

شبیه سازی عددی جریان هوای اطراف قطار مسافربری پارسی تحت اثر بادهای عرضی

محمدعلی رضوانی (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
مسعود محبی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: rezvani_ma@iust.ac.ir

دریافت: ۹۱/۱۰/۰۵ پذیرش: ۹۲/۰۳/۲۶

چکیده

پیشگیری خروج از خط به عنوان ضرورتی پر اهمیت برای تأمین ایمنی حرکت بسیاری از ماشین های ریلی مطرح است. یکی از عواملی که سبب خروج از خط واگن می شود وزش باد عرضی است. ترکیب حرکت قطار و عامل باد مغشوش گذرا، منجر به ایجاد میدان جریان هوای پیچیده و به شدت ناپایداری در پیرامون قطار می شود که نوسانات نیروهای آیرودینامیک و مومتم ها را افزایش می دهد. اندرکنش این بارها با دینامیک واگن می تواند سبب بروز مشکلات پایداری و به ویژه در مواردی، خروج از خط و واژگونی واگن شود. به منظور دستیابی به سرعت های بیشتر، امروزه اغلب، از مواد سبک تری در طراحی واگن ها استفاده می شود. ترکیب وزن سبک و سرعت زیاد منجر به افزایش نگرانی ها در باره ثبات قطار می شود. این نگرانی ها بخصوص زمانی که واگن در معرض وزش بادهای جانبی قرار می گیرد، افزایش می یابند. در این پروژه شبیه سازی عددی جریان هوای اطراف قطار عبوری پارسی تحت اثر بادهای عرضی توسط نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شده است. با بررسی نیروهای آیرودینامیک و مومتم برای زوایای انحرافی مختلف و شرایط اغتشاش هوا، الگوی جریان اطراف قطار و توزیع فشار روی سطح قطار به دست آمده است. همچنین اثرات فاصله نسبی بین واگن بر روی و مناسب ترین فاصله محاسبه شده است. در این راستا پی برده می شود که افزایش دوبرابری سرعت باد در زاویه وزش ۸ درجه، رشد ۴ تا ۴۵ درصدی در ضرایب آیرودینامیک دارد.

واژه های کلیدی: آیرودینامیک قطار، خروج از خط، الگوی جریان، بادهای عرضی، پایداری دینامیکی.

۱. مقدمه

در دهه های اخیر، تحولات در مهندسی راه آهن، سبب رفتار سریع تر، راحتی و مصرف بیشتر انرژی در قطارها شده است. بر این اساس، بهبود عملکرد آیرودینامیک قطارها یکی از اهداف اصلی فرآیند طراحی است. یکی از مسایل حل نشده و معضلات رفتار آیرودینامیک قطارها، وابستگی ضرایب آیرودینامیک محاسبه شده در شبیه سازی های عددی و اندازه گیری شده در تونل های باد، نسبت به رفتار در مقیاس کامل است.

شماری از مطالعات قبلی، ساختار جریان اطراف قطارهای سریع سیر را در زوایای وزش نسبی خطرناک و واژگون کننده در نظر می گرفتند [Baker and Robinson, 1990]. محققان زیادی در کشورهای اروپایی، مساله ای را که قطارها با آن درگیر هستند به ویژه برای قطارهای سریع السیر در نظر گرفتند [Baker, 2002, Baker et al, 2004, Baker, 2008]. تحقیقات تجربی انجام شده توسط بیکر و گاوورپ در مدل های مقیاس نشان دادند که اختلافات ناچیز در نتایج به تنظیمات متفاوت آزمایش، به عنوان مثال لایه مرزی اتمسفریک و حرکت زمین بستگی دارد [Baker and Gawthrope, 1983]. کوپر روشی برای تخمین احتمال واژگونی قطار در بادهای عرضی معرفی کرد. مطالعات او بر روی مدل در مقیاس ۱:۱۵ بود. بر اساس نتایج او، معادلات به دست آمده به تغییرات پارامترهای ورودی بسیار حساس است. دقت لازم برای تعیین این پارامترها، فراتر از قابلیت های فنآوری موجود است [Cooper, 1979]. کوپر همچنین خلاصه ای از آزمایش های تونل باد ارائه کرد که بیان می کرد عدد رینولدز بحرانی، تغییرات عمده ای در ساختار میدان جریان ایجاد می کند. به طور مشابه، تغییر در محل نقطه جدایش روی سیلندرها، نقطه جدایش را از لبه بادگیر به لبه بادپناه تا طیفی از زاویه وزش تا ۳۰ درجه حرکت می دهد [Cooper, 1979]. چپو با استفاده از

