

## کاهش سطح مقطع تونل‌های راه‌آهن با اجرای دویل‌های فشارشکن هوا

سیده گلانه حسینی، دانشجوی کارشناسی ارشد تونل‌سازی دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
حسن مدنی، استادیار دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
کوروش شهریار، استاد دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
علی مرتضوی، دانشیار دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

هنگامی که یک قطار با سرعت بالا از دهانه خروجی تونل بیرون می‌آید یک موج فشاری تولید می‌کند که باعث ایجاد یک صدای ضربه‌ای به نام موج میکروفشار می‌شود. به منظور کاهش موج فشاری ایجاد شده، یکی از مهم‌ترین و موثرترین راه‌ها، طراحی مناسب شکل دماغه قطار است. علاوه بر این، دویل‌های ایجاد شده در سقف تونل موجب کاهش فشار و خروج هوا از تونل به خارج می‌شوند. از این دویل‌ها، به منظور کاهش اثر پالس میکروفشار، زمانی که موج فشار به انتهای تونل می‌رسد، استفاده می‌کنند.

یکی از کاربردهای دویل‌های میانی، کاهش نوسانات فشار و راحتی مسافران در قطارهایی با سرعت بالا است. در این دویل‌های آزادسازی فشار باعث کاهش سطح مقطع تونل می‌شود و هزینه‌های حفاری را کاهش می‌دهد و از لحاظ اقتصادی نیز به صرفه است. علاوه بر آن دویل‌های آزادسازی فشار باعث خروج دود و بهبود کیفیت هوای داخل تونل می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: کاهش فشار، دویل میانی، تونل‌های راه‌آهن، نرم افزار Thermotun

### ۱- مقدمه

شهری، تونل‌های بزرگراه‌ها، خطوط حمل و نقل و پیاده‌روهایی زیرزمینی به فراوانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مجموع سازه‌های تونل‌های ترابری به دلیل استفاده و دربرداشتن جمعیت بالایی کاربران و همچنین حجم بالای سرمایه‌گذاری انجام شده، جزو نقاط کلیدی هر شهر به حساب می‌آید [۶].

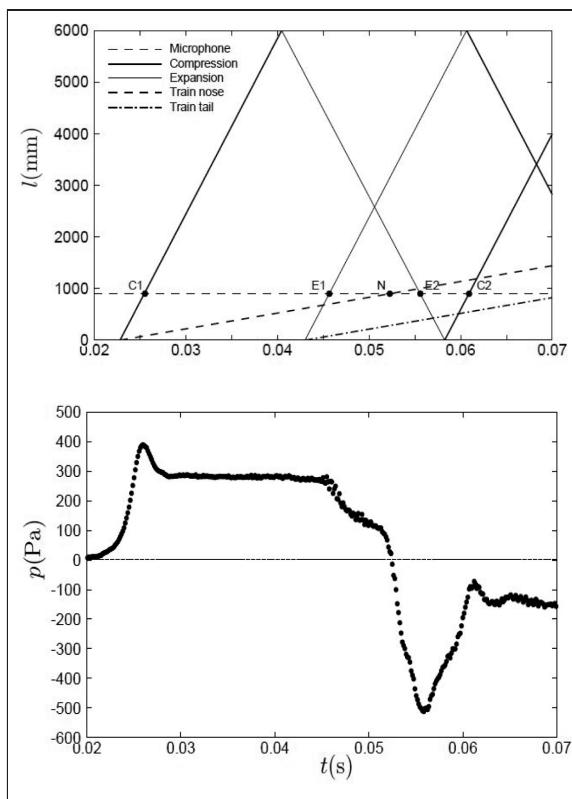
### ۲- فشار ایجاد شده به وسیله قطار هنگام ورود به تونل

هنگامی که قطار از تونل عبور می‌کند، نوسانات سریع در فشار هوا ایجاد می‌شود که ناشی از ورود اولین قطار به داخل تونل و عبور قطار از تونل است. این نوسانات فشار هوا که مسافران به احتمال زیاد تجربه کرده‌اند، در شرایط نرمال به ندرت بیش از ۲/۵ کیلو پاسکال در عرض چند ثانیه است.

