

# Ispitivanja brzih vlakova u podzvučnom zračnom tunelu

Mirjana PUHARIĆ<sup>1)</sup> i  
Živoslav ADAMOVIĆ<sup>2)</sup>

- 1) GOŠA Institut,  
Milana Rakića 35,  
11000 Beograd,  
Republic of Serbia
- 2) Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin",  
Đure Đakovića bb,  
23000 Zrenjanin,  
Republic of Serbia

miramo@neobee.net

## Ključne riječi

*Aerodinamika*  
*Diferencijalni davači tlaka*  
*Vlak velikih brzina*  
*Zračni tunel*

## Keywords

*Aerodynamic*  
*Differential pressure gauge*  
*High-speed train*  
*Wind tunnel*

Received (primljeno): 2007-04-25

Accepted (prihvaćeno): 2008-04-20

Izvornoznanstveni članak

U ovom su radu prikazani rezultati mjerenja raspodjele aerodinamičkih tlakova nastalih pri kretanju vlaka velikih brzina, s ciljem određivanja efekata lokalnih tlakova, koji izazivaju dodatna opterećenja oplata vlaka. Ovaj rad prikazuje rezultate eksperimentalnog istraživanja modela vlaka u zračnom tunelu. Ispitivanje je izvršeno u dvije faze. Prva faza je obuhvatila mjerenje raspodjele tlaka na modelu vlaka. Druga faza obuhvaća mjerenje raspodjele tlaka oko modela vlaka pomoću češlja s 10 sondi. Rezultati eksperimenta uspoređeni su s rezultatima raspodjele tlaka dobivenih numeričkom simulacijom.

## Research of High Speed Trains the Subsonic Wind Tunnel

Original scientific paper

This paper describes measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains. The focus for this study is to determine the localized effects such as potential damage to train's caot.

The paper presents the experimental researches of train models, carried out in subsonic wind tunnel.

The testing has been conducted in two stages. First stage contains measurement of the pressure distribution on the train. Second stage contains measurement of the pressure distribution in the area disturbance around the train using the rake with 10 tubes.

Results of the experiment are compared with the pressures predicted by computational fluid dynamics simulation.

## 1. Uvod

Vlak u kretanju pomiče sa sobom zrak i deformira sredinu kroz koju se kreće. Ako vlak napreduje konstantnom brzinom na otvorenoj pruzi tj. bez prisutnosti drugih vlakova ili objekata koji bi izazvali interakciju s vlakom koji se promatra, oblik strujanja je neovisan o vremenu i pojave su stacionarne.

Kada se vlak kreće brzinom koja nije konstantna ili kada je njegova neposredna okolina modificirana mimoilazećim vlakom ili nekom drugom preprekom duž pruge: pješak, vozilo, most, zgrada, tunel itd., strujanje zraka mijenja se s vremenom i pojave su nestacionarne. U ovom slučaju, treba odrediti interakciju između vlaka i njegove okoline i treba odrediti granice sigurnosti i komfora.

Analiza nestacionarnih fenomena može se svesti na stacionarne analize, podjelom vremena na intervale  $\Delta t$  koji su dovoljno mali. U okviru jednog vremenskog intervala pojava se promatra kao stacionarna [1,2].

## 2. Ekperimentalna ispitivanja aerodinamike vlakova velikih brzina

S povećanjem brzine vlakova aerodinamički otpor postaje prevladavajući, jer se mijenja s kvadratom brzine. Aerodinamički otpor direktno ovisi o aerodinamičkom obliku vlaka. Istraživanja u ovom području razlikuju se u odnosu na ispitivanja u automobilskoj industriji, zbog velike dužine vlaka. Dužina automobila je 2,5 do 2,7 puta veća od širine. Kod željezničkih vozila odnos dužine i širine je 6 ili 7, a za dugačke kompozicije 50, 100, pa i više. Koeficijent aerodinamičkog otpora se kod automobila i aviona daje u odnosu na površinu poprečnog presjeka, što bi za željezničku kompoziciju bilo neprilodno. Ovaj koeficijent se kod željezničkih kompozicija daje u odnosu na dužinu ili broj kola. Željezničke kompozicije se moraju kretati u oba smjera podjednako, što nije zahtjev koji se postavlja pred avion, a kod automobila se pri kretanju unatrag ne traži aerodinamička kvaliteta.

**Oznake/Symbols**

$C_p$	- koeficijent tlaka - pressure coefficient	$Re$	- Reynoldsov broj - Reynolds number
$P_0$	- zaustavni tlak, Pa - stagnation pressure	$T_0$	- zaustavna temperatura, K - stagnation temperature
$Pst_{rupica}$	- statički tlak s rupicama na modelu, Pa - static pressure on a hole on the model	$\beta$	- kut skretanja, ° - angles of deflection
$Pst_{PMS}$	- statički tlak primarnog mjernog, Pa sustava PMS - static pressure primary measurement system PMS	$M$	- Machov broj - Mach number
$\Delta p$	- razlika tlakova, Pa - pressure difference	$q$	- dinamički tlak zračne struje - dynamic pressure of air flow

Jedan od značajnih problema koji se javio s povećanjem brzine je nestacionarna pojava vezana za efekat tlaka zraka, tj. zračnih valova koji nastaju pri mimoilaženju vlakova na otvorenoj pruzi i pri prolasku kroz tunel, bez i sa mimoilaženjem. Promjena tlaka u tim slučajevima izaziva zamor stakala prozora i vrata, kao i dodatna opterećenja konstrukcije. Mimoilaženje vlakova u tunelu izaziva takve promjene tlaka, koje se prenose i na bubnjić u uhu putnika, što može biti neugodno. Specijalni oblici tunela mogu smanjiti snagu zračnog vala, koji stvara vlak i na taj način poboljšati komfor putnika. Kao rezultat prvih istraživanja proistekla je izmjena nosnog profila, razvijanje zabrtvljenih vozila, a u postojećim putničkim vagonima razvijanje uklopnih elemenata koji omogućavaju naknadno brtvljenje. Zračni val nastao

kretanjem vlaka velikih brzina, utječe na ulazne portale tunela, bliske instalacije i tijela malih dimenzija, koja se nalaze u blizini pruge [1,2].

