

Modelsko ispitivanje ventilacije cestovnih tunela u uvjetima normalnog prometa

Miroslav Sambolek, Mladen Čizmek

Ključne riječi

cestovni tunel,
uzdužna ventilacija,
modelsko ispitivanje,
tunel Sv. Rok,
normalni prometni
uvjeti

M. Sambolek, M. Čizmek

Izvorni znanstveni rad

Modelsko ispitivanje ventilacije cestovnih tunela u uvjetima normalnog prometa

Prikazano je modelsko ispitivanje ventilacije na modelu tunela Sv. Rok. Svrha ispitivanja bila je dobivanje podataka za projektiranje sustava ventilacije. Podaci su posebno važni s obzirom na to da se predviđa uzdužna ventilacija koja nije uobičajena za tako duge tunele s dvosmjernim prometom, kakav će biti u ovom tunelu dok se ne izgradi druga cijev. Opisano je ispitivanje i prikazani rezultati rada sustava provjetravanja i njegova djelotvornost u normalnim prometnim uvjetima.

Key words

road tunnel,
longitudinal ventilation,
model testing,
Sveti Rok tunnel,
normal traffic
conditions

M. Sambolek, M. Čizmek

Original scientific paper

Model testing of road tunnel ventilation in normal traffic conditions

The tunnel ventilation testing was conducted on the model of the Sveti Rok Tunnel. The purpose of the testing was to obtain information as needed for the design of a proper tunnel ventilation system. This information is particularly significant because the longitudinal ventilation system is to be used, which is not often the case in such long tunnels with two way traffic, but will be applied in this tunnel until completion of the second tunnel tube. The testing procedure is described and ventilation results, with the system's efficiency in normal traffic conditions, are presented.

Mots clés

tunnel routier,
ventilation longitudinale,
essais sur modèle réduit,
tunnel Sv. Rok,
conditions de
l'exploitation normale

M. Sambolek, M. Čizmek

Ouvrage scientifique original

Essais sur modèle réduit de la ventilation des tunnels routiers dans les conditions de la circulation normale

L'article décrit des essais sur modèle réduit de la ventilation du tunnel Sv. Rok. Les essais avaient pour but d'obtenir des données pour l'étude du système de ventilation. Ces données sont particulièrement importantes, compte tenu du système de ventilation longitudinale qui n'est pas courante dans des tunnels aussi longs, où la circulation se déroulera à deux sens tant qu'un second tube n'aura été construit dans ce tunnel. L'article décrit les essais et fournit les résultats du fonctionnement du système de ventilation ainsi que son efficacité dans les conditions de l'exploitation normale.

Ключевые слова:

дорожный туннель,
продольная
вентиляция,
модельное
испытание, туннель
Св. Рок, нормальные
условия движения

M. Самболек, М. Чизмек

Оригинальную научную работа

Модельное испытание вентиляции дорожных туннелей в условиях нормального движения

В работе показано модельное испытание вентиляции на модели туннеля Св. Рок. Целью испытания было получение данных для проектирования системы вентиляции. Данные являются особенно важными, принимая во внимание что предусмотрена продольная вентиляция, не являющаяся обычной для таких длинных туннелей с двухсторонним движением, какое будет в этом туннеле до тех пор, пока не будет выстроена вторая труба. Описано испытание и показаны результаты работы системы проветривания и их действительность в нормальных условиях движения.

Schlüsselworte:

Strassentunnel,
Längslüftung,
Modelluntersuchung,
Tunnel Sv. Rok,
normale
Verkehrsbedingungen

M. Sambolek, M. Čizmek

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Modelluntersuchung der Strassentunnellüftung in normalen Verkehrsbedingungen

Dargestellt ist die Modelluntersuchung der Lüftung am Modell des Tunnels Sv. Rok. Ziel der Untersuchung war Daten für den Entwurf des Lüftungssystems zu erreichen. Diese Daten sind besonders wichtig weil eine Längslüftung vorgesehen ist, was für so lange Tunnels, mit Gegenverkehr bis zum Ausbau des zweiten Tunnelrohres, nicht üblich ist. Es sind die Untersuchungen beschrieben und die Ergebnisse der Funktion des Lüftungssystems und dessen Wirksamkeit in normalen Verkehrsbedingungen dargestellt.