زمانی که قطار از تونل عبور می‌کند، موج فشاری هوا را به وجود می‌آورد. این امواج فشاری باعث ایجاد ناراحتی و عدم

صنعت راه‌آهن یک دوره شکوفایی از پیشرفت و نوآوری را به ویژه در فناوری قطارهای با سرعت بالا طی می‌کند. در ۲۵ سال گذشته، تحقیقات مهندسی راه‌آهن منجر به مسافرت با قطارهایی با سرعت‌های بالاتر از ۳۰۰ کیلومتر در ساعت شده است. پیشرفت‌های فناوری همراه با مشکلات مهندسی از قبیل سرو صدای آئرودینامیکی و کاهش فشار هوا است. سرو صدای آئرودینامیکی بزرگ‌ترین نگرانی در شرایط عملیاتی سرعت‌های بالا است. این سرو صدا ناشی از صدای چرخ قطار نیز هست که فاکتور اختلال در سرعت پایین به حساب می‌آید [۵].

سازه‌های زیرزمینی با توجه به گسترش و توسعه شهرها، به‌طور فزاینده‌ای ساخته می‌شوند و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در این شرایط، تونل‌های ترابری شامل متروهای



شکل ۱- فشار هوا در داخل تونل و نمودار موج برای قطار بلند مسافرتی با سرعت ۱۱۰ کیلومتر در ساعت، عبور امواج قطار در میکروفن با نقطه‌های سیاه در نمودار موج نشان داده شده است.

روند فشار هوا، پس از عبور از اولین موج تراکم تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در این فاصله، فشار از منطقه بین دماغه قطار و بخشی از پشت قطار از موج تراکمی اندازه گرفته می‌شود. کاهش ایجاد شده در این موج در طول تونل برابر با افزایش ناشی از ورود قطار به تونل است. این تاثیرات تقریباً همدیگر را خنثی می‌کنند. فشار هوا تمایل دارد که به شکل یک منطقه محدود شده که در حال گسترش است، به صورت یک موج سریع‌تر از قطار حرکت کند، اما در همان زمان، لایه مرزی روی قطار، تغییرات بیشتری را ایجاد می‌کند.

شدت افزایش فشار هوا بر روی تونل نزدیک به قطار، مطابق با فاصله زمانی تقریباً ثابت مشاهده شده که ممکن است به علت تنش‌های شدید موجود در منطقه بین قطار و دیواره تونل باشد. تغییرات فشار هوا ناشی از موج انبساطی تولید شده توسط انتهای قطار با حس‌گرهایی که در داخل تونل و با فواصل مکانی تعبیه شده‌اند، در زمان‌های مختلف

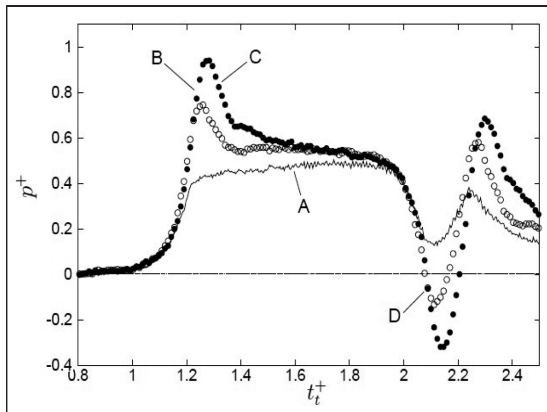
آرامش برای مسافران و موجب افزایش عوارض بیشتر مانند آسیب احتمالی به وسیله نقلیه و انتشار امواج میکروفشار کروی از دهانه تونل می‌شوند [۱۰].

در مورد هندسه تونل و دهانه دوپیل در سطح تونل تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است. هدف از دوپیل هوا، کاهش فشار و خروج هوای آلوده با هزینه‌های پایین است [۳].

