

Milan ŠEKULARAC¹, Predrag RADULOVIĆ²

ENERGETSKA EFIKASNOST SISTEMA VENTILACIJE PODUŽNO VENTILISANIH SAOBRAĆAJNIH TUNELA

Sažetak: U radu su dati rezultati dobijeni na eksperimentalnoj instalaciji modela saobraćajnog tunela sa sistemom ventilacije. Model predstavlja primjer drumskog tunela sa dvosmjernim saobraćajem, opremljenog podužnim sistemom ventilacije pomoću aksijalnih ventilatora. Analizirani su hidraulički otpori u tunelu koje savlađuje sistem ventilacije i eksperimentalno kvantifikovan stepen efikasnosti ventilacionog sistema pri različitim uslovima saobraćaja i strujanja. Na osnovu dobijenih rezultata na modelu izvršena je procjena pada pritiska u sistemu ventilacije saobraćajnih tunela odgovarajuće dužine.

Ključne riječi: *ventilacija tunela, modeliranje tunela, impulsni ventilatori*

1. UVOD

Podužno ventilisani saobraćajni tuneli sa jednom tunelskom cijevi i dvosmjernim saobraćajem predstavljaju za sada jedinu građevinsku izvedbu saobraćajnih drumskih tunela u Crnoj Gori. U skorije vrijeme, pušten je u saobraćaj najduži takav tunel u Crnoj Gori, dužine 4200 [m], tunel Sozina, na magistralnom putu koji povezuje Bar i Podgoricu. U okviru naučnoistraživačkog projekta Mašinskog fakulteta Podgorica, istraživana je aerodinamika strujanja u modelu saobraćajnog tunela u laboratoriji Mašinskog fakulteta. Instalacija modela saobraćajnog tunela napravljena je u razmjeri 1: 19 u odnosu na objekat (tunel Sozina). Razmjeru je diktirao odnos prečnika radnog kola ventilatora u objektu i ventilatora u modelu. Dužina modela je 20.5 [m] što odgovara objektu dužine 390 [m].

U okviru ovog rada analizirani su hidraulički otpori pri strujanju kroz model tunela i određen stepen efikasnosti sistema ventilacije modela u različitim režimima broja vozila i brzina strujanja. Na osnovu dobijenih rezultata može se odrediti pad pritiska i potreban broj ventilatora na odgovarajućem objektu – saobraćajnom tunelu.

¹ Mr Milan Šekularac, dipl. maš. inž., Mašinski fakultet Univerziteta Crne Gore, Podgorica, *e-mail*: milans@ac.me

² Predrag Radulović, dipl. maš. inž., Pivara, Nikšić, *e-mail*: radulovic_predrag@yahoo.ca

2. MODEL SAOBRAĆAJNOG TUNELA

Nomenklatura (sve veličine su u SI jedinicama):

A_{AUTO}	površina frontalnog presjeka putničkog vozila;
A_{BUS}	površina frontalnog presjeka autobusa;
A_{TUN}	površina poprečnog presjeka tunela;
N_{AUTO}	broj putničkih vozila;
N_{BUS}	broj autobusa;
L	dužina tunela;
D_{H}	hidraulički prečnik;
ζ_{AUTO}	koeficijent lokalnog otpora od putničkih vozila;
ζ_{BUS}	koeficijent lokalnog otpora od autobusa;
ζ_{ULAZ}	koeficijent lokalnog otpora na ulazu iz tunela;
ζ_{IZLAZ}	koeficijent lokalnog otpora na izlazu iz tunela;
ξ_{TR}	koeficijent podužnog trenja tunelske cijevi;
ρ	gustina vazduha;
v	brzina vazduha;
Δp_{T}	ukupni pad pritiska vazduha kroz tunel.

Model tunela je prikazan na Sl. 1(a) i Sl. 1(b). Analizirana varijanta ventilacije se sastoji iz 3 baterije od po 2 ventilatora, koje su montirane na rastojanju od 100 prečnika ventilatora (*približno* $\sim 5.12 \text{ m}$). Udaljenost prve i treće baterije od portala tunela je jednaka međusobnom rastojanju baterija (5.12 m).

Tabela 1. Geometrijske dimenzije modela tunela

Dužina tunela	[m]	20.5
Radijus krivine krova	[m]	0.237
Širina kolovoza (obje trake)	[m]	0.47
Površina poprečnog presjeka	[m ²]	0.1464
Visina centra krivine krova u odnosu na kolovoz	[m]	0.12
Hidraulički prečnik	[m]	0.4

Mjerni instrumenti postavljani su u zavisnosti od mjernih zahtjeva na različitim pozicijama na tunelu. Paralelno sa glavnim tunelom montiran je tunel u formi cijevi odgovarajućeg prečnika, koji predstavlja evakuacioni tunel. Evakuacioni tunel se koristi u svrhu evakuacije putnika u slučaju požara u glavnom saobraćajnom tunelu nastalog usljed saobraćajnog incidenta. Na krajevima evakuacionog tunela nalazi se po jedan ventilator, usmjeren ka unutrašnjosti tunela – jedan drugom u susret. Evakuacioni tunel je povezan sa glavnim tunelom poprečnim evakuacionim putevima. U evakuacionim putevima su montirane pregradne klapne pomoću kojih se simulira otpor strujanju kroz evakuacione puteve u stvarnom si-