Autori: Dr. sc. Miroslav Sambolek, dipl. ing. stroj., Mladen Čizmek, dipl. ing. brod.; Brodarski institut, Zagreb

1 Uvod

Ispitivanja djelovanja kompletnih sustava za provjetravanje tunela na modelima nisu česta [1]. Objavljivani su podaci o ispitivanjima pojedinih dijelova sustava, odnosno o modeliranju pojedinih fizičkih pojava, kao što je ispitivanje difuzije plinskih mlazova [2] i istraživanje aerodinamike mlaznih ventilatora [3]. Za tunel kroz Učku izvršeno je ispitivanje utjecaja razmaka ventilatorskih baterija i kuta nagiba sapnica na djelotvornost provjetravanja [4]. Međutim, iako se u literaturi ne susreću primjeri dimenzioniranja sustava ventilacije samo na temelju rezultata modelskih pokusa, modelska ispitivanja mogu mnogo pridonijeti uspješnosti projekta.

Objekt je cestovni tunel s dvosmjernim jednostručnim prometom, duljine 5670 m, s površinom poprečnog presjeka od 58,05 m². Podrobniji podaci o tunelu mogu se naći u [5] i [6].

2 Uvjeti ispitivanja normalnog toka prometa

U normalnim uvjetima postoje tri slučaja djelovanja ventilacije, koji ovise o trenutnim meteorološkim uvjetima i o gustoći prometa kroz tunel:

- samo prirodna ventilacija (kada postoji dovoljna razlika tlakova na portalima da bi se savladala uzdužna komponenta težine zraka u tunelu koja je posljedica uzdužnog nagiba tunela i otpori strujanju)
- samo umjetna ventilacija (atmosferski uvjeti ne podržavaju strujanje, tako da se ventiliranje mora ostvariti isključivo djelovanjem ugrađenih ventilatora) te
- kombinacija prirodne i umjetne ventilacije (kako postoji mogućnost reverziranja pogona ventilatora izabire se takav smjer strujanja pri kojem se podupiru umjetna i prirodna ventilacija).

Izdašnost prirodne ventilacije ovisi o razlici tlakova na portalima tunela, što je ovisno o trenutnim vremenskim uvjetima s jedne i druge strane Velebita, te o gustoći zraka (zapravo smjese zraka i ispušnih plinova) uvjetovanoj temperaturom usisanog zraka, o toplini razvijenoj radom motora i o prijelazu topline na stijenkama tunela.

3 Fizikalni model

Pouzdanost rezultata ispitivanja jako ovisi o kakvoći primijenjenoga fizikalnog modela, pa mu je posvećena posebna pozornost, posebno jer nije bilo pravih uzora.

3.1 Izbor mjerila modela

Mjerilo modela izabrano je vodeći računa o više uvjeta. Nakon detaljnog razmatranja odlučeno je da se izradi model središnjeg dijela tunela duljine 675 m, u mjerilu 1:25, koji može osigurati dovoljnu pouzdanost rezultata mjerenja važnih fizičkih veličina i vizualizaciju strujanja,

nja, a da istodobno model ne bude neprikladno velikih dimenzija.

3.2 Zamisao modela

Za modeliranje je u dogovoru s projektantom ventilacije izabrana sekcija tunela u blizini njegove sredine koja obuhvaća jedno okretište, dva skloništa za putnike, tri niše za zaustavljanje vozila i pet ventilatorskih baterija.

Da bi se moglo ostvariti razliku tlaka na modeliranoj sekciji, jedna strana modela otvorena je prema atmosferi, a druga završava u nepropusnoj komori u koju se posebnim ventilatorom - ventilatorom komore može tlačiti/isisavati zrak ovisno o smjeru strujanja. Tijekom pokusa kontinuirano se mjeri razlika tlaka u komori u odnosu prema atmosferi. Ventilatorom komore simulira se prirodna ventilacija, a njegova mjerna prigušnica služi za mjerenje ukupnog protoka kroz tunel. Pet ventilatorskih baterija raspoređenih na razmaku od 5 m (125 m u naravi) duž modelirane sekcije i modeli vozila koji se gibaju kroz tunel, onemogućavaju direktno mjerenje brzine strujanja zraka u modelu, tako da se prosječna brzina strujanja dobiva izračunavanjem iz ukupnog protoka i površine poprečnog presjeka modela tunela.

