

تحلیل و مدل‌سازی موج فشاری ایجاد شده در ورود قطار تندرو به تونل

مهرداد جعفری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران
محمدرضا طلائی*، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: mrtalae@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۲ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۲

چکیده

با ورود قطار تندرو به تونل، یک موج فشاری در جلوی قطار به وجود می‌آید. همین امر عامل ایجاد پدیده پیستونی در تونل است که تمام جریان هوای درون تونل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده در بلندمدت باعث مشکلاتی از جمله تخریب لایه‌های دیواره تونل، تهدید امنیت مسافران، تهویه ایستگاه‌های زیرزمینی و حتی در مواردی آسیب به قطار می‌شود. در این پژوهش، این پدیده برای ورود یک قطار از نوع ICE2 به تونل تک‌خط مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی با استفاده از حل عددی در نرم‌افزار محاسبات سیالاتی انسیس فلوئنت، به روش اسلایدینگ مش، به صورت سه‌بعدی، تراکم‌ناپذیر و مغشوش انجام شده است. برای اطمینان از روش عددی، سرعت جریان درون تونل با یک تست تجربی صحت‌سنجی شده است. شبیه‌سازی‌ها برای قطار با سرعت‌های ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ متر بر ثانیه انجام شده است. نتایج کلی نشان از آن دارد که هر چه سرعت قطار افزایش داده شود، در نتیجه آن، دامنه فشار و سرعت موج هوایی تولید شده افزایش می‌یابد. در نهایت، میزان استحکام شیشه روبروی قطار در مقابل حداکثر موج هوای ایجاد شده مورد مطالعه قرار گرفته و محدوده‌ی مجاز سرعت قطار در ورود به تونل قابل برداشت است.

واژه‌های کلیدی: قطار تندرو، پدیده پیستونی، امواج فشار تراکمی و انبساطی، جریان تراکم‌ناپذیر، اسلایدینگ مش

۱. مقدمه

است. در سال‌های اخیر، رشد چشم‌گیر سرعت و امنیت این وسیله نقلیه باعث تبدیل شدن به گزینه اول مسافرت‌های برون‌شهری و درون‌شهری شده است. اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن^۱ تعریف دقیقی برای سرعت قطارهای تندرو دارد. به این صورت که برای خطوط موجود و یا بهسازی شده، حداقل سرعت ۲۰۰ کیلومتر

از دیرباز تا هم‌اکنون، قطارهای مسافری به‌عنوان وسیله نقلیه ایمن، سریع و ارزان کاربرد داشته‌اند و با گسترش فناوری‌های حمل‌ونقل عمومی، قطارها یکی از گزینه‌های شاخص و مورد توجه برای استفاده در این زمینه بوده

عددی سه‌بعدی (روش شبکه لغزنده چند بلوکی) به بررسی تغییرات نیروهای آئرو‌دینامیک و تولید امواج تراکمی در هنگام ورود قطار به تونل پرداختند. در سال ۲۰۱۱، اُیستپروست و همکاران یک روش جدید را برای شبیه‌سازی سه‌بعدی قطار در حال ورود به تونل مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از روش مش متحرک به بررسی توزیع فشار روی قطار و دیواره تونل پرداختند. آن‌ها به‌منظور اعتبارسنجی روش عددی‌شان سه هندسه متفاوت مخروطی، سهموی و بیضوی برای دماغه قطار در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و روش عددی وجود دارد. در سال ۲۰۱۲، کو و همکاران به‌منظور بررسی واقعی فشارهای آئرو‌دینامیک در تونل که هنگام عبور قطارهای با سرعت زیاد به وجود می‌آید، در تایوان یک سری اندازه‌گیری‌های میدانی را به‌صورت آزمایشگاهی در نزدیک ورودی تونل و محور تونل مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری‌ها در سرعت‌های مختلف قطار، که بیشینه آن ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت بود، انجام گرفت. به‌منظور بررسی چگونگی انتشار امواج فشاری از حسگرهای فشار در طول تونل استفاده شد. در سال ۲۰۱۴، چو و همکاران به بررسی یک شبیه‌سازی عددی دو قطار از کنار هم گذرنده در یک تونل پرداختند. برای شبیه‌سازی از روش اسلایدینگ مش برای رفتار شرایط مرزی متحرک استفاده شده است. نتایج عددی به‌وسیله نتایج آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی^۱ تأیید شده‌اند. همچنین، در سال ۲۰۱۷، چن و همکاران مقاله‌ای تحت عنوان تجزیه و تحلیل اثرهای آئرو‌دینامیک طول‌های متفاوت دماغه دو قطار متقاطع درون تونل ارائه دادند. این تحقیق، یک حل عددی سه‌بعدی با استفاده از تکنیک اسلایدینگ مش است.

بررسی کلی مجموعه این پژوهش‌ها نشان از اهمیت و استقبال بیش از پیش از روش عددی در این شاخه از

بر ساعت و برای خطوط ساخته شده جدید برابر ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت است. با توجه به برنامه‌ریزی‌های انجام شده در ایران به جهت راه اندازی خط پرسرعت تهران-قم-اصفهان با سرعت سیر ۳۰۰ km/hr اهمیت مطالعات آئرو‌دینامیک در این زمینه در کشور روز افزون است. امروزه، توزیع فشار یکنواخت و مطلوب در اطراف بدنه قطار از جمله موارد مهم برای امنیت هر چه بیشتر و راحتی مسافران هنگام مسافرت با قطار می‌باشد. عوامل زیادی باعث اختلال در این امر شده‌اند که هم باعث ایجاد شرایط عدم تعادل و هم اتلاف انرژی و سلب آرامش مسافران می‌شوند. وجود تونل‌ها و تأثیراتی که هنگام ورود قطار به تونل، توسط جریان هوای موجود ایجاد می‌شود، از جمله این عوامل می‌باشد، که در این پژوهش به بررسی این جریان درون تونل پرداخته شده است.

در سال ۱۹۹۰، بروکی و بیکر یک شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی روی درگ آئرو‌دینامیک قطارهای تندرو انجام دادند. سه سال بعد، ایدو و همکاران (۱۹۹۳)، تحقیقاتی در مورد شکل دماغه و دم قطار برای بهینه‌سازی درگ آئرو‌دینامیک با استفاده از تست تجربی و آزمایشگاهی، انجام دادند. در سال ۲۰۰۱، بارون و همکاران به بررسی حرکت قطارهای زیرزمینی با سرعت زیاد پرداختند. هدف از آن تحقیق، تعیین اثر حضور خروجی‌های هوا (که وظیفه ایجاد خلأ نسبی در مقاطع مختلف تونل را بر عهده دارند) و نیز تأثیر تغییر شکل بدنه تونل در موج‌های فشاری ایجاد شده اطراف قطار بوده است. در این کار، که به کمک حل عددی انجام شده است، حرکت قطار در یک تونل طویل به‌صورت یک جریان شبه یک‌بعدی شبیه‌سازی شده و معادلات حاکم بر همین اساس استخراج گردیده‌اند. در همین سال، بلنو و همکاران به بررسی تأثیر هود قبل از ورودی تونل، برای کاهش موج فشاری جلوی قطار با استفاده از تست آزمایشگاهی پرداختند. شین و پارک (۲۰۰۳) با استفاده از شبیه‌سازی

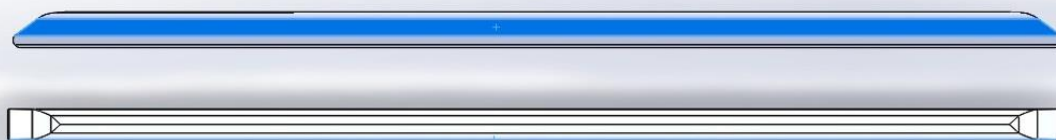
۱- Field observations

در وسط قطار قرار دارد که برای در نظر گرفتن ریل، به اندازه ۰/۳ قطار در بالای مبدأ مدل سازی شده است. طول قطار ۱۰۶ متر، عرض آن ۳/۱ متر و ارتفاع آن ۳/۶ متر می باشد (خیرولینا و همکاران، ۲۰۱۵). این مدل سازی در ابتدا در نرم افزار طراحی مدل سالیدورک^۳ رسم شده و سپس برای شبکه بندی آن از نرم افزار گمبیت^۴ استفاده شده است. در شکل ۱، مدل طراحی شده در سالیدورک نشان داده شده است. در ادامه، برای شبیه سازی های این پژوهش، به منظور کاهش حجم محاسبات و با توجه به تحقیق بیادگو و همکاران (۲۰۱۴)، طول قطار را مطابق با شکل ۲ به ۲۹/۳ متر کاهش داده و بقیه ابعاد ارتفاع و عرض قطار با همان مقدار بدون تغییر اعمال شدند. خیر و همکاران (۲۰۰۰) نیز پژوهشی در این زمینه انجام دادند و بیان داشتند که در شبیه سازی های آئرو دینامیک نیازی به اعمال کامل و دقیق طول قطار با توجه به پیچیدگی های مدل ها نمی باشد. این در حالی است که بدون وجود تغییرات خاص و مهم در شبیه سازی های آئرو دینامیک، شبیه سازی قطاری به طول واقعی با قطاری با طول ساده سازی شده، اختلاف زیادی در هزینه محاسبات دارد. البته در پدیده بیستونی و موج فشاری ایجاد شده، عوامل سطح مقطع، شکل آئرو دینامیک دماغه قطار و سرعت ورود به تونل حائز اهمیت بیشتری نسبت به طول قطار می باشند. لذا، مسئله طول قطار با الگوگیری از نمونه کارهای آئرو دینامیک انجام شده در این زمینه به منظور کاهش زمان تحلیل نرم افزاری کاهش یافت.

