

بررسی تأثیر دیوارهای بادشکن بر رفتار آیرودینامیک قطار پرسرعت در مگا پروژه ملی راه آهن پرسرعت تهران - قم - اصفهان

مسعود محبی، دانشجوی دکتری، مهندسی ماشین‌های ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
محمدعلی رضوانی*، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: rezvani_ma@iust.ac.ir

دریافت: ۹۶/۱۰/۱۷ - پذیرش: ۹۶/۱۲/۰۳

چکیده

قطارهای پرسرعت برون‌شهری یکی از گزینه‌های مناسب و مطلوب در جابجایی مسافر است و کشور ایران از سال‌ها پیش برای احداث این سامانه‌های حمل‌ونقل، به‌ویژه پروژه راه‌آهن پرسرعت تهران-قم-اصفهان که یکی از مگا پروژه‌های ملی می‌باشد، برنامه‌ریزی کرده است. لذا، به علت اهمیت زیاد این پروژه از حیث اولین تجربه و مسائل امنیتی پیش روی آن، در مقاله حاضر با یکی از جنبه‌های حیاتی حمل‌ونقل ریلی که تضمین‌کننده ایمنی سفر مسافران قطارهای پرسرعت در این محور است پرداخته می‌شود. در مقاله حاضر، با مدل‌سازی هندسه بستر خط و قطار پرسرعت پروژه مذکور و شبیه‌سازی بدترین وضعیت آب و هوایی منطقه با تکیه بر داده‌های هواشناسی، سعی در شناخت رفتار قطار پرسرعت روی خط شده است و برای بالا بردن ضریب ایمنی خط، تأثیر نصب دیوارهای بادشکن بر خط بررسی گردیده است. نتایج به‌دست آمده ثابت کرد که دیواره سبب کاهش نیروی درگ می‌شود و افزایش ارتفاع آن، رشد بیشتری در کاهش این ضریب دارد. نتایج حاصل از این مقاله می‌تواند در بالا بردن مسائل ایمنی این پروژه بسیار مؤثر واقع گردد.

واژه‌های کلیدی: راه‌آهن پرسرعت، دیوار بادشکن، باد عرضی، روش شبکه بولتزمن

۱. مقدمه

کشورهای توسعه‌یافته اولویت بالایی یافته است. در کشور ایران، مطالعه و ساخت راه‌آهن پرسرعت تهران-قم-اصفهان طی ۱۵ سال گذشته هر روز جدی‌تر و الزامات و فن‌آوری‌های مرتبط و اجزای فنی و مالی طرح شفاف‌تر شده است. مسیر ریلی پرسرعت تهران-قم-اصفهان، با توجه به ویژگی‌های اقتصادی و اجتماعی استان‌های تهران، قم و اصفهان، یکی از کریدورهای ریلی مهم جابه‌جایی مسافر در کشور است که مرکز سیاسی-

با پیشرفت و افزایش دامنه دانش بشری و شناخت روزافزون منافع و برتری‌های راه‌آهن‌های پرسرعت در کشورهای مختلف که تکیه بر کاهش زمان سیر، جذابیت سفرهای به‌موقع و منظم، منافع زیست‌محیطی و کاهش مصرف انرژی دارد، طراحی، ساخت و ارتقای راه‌آهن‌های پرسرعت در بخش حمل‌ونقل اغلب

افزایش یافته است و تمایل طراحان به قطارهای سبک تر است. هدف از افزایش سرعت، رقابت سیستم حمل و نقل ریلی با دیگر سیستم های حمل و نقل موجود می باشد. بنابراین، بسیار حیاتی است که با مسائلی که آینده حمل و نقل ریلی را تضمین کند مواجه باشیم. روش های کاستن وزن قطار از جمله راه حل های خاصی هستند که به سرعت در حال توسعه می باشند. به علاوه، امروزه وجود خطوط پرسرعت با شمار زیادی از پل ها و بسترها که به منظور عبور از تقاطع ها طراحی و ساخته شده اند فراوان شده است. سرعت باد با فاصله گرفتن از سطح زمین افزایش می یابد. بنابراین، در شرایط باد محیطی یکسان، قطار بایستی توانایی تحمل بارهای قوی تر باد را روی پل، نسبت به زمین مسطح، داشته باشد. اهمیت تحقیق حاضر در این است که به طور خاص به این موضوع که شماری از تصادفات جدی در سال های اخیر، که بادهای شدید عامل اصلی خروج از خط بوده اند، می پردازد.

بر اساس آمار اداره راه آهن فدرال¹ (FRA) بین سال های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۹، سالانه به طور متوسط ۱۳ حادثه خروج از خط به علت بادهای عرضی اتفاق افتاده است. اداره راه آهن فدرال، نهادی در وزارت حمل و نقل ایالات متحده آمریکا است. این نهاد توسط وزارت حمل و نقل آمریکا و قانون مصوب سال ۱۹۶۶ ایجاد شده است. از این رو، پایداری در برابر باد عرضی موضوع ایمنی پراهمیتی می باشد. در دنیا، کشورهای دارای راه آهن پرسرعت همگی دارای ستادی جهت بررسی رفتار قطارها در شرایط بادهای عرضی هستند که از جمله آنها می توان به مؤسسه تحقیقات فنی راه آهن (RTRI) ژاپن، تکنولوژی ریل ARA انگلستان، ریل آلمان (DB AG)، راه آهن ملی فرانسه (SNCF)، حمل و نقل بمباردیر سوئد و راه آهن ایتالیا (Trenitalia) اشاره کرد. بنابراین، اهمیت بررسی این موضوع بر همگان معلوم است.

تولیدکنندگان می توانند رفتار قطار در برابر بادهای

اقتصادی ایران، یعنی تهران، را به مرکز جغرافیایی کشور و شهر مهم اصفهان مرتبط می سازد. استان های تهران، قم و اصفهان بر اساس نتایج سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۰ به ترتیب دارای ۱۲/۱۸۳، ۱/۱۴۲ و ۲/۱۷ میلیون نفر جمعیت ساکن بوده اند که نرخ رشد جمعیت هر سه استان از متوسط نرخ رشد جمعیت کشور (۱/۲۹ درصد) بیشتر است (به ترتیب ۱/۴۴، ۱/۹۳ و ۱/۳۷ درصد). همچنین، این سه استان دارای مراکز متعدد صنعتی و تجاری و گردشگری می باشند که احداث راه آهن پرسرعت، به دسترسی سریع و ارزان، در مقایسه با روش های دیگر حمل و نقل، به این مناطق کمک شایانی خواهد نمود.

طرح راه آهن پرسرعت تهران- قم- اصفهان به طول تقریبی ۴۱۰ کیلومتر، با حد سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، از ایستگاه راه آهن تهران آغاز شده و با عبور از فرودگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قم، دلیجان، میمه و مورچه خورت، در نهایت به شهر اصفهان می رسد.

از این رو، بحث انتقال و جابجایی بار و مسافر به شکلی راحت و سریع با ایمنی بسیار بالا قابل توجه می باشد. سال هاست که در این راستا برخی از کشورهای پیشرفته در جهت دستیابی به اهداف قید شده تلاش های فراوانی انجام داده اند و در این راه نیز موفقیت های بی شماری کسب کرده اند.

با توجه به اهداف راه آهن جمهوری اسلامی ایران در راستای ایجاد راه آهن پرسرعت، افزایش سرعت تردد قطارها و بالا بردن سطح ایمنی به کارگیری این خطوط، نیاز به انجام مطالعات و بررسی های فنی و تخصصی در این باب ضروری می باشد. بنابراین، با توجه به تجربه اول ایران در زمینه احداث خط راه آهن پرسرعت در محور تهران- قم- اصفهان، توجه به بحث ایمنی بسیار حائز اهمیت می باشد.