Sl. 1. Model tunela u laboratoriji Mašinskog fakulteta, Univerzitet Crne Gore
(a) Model tunela; (b) Pogled kroz model

stemu tunela. U tunelu su postavljane makete vozila koje su napravljene od punog drveta, za dvije kategorije vozila: putnički automobil i autobus. Makete geometrijom odgovaraju aerodinamičkom obliku stvarnih vozila. Napravljene su u istoj razmjeri kao i model tunela u odnosu na objekat. Makete su nepokretne i donjom površinom naslonjene na kolovoznu traku u modelu tunela. Model ne odslikava u potpunosti stvarno stanje u tunelu s obzirom na to da su vozila nepokretna. Autori smatraju da makete vozila uspješno aproksimiraju otpor motornih vozila u režimu gustine saobraćaja kojoj odgovara mala brzina kretanja vozila od 10 [km/h] (kritični režim za analizu). Korekciju dobijenih rezultata, kojom bi se obuhvatio uticaj kretanja vozila, moguće je izvesti simulacijom strujnog polja pomoću CFD softvera. Ove simulacije su naredni korak istraživanja u okviru ovog projekta.

U zavisnosti od analiziranog režima saobraćaja, gustina vozila u tunelu je podešavana za dvije varijante broja vozila u tunelu, koji odgovaraju režimima saobraćaja pri brzini kretanja vozila od 10 [km/h] i 80 [km/h] – po austrijskom VRS standardu. U ovom radu prezentirana istraživanja su izvedena samo na modelu glavnog, saobraćajnog tunela, te se evakuacioni tunel neće analizirati.

2.1. VENTILACIJA TUNELA

Sistem ventilacije modela sastoji se iz tri baterije od po dva aksijalna ventilatora, proizvođača *Great Planes*, model *Hyperflow 56 mm*. Ovi ventilatori su namjenski predviđeni za upotrebu na modelima aviona. Pogone ih elektromotori naizmjenične struje (Sl. 2), istog proizvođača (*model 20-40-3500*), napajani preko invertora napona naponom od 11 V.



Sl. 2. Motor

Sl. 3. Invertor napona
(Speed Control SS-25)

Ventilatori pri broju obrtaja do 35800 min^{-1} postižu silu statičkog potiska od oko 0.389 [kp] i izlaznu brzinu vazduha od 38.8 [m/s] .

Invertori napona (Sl. 3. *Electrifly silver series*, model *SS 25*) napajani su jedno-smjenim naponom od 11 V .

Karakteristike motora su date u Tabeli 2.

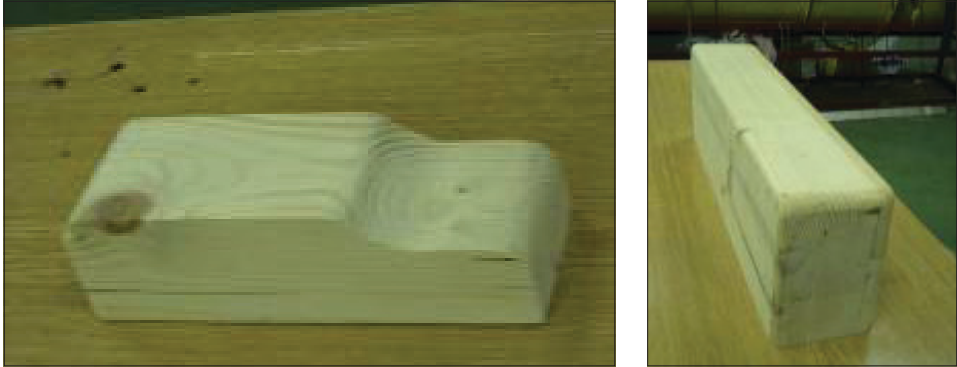
Tabela 2. Karakteristike modelskog motora

kV klasa	3500	[rpm/Volt]
Ulazni napon	7.4-11.1	[V]
Maksimalna konstantna struja	12	[A]
Maksimalna snaga	25 A:133	[W]
Prečnik statora motora	20	[mm]
Dužina motora	40	[mm]
Prečnik vratila	2	[mm]
Dužina vratila	10.5	[mm]
Težina	65	[grama]

Na invertoru napona postoji izvod za potenciometar – kontroler brzine obrtaja. Posebnim uređajem je omogućeno istovremeno povezivanje više ovih izvoda na jedan ili na dva kontrolera. Na ovaj način se svi ventilatori u tunelu mogu jednako i istovremeno upravljati istim intenzitetom sa jednog kontrolera. Takođe, postoji mogućnost da se analiziraju režimi brze promjene smjera rada ventilatora i strujanja vazduha, odvojenim povezivanjem ventilatora u dvije grupe različite po smjeru – na dva različita nezavisna kontrolera.

2.2. MAKETE MOTORNIH VOZILA

Sva modelska vozila (Sl. 4 (a) (b)) napravljena su od drveta, u razmjeri u odnosu na stvarna vozila, kao model i objekat (1:19).



Sl. 4. Makete vozila u modelu tunela: (a) Putnička vozila (24 cm x 9.5 cm x 8 cm); (b) Autobus (61.5 cm x 12 cm x 19 cm)

3. PRORAČUN PODUŽNE VENTILACIJE U TUNELIMA

Ukupni pad pritiska usljed otpora se može sračunati pomoću izraza:

$$\Delta p_{UK} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 + \Delta p_5 \text{ [Pa]} \quad (1)$$

gdje su:

- Δp_{UK} – ukupni pad pritiska vazduha koji struji kroz tunel;
- Δp_1 – otpor od efekta dimnjaka;
- Δp_2 – otpor od podužnog trenja;
- Δp_3 – otpor koji se javlja na ulazu i na izlazu iz tunela (zbir);
- Δp_4 – otpor od kretanja vozila u tunelu;
- Δp_5 – otpor koji je prouzrokovan dinamičkim pritiskom vjetra.