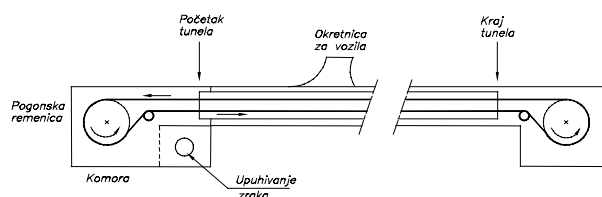
Brzina gibanja modela vozila mora zadovoljiti uvjete kinematičke sličnosti. Iz uvjeta prometnog opterećenja tunela i neprekoračenja dopuštene koncentracije štetnih primjesa na kraju tunela na kojem izlazi zrak, projektant je izračunao da su potrebne brzine strujanja zraka u najnepovoljnijem slučaju od 5 do 8 m/s. Istodobno je projektom zahtjevom predviđena brzina prometa u tunelu od 80 km/h. Da bi se dobile dovoljno velike brzine strujanja kroz model tunela, koje će još omogućiti pouzdano mjerenje, a to je približno 0,4 do 0,5 m/s, izabrana je najveća brzina gibanja modela od 2 m/s.

3.3 Izvedba modela

Na podlogu modela pričvršćene su sekcije od pleksi-stakla debelog 3 mm, potkovastog presjeka. Za oblogu tunela izabrano je pleksi-staklo da bi se moglo vidjeti širenje dima pri pokusu simuliranja požara, ali i zato da se može jednostavno locirati mjesto eventualnog zastoja i ukloniti kvar.

3.4 Sustav za simuliranje dvosmjernog prometa

Sustav za gibanje modela sastoji se od beskonačne transportne vrpce i dvije remenice. Pogonsku remenicu okreće elektromotor snage 1 kW s 930 okr/min, kojemu se brzina vrtnje reduktorom (1:12) smanjuje na 77,5 okr/min. Brzina vrtnje može se kontinuirano mijenjati u području od 0,15 m/s do maksimalne brzine od oko 2,2 m/s. Sustav za simuliranje dvosmjernog prometa shematski prikazuje slika 1.

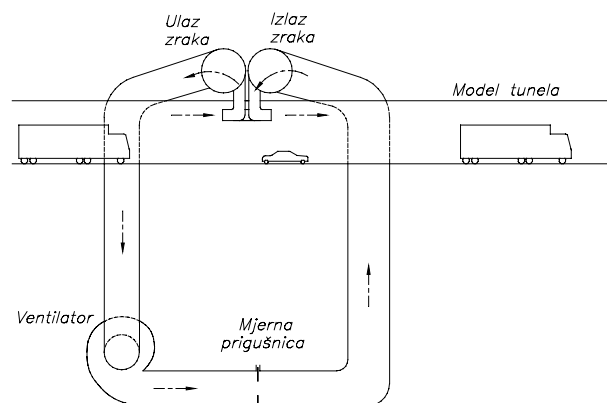


Slika 1. Skica zrakonepropusne komore okretišta i sustava za simulaciju dvosmjernog prometa

3.5 Modeliranje impulsnih ventilatora

Mlazni ventilatori u tunelu sastoje se od cijevi promjera 1250 mm u kojoj se nalazi elektromotor koji pogoni ventilator, a na kraju te cijevi smještena je sapnica. Po dva takva mlazna ventilatora, smještena paralelno po širini tunela, čine jednu ventilatorsku bateriju.

Problem simuliranja rada ventilatora na modelu riješen je tako da se zrak usisava u tunel kroz otvore kojima su modelirani usisni otvori mlaznih ventilatora, dovodi se do centrifugalnog ventilatora i pošto prođe kroz mjernu prigušnicu ponovno je doveden u tunel i izbačen s povećanom brzinom u smjeru u kojem treba stvoriti strujanje u tunelu. Konfiguraciju i način rada takvog sustava koji na modelu simulira jednu bateriju mlaznih ventilatora prikazuje slika 2.