سرعت ماشین های ریلی در سال های اخیر

¹- Federal Railroad Administration

بوده و جزو مناطق بادخیز ایران می‌باشد، بررسی و مطالعه خاص این مسئله بسیار حائز اهمیت است.

راگوناتان و همکاران (۲۰۰۲)، برخی از مسائلی را که در سال‌های اخیر به‌عنوان نتیجه‌ای از افزایش سرعت ایجاد شده است را بیان نمودند. این تحقیق تنها بر باد عرضی تمرکز نداشت. اما می‌تواند در داشتن یک چشم‌انداز کلی از مسائل اصلی آیرودینامیک قطار راهگشا باشد. بیکر (۱۹۸۵) که جزو بزرگ‌ترین محققان در زمینه مطالعات باد روی قطارهای معمولی و پرسرعت، از اواخر دهه ۸۰ میلادی تا به‌حال، می‌باشد و در این زمینه آثار متعددی منتشر نموده است، در یکی از مقالاتش در سال ۱۹۸۵، به‌سرعت گرفتن جریان باد روی بستر اشاره می‌کند و بیان می‌دارد که این ویژگی به‌سادگی قابل تولید در آزمایش‌های تونل باد نیست. در حقیقت، چنین مسائلی سبب شده که موضوع همچنان باز باقی بماند.

از آن زمان به بعد، کارهای گروهی به‌منظور حل ویژگی‌های خاص زیرساخت‌های مختلف در حال انتشار است. علاوه بر این، زیرساخت به همان اندازه در آشفتگی جریان هوای اطراف هر نوع قطاری نقش ندارد و این هندسه بدنه قطار است که نقش مهمی در تغییرات ضرایب آیرودینامیک به‌واسطه‌ی پل‌ها و بسترها بازی می‌کند (سوزوکی و همکاران، ۲۰۰۳). مک‌نیل و همکاران (۲۰۰۲) آزمایشی در مقیاس کامل برای اندازه‌گیری فشار آیرودینامیک و زاویه چرخش روی واگن سالم دوکانتینره که قطار مسافری سریع‌السیری از خط مجاور آن می‌گذشت انجام دادند. در رابطه با بسترها، چلی و همکاران (۲۰۱۰) به این دستاورد رسیدند که در زوایای حمله کم و زیر ۴۰ درجه، ضریبی که از اندازه‌گیری سرعت باد روی یک خط به دست می‌آید با ضریبی که روی زمین مسطح به دست می‌آید یکسان است. ادبیات مقاله نشان می‌دهد که این نتیجه‌گیری را می‌توان به انواع دیگر قطارها نیز تعمیم بخشید (اسکوبر و همکاران، ۲۰۱۰).

عرضی را بهینه‌سازی کنند. اما پارامترهای تأثیرگذار بسیاری هستند که وابسته به برخی از جنبه‌های مهندسی و نقشه‌برداری از محیط اطراف مسیر می‌باشند. برخی خطوط بیشتر در معرض بادهای عرضی نسبت به بقیه هستند. از این‌رو، اقدامات اصلاحی برای کاهش سرعت بادهای محلی نیاز است که از جمله آن‌ها تجهیزات بادشکن، که قطار را در برابر باد محافظت می‌کند، می‌باشد. واضح است که افزودن دیوارهای بادشکن در نزدیکی خط می‌تواند سرعت بادی که به قطار می‌رسد را کاهش دهد. وجود این دیواره‌ها در مناطق بادخیز، در پل‌ها و بسترها که سرعت باد شدت پیدا می‌کند، و در ورود و خروج به تونل‌ها که با تغییرات فشار روبرو هستیم بسیار لازم و کاربردی می‌باشد. به‌عنوان مثال، در خط جیانگ لانژو در چین، ۶۷ کیلومتر از خط با دیوارهای بادشکن پوشیده شده است.

دیواره‌ها، بارهای باد را کاهش می‌دهند. اما دیواره‌های بلند می‌توانند نیروی مکشی ایجاد کنند که ممکن است به بزرگی نیروهای مستقیم باد عرضی باشند. اندازه ارتفاع دیواره که نیروی مکشی را ایجاد می‌کند نیز به مشخصات خاص هر واگن بستگی دارد. بنابراین، یکی از موانع اصلی در این نوع مطالعات، دشواری تعمیم دادن مسئله‌ای است که در حال حاضر حل آن ساده نیست. هرچند دیواره‌های استاندارد وجود دارند که می‌توانند در بسیاری از موقعیت‌ها کار کنند، اما پیدا کردن طراحی بهینه، نیازمند مطالعات خاص برای این سناریو می‌باشد تا ایمنی در معرض خطر قرار نگیرد.

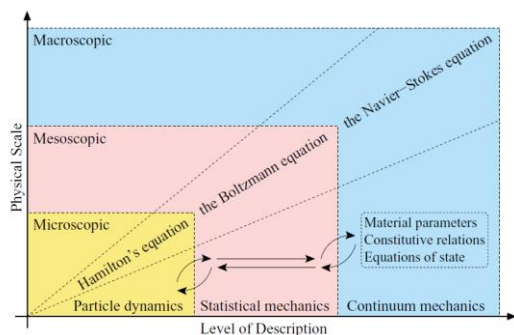
لازم به ذکر است که انتخاب مناسب دیواره‌های بادشکن می‌تواند در خطوط پرسرعت تا ۵۰٪ و در خطوط معمولی تا ۷۵٪، جریان باد رسیده به قطار را کاهش دهد. بنابراین، به‌منظور افزایش ایمنی و پایداری قطار و جلوگیری از حوادث ناگوار ریلی در محور تهران-قم-اصفهان که بنا بر اطلاعات مرکز هواشناسی ایران دارای سرعت باد ۹۰ الی ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت

پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ارتفاع و عرض دیوارها از مهم ترین پارامترها در این دیوارها هستند. تحقیقات دیگری توسط شی و همکاران (۲۰۱۳) روی دیوارهای بادشکن صورت گرفت. آن ها نوع جدیدی از دیوارهای بادشکن با ساختار دولایه را ارائه کردند که می تواند در اثر بار آیرودینامیک وارده بر قطارها اثر بهتری برجای بگذارد.

آزمایش های تونل بادی توسط آلوری و همکاران (۲۰۱۳) روی جریان هوای عبوری از میان المان های ساختاری با حفره های ماکرو بر آن انجام گردید. دوریگاتی و همکاران (۲۰۱۲) یکسری آزمایش های تونل باد به منظور بررسی اثر بادهای عرضی بر پل های معمول با دهانه بلند انجام دادند. در این آزمایش ها، شماری از مدل های وسایل نقلیه بررسی گردید. ما و ما (۲۰۱۲) به مطالعه و جمع آوری اطلاعات سرعت و جهت باد طی ۵۰ سال اخیر از ۷۳۸ ایستگاه هواشناسی در طول خطوط راه آهن پرسرعت ملی چین پرداختند. هدف آن ها از جمع آوری این اطلاعات، ارائه راهکارهایی برای کنترل بادهای شدید بر قطارهای پرسرعت بود.