Ispitivanja vlakova u aerodinamičkim tunelima obuhvaćaju: mjerenje čeonog otpora kompozicije, otpora cezura između vagona, momenata propinjanja i skretanja, momenta naginjanja vlaka, raspodjele tlaka u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini, tlaka na postolju vagona, odcjepljenja na udubljenjima vrata i prozora, dovođenja zraka rashladnim i ventilacijskim sustavima, ispuštanje zraka ventilatora električnih motora za vuču, ispuštanje zraka za hlađenje električnih kočnica, ispitivanje zračnih kočnica, kao i vizualizaciju strujanja pomoću dimne emisije i traka naljepljenih na površinu modela [3,4].



a)



b)

Slika 1. Različiti modeli vlakova za ispitivanja u zračnim tunelima [5]

Figure 1. Various train models for testing in wind tunnels [5]

Za potrebe ispitivanja aerodinamike vlakova konstruiraju se zračni tuneli s dugim radnim dijelom. Osnovni razlog postojanja ovih zračnih tunela je mjerenje aerodinamičkih sila na maketama vlakova i željezničke opreme. Na dijelu prilazne struje vrši se hrapavljenje površine pod radnog dijela zračnog tunela, kako bi se simulirali uvjeti bliski realnim. Preko tunelskog poda odgovarajuće hrapavosti, postiže se potrebna turbulencija prilazne struje. Za hrapavljenje poda zračnog tunela koriste se ravne ploče s kockama različitog poprečnog presjeka, žičane rešetke, ili drvene kockice određenog broja i dimenzija postavljene u unaprijed određenom rasporedu. Izolirana vožnja na otvorenoj pruzi može se smatrati stacionarnim strujanjem.

Kretanje vlaka u zračnom prostoru, izaziva stvaranje zona povišenog tlaka ispred vlaka, turbulentnog graničnog sloja duž vlaka pod djelovanjem trenja, pratećeg strujanja na bočnim zidovima vagona i iza vlaka. Strujanje oko kompozicije na otvorenoj pruzi, bilo da se radi o izoliranoj vožnji ili vožnji uz prisustvo prepreka ili mimoilazećeg vlaka, može se svrstati u nekompresibilno strujanje, što nije slučaj kod kretanja vlaka u tunelu.

Neophodno mjerilo izrade modela za ispitivanje je 1:20, kako bi se dobile dovoljno vjerne reprodukcije vozila i ispunjavanje uvjeta  $Re$  broja. Modeli mogu biti izrađeni od drveta, metala i drugih materijala, a izbor ovisi o namjeni, cijeni i opterećenju kojem će model biti izložen tijekom ispitivanja.

### 3. Eksperimentalna istraživanja aerodinamike vlakova velikih brzina provedena u VTI

Ispitivanje modela vlakova je izvršeno u podzvučnom zračnom tunelu T-35 VTI Beograd. Zračni tunel T-35 je zatvorenog tipa s radnim dijelom osmerokutnog poprečnog presjeka, širine 4,4 m, visine 3,2 m i površine 11,92 m<sup>2</sup>. Dužina radnog dijela je 9 metara, a radne sekcije 6 metara.

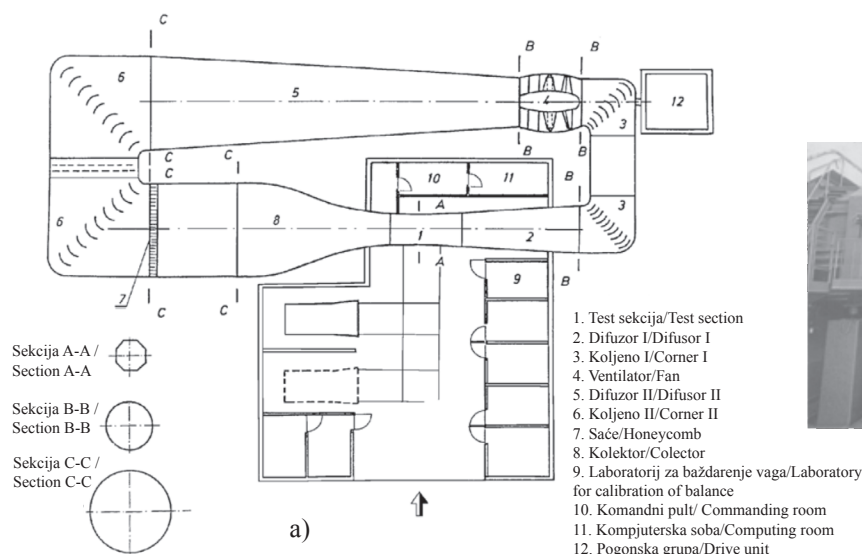
Opseg Machovih brojeva je od 0,1 do 0,6 sa ventilatorskim pogonom, i od 0,6 do 0,8 sa ventilatorom i injektorom. Reynoldsov broj je  $Re = 2,3 \cdot 10^6$ , a statički tlak od 1,0 do 1,52 bara. Vrijeme rada sa ventilatorom je neograničeno, a s injektorskim sustavom do 120 s.

Zračni tunel je opremljen opremom za mjerenje tlaka, temperature, aerodinamičkih sila, derivativa stabilnosti, opremom za vizualizaciju strujanja i LDA sustavom.

Cilj ispitivanja je određivanje raspodjele tlaka na modelu vlaka za brze pruge u konfiguraciji samostalne vožnje na otvorenoj pruzi. Ispitivanje je izvršeno u dvije faze:

- Mjerenje raspodjele tlaka na modelu vlaka za brze pruge,
- Mjerenje zone poremećaja oko vlaka u kretanju.

Na slici 2 je prikazana shema zračnog tunela T-35 i izgled test sekcije koji je korišten u ovom ispitivanju [5].