علم دارد. به طوری که سال های اخیر، اکثر تحقیقات در این زمینه به روش عددی صورت گرفته است. این روش، علاوه بر دقت زیاد، در مقایسه با روش های تجربی، باعث کاهش هزینه ها و بررسی فرایندهای متفاوتی می شود که در تست تجربی دسترسی به آن ها دشوارتر و در حل تحلیلی غیر ممکن است. در این پژوهش، این پدیده برای سرعت های مختلف قطار در ورود به تونل مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی با استفاده از حل عددی در نرم افزار محاسبات سیالاتی انسیس فلونت به روش اسلایدینگ مش^۱ به صورت سه بعدی، تراکم ناپذیر و مغشوش انجام شده است و نتایج این حل عددی با نتایج تجربی گیلبرت و همکاران (۲۰۱۲) و نتایج عددی خیرولینا و همکاران (۲۰۱۵) صحت سنجی شده است. در ادامه، به بررسی پارامتریک اثر سرعت های مختلف قطار در ورود به تونل و طول تونل بر مقدار دامنه موج فشاری ایجاد شده در تونل پرداخته شده است. امید است تا با نتایج این تحقیق، پاسخ فنی به منظور اطمینان از محدوده سرعت مجاز در ورود قطار به تونل به جهت کاربری در صنعت ریلی پرسرعت در کشور ارائه گردد.

۲. مدل سازی قطار تندرو

مدل قطار شبیه سازی شده در این پژوهش، قطار تندرو آلمانی^۲ می باشد. در ابتدا، برای انجام اعتبار سنجی روش عددی، ابعاد به کار رفته در مدل سازی متناسب با تست تجربی در مقیاس واقعی رسم شده است. مرکز مختصات



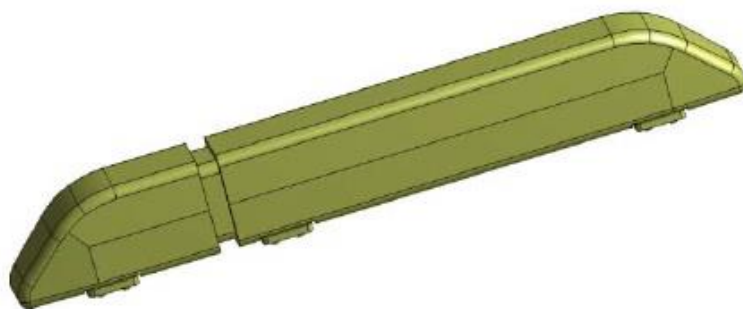
شکل ۱. هندسه مدل سازی شده در نرم افزار سالیدورک

۳- Solidworks

۴- Gambit

۱- Sliding mesh

۲- ICE2

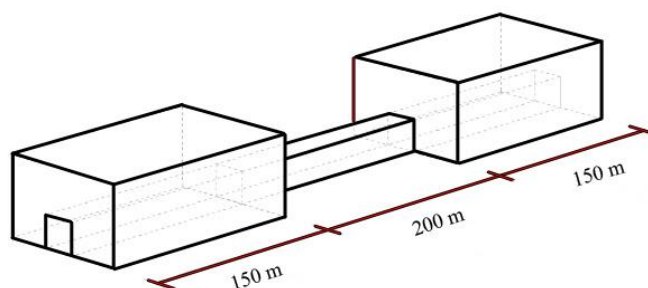


شکل ۲. مدل شبیه‌سازی قطار ICE2

محاسباتی بعد از تونل می‌باشد. به‌طور کلی، این مسئله دارای یک قسمت ثابت می‌باشد که خود تونل و میدان‌های قبل و بعد از آن بوده و قسمت متحرک شامل قطار می‌باشد.

۲-۱. دامنه محاسباتی

دامنه محاسباتی شامل سه قسمت می‌باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است. قسمت اول، یک میدان محاسباتی قبل از تونل، قسمت بعد خود تونل و قسمت سوم میدان



شکل ۳. دامنه محاسباتی برای اعتبارسنجی

کافی می‌باشد. همچنین، سوزوکی و همکاران (۲۰۰۸) برای دامنه محاسباتی، از مقدار $20H$ در ناحیه گردابه‌ای پشت جسم و $10H$ جلوی جسم تا ورودی استفاده کردند. در شکل ۳، اندازه طولی دامنه محاسباتی شبیه‌سازی شده برای اعتبارسنجی نشان داده شده است. برای ادامه شبیه‌سازی‌ها و بررسی پارامتر سرعت در این پژوهش، طول دامنه‌ها به 75 متر و طول تونل به 60 متر تغییر داده شده است. ارتفاع و عرض دامنه‌ها برابر می‌باشند. همچنین، طول قطار از 106 متر به $29/3$ متر کاهش داده شده است.

۲-۲. شبکه‌بندی قطار و دامنه محاسباتی

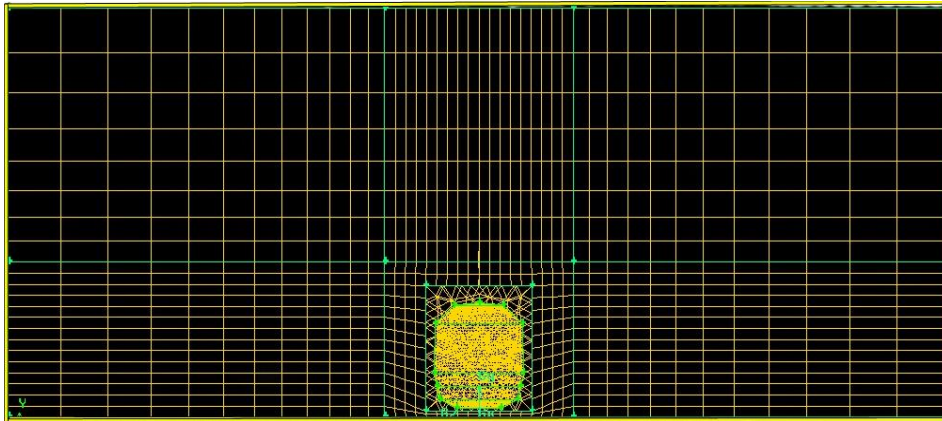
برای شبکه‌بندی قطار و دامنه حل، روش‌های متفاوتی ارائه شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت که برای شبکه‌بندی

انتخاب ابعاد این دامنه بسیار مهم است. اکسلسون و همکاران (۱۹۹۸) در مطالعه‌ای که روی واگن مسافری داشتند نشان دادند که انتخاب ابعاد و فاصله نامناسب باعث ایجاد میدان فشار نادرست در اطراف قطار می‌شود. در سال ۱۹۹۳، منهارت و ونگل یک دامنه محاسباتی برای یک مکعب ارائه دادند. در سال ۲۰۰۸ کراجنویچ یک محدوده بزرگ‌تری را برای دامنه محاسباتی قطار ارائه کرد.

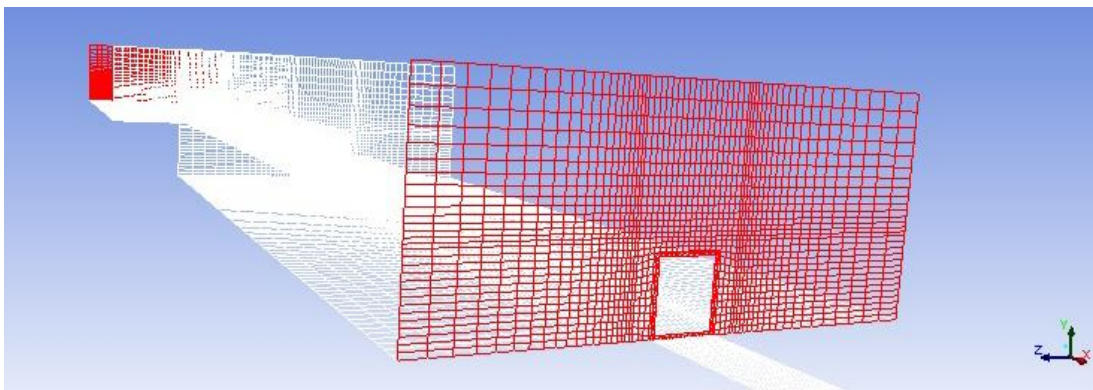
فرانک و همکاران (۲۰۰۴) برای گسترش دامنه در جهت قطار، توصیه کرده‌اند که فاصله $5H$ بین مرز ورودی و جسم (به‌عنوان مثال قطار) باشد، که در آن H ارتفاع جسم است. گسترش طولی دامنه در ناحیه گردابه بین جریان خروجی و جسم باید حداقل $15H$ باشد تا توسعه جریان را دقیقاً نشان دهد. تومیناگا و همکاران (۲۰۰۸) بیان کرده‌اند که در ناحیه گردابه فاصله $10H$

حجم وسط که خود قطار در آن قرار دارد یک شبکه‌بندی ریزتر در نظر گرفته شود. همچنین، برای دامنه ثابت که شامل سه قسمت می‌باشد. مطابق شکل ۴، ابتدا خطوط هر قسمت را تقسیم‌بندی کرده، سپس روی سطوح یک مش منظم اجرا شده و در نهایت برای مش حجمی آن‌ها از سلول‌های شش‌وجهی استفاده شده است. شبکه‌بندی سطوح و حجم کل دامنه حل در شکل ۵ نشان داده شده است. مجموع تعداد مش در این شبیه‌سازی، حدود دو میلیون عدد می‌باشد.