با توجه به روش نوین شبکه بولتزنم و به کارگیری آن در حل مسئله این مقاله، در ادامه، تعدادی از مقالات مرتبط با این زمینه آورده شده است. کودا و لین (۲۰۱۳) به بررسی اثرهای آیرودینامیک توسعه ساختارهای جریان سه بعدی بر یک استوانه و دو استوانه در پشت یکدیگر، با استفاده از روش شبکه بولتزنم، پرداختند و اهمیت عدد رینولدز در این آزمایش ها را مطالعه نمودند. آلمالوی و اُزتکین (۲۰۱۲) با استفاده از روش شبکه بولتزنم، به بررسی هیدرودینامیک و حرارتی توسعه جریان های آرام پایدار در یک کانال پرداختند. آن ها به جرأت قابلیت روش شبکه بولتزنم در حل مسائل جریان غیر هم دما را نشان دادند. بارتلت و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش شبکه بولتزنم، نوسانات سرعت در جریان با اعداد رینولدز زیاده را که از سیلندر استوانه ای شکلی با شعاع

نتایج تحقیقات بوسیولونه و همکاران (۲۰۰۸) و چلی و همکاران (۲۰۱۱) نشان می دهد که دیوارها به طرز چشمگیری می توانند خطر واژگونی را کاهش دهند. فرایند رسیدن به این نتیجه به شرح زیر می باشد. مدلی در بین دیوارهای بادپناه قرار گرفت و ضرایب آیرودینامیک در این وضعیت اندازه گیری شد. سپس، آن ها وضعیتی که یک مدل با دیوارهای بادپناه محافظت شده بود را با وضعیت بدون دیوارهای بادپناه مقایسه نمودند. از آنجایی که در اکثر آزمایش ها چند پارامتر دیوارها بررسی می شدند، آزمایش های تونل باد معمولاً پرهزینه بود. معمولاً پارامترهایی نظیر ارتفاع دیوارها در این آزمایش ها بررسی می گردند. بارکالا و مسگر (۲۰۰۷)، پارامترهایی نظیر ارتفاع و شیب دیوارها را مورد آزمایش قرار دادند. آن ها با کاهش مدل به دو بعد و فرضیات و محدودیت های مطالعات دوبعدی، عبارت هایی از اثرهای نسبی پارامترهای دیوارها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. اما در مطالعات دوبعدی، جریان اطراف مدل نمی تواند به دست آید. از این رو، برای رسیدن به این هدف، مطالعات سه بعدی مورد نیاز است. آویلا سانچز و همکاران (۲۰۱۰) آنالیز مشابهی را انجام دادند. اما نگرش کار آن ها مطالعه اثر دیوارها بر یک سلسله واگن بود. در این مورد، فرضیات جریان دوبعدی معتبر بود، زیرا پل و سلسله واگن می توانند به عنوان بدنه های نامحدود در نظر گرفته شوند. لی و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقاتی در خصوص کاربردهای دیوارهای بادشکن راه آهن، که امروزه به طور گسترده ای در حال رشد و استفاده است، انجام دادند و نقش این دیوارها در جلوگیری از خطر واژگونی قطار را بیان نمودند. ژو و همکاران (۲۰۱۲) با مطالعه روی دیوارهای بادشکن به این نتیجه پی بردند که سیستم پانتوگراف قطار در حالت حضور دیوارهای بادشکن عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. شو و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی برخی از فاکتورهای تأثیرگذار بر عملکرد دیوارهای محافظ متخلخل



شکل ۱. دیدگاه‌های مختلف حل عددی مسائل فیزیکی و تحلیل جریان سیال (متیلا، ۲۰۱۰)

در دیدگاه ماکروسکوپی، که روش‌های کلاسیک دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای آن بنا شده‌اند، به‌جای حرکت مولکول، حرکت سیال در نظر گرفته می‌شود. حل معادلات ناویر-استوکس به کمک روش‌های اختلاف محدود، حجم محدود و المان محدود از همین دیدگاه پیروی می‌کند.

دیدگاه مزوسکوپی حفاصل میان دو دیدگاه فوق می‌باشد. در این روش، به‌جای یک مولکول یا یک سیال، مجموعه‌هایی از مولکول‌ها به‌عنوان یک بسته در نظر گرفته می‌شود و حرکت آن بسته مطالعه می‌گردد. این ذرات در هر جهتی می‌توانند حرکت کنند، به‌طوری‌که معادلات حرکت آن‌ها به‌صورت آماری و به‌وسیله معادلات توزیع بیان می‌شوند. در این دیدگاه، از معادله بولتزمن استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر، روش شبکه بولتزمن به‌عنوان یک طرح عددی مطلوب در شبیه‌سازی جریان سیال و مدل‌سازی فیزیک سیالات، توسعه یافته است. این روش، به علت ساده بودن پیاده‌سازی آن در سخت‌افزارهای معمول و قدرت زیاد آن در شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت، در مسائلی مانند جریان با مرزهای پیچیده، جریان چندفازی و جریان سیال غیرنیوتنی مناسب است (چن و دولن، ۱۹۹۸؛ سوکوپ و تورن، ۲۰۰۶؛ سوکی، ۲۰۰۱). روش شبکه بولتزمن یک روش با دیدگاه آماری می‌باشد که فرایندهای جریان را بدون گسسته‌سازی

مشخص عبور می‌کند محاسبه کردند.

در این مقاله، با هدف تأثیر دیوارهای بادشکن بر رفتار قطار پرسرعت در پروژه ملی تهران-قم-اصفهان، در ابتدا با مدل‌سازی مدل پیشنهادی ناوگان ICE3 برای این پروژه، و مدل‌سازی وزش باد عرضی در حالت بحرانی‌ترین وضعیت جوی موجود، مسئله بررسی می‌گردد. سپس، با مدل‌سازی دیوارهای بادشکن نصب شده در طرفین خط ریلی، وجود و عدم وجود این دیواره‌ها مطالعه می‌شود. به‌منظور روشن‌تر شدن تأثیر این دیواره‌ها، چندین حالت مختلف طراحی دیواره بررسی شده و پیشنهادهایی در زمینه‌ی مناسب‌ترین مدل ارائه می‌شود. حل این مسئله بر مبنای استفاده از روش شبکه بولتزمن بود که برخلاف روش‌های کلاسیک دینامیک سیالات محاسباتی، روشی فاقد مش در مقیاس مزوسکوپی می‌باشد.

۲. تئوری

به‌طورکلی، سه دیدگاه در حل عددی مسائل فیزیکی و تحلیل جریان سیال مطابق شکل ۱ وجود دارد:

- روش‌های میکروسکوپی
- روش‌های ماکروسکوپی
- روش‌های مزوسکوپی

دیدگاه میکروسکوپی، حرکت منفرد مولکول‌ها را در مسیر آزاد متوسط در نظر می‌گیرد و سیستم‌های دینامیک سیال با استفاده از معادله همیلتون شبیه‌سازی می‌شوند. در ارتباط با مسائل موجود در دینامیک سیالات محاسباتی، دیدگاه میکروسکوپی از لحاظ محاسباتی با توجه به حافظه و سرعت پردازش کامپیوترهای موجود مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشد.

معادلات حاکم بر جریان، حل می‌کند.

در این روش، برخلاف روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مرسوم، همچون روش اختلاف محدود، حجم محدود و المان محدود که یک دیدگاه از بالا به پایین می‌باشند، بدین معنی که ابتدا معادلات ماکروسکوپی حاکم بر جریان استخراج شده و سپس گسسته سازی می‌گردند و پارامترهای جریان همچون سرعت، فشار، مومنتم و چگالی با استفاده از روش‌های پیچیده عددی محاسبه می‌شوند، روشی بر اساس مدل‌های میکروسکوپی و معادلات جنبشی میکروسکوپی و الگوریتم پایین به بالا می‌باشد (مک‌نامارا و زانتی، ۱۹۸۸). عملکرد این روش بر اساس یک تصویر سینتیک با استفاده از معادله بولتزمن به‌عنوان شالوده بوده که در آن ذرات ساختگی، در حال حرکت و تأثیر متقابل بر یکدیگر در چارچوب قوانینی خاص، در یک فضای مجازی می‌باشند. مزیت این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی، محاسبات ساده‌تر، سهولت اعمال شرایط مرزی و قابلیت موازی شدن است که برای حل مسائلی با هندسه پیچیده، دارای کاربرد فراوانی است.