Slika 2. a) Shema zračnog tunela T-35 u VTI Beograd, b) test sekcija

Figure 2. a) The scheme of wind tunnel T-35 in MTI Belgrade, b) test section

### 3.1. Opis modela

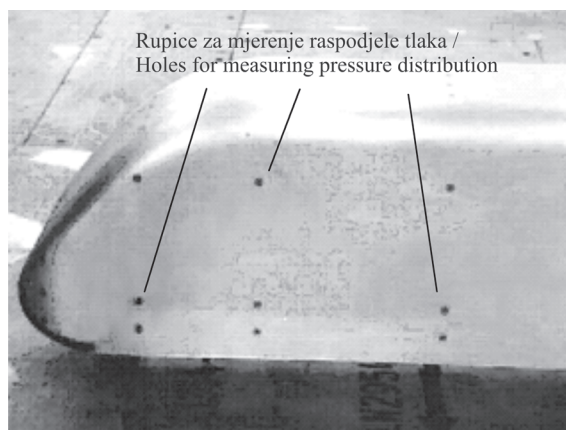
Za izvođenje ovog ispitivanja, projektiran je i izrađen model vlaka u mjerilu 1:20, prikazan na sl. 3. Model je izliven od durala i sastoji se od dvije lokomotive međusobno leđno spojene. Ukupna dužina modela je 2,056 m. Poprečni presjek je promjenjiv s maksimalnom širinom 0,15 m i maksimalnom visinom 0,18 m.

Otvori za mjerenje raspodjele tlaka po modelu su promjera 0,5 mm i povezani su s uređajem koji mjeri tlak. Ivice otvora su oštre, a os otvora je normalna na lokalnu površinu. Ovi zahtjevi su ispunjeni korištenjem metalnih čepova prikazanih na slici 3b, koji se postavljaju u unaprijed izbušen otvor na površini modela i lijepe se dvokomponentnim ljepilima. Na naslon čepa lijepi se metalna cjevčica na čijem drugom kraju je vezano

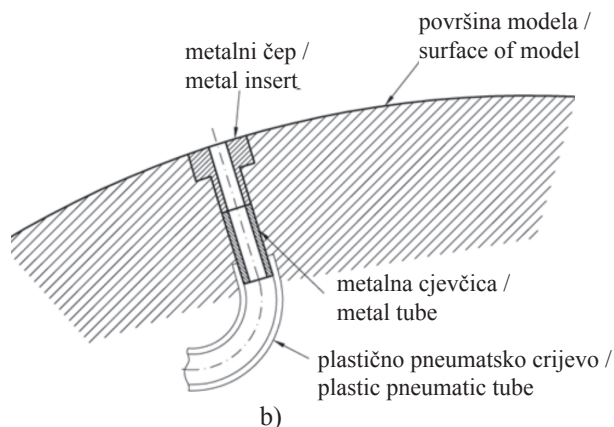
plastično pneumatsko crijevo, koje povezuje mjerno mjesto s davačem za mjerenje tlaka. Bušenje otvora za čep na zakrivljenim površinama, izvršeno je normalno na tangentu u toj točki.

U trupu modela vlaka je izrađen otvor za smještaj dvaju uređaja za multipleksiranje tlaka tipa Scanivalve. Plastična crijeva su povezana sa Scanivalve uređajem, odakle se tlak vodi do aktivne strane diferencijalnog davača tlaka.

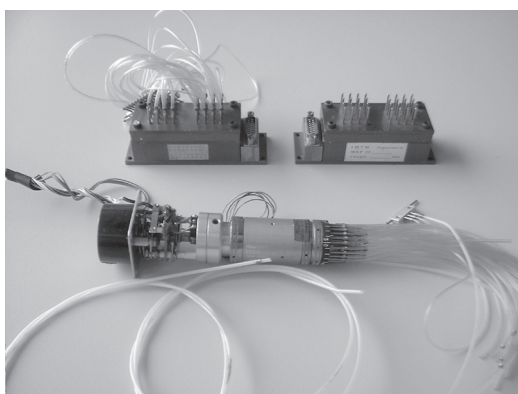
Model vlaka je postavljen na nosač, koji omogućava promjenu kuta klizanja  $\beta$ , odnosno simulaciju promjene pravca brzine. Nosač je montiran na visini 40 mm od platforme, koja simulira utjecaj tla na vlak. Na platformi su napravljena dva proreza, normalno na pravac strujanja, za odsisavanje graničnog sloja.



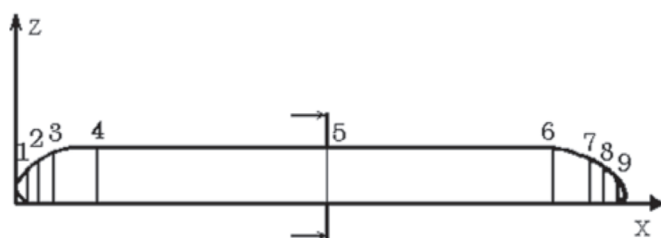
a)



b)



c)



Položaj mjernih točaka u presjeku 5 / Position of measuring points in the cross section 5

d)

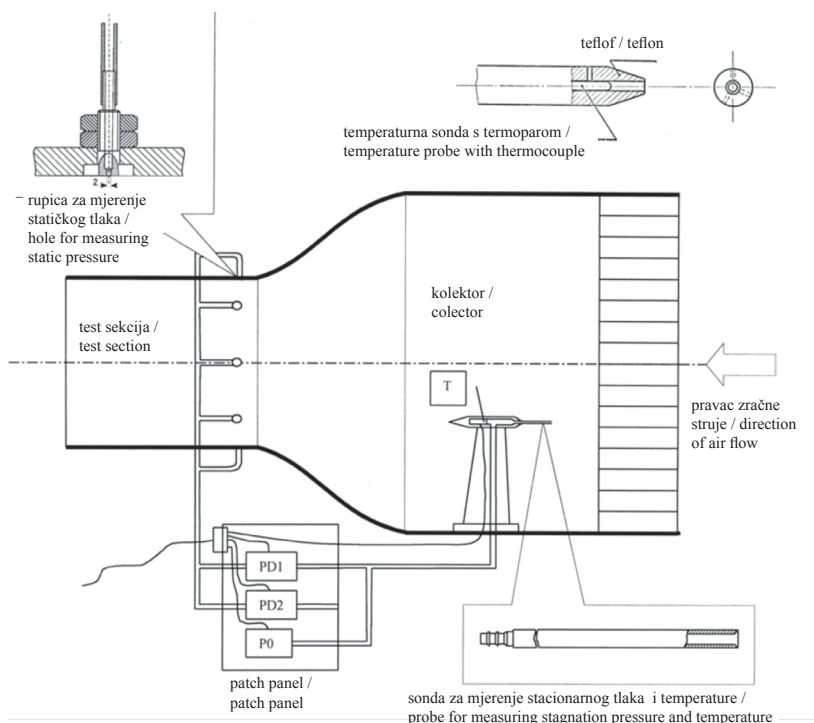
**Slika 3.** a) Model s rupicama za mjerenje raspodjele tlaka, b) tehničko rješenje izrade rupica za mjerenje raspodjele tlaka na površini modela, c) Scanivalve uređaj za multipleksiranje tlaka, d) koordinatni sustav, položaj mjernih presjeka i mjernih točaka na modelu