سلول‌های شش‌وجه^۱ بهتر از چهاروجه^۲ هستند. برای شکل-های پیچیده باید این کار را انجام داد. نزدیک دیواره، سلول‌های شبکه باید عمود بر دیوار باشند. بنابراین، در نزدیکی دیواره، سلول‌های منشوری^۳ بهتر از چهارگوش هستند. شبکه‌بندی شش‌وجهی دارای لایه‌های منشوری در نزدیکی سطح دیواره برای بهبود رفتار دیواره می‌باشد (خیرولینا و همکاران، ۲۰۱۵). برای شبکه‌بندی این مسئله، در ابتدا حجم اطراف قطار به سه قسمت متفاوت تقسیم‌بندی شد تا برای



شکل ۵. شبکه‌بندی سطوح و حجم کل دامنه حل



شکل ۴. شبکه‌بندی دامنه حل

۳-۲. روش حل (اسلایدینگ مش)

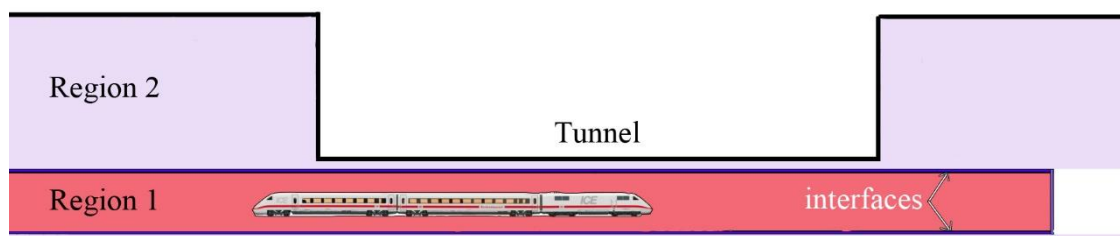
در انسیس فلونت، دو روش برای حل جسم‌های در حال حرکت موجود است. برای حرکت قطار درون تونل

۳- Prismatic

۱- Hexahedral

۲- Tetrahedral

قطار تندرو به تونل اعتبارسنجی کردند. مطابق شکل ۶، در روش اسلایدینگ مش برای حرکت قطار، دامنه به دو ناحیه تقسیم می‌شود: ناحیه ثابت، شامل ایستگاه و تونل و ناحیه متحرک، شامل قطار می‌باشد. مهم‌ترین صفحات در این روش، صفحات محدود شده می‌باشند که در هر دو ناحیه‌ی ثابت و متحرک به یکدیگر متصل می‌باشند. این صفحات شرط مرزی حدفاصل دارند (خیرولینا و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۶. نمای از پهلو برای هر دو دامنه ثابت و متحرک در روش اسلایدینگ مش

جریان، نسب به دیگر مدل‌های آشفتگی نشان می‌دهد. مدل استفاده شده در این پژوهش $k-\epsilon$ realizable می‌باشد. مقدار y^+ در محاسبات انجام شده بین مقادیر ۴۰ و ۲۲۵ قرار دارد. ولی باز تأکید می‌شود که با توجه به روش حل اتخاذ شده (اسلایدینگ مش) هدف بررسی جریان پروفیل باد القایی توسط حرکت قطار در تونل است و به هیچ وجه بررسی روی سطح قطار نیست و این مقادیر به دست آمده نیز با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی موجود در مقالات صحت‌سنجی می‌شود. لذا، بررسی و کنترل پارامترهای لایه مرزی مانند y^+ ضروری نیست.

۲-۵. شرایط مرزی و گام زمانی

با توجه به نسبت انسداد کمتر از ۳٪ در ناحیه میدان باز قبل و بعد از تونل، نزدیک صفحات جانبی حرکت هوا وجود ندارد. بنابراین، تمام صفحات جانبی دامنه میدان با شرط مرزی تفارن^۲ تعریف می‌شود. هر دو صفحه ورودی

توصیه به استفاده از روش اسلایدینگ مش شده است (فلوئنت، ۲۰۰۹a و ۲۰۰۹b). اسلایدینگ مش به طور خلاصه در مقالات متفاوت توضیح داده شده است. شین و پارک (۲۰۰۳) برای پیش‌بینی جریان باد در هود تونل، وقتی که قطار وارد تونل می‌شود، از این روش برای شبیه‌سازی استفاده کردند. همچنین، ایوستپروست و همکاران (۲۰۱۱) این روش را با اطلاعات یک تست تجربی در موضوع موج فشاری تولید شده توسط ورود

۲-۴. مدل آشفتگی

بلوکن (۲۰۱۰) بیان کرده که معادلات $RANS^1$ ساده شده معادلات ناویر-استوکس هستند. این معادلات می‌توانند هر دو مدل از جریان پایا و ناپایا را حل کنند. در پژوهش مربوطه، معادلات ناپایا حل شده‌اند، چرا که قطار در یک دامنه ثابت در حال حرکت است که باعث وابستگی مدل به زمان می‌شود. از آنجایی که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ standard انرژی جنبشی متلاطم را در ناحیه‌هایی که جریان راکد است نسبت به $k-\epsilon$ realizable بیشتر از واقعیت نشان می‌دهد، فرانک و همکاران (۲۰۰۴) برای این نوع شبیه‌سازی از $k-\epsilon$ realizable استفاده کردند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) و شیه و همکاران (۱۹۹۵)، طی تحقیقاتی نشان دادند که برای حل جریان آشفته درون تونل باید از روش $k-\epsilon$ realizable استفاده کرد، چرا که این روش عملکرد بهتری را برای شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی، لایه مرزی با گرادین فشار معکوس و جدایش

۲- Symmetry

۱- Reynolds Averaged Navier-Stokes

و رم^۴ 16 G تقریباً ۱۹ شبانه‌روز طول کشیده است و برای مدل‌های شبیه‌سازی ساده‌سازی شده، با همین سیستم، بسته به نوع مدل، به‌طور تقریبی هر شبیه‌سازی ۷ شبانه‌روز ادامه داشته است.

۶-۲. معادلات حاکم

برخی روابط این حل به‌طور خلاصه در ادامه آورده شده است. عدد ماخ، نسبت سرعت سیال به سرعت صوت در همان سیال است. عدد ماخ یک پارامتر بی‌بعد است که در آئرو‌دینامیک جریان‌های تراکم‌پذیر دارای اهمیت زیادی است.

$$M = \frac{V}{C} \quad (2)$$

در این رابطه، V سرعت سیال (ویا جسم در سیال) و C سرعت صوت می‌باشد. در صورتی که این مقدار بیشتر از ۰/۳ باشد، نوع جریان تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. سرعت قطار مورد مطالعه برای اعتبارسنجی، ۳۲ متر بر ثانیه است که عدد ماخ آن کمتر از ۰/۱ می‌باشد. به‌طور کلی، تأثیرات تراکم‌پذیری زمانی بررسی می‌شود که عدد ماخ بیشتر از ۰/۳ باشد. در نتیجه، این شبیه‌سازی‌ها با فرض جریان تراکم‌ناپذیر انجام شده است. صحت این فرض در نمودار اعتبارسنجی نیز مشخص است.

همچنین، معادله پیوستگی برای یک جریان تراکم‌ناپذیر به‌صورت رابطه (۳) می‌باشد:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

معادله ناویر-استوکس در جهت x نیز به شکل معادله (۴) می‌باشد:

و خروجی به‌صورت خروجی فشار^۱ تعریف می‌شود. تمام صفحات کف دامنه‌ها و دیواره تونل و همچنین بدنه قطار، دیوار^۲ تعریف می‌شود. زبری دیواره تونل و بدنه قطار به‌صورت مقادیر اولیه آن نگه داشته می‌شود (ارتفاع زبری صفر و ثابت زبری ۰/۵). شرط مرزی حدفاصل نیز برای صفحاتی که درون جریان با همدیگر در اتصال هستند به‌کار برده می‌شود (خیرولینا و همکاران، ۲۰۱۵). تمامی این شرایط مرزی با توجه به شبیه‌سازی انجام شده در کنار تست تجربی موجود در مراجع ارائه شده است که در ادامه نمودار اعتبارسنجی روش عددی در مقایسه با تست تجربی ارائه شده است. گام زمانی یک پارامتر مهم برای دقت و صحت نتایج و همچنین هزینه محاسبات برای شبیه‌سازی‌های RANS می‌باشد، که مطابق با پژوهش فرانک و همکاران (۲۰۰۷) می‌توان از رابطه (۱) برای محاسبه آن استفاده کرد:

$$\Delta t = \frac{CFL * \Delta X_{min}}{V_{max}} \quad (1)$$

کمترین طول سلول برابر ΔX_{min} ، سرعت قطار V_{max} و CFL عدد کورانت می‌باشد که معمولاً برابر با یک گرفته می‌شود. گام زمانی به‌کار برده شده در این پژوهش متغیر بوده است. با توجه به اینکه مدل‌های متفاوتی با سرعت‌های متفاوت شبیه‌سازی شدند، در نتیجه آن یک گام زمانی ثابت وجود نداشته است. ولی با توجه به اینکه سرعت‌های متفاوت ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ m/s برای قطار در این پژوهش شبیه‌سازی شده است، از اعداد بین 10^{-3} تا 10^{-5} ثانیه که به‌صورت تجربی به‌دست آمده‌اند، بسته به سرعت حل و شرایط همگرایی استفاده شده است که در رابطه ارائه شده (۱) نیز صادق‌اند. گام زمانی حل عددی که برای اعتبارسنجی از آن استفاده شد برابر 3.44×10^{-5} بوده است. حجم محاسبات برای اجراهای اعتبارسنجی با استفاده از یک سیستم با هسته^۳ 2.4 GHZ