## ۲-۱- الگوی فشار

بین اوج فشار هوا و سرعت و شکل دماغه قطار ارتباط قوی وجود دارد. هنگامی که از دوپیل‌های هوا استفاده می‌شود، روند تغییرات فشار هوا با محاسبات یک بعدی به طور کامل انجام می‌گیرد. افزایش مساحت این دوپیل باعث کاهش بیشتر فشار هوا می‌شود. شکل و سطح مقطع قطار بر روی امواج فشاری تولیدی در اثر ورود وسایل نقلیه در یک فضای محدود تاثیر دارد. نقش شکل مقطع تا زمانی که نسبت انسداد مؤثر نباشد چندان زیاد نیست، یعنی نسبت بین محدوده‌های سطح مقطع قطار و تونل ثابت است. امواج فشاری هوا در مسیر باد از دهانه تونل به صورت یک بعدی هستند [۳، ۴].

الگوی فشار هوا در شکل ۱ نشان داده شده است. نمودار بالای شکل ۱ موقعیت قطار در ابتدا و انتهای آن و همچنین موج‌های فشار هوا در سرعت صوت را نشان می‌دهد. این مقادیر با اندازه‌گیری تاخیرهای زمانی در سیگنال‌های فشار در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. خطوط مربوط به موج‌های فشار هوا از خطوط مربوط به حرکت قطار به دلیل سرعت بالاتر، با شیب تندتر نشان داده شده‌اند. خط افقی نشان‌دهنده موقعیت میکروفن است. هر تقاطع این خط با زاویه منفرجه مطابق با تغییرات فشار هوای اصلی است. محل تقاطع موج فشرده، بیانگر رشد فشار هوا است. این موج از حالت تراکمی به انبساطی در داخل تونل تغییر می‌یابد و بخشی از انرژی خود را به خارج از تونل به صورت یک موج کوچک فشاری منتشر می‌کند. اوج موج فشاری، اولین بار توسط موج تراکمی دماغه قطار ایجاد می‌شود. پس از این موج، فشار هوا با همان آهنگی که قبلاً افزایش داشت کاهش می‌یابد [۱].



شکل ۲- تاثیرات زاویه دماغه روی الگوی فشار تجربی برای قطارهای طولانی

$$\alpha = 30^\circ (-), \alpha = 60^\circ (o), \alpha = 90^\circ (\bullet)$$

هوا در نقطه D ایجاد می شود. این کاهش در فشار، ناشی از موج فشرده سازی اولیه است که از جلو قطار به خروجی تونل و پشت قطار می رسد [۴].

#### ۴- نرم افزار Thermotun

نرم افزار Thermotun برای شبیه سازی فشار، سرعت و درجه حرارت در تونل های راه آهن و ایستگاه ها است. مدل های ایجاد شده با این نرم افزار با پارامترهایی از قبیل حرکت قطار و عملیات اجرایی فن ها تغییر می کنند. این نرم افزار به طور خاص برای شبیه سازی اثرات امواج ناشی از قطارهای با سرعت بالا مناسب است [۱۱].

#### ۵- مطالعه موردی: تونل Emmequerung

مسافرت در سرعت های بالا با وجود موانع زیست محیطی مانند کوه ها و رودخانه ها امکان پذیر نیست. زمانی که قطار در داخل یک تونل حرکت می کند با انبساط و انقباض امواج و با تغییر در سطح مقطع ها مواجه است [۸، ۹]. کوچک و بزرگ بودن تغییرات فشار هوا در فواصل زمانی مختلف باعث ایجاد آشفستگی در معیارهای فشار می شود [۱۰]. یک خط راه آهن ارتباطی در سوئیس یکی از اولین پروژه های راه آهن است که در آن چنین دویلی به عنوان بخش جدایی ناپذیر از پروژه طراحی در نظر گرفته شده است. در این