**Figure 3.** a) Model with holes for measuring pressure distribution, b) shape of the holes for measuring pressure distribution, c) pressure scanning system SCV, d) coordinate system, position of measuring sections and measuring points on the train

### 3.2. Opis eksperimenta

Ispitivanje u zračnom tunelu izvodi se u uvjetima kada je model fiksno postavljen u radni dio zračnog tunela, dok se kreće okolni zrak. Da bi tokom eksperimenta bili osigurani zahtijevani uvjeti brzine i temperature, projektiran je primarni mjerni sustav (PMS) koji mjeri sljedeće parametre:

- zaustavni tlak  $P_0$ ,
- zaustavnu temperaturu  $T_0$ ,
- razliku tlaka  $\Delta p = P_0 - P_s$ .



Slika 4. Davači primarnog mjernog sustava

Figure 4. Primary measurement system (PMS)

Instalacija PMS-a omogućava kvalitetno i točno mjerenje osnovnih parametara zračne struje u radnom dijelu. Zaustavni tlak  $P_0$  se mjeri neposredno iza saća, koje služi kao hladnjak i usmjerivač zraka. Sonda za zaustavni tlak prikazana na slici 4, dole desno, postavljena je na aerodinamički oblikovanoj nozi, zajedno sa sondom za mjerenje zaustavne temperature. Od sonde do patch panela u kome su smješteni davači, vodi pneumatski vod i tu se račva. Jedna grana ide direktno na davač apsolutnog tlaka tipa MENSOR, opsega do 1,65 bara, a druga grana na referentnu stranu jednog od tri diferencijalna davača tlaka različitog opsega, što ovisi o traženoj brzini za određeno ispitivanje. Na aktivnu stranu se dovodi statički tlak s rupica po obodu vijenca radnog dijela, lijevi gornji kut slike 4.

Tražena brzina za ovo ispitivanje je 30, 50 i 70 m/s, što odgovara Machovim brojevima do 0,2, pa je u skladu sa tim izabran davač s opsegom od 70 mbara. Zaustavna temperatura se mjeri osjetnikom s termoparom, slika 4 gore desno, čije je kućište izolirano teflonskim omotačem, smještenim na nosač na kome se nalazi i sonda zaustavnog tlaka.

*Opis faze 1:* Mjerenje raspodjele tlaka na modelu vlaka je izvršeno pomoću dva Scanivalve uređaja, koji su smješteni u trup vlaka. U njima se nalaze diferencijalni davači tlaka (tipa Druck), koji mjere razliku tlaka sa aktivne i referentne strane. Na referentnu stranu se dovodi statički tlak s Pitot-cijevi postavljene na platformu, a na aktivnu statički tlak s rupica na modelu povezan plastičnim pneumatskim cijevicama.

Ispitivanje je izvršeno za brzine 30, 50 i 70 m/s, za kutove skretanja  $\beta = -10^\circ$  do  $10^\circ$  s korakom  $\Delta\beta = 2^\circ$ .

*Opis faze 2:* Mjerenje "zone poremećaja" oko vlaka je izvršeno pomoću horizontalnog češlja, koji je učvršćen na vertikalni nosač, koji se kreće po vodilici duž platforme u pravcu strujanja zraka. Češalj se sastoji od 10 sonda za mjerenje lokalnih tlakova ( $P_{lok}$ ). Sonde su pneumatski povezane sa diferencijalnim davačem tlaka smještenim u Scanivalve uređaje. Scanivalve uređaj je smješten ispod platforme u posebno dizajniran nosač, kako ne bi unosi poremećaj u strujnu sliku i izazvao neadekvatno strujanje

oko modela. Nakon proračuna očekivanih tlakova oko modela vlaka, izabran je davač tipa Druck sa mjernim opsegom od 70 mbar. Na davač je na referentnu stranu doveden tlak  $P_{st}$  sa Pitot-sonde postavljene na prednjem dijelu platforme, a na aktivnu stranu tlak sa sonde na češlju. Davač mjeri razliku tih dvaju tlakova [7,8].

Mjerenje je izvršeno u 7 poprečnih presjeka duž osi vlaka i to na: 13 mm ispred nosa vlaka i 88, 140, 1910, 2063, 2163 i 2263 mm iza nosa vlaka. Brzine zračne struje u radnom dijelu zračnog tunela tokom ispitivanja su bile 30, 50 i 70 m/s.

Češalj je pomican duž modela vlaka i po visini te je mjerena raspodjela tlaka oko vlaka. Na osnovi koeficijenta tlaka  $C_p$  određena je granica zone utjecaja.

Zračni tunel je opremljen sustavom za kontrolu rada tunela, akviziciju podataka i sustavom za obradu podataka, koji pomoću aplikacijskog softvera vrši njihovu obradu.