۳- CPU

۴- RAM

۱ - Pressure outlet

۲ - Wall

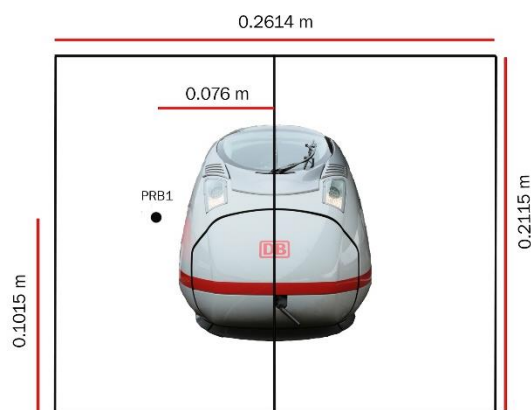
برای اعتبارسنجی برای مدل قطار ICE2 با طول واقعی ۱۰۶ متر از مدل با مقیاس ۱ به ۲۵، با سرعت ۳۲ متر بر ثانیه استفاده کردند. طول تونل در این تست ۸ متر می‌باشد. محل قرارگیری سنسور سرعت جریان در موقعیت ۴/۸۸ متری درون تونل، همانند شکل ۷ می‌باشد. این سنسور به اسم PRB1 نام‌گذاری شده است. در تحقیق دیگری در یک پایان نامه دکتری در دانشگاه دلفت هلند (خیرولینا و همکاران، ۲۰۱۵) یک کد عددی برای این مسئله ایجاد شده و برای رسیدن به بهترین حالت اعتبارسنجی این شبیه‌سازی را حدود ۱۰ مرتبه تکرار می‌کند و نتیجه را با مقادیر تست تجربی گیلبرت و همکاران (۲۰۱۲) مقایسه می‌کند که در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روند کلی نمودار مشابه بوده و نزدیکی زیادی به حل تجربی دارد. در ادامه نیز نتایج مدل عددی تحقیق حاضر در کنار دو نمودار گیلبرت و همکاران (۲۰۱۲) و خیرولینا و همکاران (۲۰۱۵) در دو حالت تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر رسم شده است. از جمله دلایل افت پیک اول در مدل‌های عددی در مقایسه با مدل‌سازی تجربی، تفاوت‌های اندک در مدل‌سازی دقیق پروفیل دماغه قطار ICE2 در مدل عددی می‌باشد.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

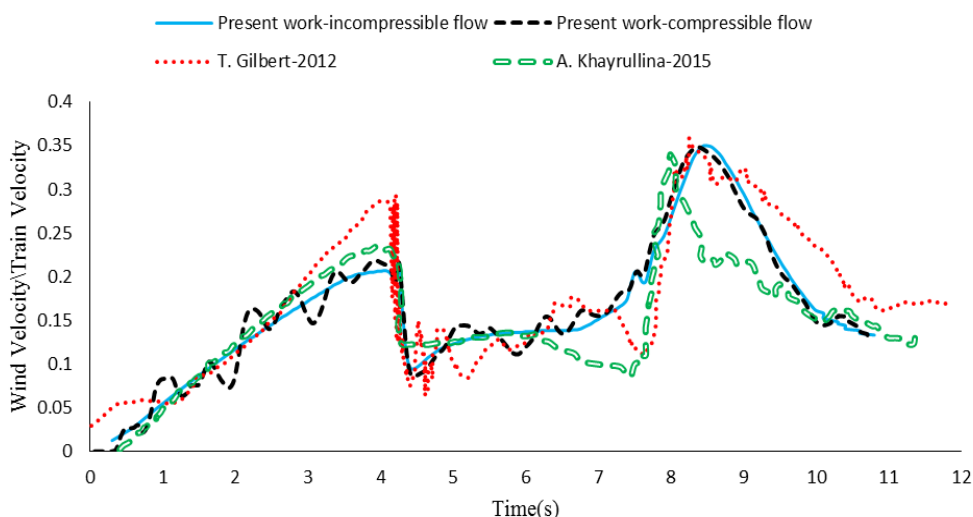
البته برای مقایسه، محاسبات جریان در داخل تونل در مدل صحت‌سنجی به صورت تراکم‌پذیر نیز انجام شده است. ولی با توجه به کاربرد نتایج مد نظر و نتایج به دست آمده، در ادامه تمامی شبیه‌سازی‌ها، تراکم‌ناپذیر، ناپایا و سه‌بعدی در نظر گرفته شده است.

۳. اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی این پژوهش از یک نمونه تست تجربی مقیاس شده استفاده شده است. گیلبرت و همکاران (۲۰۱۲) یک تست تجربی مقیاس شده از حالت واقعی از ورود قطار به تونل انجام دادند. در مدل گیلبرت و همکاران به‌عنوان منبع



شکل ۷. موقعیت سنسور تست تجربی



شکل ۸. اعتبارسنجی حل عددی با تست تجربی و حل عددی گذشته

المان است. برای این کار، از تعداد متفاوت شبکه‌بندی: درشت، متوسط و ریز استفاده شده است. ساختار شبکه‌بندی به همان صورت که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد می‌باشد. دامنه‌ها دارای شبکه منظم می‌باشند و شبکه اطراف حجم قطار دارای الگوی نامنظم می‌باشد.

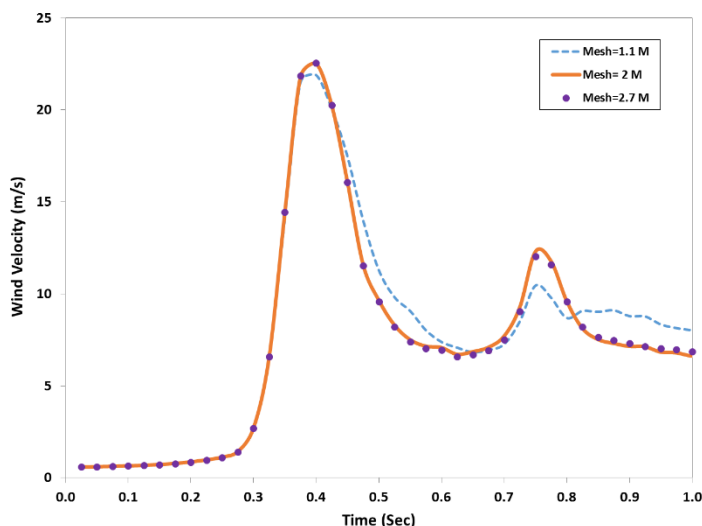
برای این بررسی، سه شبیه‌سازی انجام شده است. تعداد مش‌های شبیه‌سازی شده از درشت تا ریز به ترتیب برابر: ۱۱۰۳۵۸۳، ۲۰۴۲۲۷۵، ۲۶۸۲۰۳۶ می‌باشند. برای بررسی استقلال از مش، یک سنسور در موقعیت ابتدای ورودی دهانه تونل قرار داده شده است. این سنسور، مقایسه‌ای از رفتار هوا هنگام ورود قطار به تونل برای شبکه‌بندی‌های متفاوت را نشان می‌دهد. در شکل ۹، سرعت هوا در این سنسور (یعنی ۵ متر در ورودی تونل) مورد بررسی قرار گرفته است. با مشاهده نمودار مقایسه‌ای این نتیجه حاصل می‌شود که ریز کردن مش‌ها و افزایش تعداد آن‌ها از یک مقداری به بعد تأثیری در پاسخ شبیه‌سازی‌ها نخواهد داشت و فقط باعث افزایش هزینه محاسبات می‌شود. در نتیجه، با توجه به اختلاف کم نمودار سرعت در شبکه‌بندی ۲ میلیونی و ۲/۷ میلیونی برای صرفه‌جویی در زمان محاسبات از مدل‌هایی با

به‌طور تقریبی، زمانی که دماغه قطار از مقابل سنسور می‌گذرد، خطای حل عددی این پژوهش برای جریان تراکم‌ناپذیر، برای پیک اول با تست تجربی گیلبرت و همکاران (۲۰۱۲) تقریباً برابر ۲۳/۹ درصد می‌باشد. این در حالی است که حل عددی پژوهش خیرولینا و همکاران (۲۰۱۵) در دانشگاه هلند با تست تجربی در حدود ۱۷/۱ درصد خطا دارد. در پیک دوم نیز خطای این پژوهش با تست تجربی برابر ۰/۶ درصد بوده، در حالی که خطای حل عددی پژوهش دانشگاه هلند با تست تجربی در حدود ۳/۷ درصد می‌باشد. مشاهده می‌شود که در اعتبارسنجی این پژوهش هم جریان تراکم‌پذیر و هم تراکم‌ناپذیر آورده شده است و اختلاف پیک‌های دو حالت ناچیز می‌باشند. ولی جریان تراکم‌پذیر نوسانات بیشتری را نشان داده است. با توجه به اختلاف ناچیز مقادیر دامنه پیک موج فشاری، بقیه شبیه‌سازی‌ها با فرض تراکم‌ناپذیر انجام شده است.

