu da posluže kao preporuka pri izgradnji tunela za određivanje poprečnog preseka tunela, zavisno od tipa i gabarita voza (dužina i površina poprečnog preseka), brzine kretanja voza kroz tunel i dozvoljenih pritisaka u tunelu.

B je odnos površine poprečnog preseka voza prema površini poprečnog preseka tunela, A_v/A_t .

Ispunjenje zahteva komfora putnika se ostvaruje izradom zaptivenih vozila. Kod zaptivenih vozila su zadovoljeni kriterijumi komfora putnika, ali je usled razlike između spoljašnjeg i unutrašnjeg pritiska visoko naprezanje strukture vozila. Zbog toga je za projektante merodavno opterećenje strukture kod vozila koja su zaptivena. Na slikama 8 i 9 su date raspodele unutrašnjeg i spoljašnjeg pritiska u kratkom i dugom tunelu, mereno na nemačkom vozu ICE 3 (Inter City Express), dužine 400 m, koji se kreće brzinom 330 km/h.



Slika 8. Raspodela unutrašnjeg i spoljašnjeg pritiska na vozu u kratkom tunelu



Slika 9. Raspedela unutrašnjeg i spoljašnjeg pritiska na vozu u dugom tunelu

Tunel pod La Manšom

Lokacija novih aerodinamičkih istraživanja poslednjih godina je tunel pod La Manšom. Ovaj tunel, koji je dug 52 km, sastoji se od dve galerije, sekcije kojom cirkulišu vozovi prečnika 6,58 m, udaljenosti između osa 30 m i jedne slobodne sekcije od 27 m², gde se nalazi kolosečna platforma, trotoar i različite ekipe. Na svakih 10 km te platforme su povezane spojnim kanalom. Pored ove dve galerije, postoji jedna galerija za servis, prečnika 4,5 m, smeštena između dve glavne galerije. U ovom tunelu cirkulišu teški vozovi i brzi vozovi, vučeni lokomotivom $\approx 6000 \text{ kW}$, koji služe za transport automobila a koji su sastavljeni od 30 vagona na dva sprata velikih gabarita. Problem koji se javlja u ovom tunelu je evakuacija toplote.

„Sonic boom” efekat ili tunelski prasak

Jedan od problema, koji se takođe javio sa povećanjem brzina kretanja vozova, je „sonic boom” efekat ili tunelski prasak. „Sonic boom” efekat je aerodinamičko-akustični fenomen koji može nastati ako šinsko vozilo velikom brzinom ulazi u tunel, pri čemu prema prilikama, talasni pritisak koji ide unapred toliko može uticati na voz, da stvori impuls (prirast) pritiska koji se prilikom izlaska iz izlaznog otvora (portala) manifestuje više ili manje glasnim prasakom. Da li će se prasak na izlaznom otvoru tunela javiti i kojim intenzitetom, zavisi od niza parametara.

Uopšte uzevši, „sonic boom” efekat se pojačava:

- porastom brzine voza na ulazu u tunel,
- smanjenjem površine poprečnog preseka tunela,
- povećanjem dužine tunela,
- povećanjem površine poprečnog preseka voza,
- izborom čvrste površine kolovoza i
- izradom relativno glatkih površina tunelskog zida bez naglih promena poprečnih preseka.

Na jačinu praska, pored napred pomenutih parametara, utiče i topografija. Uski prednji usek je nepovoljniji od otvorenog terena, kada voz izlazi u slobodan prostor. Jačina praska se smanjuje sa porastom rastojanja od izlaznog portala.

Na slabljenje „sonic boom” efekta utiče aerodinamički povoljan oblik prednjeg dela, tj. glave voza. Jedno slabo, ali ne sasvim nezatno, slabljenje efekta može da se postigne i izradom kosog (nagutog) ulaznog portala.

Kod evropskih železnica, gde su granični uslovi u tunelima relativno povoljni, naročito kod relativno većih površina poprečnih preseka i kada postoje promene poprečnog preseka tunela, kod kolovoza uređenih tucanikom i nagnu-

tih (kosih) portalnih završetaka, do sada se nisu javljali nikakvi problemi sa „sonic boom” fenomenom. U postojećim tunelima u svetu, zbog nemogućnosti proširivanja poprečnih preseka tunela i u planiranim budućim tunelima na novoizgrađenim deonicama, zbog predviđenih velikih brzina i izabranih čvrstih površina kolovoza (kao norme gradnje) može se očekivati pojava „sonic boom” efekta. Ovo se, pre svega, odnosi na jednokolosečne tunele, koji imaju znatno manje površine svetlosnog poprečnog preseka. Očekuje se da će se kod jednokolosečnih tunela na novoizgrađenim deonicama morati ukloniti ove pojave.