3.1. RELACIJE ZA PRORAČUN PODUŽNE VENTILACIJE

U literaturi i projektima sistema ventilacije saobraćajnih tunela mogu se naći sljedeće relacije za proračun ukupnog pada pritiska vazduha koji struji kroz tunel.

– Otpor od efekta dimnjaka

Ovaj otpor nastaje kao posljedica gravitacionog efekta usljed zagrijavanja vazduha u tunelu. Zbog kretanja vozila kroz tunel i toplote u tlu i zidovima tunela, dolazi do zagrijavanja vazduha. Intenzitet ovog efekta iskazan je relacijom:

$$\Delta p_1 = \Delta \rho \cdot g \cdot H \text{ [Pa]}, \quad (2)$$

gdje su:

- H [m] – visinska razlika portala tunela;
- Δp [kg/m³] – razlika gustina vazduha između portala tunela;
- $g = 9.81$ [m/s²] – ubrzanje Zemljine teže.

U opštem slučaju smjer strujanja može biti suprotan ovom efektu pa stoga on učestvuje u sumi ukupnog potrebnog napora sistema ventilacije.

– Otpor od podužnog trenja

$$\Delta p_2 = \xi_{TR} \frac{L}{D_H} \frac{\rho v^2}{2} \quad [\text{Pa}], \quad (3)$$

gdje su:

- ξ_{TR} – koeficijent uzdužnog trenja [/];
- L – dužina tunela [m];
- D_H – hidraulički prečnik tunela [m];
- ρ – gustina vazduha u tunelu [kg/m³];
- v – brzina vazduha u tunelu [m/s].

– Otpor koji se javlja na ulazu i na izlazu iz tunala

$$\Delta p_3 = (\zeta_{UL} + \zeta_{IZ}) \frac{\rho v^2}{2} \quad [\text{Pa}], \quad (4)$$

gdje su:

- ζ_{UL} i ζ_{IZ} – koeficijenti lokalnog otpora (na ulazu i na izlazu iz tunela).

– Otpor od kretanja vozila u tunelu

Prilikom kretanja vozila kroz tunel, vozila potiskuju (guraju) vazduh ispred sebe. Ovo potiskivanje naziva se klipni efekat. U zavisnosti od smjera kretanja i intenziteta brzine nekog vozila u odnosu na kretanje vazduha kroz tunel, klipni efekat može biti otpor ili uzgon kretanju vazduha. Relevantna brzina za računanje intenziteta ovog efekta je relativna brzina opstrujavanja vozila vazduhom. Znak (karakter) ovog člana diktira intenzitet brzine vozila u odnosu na brzinu vazduha – za vozila koja se kreću u smjeru kretanja vazduha. Za vozila u suprotnoj saobraćajnoj traci, ovaj znak je uvijek pozitivan (član je otpor strujanju) – a relativna brzina je uvijek zbir brzine vazduha i brzine vozila.

$$F_{R4} = \zeta \cdot A_{VOZ} \cdot \frac{\rho v_{REL}^2}{2} \text{sign}(v - v_{VOZ}) \quad [\text{N}], \quad (5)$$

gdje su:

- ζ – koeficijent lokalnog otpora za odgovarajući tip vozila;
- A_{VOZ} – površina frontalnog presjeka vozila;
- $\frac{\rho v_{REL}^2}{2}$ – dinamički pritisak (na osnovu relativne brzine strujanja oko vozila).

Vrijednosti koeficijenta otpora vozila koje se mogu naći u literaturi date su u tabeli 3.

Tabela 3. Koeficijenti otpora vozila iz literature [6,7,8] i površine čeonog presjeka vozila

	$\zeta_{\text{AUTO}} / \zeta_{\text{BUS}}$	A [m ²]
PUTNIČKA VOZILA	0.35 – 0.50	1.75
AUTOBUSI	0.90 – 1.35	6

Rezultujući pad pritiska od ovih otpora se dobija iz veze:

$$\Delta p_4 = \frac{\sum F_R}{A_{TUN}} \quad [\text{Pa}], \quad (6)$$

– Otpor od vjetra

Prisustvo vjetra na jednom od portala tunela stvara natpritisak sljedećeg intenziteta:

$$\Delta p_5 = \frac{\rho v v_{JET}^2}{2} \quad [\text{Pa}], \quad (7)$$

Ako pravac vjetra nije saosan tunelskoj cijevi, brzina u prethodnom izrazu je normalna projekcija brzine vjetra upravno na presjek tunela.

4. REZULTATI MJERENJA

Na modelu nijesu prisutni efekti od dimnjaka i vjetra. Klipni efekat (usljed kretanja vozila) se svodi na slučaj lokalnog otpora opstrujavanog brzinom kretanja vazduha. Slijedi da je:

$$\Delta p = \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 \quad [\text{Pa}], \quad (8)$$

gdje su:

– pad pritiska od podužnog trenja kroz tunel: $\Delta p_2 = \xi_{TR} \frac{L}{D_H} \frac{\rho v^2}{2} \quad [\text{Pa}]$

– lokalni gubitak pritiska na ulazu i na izlazu (suma): $\Delta p_3 = (\zeta_{UL} + \zeta_{IZ}) \frac{\rho v^2}{2} \quad [\text{Pa}]$