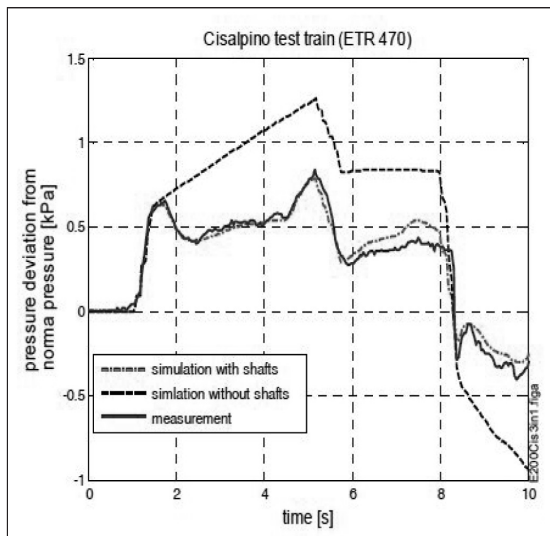
سنجیده می شوند. هنگامی که قطار وارد تونل می شود، منطقه پرفشاری در اطراف دماغه آن ایجاد می شود که گسترش این موج به صورت انتقالی از ورودی تونل به سمت خروجی آن است. منطقه سرعت بالا در اطراف دماغه قطار و گسترش موج به عنوان ورودی از خروج تونل به عنوان بازتاب است. دویل ها برای تهویه و کاهش نوسانات فشار هوا در تونل و عبور و مرور پرسنل تعمیر و نگهداری استفاده می شوند. همچنین برای ایستگاه های میانی لازم هستند و ممکن است در ایستگاه های اضطراری هم احداث شوند. این ایستگاه ها برای به حداکثر رساندن امکان تخلیه و تهویه مطبوع هستند. در این موارد، تاکید بر طراحی آئروپنایمیک و مدیریت فشار هوا است. دویل های تهویه به طور عمده برای مکش دود طراحی شده اند، اما برای تامین هوای تازه برای تونل نیز استفاده می شوند. تاثیر اثر پیستونی برای یک قطار در حال حرکت به شکل گردش هوا در تونل است، اما علاوه بر این ها ممکن است به عنوان تهویه کلی هم استفاده شود. قطار در حال حرکت، در یک تونل، هوا را به بیرون از تونل هول می دهد و هوای تازه بلافاصله از دویل واقع در پشت قطار شروع به گردش در تونل می کند [۲].

#### ۳- تاثیرات شکل دماغه قطار روی فشار

روند تغییرات فشار هوا در داخل تونل هایی که قطارهای طولانی با سرعت بالا و زاویه های دماغه متفاوت در آن حرکت دارند، در شکل ۲ نشان داده شده است. اوج تغییرات برای زاویه دماغه قطار اتفاق می افتد و در این زاویه بعد از افزایش اولیه در فشار هوا، روند تغییرات به طور یکنواخت ادامه می یابد (نقطه A). در نقطه B مقدار اوج فشار هوا با زاویه دماغه قطار افزایش می یابد، زیرا محدوده گردش در دماغه قطار قوی تر می شود [۴].

جریان در قسمت جلو قطار به طرف عقب قطار از راه منطقه حلقوی محدود شده، حرکت می کند و به پشت قطار می رسد و در برخورد با یک محدوده بزرگ تر، سرعت کاهش پیدا کرده و فشار هوا به طور ناگهانی به دلیل منطقه کم فشار پشت قطار، افت می کند (نقطه C). اوج مقدار منفی فشار

در طول اجرای آزمون، اندازه‌گیری‌های فشار هوا در یک تونل اجرا شد. نخست یک تونل بدون دویل و یا دهانه دیگر انتخاب شد. داده‌های فشار هوا از این تونل برای شناسایی ویژگی‌های آئروپدینامیکی برای قطار و در نهایت برای بهبود کیفیت شبیه‌سازی انتخاب شدند. پس از آن برای قطار دوم، فشار نزدیک دهانه غرب و کنار دویل کاهش فشار هوا اندازه‌گیری شد [۷]. سیگنال‌های فشار در این روش، تاثیر قوی چاه را نشان می‌دهند (شکل ۴).