۴. حساسیت‌سنجی نسبت به مش

در این قسمت، به بررسی چند نمونه شبکه‌بندی برای مدل پرداخته شده است تا این نتیجه به‌دست آید که بهترین شبکه‌بندی برای ادامه تحلیل‌ها دارای چه تعداد

شبکه‌بندی حدود دو میلیون مش برای شبیه‌سازی‌های ادامه کار استفاده شده است.



شکل ۹. نمودار بررسی حساسیت پاسخ نسبت به مش

۵. نتایج

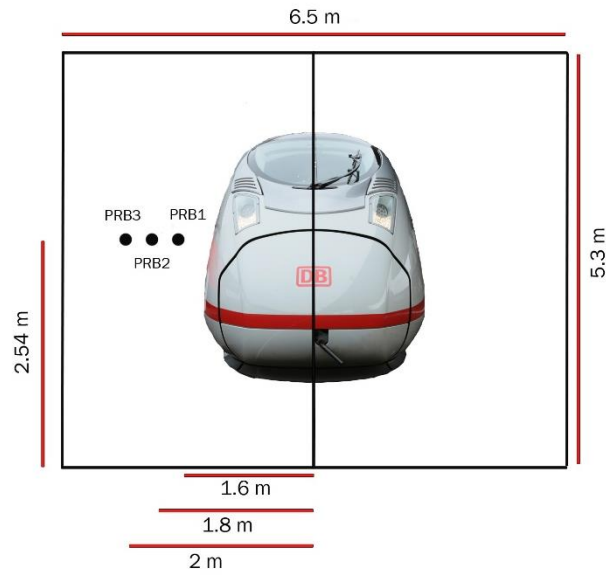
در این قسمت، به منظور مطالعه پارامتریک اثر سرعت ورود قطار به تونل و طول تونل در میزان دامنه موج فشاری ایجاد شده به شبیه‌سازی عددی ورود قطار با سه سرعت ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ متر بر ثانیه در تونل با طول ۶۰ متر (دو برابر طول قطار) پرداخته شده است و در ادامه، ورود قطار با سرعت ۱۰۰ m/s به تونل با طول‌های ۸۰ و ۱۰۰ متر مدل‌سازی شده است. در انتها نیز یک جمع‌بندی در نتیجه‌گیری برای سه شبیه‌سازی ارائه شده است.

۵-۱. موج فشاری در عبور قطار

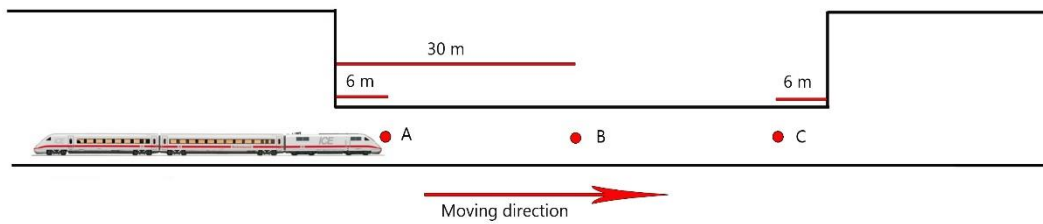
از آنجا که بیشترین موج فشاری اولیه زمانی در تونل رخ می‌دهد که دماغه قطار وارد تونل می‌شود. با توجه به

اینکه طول دماغه قطار در حدود ۵ متر می‌باشد، صفحات و سنسورهای داده‌برداری برای اندازه‌گیری فشار و سرعت جریان در تمامی شبیه‌سازی‌ها ۶ متر درون تونل و ۶ متر قبل از اتمام تونل در نظر گرفته شده است. در خصوص موقعیت سنسورها در عرض و ارتفاع تونل نیز متناسب با تست تجربی و عددی که کار این پژوهش با آن تحقیقات اعتبارسنجی شده است، از مختصات مشابه و نسبت اعداد معقول استفاده شده تا بهترین خروجی‌ها برای جریان مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. محل قرارگیری سنسورهای داده‌برداری موج فشاری در عرض و طول تونل به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌گردد.

تحلیل و مدل‌سازی موج فشاری ایجاد شده در ورود قطار تندرو به تونل

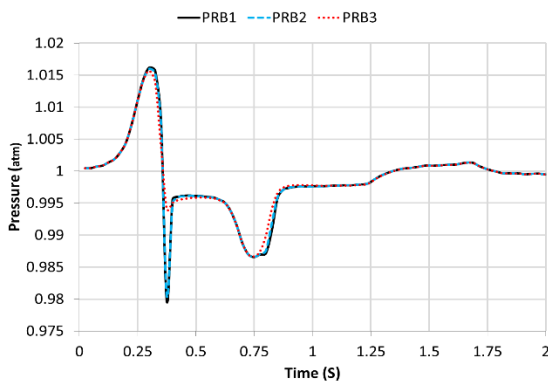


شکل ۱۰. موقعیت سنسورها در ۶ متر ورودی تونل و نقاط عرضی متفاوت

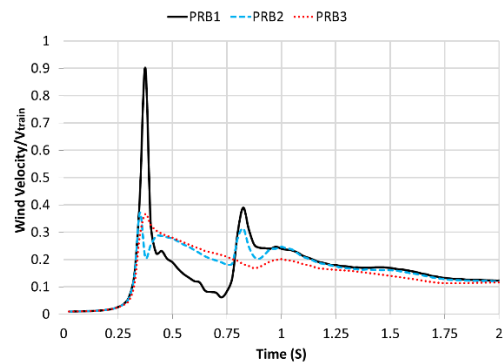


شکل ۱۱. موقعیت سه سنسور طولی در تونل

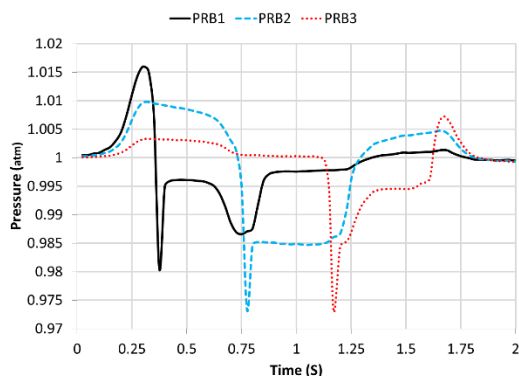
در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵، نمودارهای فشار و سرعت داده‌برداری شده در سنسورها در عرض و طول تونل برای عبور قطار با سرعت ۶۰ m/s نشان داده شده است.



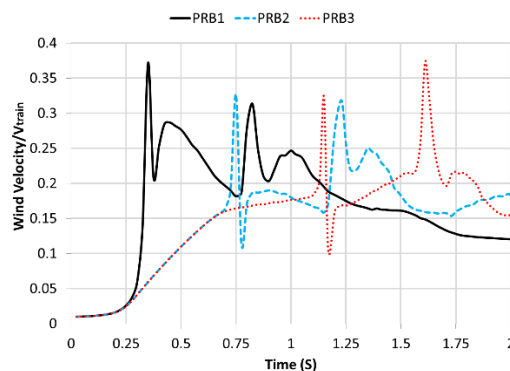
شکل ۱۳. تغییرات فشار برای سنسورهای عرضی درون تونل برحسب زمان برای سرعت قطار برابر ۶۰ متر بر ثانیه



شکل ۱۲. تغییرات سرعت برای سنسورهای عرضی درون تونل برحسب زمان برای سرعت قطار برابر ۶۰ متر بر ثانیه



شکل ۱۵. تغییرات فشار برای سنسورهای طولی درون تونل برحسب زمان برای سرعت قطار برابر ۶۰ متر بر ثانیه



شکل ۱۴. تغییرات سرعت برای سنسورهای طولی درون تونل برحسب زمان برای سرعت قطار برابر ۶۰ متر بر ثانیه

جریان هوا متأثر از سرعت در لایه مرزی چسبیده به بدنه قطار و در حدود 50 m/s می باشد و با 40 سانتی متر فاصله گرفتن از این نقطه، مقدار سرعت به حدود 15 m/s می رسد.

- با فاصله گرفتن از دیواره قطار در عرض تونل، فشار منفی عبور دماغه نوک قطار کاهش می یابد که نشان دهنده کاهش تأثیر گردابه های کنار بدنه قطار با فاصله گرفتن از قطار می باشد.

- در شکل ۱۴، ملاحظه می شود که فشار مثبت ناشی از ورود قطار به تونل در سنسور A در ابتدای تونل بیشترین مقدار بوده و به ترتیب تا انتهای تونل دامنه موج فشاری کاهش می یابد.

- فشار منفی ایجاد شده در سنسورهای موجود در طول تونل نیز در زمان رسیدن دماغه قطار به محل سنسور دیده می شود که نشان دهنده تأثیر گردابه های جریان بعد از حرکت نوک قطار است. به همین ترتیب، شکل ۱۵ نشان می دهد که دامنه موج سرعت ایجاد شده در طول تونل نیز با فاصله گرفتن از دهانه ورودی تونل به تدریج کاهش می یابد.