– otpor od vozila prisutnih u tunelu: $\Delta p_4 = \sum N_{VOZ} \frac{A_{VOZ}}{A_{TUN}} \zeta_{VOZ} \frac{\rho v^2}{2} \quad [\text{Pa}]$

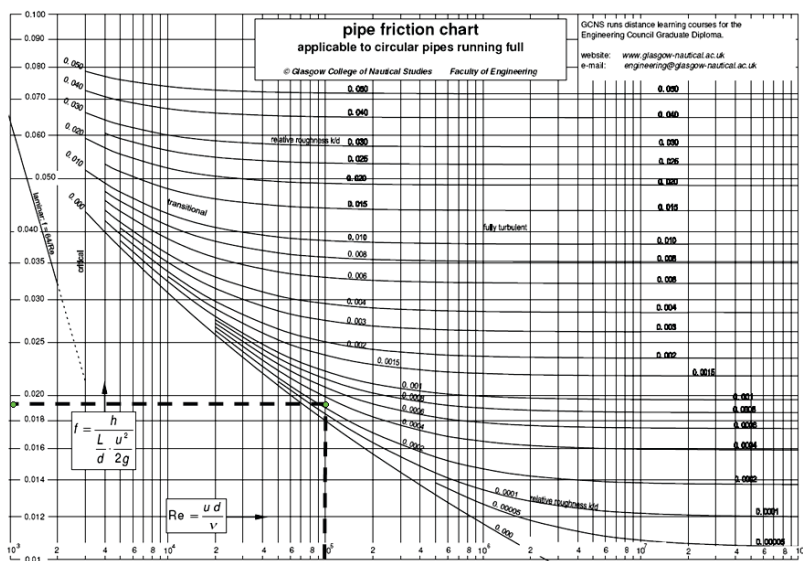
– Koeficijent trenja ξ_{TR} – relativna hrapavost tunela

Na Sl. 5(a) i Sl. 5(b) prikazana je instalacija u toku mjerenja hidrauličkog otpora od podužnog trenja (koeficijenta trenja tunela), otpora od vozila i lokalnih otpora na ulazu i na izlazu iz tunela. Na ulazu tunela montiran je aksijalni ventilator. Statički natpritisak je mjereno u različitim presjecima tunela pomoću dife-

Sl. 5(a) Instalacija pri mjerenju ξ_{TR} Sl. 5(b) Manometar – mjerenje Δp

rencijalnog manometra. Brzina vazduha mjerena je na izlaznom presjeku tunela. Mjerenje za iste uslove je ponavljano 3 puta i rezultati su osrednjeni.

Na Sl. 6. dat je Moody dijagram, u kome je ucrtana jedna radna tačka iz mjerenja koeficijenta trenja tunela, sa koordinatama: $Re = 1.02 \times 10^5$, $\xi_{TR} = 0.01963$. Efektivna relativna hrapavost tunela iznosi: $\delta/D_H \sim 0.00035$. Za dalje analize u ovom radu je koeficijent trenja određivan: iz Moody dijagrama za potrebnu vrijednost Re broja, ili je korištena formula Hallanda [5] koja daje zadovoljavajuću tačnost ξ_{TR} u opsegu Re brojeva koji su od interesa u ovom radu.

Sl. 6. Moody dijagram za koeficijent trenja $\xi_{TR} = f(Re)$

– Ulazni otpor

Mjerenjem je ustanovljeno da koeficijent hidrauličkog otpora ulaska vazdušne struje u tunel ima vrijednost: $\zeta_{ULAZ} = 0.564$.

– Izlazni otpor

Koeficijent izlaznog gubitka iznosi: $\zeta_{IZLAZ} = 1.0$.

– Koeficijent otpora vozila

Za putničke automobile je izmjerena vrijednost: $\zeta_{AUTO} \approx 0.5$, a za autobus $\zeta_{BUS} \approx 1.0$

5. REŽIMI SAOBRAĆAJA I PAD PRITISKA

U Tabeli 4 su date geometrijske dimenzije i parametri potrebni za proračun pada pritiska. Eksperimentalno je mjerena srednja brzina strujanja vazduha za različite režime broja vozila prisutnih u tunelu, za dvije analizirane statičke sile potiska ventilacionog sistema.

Kritičan režim gustine saobraćaja je režim kome odgovara brzina kretanja $v = 10$ [km/h] po VRS (austrijskom) standardu. Za uporednu analizu sa rezultatima eksperimenata zadržana je ova vrijednost kritične gustine prisutnih vozila.

T. 4. Podaci o modelu

L – dužina	20.5	[m]
D_H (hidraulički prečnik)	0.40	[m]
Širina kolovoza	0.47	[m]
A_{TUN} (površ. pres.)	0.1463	[m ²]
Broj ventilatora – glavni tunel	3 x 2 = 6	[kom]
Sila potiska (statički potisak)	7.17 [N] / 12.76 [N]	

Gustina prometa vozila sračunata je prema austrijskim smjernicama RVS 9.262 na osnovu izraza:

$$D = \frac{150M_{DIM}}{150v + M_{DIM}\left(1 - \frac{v}{v_0}\right)^2} \text{ [voz/km]} \quad (9)$$

D – predstavlja broj vozila po km; M_{DIM} dimenzionisani intenzitet prometa; $v_0 = 60$ [km/h] je usvojena vrijednost brzine kretanja vozila, iz projekta tunela usvojenog za objekat (tunel Sozina). Analizirana su 2 režima saobraćaja koja nastaju pri brzinama kretanja vozila od 10 [km/h] i 80 [km/h]. Usvojeno je za oba režima saobraćaja da se u tunelu nalazi 80% putničkih vozila i 20% autobusa.