Na osnovi izmjerenih veličina: zaustavnog tlaka  $P_0$ , zaustavne temperature  $T_0$  i razlike tlaka  $\Delta P = P_0 - P_s$  određeni su M - Machov broj,  $q$  - dinamički tlak, Re - Reynoldsov broj [5,6]:

$$M = \left\{ 5 \cdot \left[ \left( \frac{P_0}{P_s} \right)^{\frac{1}{3.5}} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$q = 0,7 \cdot P_s \cdot M^2,$$

$$Re = \frac{1,4 \cdot l \cdot P_0 \cdot 10^5}{a_0 \cdot \mu} \cdot \frac{M}{\left( 1 + \frac{M^2}{5} \right)^3}, \quad (2)$$

gdje su:

$$a_0 = 20,047 \sqrt{T_0}, \quad (3)$$

$$T = T_0 \cdot \left( 1 + \frac{M^2}{5} \right)^{-1}, \quad (5)$$

$$l = 1 \text{ m},$$

$$\mu = 1,791 \cdot 10^5 \left( \frac{T}{288} \right)^{1,5} \cdot \left[ \frac{398,5}{(T + 110,3)} \right] \quad (6)$$

Koeficijent tlaka  $C_p$  po modelu vlaka je izračunat prema izrazu:

$$C_p = (Pst_{rupica} - Pst_{PMS}) / q, \quad (7)$$

gdje su:

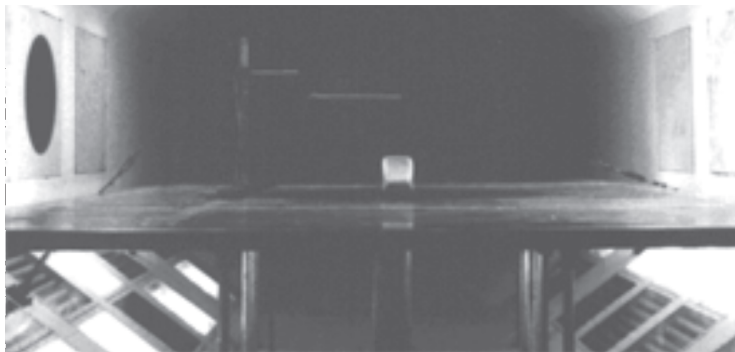
(2)  $Pst_{rupica}$  - statički tlak s rupica na modelu

$Pst_{PMS}$  - statički tlak PMS-a

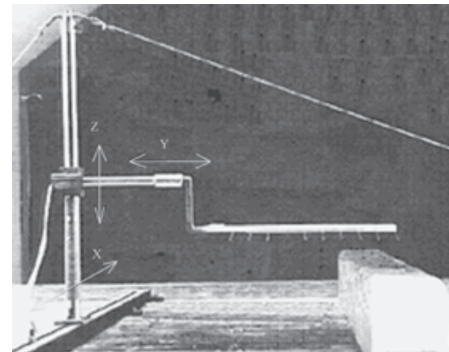
(3)  $q$  - dinamički tlak struje zraka.

Koeficijent tlaka  $C_p$  u zoni poremećaja oko vlaka, izračunat je na način da je iz datoteke usrednjenih PMS podataka po elementima, uzeto  $Pst_{PMS}$  i izračunato  $P_{lok}$  pomoću izraza:

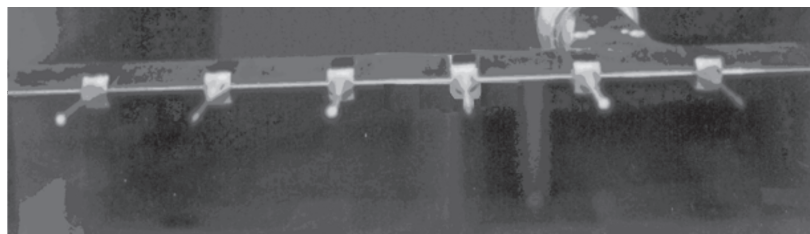
$$(4) P_{lok} = Pst_{PMS} + P_s, \quad (8)$$



a)

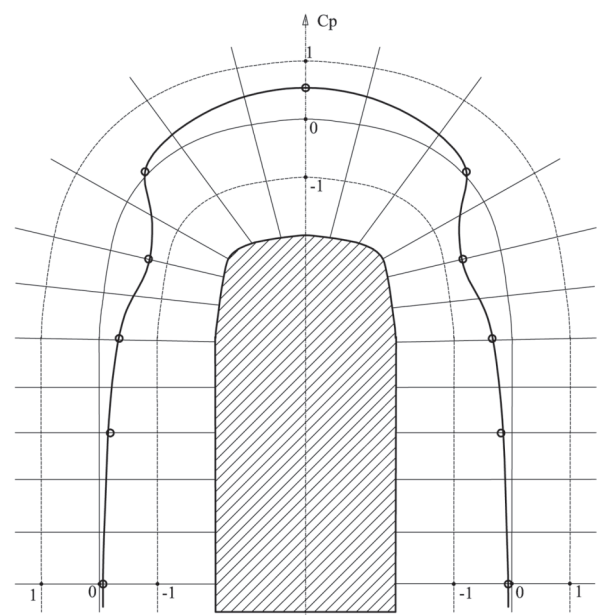


b)



c)

**Slika 5.** a) Izgled modela vlaka postavljenog na platformi, b) i c) češalj za mjerenje raspodjele tlaka oko vlaka  
**Figure 5.** a) The train model on the platform, b) and c) rake for measuring pressure distribution around train



**Slika 6.** Raspodjela tlaka na prednjem dijelu lokomotive u horizontalnoj ravnini na najširem dijelu lokomotive  
**Figure 6.** Pressure distribution around front locomotive section within the horizontal plane on the largest locomotive with

gdje je:

$P_s$  usrednjena izmjerena veličina s diferencijalnog davača tlaka.

Koeficijent tlaka  $C_p$  je jednak:

$$C_p = P_s / q, \tag{9}$$

gdje je:  $q$  dinamički tlak.

Granica zone poremećaja je na mjestu gdje postoji znatnija promjena  $C_p$ , tj. gdje je  $\Delta C_p < 0,1$ .