نمونه نمودار علامت گذاری شده تغییرات فشار در طول تونل بر حسب زمان، به منظور درک سرعت انتشار موج فشاری در تونل، به همراه کانتور توزیع سرعت در

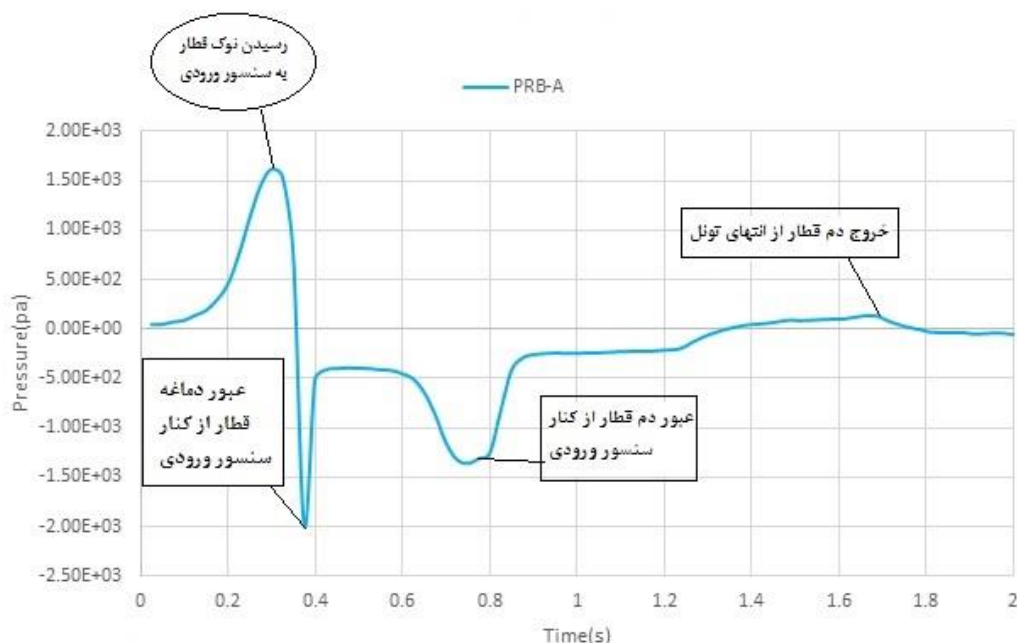
در تمامی نمودارها، به جهت قابل تعمیم بودن داده ها برای هر نوع قطار، نمایش داده ها به صورت بی بعد ارائه شده است. به این ترتیب که سرعت موج تولیدی بر حسب سرعت باد و فشار موج تولیدی بر حسب اتمسفر بیرونی ارائه گردیده است.

با دقت در نمودارها ملاحظه می گردد که مقدار پیک های مثبت موج فشاری نشان دهنده عبور دماغه جلوی قطار از محل سنسور داده بردار بوده و پیک منفی مربوط به عبور دماغه انتهایی از محل سنسورهای فشار می باشد که نشان دهنده خلأ ایجاد شده در پشت قطار است. فشار منفی ایجاد شده دقیقاً بعد از عبور دماغه نوک از محل سنسور نیز به دلیل گردابه های تولید شده در محل سنسورهای اندازه گیر است. لازم به ذکر است که با توجه به پیچیدگی نوع جریان در تونل و وجود گردابه های مختلف، با تغییر موقعیت سنسورها، رفتار موج جریان ایجاد شده می تواند تغییر کوچکی داشته باشد که تکرار اجزای مختلف به دلیل اطاله کلام حذف شده است. با دقت در نمودارهای موج فشار و سرعت، نتایج فنی و الگوهای کلی زیر قابل ارائه است:

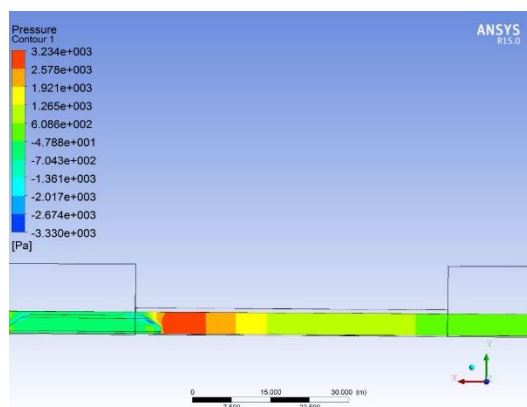
- با دقت در شکل های ۱۲ و ۱۳ ملاحظه می شود که با فاصله گرفتن از بدنه قطار در عرض تونل، میزان دامنه موج سرعتی ایجاد شده به شدت کاهش می یابد. به طوری که در نزدیکی قطار با سرعت 60 m/s مقدار سرعت

هوای درون تونل در جلوی قطار متراکم شده و با اثر پیستونی قطار به جلو رانده می‌شود. اثرهای افزایش این جریان در پروب نصب شده در وسط تونل به تدریج دیده می‌شود، تا زمانی که دماغه قطار به محل پروب می‌رسد که بیشترین مقدار دامنه سرعت موج هوا دیده می‌شود.

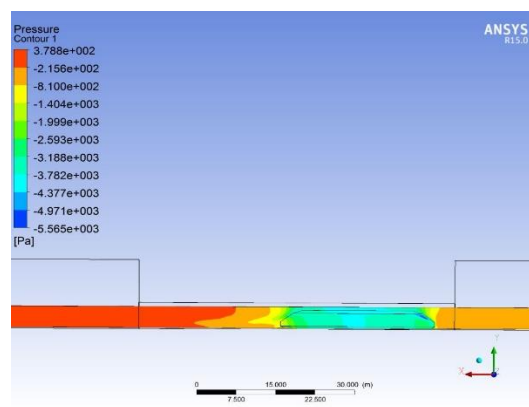
هنگام ورود و عبور قطار از تونل، به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ ارائه شده است. با توجه به کانتورهای ارائه شده، روند افزایشی توزیع سرعت و فشار اندازه‌گیری شده توسط سنسور داده‌بردار در تونل که نشان از حضور و بروز پدیده اثر پیستونی قطار در تونل است، به وضوح ملاحظه می‌گردد. به این ترتیب که با حرکت دماغه قطار،



شکل ۱۶. زمان‌بندی ورود قطار به تونل در سنسور ورودی تونل



الف) ورود قطار به تونل



ب) عبور قطار از درون تونل

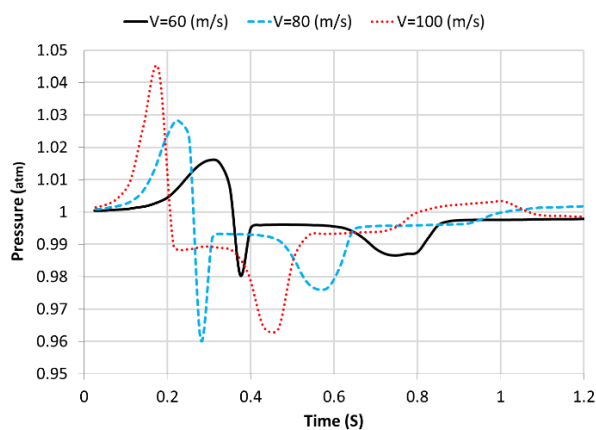
شکل ۱۷. نمونه کانتور توزیع سرعت و فشار در تونل در اثر ورود قطار

تأثیر سرعت ورودی قطار به تونل در میزان دامنه موج فشاری و سرعت تولید شده در تونل در شکل‌های ۱۸ و

رفتار مشابهی برای موج فشاری در مقطع عرضی و طول تونل برای قطار با سرعت ۸۰ m/s ملاحظه می‌گردد.

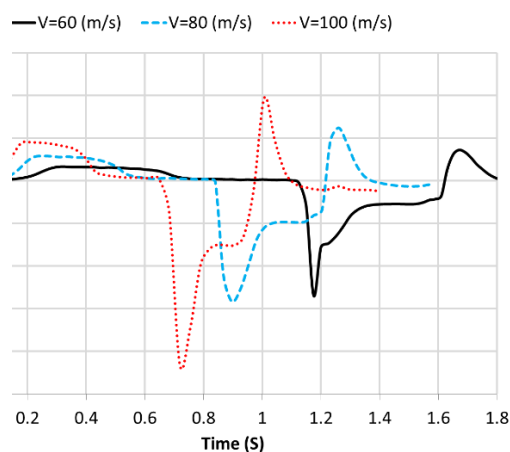
دماغه قطار در ورودی به تونل قرار دارد. یعنی یک زمان ثابت که تقریباً ۵ متر از قطار وارد تونل شده است. فشار و سرعت در یک خط مرکزی در کل طول تونل رسم شده است.

۱۹ برای سه سرعت ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ متر بر ثانیه برای سنسور عرضی Prob-2 و سنسور انتهایی تونل Prob-C نشان داده شده است. همچنین، در شکل‌های ۲۰ و ۲۱، مقدار فشار و سرعت در طول تونل نمایش داده شده است. این دو شکل برای یک زمان خاص می‌باشند که



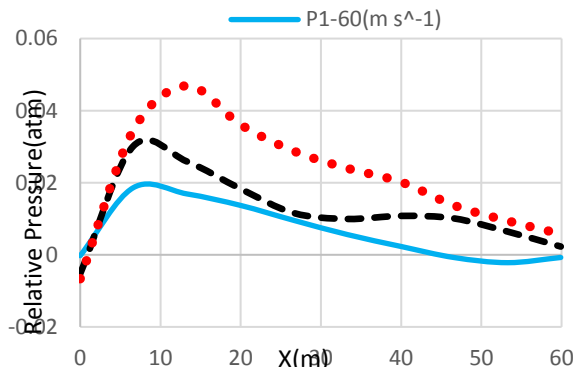
شکل ۱۹. مقایسه فشار برحسب زمان در سنسور عرضی (C) در

سرعت‌های مختلف



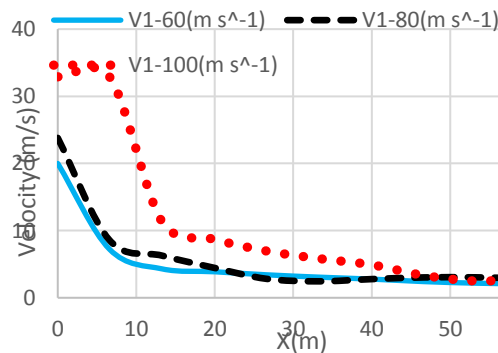
شکل ۱۸. مقایسه فشار برحسب زمان در سنسور

خروجی (C) در سرعت‌های مختلف



شکل ۲۱. مقایسه فشار در طول تونل در زمان ورود قطار به تونل با

سرعت‌های مختلف



شکل ۲۰. مقایسه فشار در طول تونل در زمان ورود

قطار به تونل با سرعت‌های مختلف

در نتیجه فشار بیشتری به کل جریان درون تونل وارد می‌شود. به طوری که مقدار حداکثر موج فشاری و سرعت جریان برای قطار با سرعت ۱۰۰ m/s به ترتیب حدود ۵ kPa و ۳۴ m/s می‌باشد.