Dimenzionisani intenzitet prometa kod tunela Sozina, po projektu iznosi $M_{DIM} = 3700$ [voz/h]. Slijedi da je gustina prisutnih vozila u tunelu, pri brzini kretanja vozila od 10 [km/h]:

$$D = \frac{150 \cdot 3700}{150 \cdot 10 + 3700 \left(1 - \frac{10}{60}\right)^2} = 136 \text{ [vozila/km]} \quad (10)$$

Pošto se radi o dvosmjernom saobraćaju u jednoj tunelskoj cijevi slijedi da je u tunelu po 68 vozila u svakoj saobraćajnoj traci. Na osnovu dobijenog rezultata slijedi da je broj vozila u tunelu modelu: 27 vozila u svakoj traci. Prosječno rastojanje između vozila u modelu je ~ 0.5 [m]. Za regularni režim saobraćaja usvojena brzina je 80 [km/h], te za taj režim slijedi:

$$D = \frac{150 \cdot 3700}{150 \cdot 80 + 3700 \left(1 - \frac{80}{60}\right)^2} = 35 \text{ [vozila/km]} \quad (12)$$

Prema tome, u tunelu objektu je prisutno po 17 vozila u obje saobraćajne trake, po kilometru dužine tunela. Slijedi da će u modelu tunela biti po 7 vozila po saobraćajnoj traci. Prosječno rastojanje između vozila u modelu u tom slučaju iznosi ~ 2.5 [m].

U Tabeli 5 sistematizovan je sračunati broj vozila (putničkih vozila i autobusa) u modelu za:

- kritični režim u analizi (kada broj vozila odgovara brzini kretanja vozila od 10 [k/hm]),
- normalni režim (koji odgovara brzini kretanja vozila od 80 [km/h]).

Tabela 5. Broj putničkih i teretnih vozila u modelu, u odnosu na režim saobraćaja

	Kritičan režim saobraćaja $v_{\text{VOZ}} = 10$ [km/h]	Normalan režim saobraćaja $v_{\text{VOZ}} = 80$ [km/h]
Putnička vozila	43	11
Autobusi	11	3

5.1. KRITIČAN REŽIM SAOBRAĆAJA

– Urađeno je mjerenje protoka vazduha u modelu za maksimalni broj vozila (koji odgovara gustini saobraćaja pri brzini vozila od $v = 10$ [km/h], vidi T. 5). Temperatura vazduha iznosila je 33 °C, gustina vazduha $\rho = 1.153$ [kg/m³]. U tunelu su postavljena 52 vozila – po 26 vozila u 2 trake. Od toga je po 5 autobusa i 21 putničko vozilo – u svakoj traci.

– Prosječno rastojanje između vozila iznosi ~ 0.5 [m]. Dužina modela: $L = 20.5$ [m]. Površina poprečnog presjeka tunela iznosi: $A_{\text{TUN}} = 0.1463$ [m²]. Hidraulički prečnik modela iznosi: $D_{\text{H}} = 0.4$ [m].

– Vozila miruju u modelu.

– Uključeno je svih 6 ventilatora sistema ventilacije. Mjerenje je izvršeno pri 2 intenziteta rada motora – tj. 2 vrijednosti ukupne statičke sile potiska ventilacio-

nog sistema od: 7.17 [N] i 12.78 [N] koje su dobijene testiranjem ventilatora. Rezultati mjerenja su sistematizovani u Tabeli 6. Brzine su dobijene osrednjavanjem izmjerenih vrijednosti srednje brzine strujanja po poprečnom presjeku modela. Za određivanje srednje brzine strujanja po poprečnom presjeku korišćen je turbinski anemometar i vremensko osrednjavanje skeniranjem poprečnog presjeka,

– Pad pritiska vazduha u tunelu Δp_{UK} je sračunat koristeći relaciju (8):

$$\Delta p_{UK} = \zeta_{UL} \frac{\rho v^2}{2} + \sum N_{VOZ} \cdot \zeta_{VOZ} \frac{A_{VOZ} \rho v^2}{A_{TUN}^2} + \xi_{TR} \frac{L}{D_H} \frac{\rho v^2}{2} + \zeta_{IZ} \frac{\rho v^2}{2} \quad (13)$$

Tabela 6. Rezultati mjerenja i proračun pada pritiska. Broj vozila odgovara gustini saobraćaja pri brzini kretanja vozila 10 km/h (usvojeni kritični režim)

Ukupna sila statičkog potiska ventilacije: F_p [N]	Statički napor ventilacionog sistema: Δp_v [Pa]	Izmjerena brzina vazduha: v [m/s]	Sračunati pad pritiska vazduha: Δp [Pa]
7.17 [N]	49 [Pa]	2.89 [m/s]	23.90 [Pa]
12.78 [N]	87.2 [Pa]	4.12 [m/s]	51.39 [Pa]

5.2. NORMALAN REŽIM SAOBRAĆAJA

Urađeno je mjerenje protoka vazduha za broj vozila u tunelu koji odgovara gustini saobraćaja nastaloj pri brzini kretanja vozila od 80 [km/h] (vidi Tabelu 5). Sobna temperatura je iznosila 33 °C, gustina vazduha $\rho = 1.153$ [kg/m³]. U modelu je postavljeno 14 vozila: 11 putničkih i 3 autobusa, tj. po 7 vozila u obje saobraćajne trake. Uključen je sistem ventilacije sa svih 6 ventilatora pri dva intenziteta rada – sili potiska od 7.17 [N] i 12.76 [N]. Rezultati su sistematizovani u Tabeli 7.