### 3.4. Rezultati mjerenja

#### 3.4.1. Rezultati mjerenja raspodjele tlaka po modelu vlaka (faza 1)

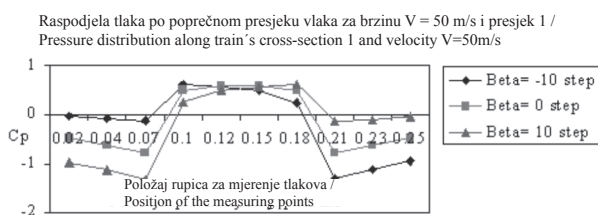
Na slici 6. prikazana je raspodjela tlaka na prednjem dijelu lokomotive u horizontalnoj ravnini na najširem dijelu lokomotive. Bezdimenzijski koeficijent tlaka  $C_p$  je direktno proporcionalan razlici tlaka:

$$C_p = \frac{(P - P_0)}{(1/2 \rho v_0^2)} \tag{10}$$

Na slikama 7 i 8 prikazane su raspodjele tlaka po poprečnom presjeku vlaka za poprečni presjek 1, za brzinu 50 m/s i raspodjelu tlaka u ravnini simetrije vlaka za brzinu 50 m/s.

Kako se vidi iz dobivenih rezultata, raspodjela tlaka po poprečnom presjeku vlaka je simetrična u odnosu na ravninu simetrije vlaka, za kut klizanja  $\beta=0^\circ$ .

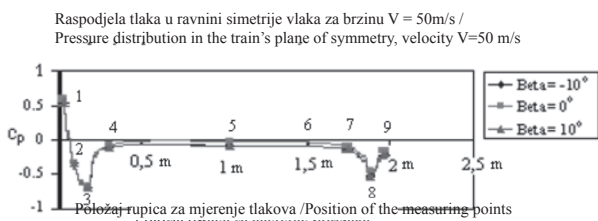
Slika 8. predstavlja raspodjelu tlaka za točke prednjeg dijela i krova vlaka, u ravnini simetrije vlaka, za kutove klizanja  $\beta = -10^\circ, 0^\circ$  i  $10^\circ$ . Na slikama se vidi da je zaustavna točka u ravnini simetrije na mjestu gdje  $C_p$  ima maksimalnu pozitivnu vrijednost. Odcjepljenje struje je na mjestima gdje se krivulja udaljava od osi apscise. Sa slike se vidi da je to iza zaustavne točke i iza presjeka 6 [7,8,9,10].



**Slika 7.** Raspodjela tlaka po poprečnom presjeku vlaka, u presjeku 1

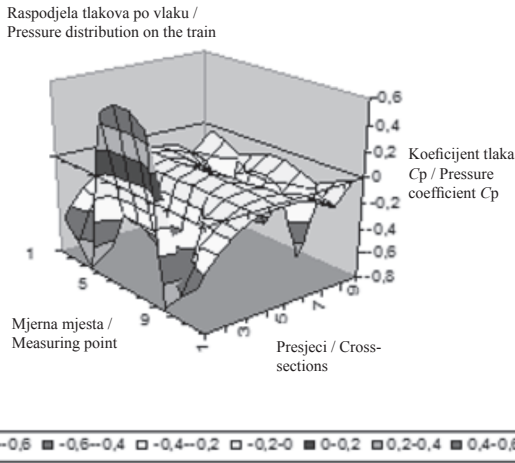
**Figure 7.** Pressure distribution along train's cross-section

Zaustavna točka pomiče se od ravnine simetrije vlaka ka vjetrovitoj bočnoj strani, a brzina opstrujavanja prednje ivice krova i prednje bočne ivice s vjetrovite strane se povećava. Udaljenost krivulje od osi apscise, u području točaka 4, 5 i 6 se povećava povećanjem kuta klizanja  $\beta$ . Ta veličina predstavlja pad tlaka na površini krova. Do odcjepljenja struje dolazi kod točke 7 i 8, da bi nakon toga došlo do ponovnog priljublivanja struje.



**Slika 8.** Raspodjela tlaka u ravnini simetrije vlaka

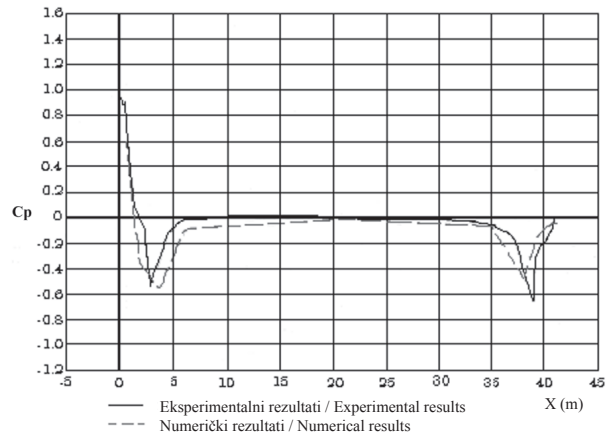
**Figure 8.** Pressure distribution in the train's plane of symmetry



**Slika 9.** Raspodjela tlakova po vlaku za brzinu  $v = 70$  m/s  
**Figure 9.** Pressure distribution on the train for speed  $v = 70$  m/s