• شکل ۱۹، تغییرات فشار برحسب زمان را در سنسور C در دهانه خروجی تونل برای سه سرعت متفاوت نشان

با دقت در نمودار شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ نتایج زیر

قابل برداشت است:

• با افزایش سرعت ورود قطار، دامنه موج فشاری مثبت و دامنه موج سرعت جریان ایجاد شده در تونل افزایش می‌یابد. به این علت که هرچه سرعت ضربه اولیه ورود دماغه قطار به جریان هوای درون تونل بیشتر شود

موجب افزایش شدت موج تراکمی و همچنین موج انبساطی در ورودی تونل می‌شود.

• از مقایسه نمودارهای شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مشخص است که افزایش سرعت قطار، موج فشاری که وارد تونل می‌شود را افزایش داده و همچنین سرعت جریان در کل تونل افزایش می‌یابد.

مقادیر حداکثر و حداقل دامنه موج فشاری و سرعتی ایجاد شده در دهانه تونل در جدول ۱ ارائه شده است.

می‌دهد. دیده می‌شود که کاهش سرعت از ۱۰۰ به ۸۰ متر بر ثانیه باعث کاهش ۲۹ درصدی و کاهش سرعت از ۱۰۰ به ۶۰ متر بر ثانیه باعث کاهش ۶۶ درصدی شدت موج فشاری اولیه می‌شود.

• همچنین، می‌توان گفت که افزایش فشار منفی نیز رابطه مستقیمی با افزایش سرعت قطار دارد، چه در زمان عبور دماغه و چه زمانی که دم قطار وارد تونل شده و باعث ایجاد گردابه‌های پشت قطار می‌شود. به‌عنوان یک الگوی مشخص می‌توان گفت که افزایش سرعت قطار

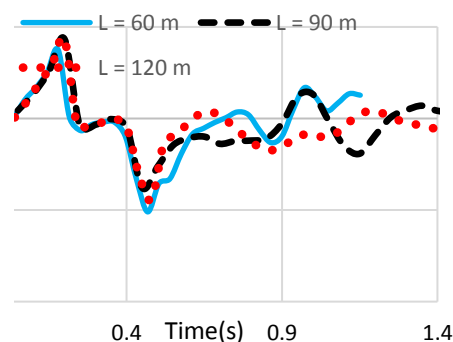
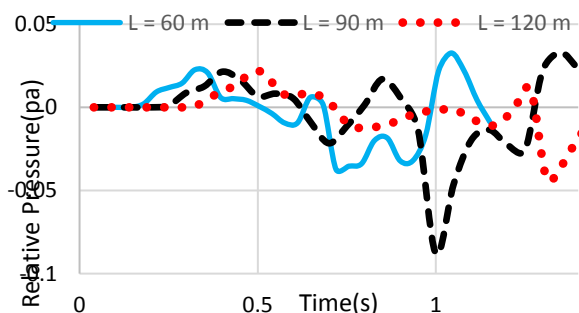
جدول ۱. مقادیر فشار ماکزیمم مثبت و منفی در سرعت‌های متفاوت برای سنسورهای عرضی ابتدای تونل و طولی در انتهای

تونل

ProbC		Prob2		سرعت قطار (m/s)
ماکزیمم فشار مکشی (atm)	ماکزیمم فشار القایی (atm)	ماکزیمم فشار مکشی (atm)	ماکزیمم فشار القایی (atm)	
۰/۹۷۲۷۰	۰/۰۰۷۶۲	۰/۹۸۰۲۰	۱/۰۱۶۲	۶۰
۰/۹۷۱۳۰	۰/۰۱۲۶۰	۰/۹۶۰۱۰	۱/۰۲۸۷۰	۸۰
۰/۹۵۶۴۰	۰/۰۱۹۷۰	۰/۹۶۳۵۰	۱/۰۴۴۶۰	۱۰۰

نمودار تغییرات موج فشاری در سنسورهای عرضی و طولی برای قطار با سرعت ۱۰۰ m/s در تونل با طول‌های مختلف در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ ارائه شده است.

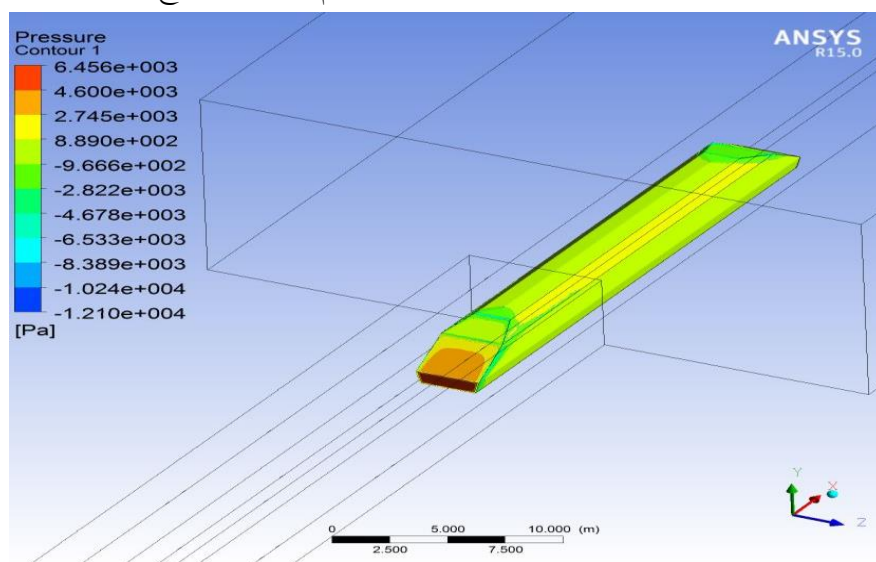
در ادامه، جهت بررسی اثر طول تونل در میزان موج فشاری تولیدی توسط قطار، یک قطار به طول تقریبی ۳۰ متر با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه برای سه طول متفاوت تونل ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ متر که به ترتیب دو برابر، سه برابر و چهار برابر طول قطار می‌باشد شبیه سازی شده است.



شکل ۲۲. تغییرات فشار برای سنسور عرضی
شکل ۲۳. تغییرات فشار برای سنسور طولی انتهای تونل برحسب زمان برای
ابتدای تونل برحسب زمان برای سرعت قطار
برابر ۱۰۰ متر بر ثانیه

۲-۵. بررسی اثر موج فشاری بر قطار
به عنوان یک نمونه استفاده کاربردی از دامنه موج فشاری
به دست آمده در طراحی قطار، به اثر موج فشاری ایجاد
شده روی شیشه جلوی قطار در حین ورود به تونل با
سرعت 100 m/s پرداخته می‌شود. برای این کار، با توجه
به شکل ۲۴، در نرم‌افزار CFD-Post یک صفحه مماس
بر شیشه قطار در نظر گرفته شده و سپس بیشترین
فشاری که بر صفحه وارد می‌شود محاسبه گردیده و بر
اساس آن ماکزیمم تنش ایجاد شده در شیشه مسطح و
استحکام آن در برابر موج فشاری تعیین می‌گردد.

به طور کلی، آنچه از شکل‌های ۲۲ و ۲۳ ملاحظه
می‌شود آن است که تغییر طول تونل تأثیر شگرفی بر دامنه
موج فشاری تولیدی ندارد و به میزان جزئی (تونل ۹۰
متری نسبت به ۶۰ متری، ۵٪ و تونل ۱۲۰ متری نسبت
به ۶۰ متری ۹٪) تغییرات دارند. دلیل این امر، میزان هوای
بیشتر موجود در تونل با طول بیشتر می‌باشد که باعث
می‌شود اینرسی حرکت موج نسبت به تغییرات و ورود
دماغه قطار بیشتر بوده و لذا دامنه موج فشاری ورودی
افزایش یابد.