Slika 2. Shema simuliranja ventilatorskih baterija na modelu tunela

4 Mjerna tehnika

Pri ispitivanju na modelu tunela mjereno je više raznih veličina: protoci, tlakovi temperatura i vlažnost zraka te brzina gibanja vozila.

Protočna je količina izmjerena standardnim mjernim prigušnicama, izrađenih od pleksi-stakla. Razlika tlaka ispred i iza prigušnice mjerena je s pomoću induktivnoga diferencijalnog tlakomjera koji je bio priključen na pojačalo preko integratora.

Prije ispitivanja ustanovljena je veza između reguliranog napona na stezaljkama elektromotora ventilatora i pro-

točne količine zraka, $q = f(U)$. Ta je ovisnost utvrđena za svaku ventilatorsku bateriju posebno i uporabljena je za postavljanje zadane konstantne dobave svih ventilatora.

Relativni tlak u komori izmjeren je također induktivnim diferencijalnim, a rezultati mjerenja prikupljeni su i praćeni s pomoću programa AEDLAB P20. Na svih 7 mjernih mjesta za mjerenje tlakova (5 ventilatorskih baterija, ventilator komore i relativni tlak na komori) diferencijalni je tlak dodatno mjereno i praćeno s pomoću LANDIS&GYR pretvornika tlaka, uz pripadni program za prikupljanje podataka na osobno računalo.

5 Uvjeti sličnosti

Prvi uvjet sličnosti koji treba ispuniti jest geometrijska sličnost modela i izvedbe [7], [8]. Odmah treba naglasiti da potpuna geometrijska sličnost uključuje i sličnost mikrogeometrije, to jest sličnost hrapavosti. Na žalost, sličnost hrapavosti obično nije moguće ostvariti pa se za preračunavanje rezultata rabe posebni korelacijski dodatci.

Drugi uvjet ostvarivanja potpune sličnosti jest kinematička sličnost, to jest sličnost geometrijske slike vektorskog polja brzina. Drugim riječima, traži se proporcionalnost apsolutnih vrijednosti svih odgovarajućih (homolognih) vektora brzina na modelu i u naravi te paralelnost odgovarajućih vektora.

Kada se radi o modelu impulsne ventilacije, uvjet kinematičke sličnosti zahtijeva proporcionalnost brzine mlaza zraka na izlazu iz ventilatora i srednje brzine strujanja u tunelu. Budući da se na modelu simulira utjecaj prometa s pomoću modela gibajućih vozila, za ostvarivanje kinematičke sličnosti potrebno je osigurati i proporcionalnost brzina strujanja i brzina vozila, to jest:

$$v_v/v_t = idem.$$

Dinamička sličnost, koja je ovdje dovoljan uvjet, budući da se ne promatraju toplinski procesi, traži proporcionalnost sila razne prirode. Pri strujanju kroz tunel na masu zraka djeluju sile tlaka, viskozne sile i inercijske sile, tako da su Reynoldsova značajka Re i Eulerova značajka Eu mjerodavni bezdimenzijski brojevi.

U ovom slučaju se Eulerov broj svodi na koeficijent otpora strujanja, koji nije isključivo posljedica smičnog naprezanja u graničnom sloju na stijenci tunela, već sadrži i elemente "profilnog otpora". Povećanje pada tlaka jest rezultat otpora koji strujanju pružaju udubine i niše koje su izgrađene uz tunel, zatim ventilacijska oprema, a također i vozila koja se gibaju kroz tunel.

Jednakost Reynoldsova broja nije moguće - kao što je to uostalom gotovo uvijek kada se radi o modelskom ispi-

tivanju - ostvariti na modelu, tako da se treba služiti prikladnim korekcijama.

6 Program ispitivanja ventilacije pri normalnom prometu

Pri pokusima djelovanja sustava provjetravanja u normalnom pogonu varirane su i mjerene sljedeće veličine:

- brzina gibanja modela vozila
- dobava ventilatorskih baterija
- dobava ventilatora komore.