„Sonic boom” fenomeni su se do sada u velikom obimu javljali u tunelima na brzim prugama u Japanu, čija iskustva treba uzeti u obzir u gradnji budućih tunela na novoizgrađenim deonicama. Na japanskim brzim prugama za otklanjanje „sonic boom” fenomena, na temelju detaljnih istraživanja, na ulaznim portalima postojećih tunela grade se posebne proširene građevine određenih dimenzija i portalni završeci koji su nagnuti za najmanje 45° prema vertikali. Ove mere su se pokazale uspešne u otklanjanju „sonic boom” efekta.

Podaci za geometriju proširenih građevina

Prednji deo tunela mora da ima 1,5 puta veću svetlu površinu od poprečnog preseka tunela, koji je odmah iza nje. Pri tom se, nezavisno od oblika poprečnog preseka tunela, preporučuje da se izabere pravougaoni poprečni presek koji treba da odgovara tunelu koji dolazi posle toga.

U bočnim zidovima proširenih građevina moraju se predvideti otvori slični prozorima, tj. bočni zidovi ne smeju biti istovremeno potporni zidovi, već moraju imati dovoljan razmah da bi mogla da se stvori neometana otičuća struja vazduha radi smanjivanja gradijenta pritiska. Dimenzije otvora i njihov raspored se mogu odrediti eksperimentalno na gotovom objektu probnom vožnjom, tako da otvori mogu biti delimično zatvoreni.

Pored ovih proširenih građevina, moguće su i druge mere, čiji je način delovanja u kvalitativnom pogledu poznat u stručnim krugovima, ali čiji se uticaji još ne mogu odrediti (u nedostatku postojećih rezultata merenja). Radi se o lokalnim ograničenjima poprečnog preseka. To su sužavajuće građevine, tj. promena poprečnih preseka za razbijanje udarnog talasa. Kvantitativni uticaj ovih mera za smanjenje gradijenta pritiska, a s tim i smanjenje „sonic boom” efekta, treba ispitati prikladnim eksperimentima, a zatim analizirati. Ove sužavajuće građevine se bez velikih arhitektonskih troškova mogu primeniti kao dodatna ili dopunska mera za suzbijanje „sonic boom” efekta.

Kao jedna od pomoćnih mera primenjuje se i raspoređivanje apsorpcionih podloga na čvrstu podlogu. Apsorpcione podloge su podloge od sintetičkih materijala (guma). Stavljaju se na čvrstu podlogu i na zidove, a mogu služiti i kao zaštita gradske okoline od buke na pruži.

Zaključak

Prilikom kretanja voza velikih brzina kroz tunel, dolazi do pojave udarnih talasa koji se brzinom zvuka rasprostiru kroz tunel. Ti udarni talasi, i talasi koji se reflektuju o zidove tunela, izazivaju fluktuacije pritiska, koje bi u slučaju nehermetičnih vozila mogle da ugroze zdravlje putnika. Zbog toga su u svim zemljama u kojima cirkulišu vozovi velikih brzina propisani komfor-kriterijumi promene pritiska u tunelima.

Pri prolasku vozova velikih brzina kroz dugački tunel sa manjim poprečnim preseccima, sa čvrstim površinama kolo-

voza, sa glatkim tunelskim zidovima bez naglih promena poprečnog preseka, dolazi do pojave „sonic boom” efekta. Slabljenje ovog efekta se može postići aerodinamičkim oblikovanjem prednjeg dela voza, izradom nagnutih portalnih završetaka, izgradnjom proširenih građevina sa otvorima na bočnim zidovima, izradom sužavajućih građevina, tj. lokalnih ograničenja poprečnog preseka tunela, kao i primenom apsorpcionih podloga na čvrstu površinu kolovoza i na zidove tunela.

Literatura

- [1] BERNARD, M. L'Aérodynamique des trains. *Revue générale des chemins de fer*, februar 1971, p.80-96.
- [2] MARTY, P., AUTRUFFE, H.. Études aérodynamiques instationnaires liées à la circulation des trains à grande vitesse. *Revue générale des chemins de fer*, juni 1973, p.371-381.

- [3] LANCIEN, D. et al. L'aérodynamique de la grande vitesse en tunnels. *Revue générale des chemins de fer*, juli/avgust, 1987, no7/8.
- [4] L'aérodynamique de la grande vitesse et tunnels. seminar "Grande vitesse" (HGV -seminar), sekcija 5, Berlin, 12.-14. november 1990.
- [5] *Querschnittsgestaltung für Tunnel (Bestimmung der inneren Tragwerksbegrenzung)*. seminar, München, 15.10.1997.
- [6] *Ergebnisbericht zur Untersuchung des "Sonic Boom"-Phänomens auf HGV-Strecken - Maßnahmen zur Vermeidung des „Sonic Boom“*. seminar, München, 16.5.1997.
- [7] *Determination of Railway Tunnel Cross-Sectional Areas on the Basis of Aerodynamic Considerations*. International Union of Railways, 1.1.1995, vol.VII-779-11, p.1-117.

Rad primljen: 26.7.1999.god.