شکل ۴- سیگنال‌های فشار برای تونل Emmequerung با دو دویل آزادسازی فشار هوا

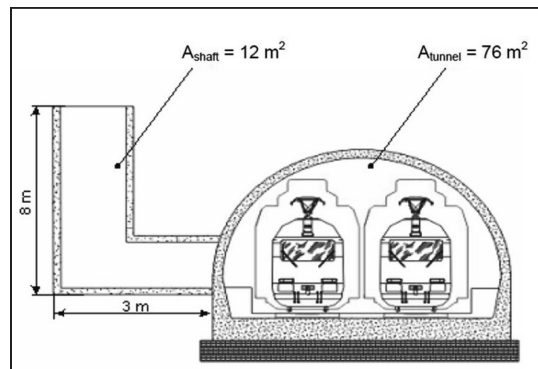
بررسی‌های انجام شده نشان داد که سطح مقطع این تونل‌ها با اضافه کردن دویل آزادسازی تغییر می‌کند. سطح مقطع تونل‌های راه‌آهن بدون حفر دویل باید افزایش یابد (شکل ۵). دویل‌های آزادسازی فشار هوا باعث کاهش نوسانات فشار می‌شوند، که این فشار به وسیله قطارهای با سرعت بالا در تونل تولید می‌شوند [۷].

#### ۶- نتیجه

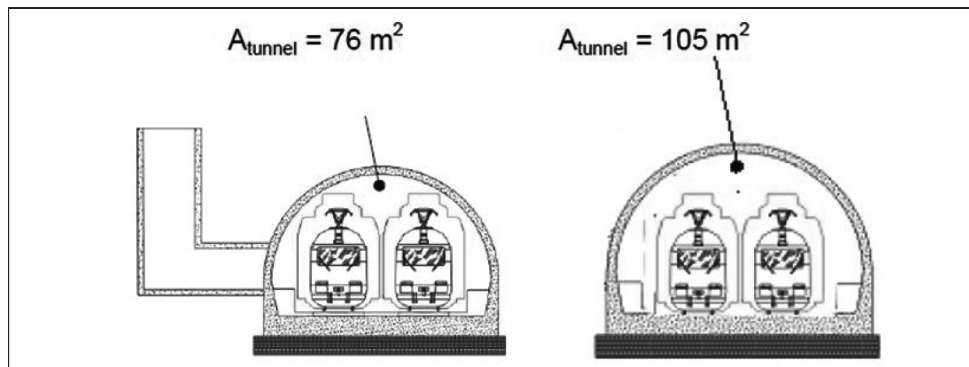
- دویل‌های آزادسازی فشار سبب می‌شوند تا نوسانات فشار که توسط قطارهای با سرعت بالا در معابر تونل تولید شده، کاهش یابد که بهبود سفر و راحتی مسافران و کارکنان را در این مکان‌ها به دنبال خواهد داشت.  
- دامنه موج فشاری هوا با توجه به سرعت قطار و نسبت

تونل اندازه‌گیری‌های آئروپدینامیکی مختلف در تونل‌های متفاوت، با و بدون دویل آزادسازی انجام شده است [۷].