Ispitivanja su provedena za sljedeće brzine gibanja vozila:

$$v_{\text{vozila}} = 0, 1, 1,41, 1,73 \text{ i } 2 \text{ m/s.}$$

Dobava ventilatorskih baterija na modelu ovisna je praktički jedino o brzini vrtnje centrifugalnog ventilatora. Zato se moglo postaviti željenu dobavu ventilatorskih baterija prilagođavanjem napona na regulatorima brzine vrtnje, ne vodeći računa o brzini strujanja kroz model tunela. Za protok ventilatorskih baterija izabrane su okrugle vrijednosti:

$$q_{VB} = 0; 0,010; 0,015; 0,020 \text{ m}^3/\text{s.}$$

Nisu ispitivani režimi rada kada ventilator komore radi nasuprot ventilatorskim baterijama, tako da su izmjerene samo pozitivne vrijednosti protoka u tunelu (to jest strujanja iz komore prema slobodnom kraju modela tunela) do $0,095 \text{ m}^3/\text{s}$.

7 Rezultati ispitivanja

Široko, dobro pokriveno područje ispitivanja omogućilo je izgladivanje izmjerenih vrijednosti, čime se smanjuje utjecaj slučajnih pogrešaka, a istodobno pruža mogućnost analiziranja djelovanja sustava provjetravanja u raznovrsnim pogonskim uvjetima.

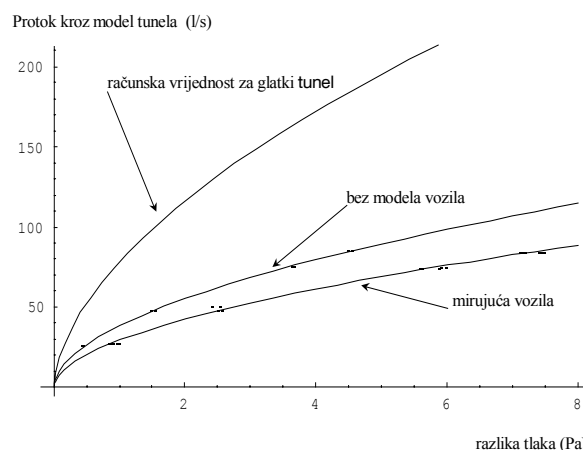
7.1 Uvjeti prirodne ventilacije bez gibanja vozila

Ispitivanja u uvjetima prirodne ventilacije, kada se strujanje zraka ostvaruje samo zbog razlike tlaka na jednoj i drugoj strani tunela, a ventilatorske baterije nisu u pogonu, vrlo je važno jer daje najjasniji uvid u utjecaj prometa na otpore strujanja.

Na slici 3. pokazane su mjerne točke i regresijske krivulje dane funkcijama oblika:

$$q_t = k_1 \Delta p^e$$

koje daju ovisnost protoka zraka kroz model tunela (q_t u l/s) o razlici tlaka (Δp u Pa) dok su k_1 , i e parametri dobiveni postupkom nelinearne regresije. Osim toga u isti je dijagram ucrtana proračunom dobivena vrijednost protoka koja odgovara tehnički glatkoj stijenci.

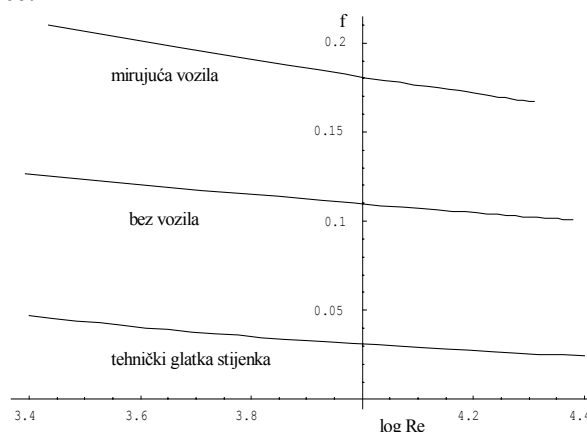


Slika 3. Preračunane mjerene vrijednosti i regresijske krivulje ovisnosti brzine zraka u modelu tunela o razlici tlaka Δp za uvjete prirodne ventilacije s prometom i bez prometa

Na temelju izmjerenog protoka kroz tunel i razlike tlaka u slučaju bez vozila i bez rada ventilatorskih baterija, određeni su koeficijenti otpora strujanja f i prikazani u dijagramu na slici 6. ovisno o Reynoldsovu broju.