اساس کار معادله شبکه بولتزمن اولیه که برای رفع مشکل اغتشاش آماری در روش شبکه گاز ایجاد شد، میانگین‌گیری از اعداد اقامت بولین است:

$$f_i = \langle n_i \rangle \quad (1)$$

که علامت براکت، میانگین‌گیری مجموع را نشان می‌دهد. در واقع، به‌جای دنبال کردن یک ذره منفرد بولین، با تاریخچه زمانی یک جمعیت گروهی سروکار داریم که احتمال حضور آن‌ها به‌صورت یک ابر میکروسکوپی قابل تجسم است (سوکوپ و تورن، ۲۰۰۶). می‌توان عدد اقامت بولین را به دو بخش متوسط و نوسانی تفکیک کرد:

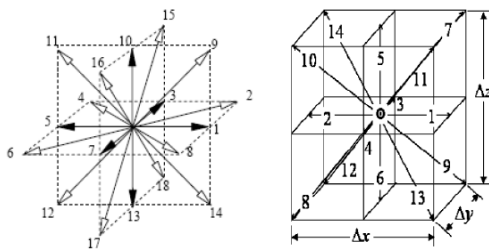
$$n_i = f_i + g_i \quad (2)$$

که طبق تعریف، متوسط نوسانات g_i صفر خواهد بود. با استفاده از این رابطه در معادلات بولین، در نهایت، معادله اولیه شبکه بولتزمن به‌صورت زیر به دست می‌آید (چن و دولن، ۱۹۹۸):

$$\Delta f_i = c'(f_1, \dots, f_b) \quad (3)$$

که در آن b بیانگر تعداد سرعت‌های گسسته شبکه، f_i ‌ها چگالی احتمال حضور ذره در مسیر i ام و c' اپراتور برخورد است.

در روش شبکه بولتزمن، تجدید آرایش ذرات طی مراحل برخورد و جاری شدن رخ داده و توابع توزیع جدید محاسبه می‌گردند. شکل کلی نمایش این شبکه‌ها به‌صورت $D_m Q_n$ است که m بیانگر بعد و n بیان‌کننده سرعت‌های مدل است و به‌عنوان نمونه می‌توان به شبکه‌های $D_2 Q_9, D_1 Q_5, D_1 Q_3$ اشاره نمود. در حالت سه‌بعدی نیز می‌توان به شبکه‌های $D_3 Q_{19}, D_3 Q_{15}$ اشاره نمود که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. غالباً در روش شبکه بولتزمن در حالت‌های دوبعدی، شبکه $D_2 Q_9$ مورد استفاده قرار می‌گیرد که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد.



شکل ۲. سمت راست، شبکه $D_3 Q_{15}$ و سمت چپ شبکه $D_3 Q_{19}$ را نشان می‌دهد (چن و دولن، ۱۹۹۸)

معمولاً برای آسان کردن حل‌های معادله بولتزمن، اپراتور برخورد در این معادله با عباراتی ساده جایگزین می‌گردد که مشکلات ریاضی آن را بدون از بین بردن مبانی فیزیکی، حل می‌نماید. این دسته از معادلات ساده شده بولتزمن با اپراتور تصادم BGK (بتنگار-گراس-کراک) به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

بادشکن بر رفتار قطار پرسرعت در مگا پروژه ملی راه آهن پرسرعت تهران- قم- اصفهان پرداخته می شود. در ابتدا نیاز است که شرایط واقعی پروژه را بدانیم. خط ریلی پروژه تهران- قم- اصفهان دارای طول تقریبی ۴۱۰ کیلومتر و به صورت دوخطه می باشد که از ایستگاه های تهران، فرودگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قم، دلیجان، میمه، مورچه خورت و اصفهان عبور می کند. حداکثر سرعت تردد قطار نیز ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه هدف این مقاله مدل کردن بدترین وضعیت موجود برای شرایط پروژه است، شرایط بیشینه وزش باد در آمار سازمان هواشناسی کشور در سال های ۱۹۵۱ الی ۲۰۱۴ میلادی برای این منطقه به شرح جدول ۱ می باشد:

جدول ۱. شرایط بیشینه وزش باد سازمان هواشناسی

کشور، برای ایستگاه های پروژه راه آهن پرسرعت تهران-

قم- اصفهان

نام ایستگاه هواشناسی	سال وقوع	سرعت وزش باد (m/s)
تهران	۲۰۱۴	۳۰
فرودگاه امام خمینی (ره)	۲۰۱۴	۳۳
قم	۱۹۶۰	۳۱
دلیجان	۲۰۰۴	۳۰
میمه	۱۹۹۹	۲۰
مورچه خورت	۲۰۰۹	۲۴
اصفهان	۱۹۹۴	۳۰

لذا، همان طور که مشاهده می شود، بدترین شرایط وزش باد عرضی سرعت ۳۳ متر بر ثانیه می باشد که در ناحیه فرودگاه امام خمینی (ره) رخ داده است.

مدل قطار پرسرعتی که برای مدل سازی در نظر گرفته شده، قطار ICE3 شرکت زیمنس آلمان فرض گردیده که جزو پیشنهادهای طراحی در این پروژه ملی می باشد. برای مدل سازی قطار پرسرعت ICE3 از تعاریف موجود در استاندارد اروپایی EN 14067-6:2010 استفاده گردیده است. هندسه قطار با دقت بسیار

$$C'_{BGK}(f) = -\frac{f - f^{eq}}{\tau_v} \quad (4)$$

که f^{eq} تابع توزیع تعادل بوده و در حالی که τ_v مقیاس زمانی رایج بوده و با آسودگی از برخورد تا تعادل موضعی تداعی می گردد.

بدون اشاره به جزئیات ریاضی مرجع (هی و لو، ۱۹۹۷) معادله بولتزمن با تقریب BGK، با گسسته سازی زمان به شکل زیر خواهد بود:

$$f(\bar{x} + \bar{e} \delta t, t + \delta t) - f(\bar{x}, t) = -\frac{1}{\tau_v} [f(\bar{x}, t) - f^{eq}(\bar{x}, t)] \quad (5)$$

قبل از تعیین تابع توزیع تعادلی باید متغیرها محاسبه گردند و محاسبه آنها یکی از مهم ترین مراحل گسسته سازی معادله بولتزمن خواهد بود. در معادله (۵)، δt گام زمانی و τ_v ویسکوزیته مبنی بر زمان آرامش می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\tau_v = 3\nu \frac{\delta t}{\delta x^2} + 0.5 \quad (6)$$

که ν ویسکوزیته سینماتیک سیال و برحسب عدد رینولدز معلوم به صورت زیر به دست می آید:

در رابطه (۷)، U سرعت ورودی، D_h قطر هیدرولیکی، Re عدد رینولدز جریان و n ضریب توانی می باشد. به منظور محاسبه مقادیر ماکروسکوپی از روابط زیر استفاده می شود:

$$\rho = \sum_i^b f_i \quad (8)$$

$$\rho \bar{u} = \sum_i^b \bar{e}_i f_i \quad (9)$$

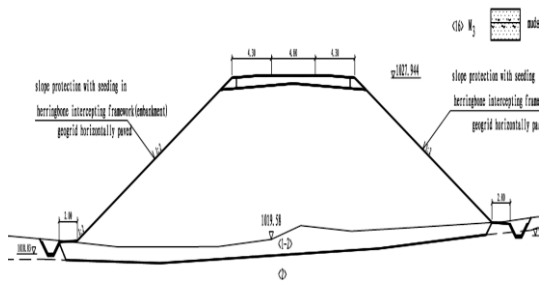
$$\rho e = \frac{1}{2} \sum_i^b (e_i)^2 f_i \quad (10)$$

که f_i مقدار تابع توزیع در جهت \bar{e}_i ، ε انرژی داخلی جریان و $b+1$ تعداد مسیرهای شبکه در هر گره است.