Tabela 7. Rezultati mjerenja i proračuna pada pritiska (broj vozila odgovara slučaju gustine saobraćaja pri brzini kretanja vozila 10 km/h – kritični režim)

Ukupna sila statičkog potiska ventilacije: F_p [N]	Statički napor ventilacionog sistema: Δp_v [Pa]	Izmjerena brzina vazduha: v [m/s]	Sračunati pad pritiska vazduha: Δp [Pa]
7.17 [N]	49 [Pa]	3.05 [m/s]	16.23 [Pa]
12.76 [N]	87.2 [Pa]	4.90 [m/s]	38.47 [Pa]

6. ANALIZA REZULTATA

6.1. EFIKASNOST VENTILACIJE

Efikasnost sistema ventilacije predstavlja odnos između ukupnog pada pritiska vazduha koji prinudno struji kroz tunel i statičkog pada pritiska (napora) koji odgovara izmjerenoj statičkoj sili potiska ventilatora. Ovaj odnos iskazuje u kojoj

mjeri je efikasan prenos impulsa ventilatora na impuls struje vazduha koji se kreće kroz tunel.

Analizirana je efikasnost pojedinih baterija (parovi ventilatora: 1 i 2, 3 i 4, 5 i 6), u dvije varijante intenziteta sile potiska ventilatora. Ovdje je dat rezultat mjerenja i proračuna samo za slučaj rada svih 6 ventilatora u navedene dvije vrijednosti sile potiska. Ovim silama odgovaraju različite vrijednosti brzine strujanja vazduha i brzine na potisku ventilatora.

– Prazan tunel

Uključeno je svih 6 ventilatora. Sila potiska je imala dvije vrijednosti: 7.12 i 12.76 [N]. Mjerena je srednja brzina vazduha po presjeku modela. Rezultati su dati u Tabeli 8.

Tabela 8. Mjerenje efikasnosti ventilacije pri strujanju kroz prazan tunel

Sila potiska F_p [N]	Napor ventilacionog sistema: Δp_v [Pa]	Izmjerena brzina vazduha v [m/s]	Pad pritiska Δp [Pa]	Efikasnost ventilacije η_v
7.17 [N]	49 [Pa]	4.175 [m/s]	25.94 [Pa]	0.5294
12.76 [N]	87.2 [Pa]	6.27 [m/s]	57.23 [Pa]	0.6563

– Tunel sa vozilima – kritični režim saobraćaja (10 [km/h])

Analogno prethodnom slučaju, određivana je efikasnost ventilacije u slučaju kada su vozila prisutna u tunelu. Za slučaj broja vozila koji odgovara gustini saobraćaja pri brzini kretanja vozila od 10 [km/h] (kritični režim), dobijeni su rezultati sistematizovani u Tabeli 9.

Tabela 9. Mjerenje efikasnosti ventilacije pri strujanju kroz prazan tunel

Sila potiska F_p [N]	Napor ventilacionog sistema: Δp_v [Pa]	Izmjerena brzina vazduha v [m/s]	Pad pritiska Δp [Pa]	Efikasnost ventilacije η_v
7.17 [N]	49 [Pa]	2.89 [m/s]	25.60 [Pa]	0.5225
12.76 [N]	87.2 [Pa]	4.12 [m/s]	51.47 [Pa]	0.6060

– Tunel sa vozilima – normalni režim saobraćaja (80 [km/h])

Analogno prethodnom slučaju, mjereni su parametri potrebni za određivanje efikasnosti ventilacije u slučaju kada su vozila prisutna u tunelu u broju i rasporedu koji odgovara gustini saobraćaja pri brzini kretanja vozila od 80 [km/h]. Dobijeni su rezultati sistematizovani u Tabeli 10.

Tabela 10. Mjerenje efikasnosti ventilacije pri strujanju kroz prazan tunel

Sila potiska F_p [N]	Napor ventilacionog sistema: Δp_v [Pa]	Izmjerena brzina vazduha v [m/s]	Pad pritiska Δp [Pa]	Efikasnost ventilacije η_v
7.17 [N]	49 [Pa]	3.05 [m/s]	18.25 [Pa]	0.3724
12.76 [N]	87.2 [Pa]	4.90 [m/s]	45.96 [Pa]	0.5271

Uslovi pri kojima su dobijeni rezultati u tabelama 9 i 10, kada su u tunelu prisutna vozila, djelimično odstupaju od realnih uslova na objektu u dijelu nepokretnosti maketa vozila koje se u realnom modelu kreću. Međutim, broj vozila odgovara gustini saobraćaja i ostali parametri su vjerodostojni pa se može smatrati da prethodni rezultati mjerenja približno kvantifikuju uticaje uslova strujanja na efikasnost prenosa impulsa ventilacije na vazduh u tunelu.

6.2. PRORAČUN PADA PRITISKA NA OBJEKTU SOZINA NA OSNOVU REZULTATA DOBIJENIH NA MODELU

Ako model tunela ekspaniramo na gabarite objekta, uvećavanjem za faktor 19, dobićemo tunel poprečnog presjeka $A_{\text{TUN}} = 57 \text{ m}^2$ i dužine 390 m. Smatrajući da koeficijenti lokalnih otpora ne zavise od Rejnoldsovog broja i korigujući vrijednost koeficijenta trenja za tunel objekat shodno vrijednosti hidrauličkog prečnika D_H objekta, može se sračunati pad pritiska u tunelu objektu. U Tabeli 11 su dati sračunati pad pritiska dobijen za model i sračunati pad pritiska za korespondentni objekat – pri usvojenoj brzini strujanja vazduha od 6 [m/s]. Prikazani podaci odgovaraju broju vozila u tunelu koji nastaje pri kritičnom režimu saobraćaja. Usvojeno je da su vozila nepokretna u oba tunela.