$$f = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} v_t^2} \cdot \frac{r_t}{l}$$

gdje je v_t srednja brzina strujanja zraka, l je duljina modela sekcije tunela, ρ je gustoća zraka, a r_h hidraulički radijus modela tunela. U isti su dijagram unesene i vrijednosti koeficijenta otpora za glatke stijenske cijevi. Dijagram pokazuje da je koeficijent otpora strujanja u tunelu bez vozila veći nego u glatkoj cijevi; tako je kod $Re = 25000$ otpor u tunelu bez vozila veći oko četiri

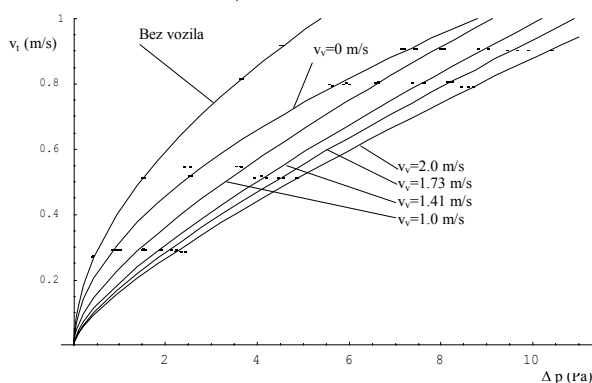


Slika 4. Ovisnost na temelju pokusa izračunanog koeficijenta trenja f za mirujuća vozila i u slučaju bez vozila pri prirodnoj ventilaciji. Ucrtna je i krivulja koeficijenta trenja za tehnički glatku stijenu prema literaturi

puta, a u slučaju mirujućih vozila na prosječnoj udaljenosti modela vozila od 2400 mm, što odgovara razmaku u naravi od 60 m, otpor je čak oko 7 puta veći.

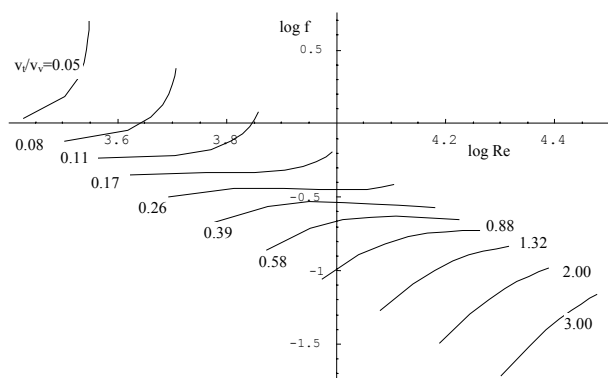
Dodatni otpor pada s povećanjem Re broja, uz tendenciju vrlo sporog smanjenja nagiba. To je posljedica ispitivanja kod Reynoldsovih brojeva koji odgovaraju prijelaznom području strujanja. Da bi se za tunel u naravi za proračun ventilacije dobio mjerodavan koeficijent otpora, treba proračunanoj vrijednosti koeficijenta otpora trenja uzetoga za hrapave betonske površine tunela pribrojiti vrijednost koeficijenta dodatnog otpora.

Sljedeća skupina pokusa odnosi se na mjerenja pri prirodnoj ventilaciji, ali uz gibanje modela vozila. Na slici 5. prikazane su brzine strujanja zraka kroz model tunela u ovisnosti o razlici tlaka, za slučaj bez vozila i za razne brzine vozila v_v .



Slika 5. Preračunane mjerene vrijednosti i regresijske krivulje ovisnosti brzine zraka u modelu tunela o razlici tlaka Δp za uvjete prirodne ventilacije s prometom razne brzine v_v i bez njega

Na istoj su slici prikazane i krivulje s kojima su se aproksimirali rezultati mjerenja. Treba uočiti već spomenutu razliku u karakteru krivulja koje odgovaraju slučaju gibanja vozila od krivulja za strujanje kroz tunel kada u njemu nema vozila, odnosno kada se ne gibaju, što je