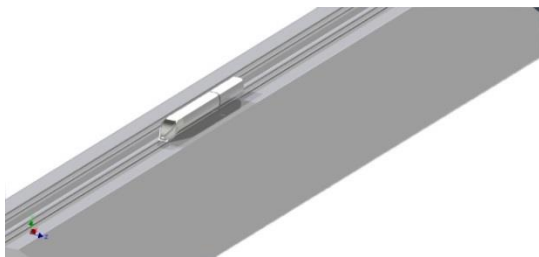
۳. مدل سازی

با توجه به اینکه در این مقاله به بررسی تأثیر دیوارهای

بررسی تأثیر دیوارهای بادشکن بر رفتار آیرودینامیک قطار پرسرعت در مگا پروژه ملی راه آهن پرسرعت تهران-قم-اصفهان



شکل ۴. مدل بستر محور ریلی تهران-قم-اصفهان



الف) نمای ایزومتریک



ب) نما از رویرو

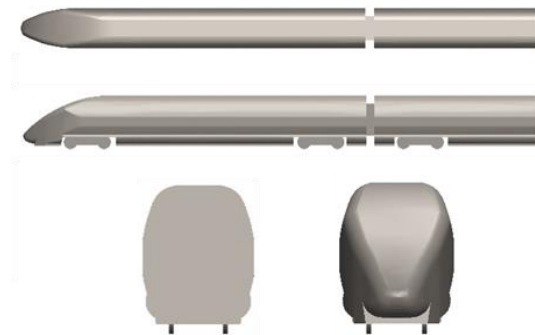
شکل ۵. مدل سازی بستر محور ریلی تهران-قم-اصفهان:

الف) نمای ایزومتریک، ب) نما از رویرو

با توجه به وجود تعداد زیادی پل و بستر در نواحی مختلف بیابانی، وجود مناطق بادخیز در محور تهران-قم-اصفهان و با توجه به داده های هواشناسی جدول ۱، توصیه اکید می شود که در نقاط ویژه ای از این مسیر به منظور بالا بردن ضریب ایمنی و آرامش سفر، از اقدامات اصلاحی برای کاهش اثر بادهای محلی استفاده گردد. یکی از این اقدامات اصلاحی، دیوارهای بادشکن است که قطار را در برابر وزش باد محافظت می کنند.

لذا، در این تحقیق، به منظور بررسی اثر دیوارهای بادشکن بر شدت جریان هوای رسیده به قطار، چندین نوع متداول طراحی این دیوارها به منظور یافتن بهترین نوع دیواره از لحاظ عملکردی در کاهش بارهای

بالایی تا حد ممکن توسط نرم افزار CAD ساخته شده است. تنها ساده سازی هایی در بوژی ها صورت گرفته است. کلیه ارتباطات بین واگن ها با دقت مدل شده است. کلیه ضرایب آیرودینامیک نسبت به طول نرمالیزه مرجع $d=3m$ ، مساحت نرمالیزه مرجع $A=10 m^2$ در استاندارد CEN و سیستم مختصات بر اساس تعریف در استاندارد EN 14067-1 در نظر گرفته شده است. مدل قطار شامل یک واگن در ابتدا و نیم واگن در پشت آن، همان طوری که در استاندارد اروپایی EN 14067-6:2010 بیان شده، می باشد. واگن ابتدایی از این جهت مطرح است که مشخصه های آیرودینامیک در آن دیده شده و از دید خطر واژگونی بسیار حیاتی است. واگن عقبی به این خاطر نیاز است که شرایط را در هندسه واقعی قطار، که در معرض وزش باد عرضی است، تقلید می کند. بنابراین، استاندارد تنها اجازه تولید یک نیم واگن در انتهای واگن ابتدایی را می دهد. مدل سه بعدی قطار سریع السیر ICE3 در نرم افزار CAD در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. مدل سه بعدی قطار پرسرعت ICE3، پیشنهاد شده

برای پروژه راه آهن پرسرعت تهران-قم-اصفهان برای مدل سازی بستر محور تهران-قم-اصفهان از اطلاعات فنی طراحی اولیه این پروژه استفاده شده (شکل ۴) و مدل سازی آن در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.

آزمون‌ها، اگر آزمون به درستی انجام شده باشد، ضرایب مدل های متحرک در مقایسه با سایر مدل‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. لذا در این مقاله، مدل قطار به صورت ثابت در نظر گرفته شده و جریان باد عبوری از روی قطار، متحرک می‌باشد.

شرایط مرزی برای مدل مسئله به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱- بنا بر تحقیقات بیکر (۲۰۰۸) در سرعت های کم قطار، پروفیل سرعت با لایه مرزی تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارد. اما در سرعت‌های زیاد قطار، پروفیل سرعت تقریباً ثابت می‌باشد. از طرفی گاتیر و همکاران (۲۰۱۳) ابراز داشتند که رویکرد عمومی آزمون‌های تأیید پایداری قطار در برابر باد عرضی، استفاده از پروفیل سرعت یکنواخت در جهت عمود و زمان است. لذا، در این مقاله، ورودی مسئله به صورت پروفیل باد با سرعت یکنواخت $U_{\infty} = 300 \text{ km/h}$ که برابر با رینولدز $Re = 2.5 * 10^7$ می‌باشد، در نظر گرفته شده است.

۲- شدت اغتشاش مسئله ۰٫۵ درصد می‌باشد که بنا بر استاندارد، مقادیر کم این ضریب پیشنهاد شده است.

۳- مرزهای جانبی به صورت گذرا در نظر گرفته شده است و به اندازه کافی از هندسه مدل دور می‌باشند تا شرط جریان آزاد برقرار باشد.

۴- شرط مرزی برای زمین بدون لغزش در نظر گرفته شده است.

۴. تجزیه و تحلیل نتایج

پس از مدل‌سازی مسئله با توجه به شرایط بیان شده در بخش قبل، برای نشان دادن صحت مدل‌سازی‌های صورت گرفته، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج کار صورت گرفته در تونل باد CSTB که در استاندارد EN14067-6:2010 وجود دارد و به بررسی ضرایب

آیرودینامیک وارده بر قطار و کاهش شدت وزش باد رسیده بر آن، مدل می‌گردد.

دیوارهای مدل شده در این تحقیق از دید ارتفاع آن‌ها بررسی شده‌اند. در جدول ۲، اطلاعات طراحی این دیواره‌های بادشکن آورده شده است.

جدول ۲. اطلاعات طراحی دیوارهای بادشکن

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
ارتفاع دیوار بادشکن (cm)	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰

همان‌طور که بیان شد، روش حل مسئله این پروژه، روش شبکه بولتزمن است که یک روش دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای تئوری مزوسکوپیک می‌باشد. دامنه محاسباتی مسئله این طور در نظر گرفته می‌شود که مرزهای خارجی دامنه به اندازه کافی دور باشند تا توزیع جریان را به درستی نشان دهند. برای همین منظور از جلو، انتها و طرفین قطار به ترتیب $13/3$ ، $26/6$ و $13/3$ برابر ارتفاع قطار فاصله در نظر گرفته شده است.

در این مقاله، از برنامه Next Limit XFlow برای مدل‌سازی بر مبنای روش شبکه بولتزمن استفاده شده است. مشخصات جریان هوای در نظر گرفته شده به صورت هم‌دما، تراکم‌ناپذیر با خصوصیات چگالی 1.2257 kg/m^3 و ویسکوزیته سینماتیک $0.000014657 \text{ m}^2/\text{s}$ و دمای $T = 288.15 \text{ K}$ می‌باشد.