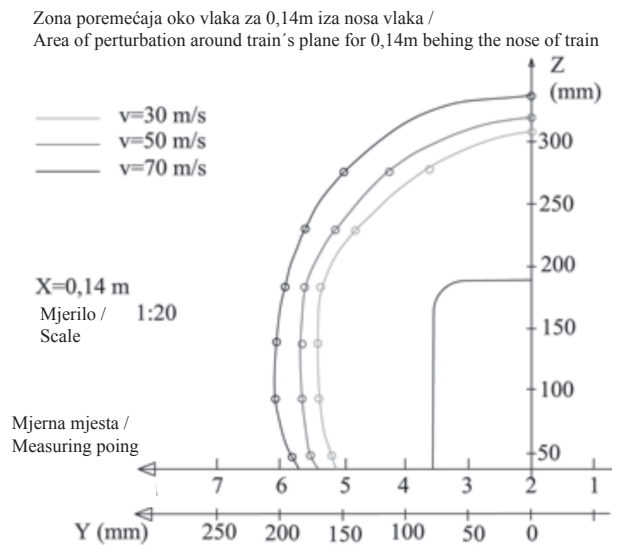
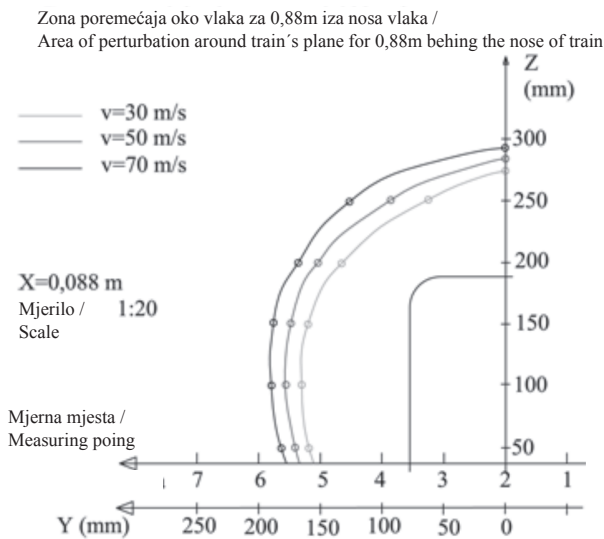
Na slici 9. prikazana je izmjerena raspodjela tlakova po vlaku za brzinu  $v = 70$  m/s i pri kutu skretanja  $\beta = 0^\circ$ . Raspodjela tlaka je simetrična u odnosu na ravninu simetrije vlaka. U prednjem (nosnom) dijelu vlaka vlada pretlak, a duž vlaka bočno i po liniji krova raspoređena su područja većeg ili manjeg potlaka. Iz dijagrama se može vidjeti da je najkritičniji nosni dio vlaka, gdje je razlika tlaka najveća. Ova mjerenja pokazuju da posebnu pažnju treba posvetiti konstrukciji elemenata koji se ugrađuju u nosnom dijelu, jer su na tom dijelu najveći gradijenti tlaka. Za ilustraciju, maksimalna vrijednost  $\Delta C_p$  za brzine  $v = 30,50$  i  $70$  m/s i kut skretanja  $\beta = 0^\circ$  je  $\Delta C_p = 1,389$ , a za  $\beta = 10^\circ$  je  $\Delta C_p = 2,354$ .

Na slici 10. prikazani su usporedni dijagrami rezultata mjerenja raspodjele tlaka na modelu vlaka iz zračnog tunela i rezultati dobiveni CFD metodama, u ravnini simetrije vlaka. Na dijagramu se vidi da je ostvareno dobro slaganje rezultata. Odstupanje se primjećuje u prednjem dijelu vlaka, gdje je veća promjena geometrije vlaka, što je posljedica nedovoljne gustoće mreže u numeričkom proračunu [7,11].



**Slika 10.** Usporedni dijagrami numerički i eksperimentalno određenih tlakova u ravnini simetrije vlaka

**Figure 10.** Comparative diagrams computational results and the wind tunnel test results for a 1:20 scale train model - pressure distribution in the train's plane of symmetry



**Slika 11.** Zona poremećaja oko vlaka na udaljenosti 0,88 m ispred vlaka i na udaljenosti 0,14 m iza nosa vlaka [7, 8,9,10]

**Figure 11.** Area of perturbation around train's plane for 0,88 m in front of the nose of train and for 0,14 m behind the nose of train [7,8,9,10]

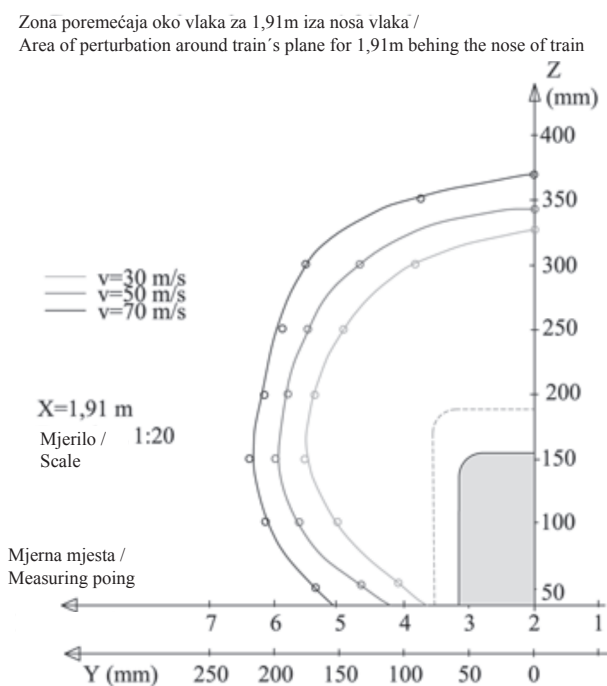


### 3.4.2. Rezultati mjerenja raspodjele tlaka u zoni poremećaja (faza 2)

Mjerenja su vršena u 7 položaja duž vlaka i to na udaljenosti 13 mm ispred nosa vlaka te 88, 140, 1910, 2063, 2163 i 2263 mm iza nosa vlaka. Prvo mjerenje na položaju ispred nosa vlaka izvršeno je na visini 45 mm od platforme, svaki slijedeći položaj je podignut za po 50 mm, sve do visine 395 mm.

Iz mnoštva rezultata mjerenja raspodjele tlaka oko modela vlaka, za ilustraciju su izabrani samo presjeci, koji su reprezentativni za karakterizaciju zone poremećaja, a koji se odnose na prva četiri položaja, 13 mm ispred i 88, 140 i 1910 mm iza nosa vlaka, gdje su veliki gradijenti tlaka.

Na slikama 11 i 12 prikazana je zona poremećaja oko vlaka na 0,88 m ispred, 0,14 m i 1,91 m iza nosa vlaka. Usvajeno je da je granica zone poremećaja na mjestu gdje je  $C_p < 0.1$ . Mjerenje raspodjele tlaka je vršeno za brzine  $v = 30, 50$  i  $70$  m/s. Iza vlaka je uočena turbulentna zona, dok je duž vlaka formirano strujanje koje se kreće zajedno s vlakom.