سطح مقطع آزاد این تونل ۷۶ مترمربع است که دو دویل آزادسازی فشار هوا به مساحت ۱۲/۲۵ مترمربع دارد. همان تونل بدون دویل آزادسازی فشار هوا، سطح مقطع بزرگ‌تری نیاز دارد. دویل‌های آزادسازی فشار هوا را می‌توان به عنوان مسیر خروجی، تخلیه دود و بهبود آب و هوا نیز در نظر گرفت. این مزایا بایستی با معایب در تعادل باشند. معایب شامل سروصدا، تولید گازهای گلخانه‌ای و جریان افزایش یافته هوای محلی در تونل است. تونل Emmequerung بخشی از راه‌آهن ارتباطی بین دو بخش Mattstetten و Rothrist در سوئیس است. این تونل یکی از چندین خطوط راه‌آهن در اروپا است که به طور سیستماتیک به دویل کاهش فشار هوا مجهز شده است. این دویل‌ها در تونل به منظور کنترل فشار هوا و جلوگیری از افزایش آن هستند. در طول مرحله طراحی، تحقیقات در مورد کنترل فشار هوا صورت گرفته است. مطالعات آئروپدینامیکی برای حالت‌های مختلف بررسی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Thermotun انجام و در نهایت برنامه یک بعدی برای خواص آئروپدینامیکی و تهویه تونل، بر اساس ویژگی‌های روش، تصویب شد. شبیه‌سازی با در نظر گرفتن انواع مختلف قطار، سرعت‌های مختلف و موقعیت دویل انجام شد [۷].  
سرانجام دویل آزادسازی فشار هوا در اندازه‌های یکسان در شکل ۳ انتخاب شد.



شکل ۳- نمایش شماتیک از مقطع تونل Emmequerung با استفاده از دویل آزادسازی فشار هوا



شکل ۵- اقدامات برای کاهش نوسانات فشار هوا در تونل Emmequerung به منظور تطابق با معیارهای راحتی فشار هوا

محدوده و فاصله از قطار و تونل تعیین می‌شود، اما زمان افزایش فشار هوا عمدتاً تحت تاثیر هندسه ورودی تونل قرار دارد.

تغییر جزئی در برابر موج فشاری هوا با استفاده از ترکیب بهینه از دامنه ورودی تونل و دوپل‌ها در سقف ورودی تونل امکان‌پذیر است.

کاهش موج فشاری هوا در داخل تونل باعث کاهش سروصدای زیاد داخل خروجی تونل و کاهش خسارت به دیوار و ساختار تونل می‌شود.

جبهه موج فشاری هوا در ورودی تونل به طور مستقیم باعث افت فشار هوا در تونل می‌شود و افزایش شدت صدا در خروجی تونل را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

نوسانات فشار هوا، موجب ایجاد ترکیب بسیار شدیدی از امواج فشاری و انبساطی می‌شوند که با سرعت صوت در داخل تونل حرکت می‌کنند.

#### ۶- منابع

- 1- M. S. Howe, The compression wave generated by a high-speed train at a vented tunnel entrance, J. Acoust. Soc. Am. 104 (3) (1998), pp. 1158-1164.
- 2- T. S. Yoon and S. Lee and J. H. Hwang and D. H. Lee, Prediction and validation on the sonic boom by a high-speed train entering a tunnel, J. Sound Vibr. 247 (2) (2001), pp. 195-211.
- 3- J. K. Mok and J. Yoo, Numerical study on high speed train and tunnel interaction, J. Wind Eng. Ind. Aero. 89 (2001), pp. 17-29.
- 4- Pierre Ricco, Arture Baron, Paolo Molteni, Nature of pressure waves induced by a high-speed train travelling through a tunnel, J. Wind Eng. Ind. Aero. (2009), pp. 1-38.
- 5- Salmensaari, Timo; "Safety In Long Subsea Rail Tunnels," 63, 2010.
- 6- Designing North America 's Future Today; "High- Speed Rail", 9.
- 7- Hagenah, Bernd; Reinke, Peter; "Effectiveness Of Pressure Relief Shafts- Full Scale Assessment", Civil Engineering Division, University Of Dundee, Scotland, 14.
- 8- I. L. McClelland and R.G. Gawthorpe; "The response of railway passengers to pressure fluctuations", Institute for Consumer Ergonomics, British Rail Research, Derby, 11.
- 9- M. S. Howe and M. Ida and T. Fukuda and T. Maeda, Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal, J. Fluid Mech, (2000).
- 10- T. Aoki and A. E. Vardy and J. M. B. Brown, Passive alleviation of micro pressure waves from tunnel portals, J. Sound Vibr, (1999).
- 11- <http://www.thermotun.com/thermotun/>