حل مسئله مشابه کارهای باسارا و آلابجگوویچ (۱۹۹۸) و باسارا و تیبات (۲۰۰۴) حالت پایدار در نظر گرفته شده است. سرعت جریان هوای آزاد 300 km/h در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، عدد رینولدز بر اساس ارتفاع قطار $Re = 2.5 * 10^7$ می‌باشد که نشان‌دهنده جریان هوای متلاطم در اطراف قطار می‌باشد. بوسیلولونه و همکاران (۲۰۰۸) به این نتیجه دست یافتند که در اکثر

بررسی تأثیر دیوارهای بادشکن بر رفتار آیرودینامیک قطار پرسرعت در مگا پروژه ملی راه آهن پرسرعت تهران-قم-اصفهان

آیرودینامیک مدل قطار ICE3 در سمت بادگیر مسیر ریلی دوخطه پرداخته است مقایسه شده است. نتایج موجود در استاندارد صرفاً به بحث اثر باد عرضی بر رفتار قطار

پرسرعت اشاره می کند. نتایج حاصل از این مقایسه که ضرایب بی بعد نیروها و مومنت های آیرودینامیک مدل قطار را نشان می دهد در جدول ۳ آورده شده است.

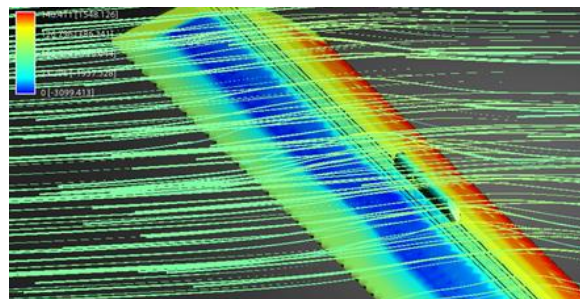
جدول ۳. مقایسه داده های مدل سازی سه بعدی صورت گرفته با داده های تونل باد موجود در استاندارد EN14067-6:2010

داده های تونل باد	داده های مدل سازی سه بعدی	اختلاف مدل سازی نسبت به تونل باد (%)
ضرایب درگ	۰/۴۷	۵
آیرودینامیک جانبی	۵/۳۷	۶
نیرو بالابرنده	-۶/۵۳	۸
ضرایب چرخشی	۲/۶۱	۱۸
آیرودینامیک پیچشی	-۰/۶۷	۲
مومنت انحرافی	-۲/۳۸	۴

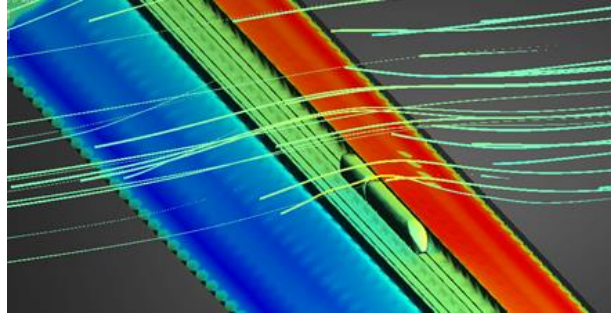
بادشکن دارای ارتفاعات متفاوت تا سه متر می باشند که در این تصاویر صرفاً سه نوع دیواره به نمایش درآورده شده است. از تصاویر، اهمیت وجود دیوارهای بادشکن در کاهش جریان باد رسیده به قطار دیده می شود. ملاحظه می گردد که با افزایش ارتفاع دیواره، کاهش بیشتری در سرعت باد رسیده به قطار پدید می آید. به عبارتی، این دیواره ها میدان پرفشار بالای سطح قطار را به طور قابل توجهی کاهش می دهند.

بنابراین، با مشاهده داده های جدول ۳ می توان صحت مدل سازی صورت گرفته را مورد تأیید دانست. حال، از اینجا به بعد، اثر حضور دیوارهای بادشکن بر رفتار قطار پرسرعت قرار گرفته روی بستر خط پروژه ریلی بررسی می گردد.

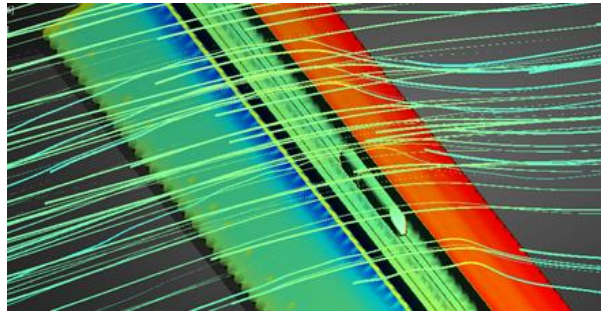
در شکل ۶، خطوط جریان هوای سه بعدی بر بالای خط ریلی پروژه راه آهن پرسرعت تهران-قم-اصفهان با قطار عبوری از روی آن در حالات عدم وجود و وجود دیوارهای بادشکن به تصویر کشیده شده است.



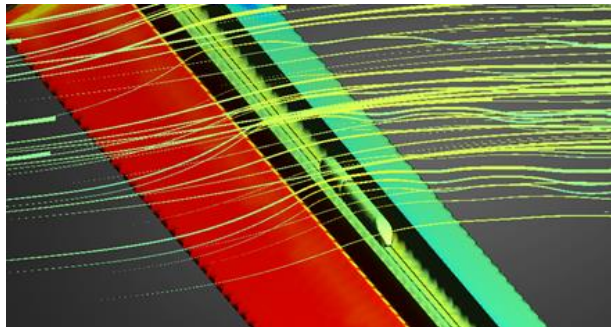
الف) بدون دیواره بادشکن



ب) با دیواره بادشکن یک متری



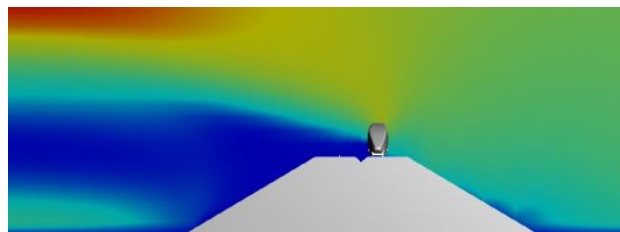
ج) با دیواره بادشکن دو متری



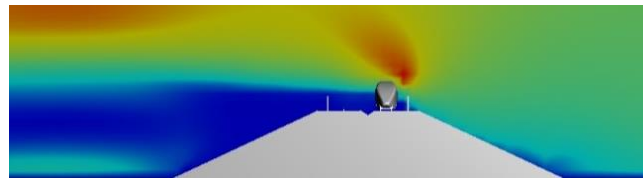
د) با دیواره بادشکن سه متری

شکل ۶. نمایش خطوط جریان هوای سه بعدی بر بالای خط ریلی پروژه راه آهن پرسرعت تهران- قم- اصفهان با قطار عبوری از روی آن و وجود دیوارهای بادشکن

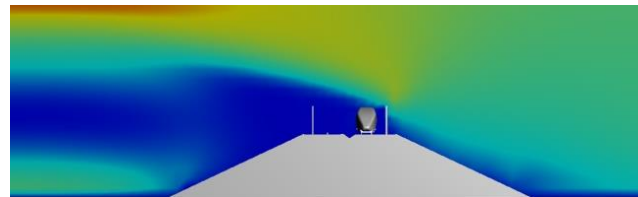
کانتورهای سرعت جریان هوا در مقطع عمود بر مسیر و در فاصله میانی واگن ابتدایی در شکل ۷ نمایش داده شده اند.