Slika 12. Zona poremećaja oko vlaka i na udaljenosti 1,91 m iza nosa vlaka [7,8,9,10]

Figure 12. Area of perturbation around train's plane for 1,91 m behind the nose of train [7,8,9,10]

Prikazane su tri izobare, za tri različite brzine strujanja zraka  $v = 30, 50$  i  $70$  m/s, koje određuju granicu zone poremećaja oko vlaka.

Ispitivanja zone poremećaja oko vlaka su pokazala da se širina zone poremećaja (bočno od vlaka) za presjeke prikazane na slici 11, vrlo malo mijenja, dok se na slici 12 može uočiti da se s povećanjem dužine vlaka, povećava i površina poprečnog presjeka zone poremećaja oko njega, tako da je na trećem presjeku za brzinu  $v=70$  m/s izmjerena visina zone poremećaja 370 mm, a bočno se proširila za 40 mm.

## 4. Zaključak

U okviru ovog rada prikazani su rezultati raspodjele tlaka mjerenih po modelu vlaka i u zoni oko vlaka u zračnom tunelu i izvršena je usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata pokazala je vrlo dobro slaganje iz čega se može zaključiti da se postojeći zračni tuneli namijenjeni ispitivanjima zrakoplova, mogu koristiti za određivanje optimalnog oblika vlakova velikih brzina. Dobiveni rezultati u skladu su s rezultatima numeričkih simulacija u dostupnoj literaturi.

Iz raspodjele tlaka po poprečnim presjecima vlaka (presjeci 1 do 9), primjećuju se zone povišenih i sniženih tlakova. Povišen tlak je na nosnom dijelu vlaka, gdje se nalazi i zaustavna točka. Na prednjem dijelu se strujnice usporavaju, pa su to zone sa manjim brzinama, ali s većim tlakom. Iza zaustavne točke dolazi do odcjepljenja strujnica, što se na dijagramima uočava kao udaljavanje krivulje od ravnine nultog tlaka. To su zone potlaka, gdje dolazi do ubrzavanja strujnica. Nakon presjeka 3, dolazi do ponovnog priljublivanja strujnica. Raspodjela tlaka po modelu vlaka pokazuje odcjepljenje struje i na zadnjoj strani vlaka, iza presjeka 6. Pad tlaka koji se javlja u zadnjem dijelu vlaka je manji od pada tlaka na nosnom dijelu vlaka. Prema rezultatima ispitivanja iz literature, ovo je bilo očekivano.

Određivanje parametara strujanja u zoni poremećaja oko modela vlaka pokazalo je da zona na prvom presjeku po visini dostiže oko 290 mm, a u drugom presjeku oko 350 mm pri brzini 70 m/s. Ako se ti rezultati prevedu na realne uvjete u mjerilu 1:1, zona poremećaja na 0,260 m ispred vlaka (na 0,088 m ispred modela vlaka) obuhvaća prostor 4 m bočno i 4 m iznad vlaka. Na udaljenosti 1,760 m iza nosa vlaka, obuhvaća područje 2 m bočno i 2 m iznad krova vlaka. Na ostaloj dužini vlaka zona poremećaja obuhvaća 1,4 m iznad i 1,6 m bočno od vlaka. Na samoj granici zone poremećaja koeficijent tlaka je  $C_p=0,1$ .

Oblik zone poremećaja u realnim uvjetima treba biti sličan po svim poprečnim presjecima duž vlaka. Zato se ne očekuje promjena linija jednakih gustoća zraka. Na slici 12 izobare imaju izmijenjen oblik i dimenzije. Na

ovu pojavu utječe nekoliko faktora. U presjeku koji se nalazi na 1,91 m iza nosa vlaka, već je došlo do promjene poprečnog presjeka modela vlaka, do odcjepljenja strujanja i pojave vrtloga. Veličina zone poremećaja direktno ovisi o promjeni brzine. Ako se brzina promjeni s 30 na 70 m/s, bočne dimenzije zone poremećaja se povećaju za oko 20%, a po visini za oko 8%. Na presjeku 1,91 m iza nosa vlaka bočna dimenzija zone poremećaja se povećava za 30%, a po visini za 12%, pri povećanju brzine od 30 na 70 m/s.

## LITERATURA

- [1] MARTY, P.; AUTRUFFE, H.: *Etudes aerodynamiques instationnaires liees a la circulation des trains a grande vitesse*, Revue generale des chemins de fer, 1993.
- [2] ARTH, P.: *Ergebnisbericht zur Untersuchung des "sonic boom" phanomens auf HGV-strecken*, Munchen, 1997.
- [3] ANDERSON, J. D.: *Fundamentals of aerodynamics*, McGraw-Hill, Inc, 1996.
- [4] OWER E.; PANKHURST, R. C.: *The measurement of air flow*, Pergamon Press, 1977.
- [5] *Ispitivanja u aerotunelu malih brzina*, Interno izdanje, Vojnotehnički institut, Septembar 1997.
- [6] POPE, A.: *Wind-tunnel testing*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1954.
- [7] PUHARIĆ M.: *Teorijsko i ekperimentalno istraživanje aerodinamičkih problema vozova velikih brzina*, magistarski rad, Mašinski fakultet Beograd, 2000.
- [8] PUHARIĆ M.: *Ispitivanje modela voza za brze pruge u podzvučnom aerotunelu T-35*, Naučni skup Vazduhoplovstvo 93., Beograd
- [9] PUHARIĆ M.: *Neki aerodinamički problemi koji se javljaju pri mimoilaženju vozova u tunelu*, NTP 1999.
- [10] PUHARIĆ M.: *Primjena aerodinamičkih tunela u ispitivanju vozova velikih brzina*, Monografija, VTI Beograd, 2002.
- [11] MARIČIĆ, N.; ZDRAVKOVIĆ M.; MATIĆ M.: *Analiza aerodinamičkih efekata pri kretanju voza velikih brzina i mimoilaženju dva voza na otvorenoj pruzi*, Studija Vojnotehničkog instituta, Beograd, 1992.
- [12] PUHARIĆ M.: *Aerodinamički efekti koji se javljaju pri prolasku vozova velikih brzina kroz tunele*, XII Želkon 2006.