شکل ۲۴. کانتور فشار وارد بر شیشه جلوی قطار در ورود به تونل

بر صفحه با شرط مرزی چهار طرف تکیه‌گاه ساده
به صورت زیر می‌باشد.
صفحه تحت یک فشار گسترده به اندازه ۳۰۰۰
پاسکال است، که بیشترین خیز در مرکز صفحه می‌باشد
و فرمول آن در ادامه آمده است. همچنین، برای به دست
آوردن بیشترین تنش و مقایسه آن با حد مجاز تنش
تسلیم، در ادامه توضیحاتی آورده شده است. برای به-
دست آوردن بیشترین خیز در مرکز صفحه، با استفاده از

در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود که در بدترین حالت،
بر سطح شیشه جلوی قطار فشاری در حدود ۳۰۰۰
پاسکال به صورت یکنواخت اعمال می‌گردد. مدل شیشه
با فشار یکنواخت وارد بر آن دارای پاسخ تحلیلی با
فرضیات ساده شده می‌باشد. ابعاد شیشه قطار ۱ در ۱/۵
متر در نظر گرفته شده و دارای ضخامت ۶/۷۲ میلی‌متر
است که تقریب نزدیکی از شیشه جلوی قطار می‌باشد.
مدل تحلیلی برای به دست آوردن بیشترین تنش‌های وارده

۳۶۰ را بدون هیچ گونه مشکلی دارد و حرکت قطار با این سرعت در تونل شبیه سازی شده خطری برای شکستن شیشه جلوی قطار ندارد.

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق، مدل آئرو دینامیک ورود قطار تندرو به تونل ایجاد شد و موج فشاری و سرعت ایجاد شده در تونل به صورت پارامتریک مورد بررسی قرار گرفت. با صرف نظر از تغییرات جریان در نقاط مختلف، به دلیل پیچیدگی جریان و وجود گردابه ها، الگوی کلی زیر را به عنوان نتایج می توان ارائه نمود. افزایش سرعت قطار در ورود به تونل باعث افزایش شدت موج فشاری تراکمی در ورودی تونل می شود. همچنین، افزایش سرعت قطار باعث افزایش مکش و تراکم شدت فشار در خروجی تونل نیز می گردد. توزیع سرعت جریان در عرض تونل بسیار وابسته به گردابه های تولید شده در کنار بدنه قطار می باشد که این مسئله می تواند منجر به ثبت اعداد بسیار بزرگ لحظه ای در کنار قطار شود. به طور کلی، ملاحظه می شود که تغییر طول تونل تأثیر شگرفی بر دامنه موج فشاری تولیدی ندارد. از روال ارائه شده توسط این محاسبات می توان در بررسی اثرهای مختلف موج فشاری بر حرکت قطار و استحکام تجهیزات و حتی دیواره تونل استفاده نمود. این مسئله در بررسی استحکام شیشه جلوی قطار در ورود قطار با حداکثر سرعت طراحی شده در خط تهران - قم - اصفهان (تقریباً ۳۵۰ km/hr) مورد بررسی قرار گرفته و به عنوان یک نتیجه گیری نهایی می توان گفت که حرکت قطار با این سرعت در ورود به تونل با ضریب اطمینان نزدیک به ۲ می تواند تضمین سلامت عملکرد شیشه و خرد نشدن آن را بدهد.

حل تحلیلی موجود، مطابق با رابطه (۴) خواهیم داشت (اگورال، ۱۹۹۹):

$$W_{\max} = 0.0041P_0 \frac{a^2 b^2}{D} \quad (4)$$

در فرمول فوق، P_0 فشار یکنواخت وارد بر صفحه، a و b طول و عرض صفحه و D سختی خمشی است که در رابطه (۵) ارائه شده است:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5)$$

که t ضخامت صفحه مورد نظر می باشد که در این مسئله مقدار آن برابر ۶/۷۲ میلی متر است. همچنین، E و ν به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می باشند که به ترتیب برابر ۷۰ گیگاپاسکال و ۰/۲۸ در نظر گرفته شده اند. با استفاده از فرمول هایی که آورده شد، دیده می شود که بیشترین خیز مقداری برابر ۳ میلی متر دارد. همچنین، بیشترین تنش وارد شده به صفحه مطابق با رابطه (۶) بیان شده است (اگورال، ۱۹۹۹):

$$\sigma_{\max} = 0.281P_0 \frac{ab}{t^2} \quad (6)$$

با جایگذاری پارامترها در فرمول دیده می شود که بیشترین تنش در صفحه حدود ۲۸ مگاپاسکال است. پنگ و همکاران (۲۰۱۲) در یک مقاله به بررسی تنش های وارد بر شیشه لمینت یک خودرو پرداختند که در آن تنش های بیشتر از ۵۰ مگاپاسکال را برای شیشه های خودرو فراتر از حد مجاز دیدند. البته برای قطارهای تندرو این مقدار خیلی بیشتر می باشد که در استانداردهای متفاوتی این مقادیر با تقریب بیان شده اند. در نهایت، می توان به عنوان نتیجه نهایی گفت که این قطار با داشتن حتی حداقل خواص شیشه لمینت که در خودروهای سواری به کار برده می شود، توان تحمل تنش ایجاد شده روی شیشه در صورت ورود به تونل با سرعت ۱۰۰ m/s و یا km/hr

۷. مراجع

- Axelsson, N., Ramnefors, M. and Gustafsson, R. 1998. "Accuracy in computational aerodynamics part 1: Stagnation pressure". SAE Technical Paper 980037, <https://doi.org/10.4271/980037>.
- Baron, A., Mossi, M. and Sibilla, S. 2001. "The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 89(5): 365-401.
- Bellenoue, M., Auvity, B. and Kageyama, T. 2001. "Blind hood effects on the compression wave generated by a train entering a tunnel". *Exp. Ther. Fluid Sci.*, 25(6): 397-407.
- Biadgo, A. M., Simonović, A., Svorcan, J. and Stupar, S. 2014. "Aerodynamic characteristics of high speed train under turbulent cross winds: A numerical investigation using unsteady-RANS method". *FME Trans.*, 42(1): 10-18.
- Blocken, B. 2010. "CFD in bulding engineering: Fundamentals and applications in urban physics and wind engineering". Eindhoven University of Technology.
- Brockie, N. and Baker, C. 1990. "The aerodynamic drag of high speed trains". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 34(3): 273-290.
- Chen, X. D., Liu, T. H., Zhou, X. S., Li, W. H., Xie, T. Z. and Chen, Z. W. 2017. "Analysis of the aerodynamic effects of different nose lengths on two trains intersecting in a tunnel at 350 km/h". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 66: 77-90.
- Chu, C. R., Chien, S. Y., Wang, C. Y. and Wu, T. R. 2014. "Numerical simulation of two trains intersecting in a tunnel". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 42: 161-174.
- Fluent, A. 2009a. "12.0 Theory guide". Ansys Inc., 5.
- Fluent, A. 2009b. "12.0 User's guide". Ansys Inc.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H. and Carissimo, B. 2007. "Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. Cost action 732: Quality assurance and improvement of microscale meteorological models". University of Hamburg, Germany.
- Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A. G., Krüs, H. W., Schatzmann, M., Westbury, P., Miles, S. D., Wisse, J. A. and Wright, N. G. 2004. "Recommendations on the use of CFD in wind engineering". Cost action C, 11 p.
- Gilbert, T., Baker, C., Quinn, A. and Sterling, M. 2012. "Aerodynamics of high-speed trains in confined spaces". *Proc. of the 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications*.
- Ido, A., Iida, M. and Maeda, T. 1993. "Wind tunnel tests for nose and tail of train". *RTRI JNR*, 7(7).
- Khayrullina, A., Blocken, B., Janssen, W. and Straathof, J. 2015. "CFD simulation of train aerodynamics: Train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 139: 100-110.
- Khier, W., Breuer, M. and Durst, F. 2000. "Flow structure around trains under side wind conditions: A numerical study". *Comp. Fluids*, 29(2): 179-195.
- Ko, Y. Y., Chen, C. H., Hoe, T. and Wang, S. T. 2012. "Field measurements of aerodynamic pressures in tunnels induced by high speed trains". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 100(1): 19-29.
- Krajnović, S. 2008. "Numerical simulation of the flow around an ICE2 train under the influence of a wind gust". *Proc. International Conference on Railway Engineering 2008 (IET ICRE2008), Challenges for Railway Transportation in Information Age, Hong Kong, China, 25-28 March*.
- Manhart, M. and Wengle, H. 1993. "A spatiotemporal decomposition of a fully inhomogeneous turbulent flow field". *Theor. Comput. Fluid dyn.*, 5(4): 223-242.
- Peng, Y., Deck, C., Yang, J. and Willinger, R. 2012. "Modeling and validation of windscreen laminated glass behavior during fracture". *Third International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA)*.
- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J. 1995. "A new k-ε eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows". *Comp. Fluids*, 24(3): 227-238.
- Shin, C. H. and Park, W. G. 2003. "Numerical study of flow characteristics of the high speed train entering into a tunnel". *Mech. Res. Commun.*, 30(4): 287-296.
- Suzuki, M., Ido, A., Sakuma, Y. and Kajiyama, H. 2008. "Full-scale measurement and numerical simulation of flow around high-speed train in tunnel". *J. Mech. Sys. Transport. Logist.*, 1(3): 281-292.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M. and Shirasawa, T. 2008. "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 96(10): 1749-1761.
- Ugural, A. 1999. "Stresses in plates and shells". McGraw-Hill.
- Uysteyruyst, D., William-Louis, M., Creusé, E., Nicaise, S. and Monnoyer, F. 2011. "Efficient 3D numerical prediction of the pressure wave generated by high-speed trains entering tunnels". *Comp. Fluids*, 47(1): 165-177.

Zhang, J., Li, J. J., Tian, H. Q., Gao, G. J. and Sheridan, J. 2016. "Impact of ground and wheel boundary conditions on numerical simulation of the high-speed train aerodynamic performance". J. Fluids Struct., 61: 249-261.