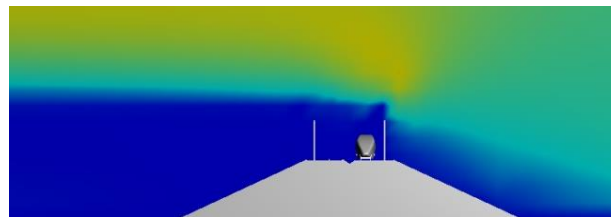
الف) بدون دیواره بادشکن



(ب) با دیواره بادشکن یک متری

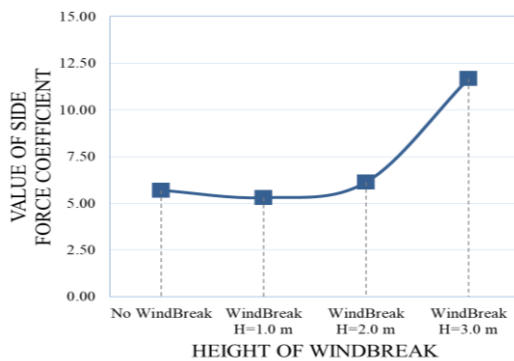


(ج) با دیواره بادشکن دو متری

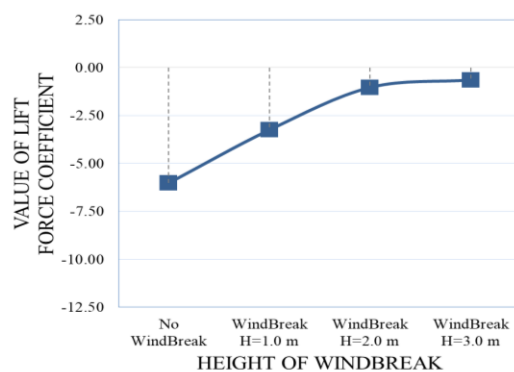


(د) با دیواره بادشکن سه متری

شکل ۷. کانتورهای سرعت جریان در مقطع عمود بر مسیر و در فاصله میانی واگن ابتدایی



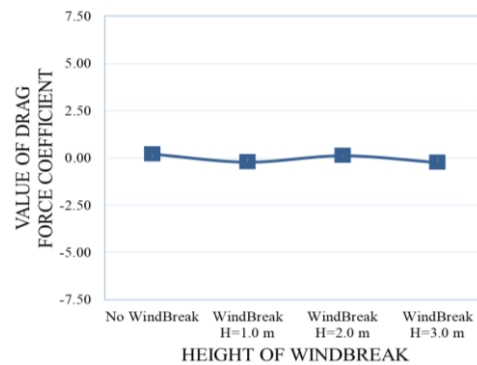
(ب) ضرایب نیروی جانبی



(ج) ضرایب نیروی بالابرنده

به وضوح می توان اثر این دیواره ها را در کاهش باد عرضی رسیده به قطار مشاهده نمود. ملاحظه می گردد که با افزایش ارتفاع دیواره، کاهش بیشتری در سرعت باد رسیده به قطار پدید می آید. به عبارتی، این دیواره ها میدان پر فشار بالای سطح قطار را به طور قابل توجهی کاهش می دهند.

در ادامه، در شکل ۸، ضرایب آیرودینامیک نیروها و مومنت های قطار پرسرعت ICE3 عبوری در خط ریلی نشان داده شده اند.



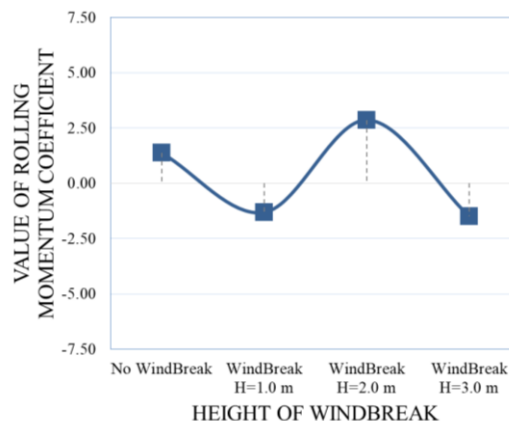
(الف) ضرایب نیروی درگ

تأثیر بسیار زیادی در ضرایب آیرودینامیک دارند. وجود دیواره سبب کاهش نیروی درگ شده و افزایش ارتفاع دیواره، رشد بیشتری در کاهش این ضریب دارد. تا جایی که با افزایش سه برابری ارتفاع دیواره (از یک متر به سه متر)، ضریب درگ $2/5$ برابر کاهش می‌یابد.

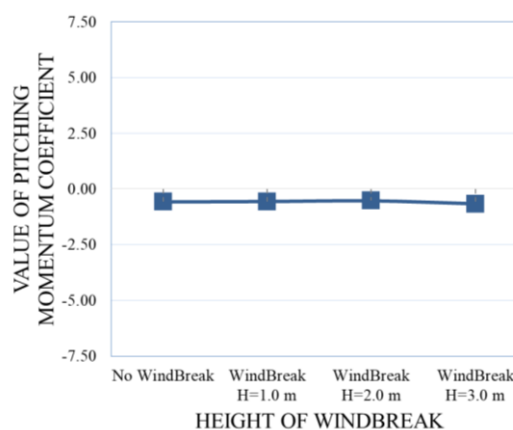
در مورد نیروی بالابرنده، وجود دیواره سبب تغییر مقدار این ضریب از حدود -5 به صفر در دیوار با ارتفاع 3 متری شده است.

در مورد مومنتم چرخشی، تغییرات این ضریب به صورت دیگری می‌باشد. در ابتدا، با نصب دیواره یک متری، شاهد کوچک شدن این ضریب هستیم. اما بعد از آن با افزایش ارتفاع به 2 متر، مقدار این ضریب افزایش می‌یابد و در انتها با افزایش ارتفاع دیواره بیش از 2 متر شاهد کاهش مجدد این ضریب هستیم. علت این امر را می‌توان به اثر تغییر ارتفاع دیواره در جریان هوای ایجاد شده بین دیوار و قطار دانست.

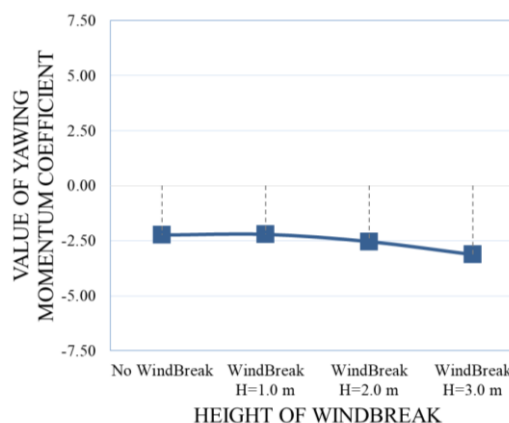
در مجموع، نتایج را این طور می‌توان تفسیر کرد که دیواره‌ها، بارهای باد را کاهش می‌دهند. اما دیواره‌های بلند می‌توانند نیروی مکشی ایجاد کنند که ممکن است به بزرگی نیروهای مستقیم باد عرضی باشند. مناسب‌ترین نوع دیواره بادشکن، دیواره‌ای است که ضرایب آیرودینامیک قطار را به حداقل ممکن برساند. لذا، با توجه به نمودارها می‌توان این‌طور فهمید که ضرایب نیروی درگ و مومنتم‌های پیچشی و انحرافی کمترین تغییرات را با افزایش ارتفاع دیواره‌ها دارند و این بدان معناست که تغییر دیواره‌ها، کمترین تأثیر را بر این ضرایب دارند. اما بیشترین تأثیرات مربوط به ضرایب نیروی جانبی و بالابرنده و مومنتم چرخشی می‌باشد که با افزایش ارتفاع دیواره‌ها تغییرات زیادی می‌کنند. بنابراین، می‌توان کاملاً به نقش دیواره‌های بادشکن در میزان جریان هوای رسیده به قطار پی برد.