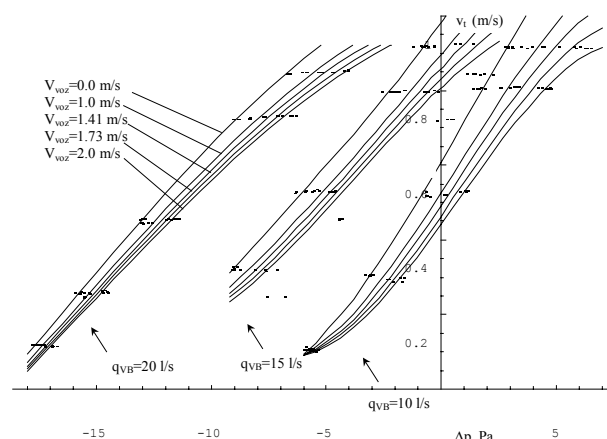
Slika 6. Ovisnost logaritma koeficijenta trenja f o logaritmu Reynoldsovog broja s omjerom brzine strujanja u tunelu i brzine vozila v_t/v_v , kao parametrom za slučaj prirodne ventilacije tunela

posljedica razlike u fizičkim procesima strujanja, a matematički se to odrazilo na različitost tipova regresijskih funkcija. Mjerne su točke, za dane uvjete ispitivanja (vrlo male razlike tlaka, reda 10^{-1} Pa) vrlo dobro grupirane, što svjedoči o primjerenoj preciznosti mjerenja.

7.2 Uvjeti čisto prisilne ventilacije pri gibanju vozila

Čisto prisilna ventilacija jedva da se može pojaviti u prirodnim uvjetima. Naime, uvijek će postojati bar neka mala prirodna cirkulacija koja će potpomagati, ili otežavati rad, ventilacijskog sustava. Takva kombinirana ventilacija ima, u odnosu prema čisto prisilnoj ventilaciji, još jedan dodatni promjenljivi parametar, a to je razlika tlaka na portalima tunela zbog čega je rezultate ispitivanja kombinirane ventilacije teško pregledno prikazati. Zato će se iz rezultata pokusa izvući samo zaključci o radu ventilacijskog sustava u uvjetima čisto prisilne ventilacije, to jest uz uvjet da ne postoji razlika tlaka na portalima tunela.

Na slici 7. vide se točkama označene vrijednosti izmjenjenih brzina strujanja kroz model tunela ovisne o razlici tlaka Δp na krajevima modela. Pokusi su provedeni kod

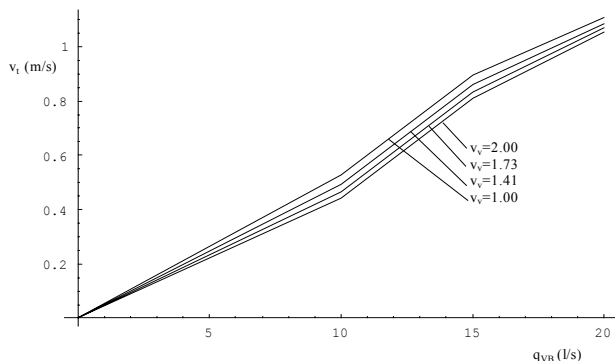


Slika 7. Ovisnost brzine strujanja u tunelu v_t o razlici tlaka Δp . Parametri su dobava ventilatorskih baterija q_{vB} izražena u l/s i brzina modela vozila v_v u m/s

dobave ventilatorskih baterija od $q_{vB} = 0,010; 0,015$ i $0,020$ m³/s, dok je brzina modela vozila iznosila $v_v = 0, 1,0; 1,41; 1,73$ i $2,0$ m/s. Izmjerene vrijednosti aproksimirane su regresijskim funkcijama u kojima se kao argumenti pojavljuju razlika tlaka Δp i dobava ventilatorskih baterija q_{vB} .

Slika 7. pokazuje da se pri dobavi ventilatorskih baterija od $0,010$ m³/s mogla ostvariti čista prisilna ventilacija, dok je za dobavu ventilatorskih baterija od $0,020$ m³/s kapacitet ventilatora zračne komore bio nedovoljan da bi u komori ostvario atmosferski tlak. Zato su se morale

ekstrapolirati mjerene vrijednosti, što inače treba izbjeći ako je ikako moguće. Za dobavu od $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$ uvjeti čisto prisilne ventilacije mogli su se postignuti samo kod manjih brzina vozila, pri kojima je dodatni otpor manji.