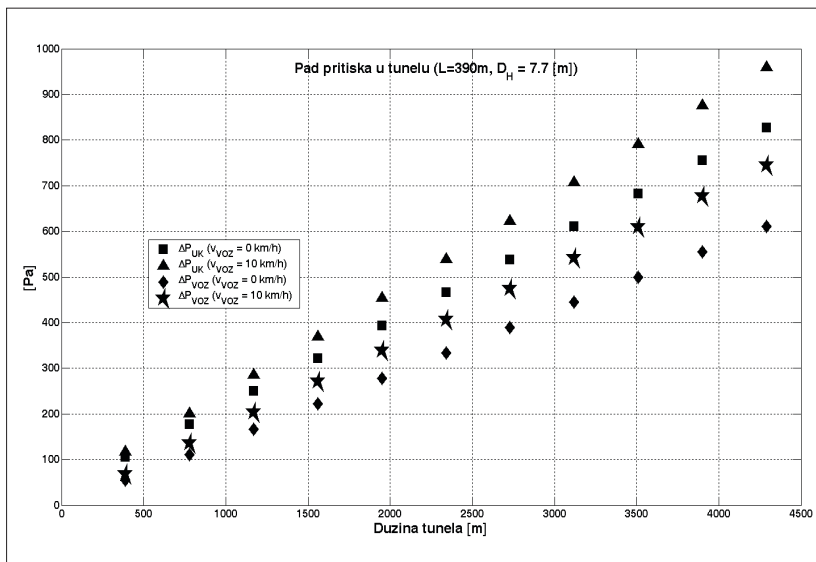
Ako se usvoji da je brzina kretanja vozila u tunelu objektu 10 [km/h] ≈ 2.8 [m/s], dobija se proračunom:

- $\Delta p_{\text{TR}} = 16.65$ [Pa], otpor od podužnog trenja,
- $\Delta p_{\text{VOZ}} = 56.78$ [Pa], otpor od vozila,
- $\Delta p_{\text{UL}} + \Delta p_{\text{IZ}} = 32.78$ [Pa], suma otpora na ulazu i na izlazu,
- $\Delta p_{\text{UK}} = 106.21$ [Pa], ukupni pad pritiska.

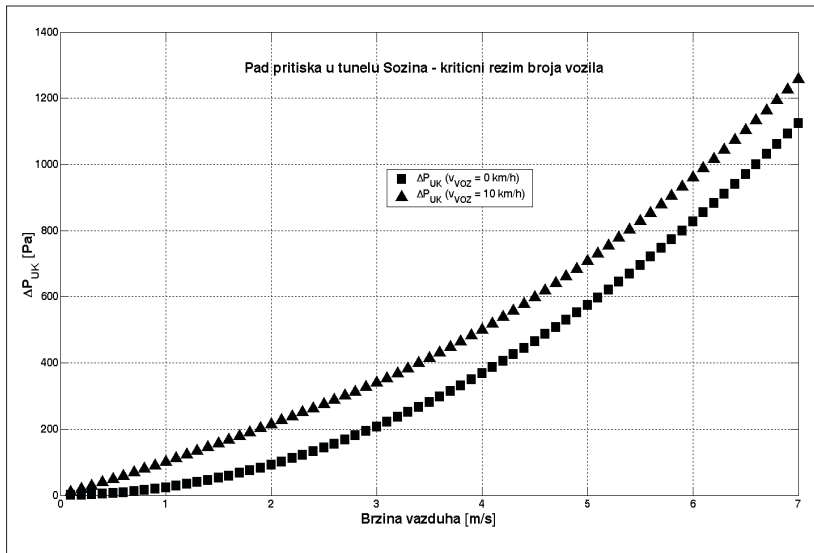
Analogni rezultat se može dobiti za objekat dužine tunela Sozina ($\approx 11 \times L_{\text{modela}} = 4290$ [m]) pri brzini strujanja vazduha od 6 [m/s]. Rezultat je dat grafički na Sl. 7. Prikazani su ukupni pad pritiska i pad pritiska od vozila – u dvije varijante računa: $v_{\text{VOZ}} = 0$ i $v_{\text{VOZ}} = 2.8$ [m/s] ≈ 10 [km/h], u funkciji dužine tunela.

Tabela 11. Pad pritiska za model i korespondentni objekat, $v = 6$ m/s

	Tunel objekat	Model (LAB)
A_{AUTO} [m ²]	2.75	0.0076
A_{BUS} [m ²]	8.883	0.0228
A_{TUN} [m ²]	57	0.1463
N_{AUTA}	2 x 21	2 x 21
N_{BUS}	2 x 5	2 x 5
L [m]	20.5 x R = 390m	20.5m
D_{H} [m]	7.7	0.4
ζ_{AUTO}	0.5	0.5
ζ_{BUS}	1	1.0
$\zeta_{\text{ULAZ}} + \zeta_{\text{IZLAZ}}$	1.564	1.564
ζ_{TR}	0.01568	0.01843
ρ [kg/m ³]	1.153	1.153
v_{VOZ} [km/h]	0	0
v [m/s]	6	6
Re	2.84×10^6	1.47×10^5
Δp_{TR} [Pa]	16.65	19.81
Δp_{VOZ} [Pa]	55.55	55.55
$\Delta p_{\text{UL}} + \Delta p_{\text{IZ}}$ [Pa]	32.78	32.78
Δp_{UK} [Pa]	104.99	108.15