د) ضرایب مومنتم چرخشی



ه) ضرایب مومنتم پیچشی



و) ضرایب مومنتم انحرافی

شکل ۸. ضرایب نیروها و مومنتم‌های آیرودینامیک قطار پرسرعت ICE3 عبوری در خط ریلی (در حالات حضور و عدم حضور دیواره‌های بادشکن)

همان‌طور که از تصاویر درک می‌گردد، این دیواره‌ها

۵. نتیجه گیری

قطارهای پرسرعت یکی از مناسب ترین گزینه ها در جابجایی مسافر می باشند. در ایران، از سال ها پیش برای احداث این سیستم های حمل و نقل برنامه ریزی شده و به عنوان اولین پروژه راه آهن پرسرعت در ایران، محور تهران-قم-اصفهان به طول تقریبی ۴۱۰ کیلومتر با حداکثر سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت انتخاب گردیده است.

با توجه به اینکه این پروژه نخستین تجربه کشور ایران در زمینه احداث خط ریلی پرسرعت می باشد، بحث ایمنی آن بسیار حائز اهمیت می باشد. لذا، در این تحقیق، با توجه به تعداد زیاد بستر و پل در نواحی مختلف بیابانی و وجود مناطق بادخیز در این محور به یکی از اقدامات اصلاحی در زمینه کاهش اثر بادهای محلی و افزایش ایمنی یعنی دیوارهای بادشکن پرداخته شد. در این زمینه، چندین نوع دیوار بادشکن با ارتفاعات

مختلف که در مجاورت خط ریلی دومسیره نصب می شود بررسی گردید و مشخص شد که وجود دیوارهای بادشکن به طرز شگرفی می تواند در کاهش نیروهای آیرودینامیک وارده بر قطار پرسرعت مؤثر واقع گردد. در مورد ضریب نیروی درگ، وجود دیواره سبب کاهش نیروی درگ شده و با افزایش سه برابری ارتفاع دیواره از یک متر به سه متر، کاهش ۲/۵ برابری در ضریب نیروی درگ مشاهده می گردد.

در مورد نیروی بالابرنده، وجود دیواره سبب تغییر مقدار این ضریب از حدود ۵- به صفر در دیوار با ارتفاع ۳ متری می شود.

در مورد ضریب مومنتم چرخشی، با نصب دیواره یک متری، این ضریب کاهش می یابد و پس از آن با افزایش ارتفاع به ۲ متر مقدار این ضریب افزایش یافته و در انتها با افزایش ارتفاع دیواره بیش از ۲ متر، کاهش مجدد این ضریب دیده می شود.

۶. مراجع

- Allori, D., Bartoli, G. and Mannini, C. 2013. "Wind tunnel tests on macro-porous structural elements: A scaling procedure". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 123: 291-299.
- Almalowi S. J. and Oztekin A. 2012. "Flow simulations using two dimensional thermal lattice Boltzmann method". *J. Appl. Math.*, ID: 135173, 12 p.
- Avila-Sanchez, S., Meseguer, J. and Lopez-Garcia, O. 2010. "Turbulence intensity on catenary contact wires due to parapets placed on a double track bridge". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 98: 504-511.
- Baker, C. J. 1985. "The determination of topographical exposure factors for railway embankments". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 21: 89-99.
- Baker, C. J. 2008. "The flow around high speed train". *BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics and Applications*, Milano, Italy, July, 20-24.
- Barcala, M. and Meseguer, J. 2007. "An experimental study of the influence of parapets on the aerodynamic loads under cross wind on a two-dimensional model of a railway vehicle on a bridge". *Proc. IMechE, Part F: J. Rail Rapid Transit*, 221(4): 487-494.
- Bartlett, C., Chen, H., Staroselsky, I., Wanderer, J. and Yakhov, V. 2013. Lattice Boltzmann two-equation model for turbulence simulations: High-Reynolds number flow past circular cylinder". *J. Heat Fluid Flow*, 42: 1-9.
- Bocciolone, M., Cheli, F., Corradi, R., Muggiasca, S. and Tomasini, G. 2008. "Crosswind action on rail vehicles: Wind tunnel experimental analyses". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 96: 584-610.
- Basara, B. and Alajbegovic, A. 1998. "Steady state calculations of turbulent flow around Morel Body". *The 7th International Symposium on Flow Modelling and Turbulence Measurements*, Taiwan.
- Basara, B. and Tibaut, P. 2004. "Time dependent vs. steady state calculations of external aerodynamics". *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*, Springer-Verlag Berlin, pp. 107-117.
- Chen, Sh. and Doolen, G. 1998. Lattice Boltzmann method for fluid flows". *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 30: 329-364.

- Cheli, F., Tomasini, G. and Volpe, R. 2010. "Experimental analysis on the effect of windbreak fences on railway vehicles". Proceeding of the Tenth International Conference on Computational Structures Technology, Valencia, Spain, September, 14-17.
- Dorigatti, M., Sterling, D., Rocchi, M., Belloli, A. D., Quinn, A. D., Baker, C. J. and Ozkan, E. 2012. "Wind tunnel measurements of crosswind loads on high sided vehicles over long span bridges". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 107-108: 214-224.
- Gautier, P. E., Tielkes, T., Sourget, F., Allain, E., Grab, M. and Heine, C. 2013. "Strong wind risks in railways: The Defrako crosswind program". Proceeding of WCRR, pp. 463-475.
- He, X. and Luo, L. S. 1997. "Theory of the lattice Boltzmann method: From the Boltzmann quation to the lattice Boltzmann equation". *Phys. Rev.*, E 56: 6811.
- Koda Y. and Lien, F. S. 2013. "Aerodynamic effects of the early three-dimensional instabilities in the flow over one and two circular cylinders in tandem predicted by the lattice Boltzmann method". *Comp. Fluids*, 74: 32-43.
- Li, B., Feng, S. H., Yang, Q. S. and Hou, Y. W. 2011. "Researches and application of railway wind-break wall". *Adv. Mater. Res.*, 194-196: 1126-1129.
- Ma, S. and Ma, Y. 2012. "Study on preventing and controlling strong wind disaster on high-speed railway". Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways, pp. 179-186.
- MacNeill, R., Holmes, S. and Lee, H. 2002. "Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains". Proceedings of the 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference, Washington, DC, 23-25 April.
- Mattila, K. 2010. Implementation techniques for the lattice Boltzmann method". Graduate Thesis, Department of Mathematical Information Technology, Jyväskylä University.
- McNamara, G. and Zanetti, G. 1988. "Use of the Boltzmann equation to simulate lattice gas automata". *Phys. Rev. Lett.*, 61: 2332.
- Raghunathan, R. S., Kim, H. D. and Setoguchi, T. 2002. "Aerodynamics of high-speed railway train". *Prog. Aerosp. Sci.*, 38: 469-514.
- Schober, M., Weise, M., Orellano, A., Deeg, P. and Wetzel, W. 2010. "Wind tunnel investigation of an ICE3 endcar on three standard ground scenarios". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 98: 345-352.
- Succi, S. 2001. "The lattice Boltzmann equation for fluid dynamics and beyond". Clarendon Press, Oxford.
- Sukop, M. C. and Thorne, D. T. 2006. "Lattice Boltzmann modeling- An introduction for geoscientists and engineers". Springer-Verlag, Berlin.
- Suzuki, M., Tanemoto, K. and Maeda, T. 2003. "Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds". *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 91: 209-218.
- Xi, Y., Mao, J., Gao, L. and Yng, G. 2013. "Optimal windbreak design for wind-erosion in high speed railway". *Modelling and Computation in Engineering II*, pp. 89-94.
- Xu, Y., Virk, M., Knight, J., Mustafa, M. and Haritos, G. 2013. "Factors influencing the performance of porous wind shields". *Appl. Mech. Mater.*, 321-324: 799-803.
- Zhou, L. L., Liang, X. F., Yang, M. Z. and Huang, S. 2012. "Optimization of bridge windbreak on highspeed railway through strong wind area". *Adv. Mater. Res.*, 452-453: 1518-1521.