Slika 8. Ovisnost brzine strujanja kroz model tunela v_t o dobavi ventilatorskih baterija s brzinom vozila kao parametrom za čistu prisilnu ventilaciju, to jest pri $\Delta p=0$

Numeričkim je proračunom iz regresijskih jednadžbi dobivena brzina strujanja u tunelu v_t kao funkcija dobave ventilatorskih baterija q_{vB} , za razne brzine vozila.

Ta je brzina dijagramski prikazana na slici 8. za brzine vozila od 1 do 2 m/s. I ovdje je, kao u slučaju prirodne ventilacije, ustanovljen jasan, premda ne velik, utjecaj brzine vozila na povećanje otpora, koji se manifestira kao smanjenje brzine strujanja kroz tunel pri istoj vrijednosti razlike tlaka $\Delta p=0$. Povećanje brzine vozila od 1 m/s na 2 m/s dovodi do smanjenja brzine strujanja kroz tunel i do 20% za manje dobave ventilatorskih baterija.

Općenito se o rezultatima ispitivanja u uvjetima normalnog prometa može zaključiti da otpori strujanja jako ovise o Reynoldsovu broju i da brzina vozila primjetno utječe na njih.

LITERATURA

- [1] *** *Road Tunnels*, PIARC (Permanent international association of road congresses), Montreal, 1995.
- [2] Malmström, T., G., Kirkpatrick, A., T., et al., "Centreline velocity decay measurements in low-velocity axisymmetric jets", *J. Fluid Mech.*, vol.246, pp 363-377., 1997.
- [3] Mutama, K. R.: *The experimental investigation of jet fan aerodynamics using wind tunnel modeling*, Transactions of the ASME, vol. 118, pp 322.-28., 1996.
- [4] *****Societe du Tunnel Učka - Ventilation longitudinale-verification experimentale*, SOFRAIR, izvještaj br. RP/GH - CM 523 V 73 - 2/6/75, 1975.
- [5] Drakulić, M., et al.: *Tunel sv. Rok - Studija ventilacije i preliminarna analiza protupožarne zaštite*, Brodarski institut, Zagreb, ožujak, 1997.
- [6] Sambolek, M.; Čizmek, M.: *Modelsko ispitivanje ventilacije tunela Sveti Rok*, Izvještaj Brodarskog instituta WP50-02-000, Zagreb, 1998.
- [7] Pope, A.: *Wind-tunnel Testing*, John & Sons, New York, 1954.
- [8] Prandtl, L.: *Führer durch die Strömungslehre*, Fridr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1965.

8 Zaključak

Cilj modelskih ispitivanja sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela bio je dobivanje podataka važnih za projektiranje toga sustava. Rezultati ispitivanja u procesu projektiranja služe kao dopuna u literaturi navedenim iskustvenim vrijednostima. O samom modelskom ispitivanju i dobivenim rezultatima može se zaključiti:

- Pokazalo se da se može uspješno istraživati djelovanje sustava ventilacije tunela ispitivanjem fizičkog modela.
- Mjerna tehnika, posebno osjetila tlaka (tlakomjeri), danas je toliko razvijena da omogućuje uspješno mjerenje vrlo malih razlika tlaka koje se pojavljuju pri pokusima.
- Primjena helija, kojemu je radi vizualizacije dodan umjetni dim, omogućuje dobro simuliranje procesa širenja dima pri izotermnom strujanju kroz model tunela.
- Za praktičnu primjenu zanimljiv je dodatni otpor strujanju kroz tunel koji je posljedica postojanja niša za vozila, ventilatorskih baterija i vozila u tunelu, što je obuhvaćeno terminom "uvjetna hrapavost".
- Ustanovljeno je da otpori strujanju kroz tunel i pri dvosmjernom prometu, doduše malo, ali nedvojbeno rastu.
- Za ispitivanje otpora u slučaju mirujućih vozila kada ne postoji ograničenje brzine strujanja zraka postavljeno kinematičkim uvjetom sličnosti, trebalo bi ispitati pri većim brzinama strujanja da bi se postigle veće vrijednosti Reynoldsova broja i tako izašlo iz prijelaznog područja.
- Bilo bi vrlo zanimljivo ispitati jednosmjerni promet kroz istu tunelsku cijev i dobivene rezultate usporediti s rezultatima ispitivanja ventilacije u uvjetima dvosmjernog prometa.