Sl. 7. Pad pritiska u objektu u funkciji dužine, $v = 6$ [m/s], $v_{\text{VOZ}} = 0 / 10$ [km/h]

Analiziran je i pad pritiska vazduha u objektu Sozina u funkciji brzine strujanja vazduha. Pretpostavljeno je (kao za prethodni rezultat) da koeficijenti hidrauličkih lokalnih otpora ne zavise od Re broja. Koeficijent podužnog trenja je sračunat iz formule Hallanda [5], na osnovu tekuće vrijednosti Re broja, za relativnu hrapavost tunela $\delta/D_H \approx 0.00035$, dobijenu na modelu. Rezultat proračuna je dat grafički na Sl. 8.



Sl. 8. Pad pritiska u objektu Sozina u funkciji brzine vazduha, $v_{voz} = 0 / 10$ [km/h]

Rezultat predstavlja procjenu ukupnog pada pritiska vazduha u tunelu dužine 4290 [m] pri kritičnom režimu saobraćaja (broj vozila odgovara režimu saobraćaja pri brzini kretanja vozila od 10 [km/h]).

Zavisno od projektnih uslova koji određuju potrebni protok vazduha kroz tunel, može se odrediti brzina strujanja i sa krive na Sl. 8. odrediti pad pritiska vazduha u tunelu. Ventilacioni sistem se dimenzioniše da zadovolji taj pad pritiska. Za izabrani model ventilatora i uslove strujanja (brzina strujanja vazduha u tunelu, brzina strujanja vazduha na potisu ventilatora i geometrijski parametri) određuje se efikasnost ventilacije [3]. Efikasnost može da odstupa od ovdje datih vrijednosti u zavisnosti od karakteristika ventilatora, upotrebe prigušivača (usmjerivača) na potisu, otklona ose ventilatora od krova tunela ka unutrašnjosti tunela, brzine vazduha kroz ventilator i drugih faktora.

Na osnovu određene efikasnosti ventilacije i sile potiska usvojenog ventilatora sračunava se potrebni broj ventilatora sistema koji zadovoljava.

7. ZAKLJUČAK

U radu su dati rezultati dobijeni eksperimentalnim putem na modelu saobraćajnog tunela: koeficijenti hidrauličkih otpora strujanju u saobraćajnom tunelu, vrijednosti pada pritiska i efikasnosti ventilacionog sistema za različite uslove gustine saobraćaja i strujanja u tunelu.

Prikazan je postupak proračuna pada pritiska koji se koristi pri postupku projektovanja ventilacije podužno ventilisanih saobraćajnih tunela za dimenzionisanje sistema. Dat je poseban osvrt na pitanje efikasnosti ventilacije, za različite uslove strujanja.

Na osnovu rezultata dobijenih na modelu, analiziran je problem pada pritiska u objektu – tunelu Sozina, u funkciji brzine strujanja vazduha. Dat je grafički prikaz u vidu zavisnosti ukupnog pada pritiska vazduha u ovom tunelu u funkciji brzine strujanja, pri kritičnom režimu gustine saobraćaja (koji odgovara brzini kretanja vozila od $v_{VOZ} = 10$ [km/h]). Prikazana je vrijednost pada pritiska kada su vozila nepokretna i za slučaj kada se vozila kreću odgovarajućom brzinom (10 [km/h]). Pretpostavlja se da se pomoću koeficijenata hidrauličkih otpora vozila određenih za nepokretna vozila može procijeniti klipni efekat i u slučaju pokretnih vozila pri manjim brzinama kretanja.

LITERATURA

- [1] F. Tarada. Impulse Ventilation for Tunnels – A State of the Art Review. 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, New Brunswick, New Jersey, USA, May 2009.
- [2] A. D. Martegani, G. Pavesi, C. Barbeta. Uno studio sperimentale sulla ventilazione longitudinale nelle gallerie. Gallerie e grandi opere sotterranee, Marzo 1996. N 48.
- [3] WOODS. Priručnik za projektovanje ventilacionih sistema tunela, 2011.
- [4] Proceedings from International Conference on Tunnel Ventilation and Fire Safety, Technical University Graz, May 2009.
- [5] F. White. Fluid Mechanics. Textbook, McGraw-Hill 2001.
- [6] Projekat ventilacije tunela Raš, jul 2002.
- [7] Projekat ventilacije tunela Ivica, 1997.
- [8] Projekat ventilacije tunela Sozina, jun 2004.

ENERGY EFFICIENCY OF LONGITUDINAL VENTILATION
SYSTEM OF TRAFFIC TUNNELS

Abstract: In this paper, the results obtained through experiments on reduced-scale model of a road traffic tunnel, with a system of longitudinal tunnel ventilation, are presented. The tunnel model is a smaller scale example of a single-tube two-way road traffic tunnel, equipped with a longitudinal ventilation system by means of axial jet fans. Hydraulic resistances occurring in the tunnel have been analyzed and the efficiency of the ventilation system of the tunnel ventilation is experimentally analyzed in different regimes of traffic and flow. Based on the experimental results obtained on the model, an estimate of the pressure drop of a corresponding traffic tunnel is given.

Key words: *tunnel ventilation, tunnel modeling, jet fans*