تکنیک پانل گردابه ای دوبعدی و سه بعدی، توزیع فشار بر مدل ایده آل قطار را به دست آورد. در این محاسبات فشار پایه از قبل مشخص بود. بنابراین، نتایج تطابق خوبی با آزمایش داشت [Chiu, 1991]. کوپلی با استفاده از تکنیک جریان سه بعدی، که روش پانل نامیده می شد، نیروها و مومنت ها را بر هندسه قطار ایده آلی تحت شرایط باد عرضی پیش بینی کرد. علاوه بر این، او نتایج محاسباتی را با اندازه گیری های تجربی برای طیف زاویه وزش ۲۰ تا ۳۵ درجه مقایسه کرد، اما تطابق ضعیفی داشت. محاسبات برای هندسه واقعی در محدوده زاویه وزش ۱۵ تا ۷۰ درجه بسط داده شد و با نتایج تجربی مقایسه گردید. تا زاویه وزش ۵۰ درجه، دقت نتایج، مشابه نمونه سابق بود، اما فراتر از این حد، نتایج محاسبات اختلاف زیادی با نتایج تجربی پیدا می کرد [Copley, 1987]. ماسبرنات و همکارانش محاسبات سه بعدی میدان جریان در اطراف قطار سریع السیر فرانسوی TGV را انجام دادند. معادلات ناویر استوکس تراکم پذیر متوسط رینولدز بر روی شبکه بدون ساختار با استفاده از روش المان محدود گسسته سازی شدند [Masbernat, Wolffhugel and Dumas, 1993]. گیلارد به بحث پیرامون ظواهر مختلف کاربردهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در آیرودینامیک قطار با استفاده از حل کننده های ناویر استوکس متوسط رینولدز پرداخت که در آن جریان اطراف یک مقطع عرضی دوبعدی واگن میانی با ۹۰ درجه زاویه وزش را شبیه سازی کرد [Gaylard, 1993]. دیدریکس پایداری در برابر باد عرضی برای قطار سریع سیر نمونه ICE۲ در محدوده زاویه وزش ۱۲/۲ تا ۴۰ درجه را بررسی کرد. نتایج اصلی او مجموعه ای از ضرایب مستقل آیرودینامیک برای واگن های ابتدایی و انتهایی بود [Diedrichs, 2003]. چلی و همکارانش به فرآیندی عددی و تجربی برای بهبود عملکرد آیرودینامیک قطار EMUV250 تحت اثر بادهای

شبیه سازی عددی جریان هوای اطراف قطار مسافربری پاریسی تحت اثر بادهای عرضی

باد عرضی برای زوایای وزش کوچک مدل سازی کرد. او اثرات ناپایداری بارهای آیرودینامیک اصلی را با استفاده از DES برای واحد کنترل سر قطار سریع السیر ICE2 بررسی کرد، [Diedrichs, 2009]. کراجنویک، جرجی و حمیدا همین مدل سازی را برای نمونه قطار ICE2 سه واگنه انجام دادند، با این تفاوت که کار آنها برای جریان های باد نسبتاً پیچیده بر اساس کارهای ریان و دومینی بود [Krajnvc, Georgii and Hemida, 2008].

روکی و همکارانش مقایسه ای از نتایج دو تونل باد PMWT و TsAGI بر روی مدل ساده شده قطار ICE2 انجام دادند. مقایسه در ترمهای نیروهای اصلی و توزیع فشار بر مدل بود و تطابق خوبی در نتایج به دست آمده از هر دو تونل باد بر روی مدل قطار مشخص بود [Rocchi et al, 2009]. تحقیق تجربی برای کاهش نیروی کشش قطار مسافربری پارس توسط تقوی و بابایی صورت گرفته است که به بررسی آزمایشگاهی رفتار آیرودینامیکی واگنهای مسافربری پارس پرداخته است. این آزمایشها شامل بررسی اثرات عدد رینولدز و زوایای وزش کوچک است [Taghavi and Babaei, 2003]. از نتایج حاصل از این کار برای اعتبارسنجی بخشهایی از مقاله حاضر استفاده شده است.

در مقاله حاضر به بررسی آیرودینامیک قطار پاریسی تحت باد عرضی پرداخته می شود. هدف این مقاله، به دست آوردن بارهای آیرودینامیک و الگوی جریان اطراف قطار پاریسی با استفاده از CFD است. محاسبات با نتایج آزمایشهای تونل باد که توسط پژوهشگران دیگری گزارش شده اند با هندسه و اعداد رینولدز بسیار مشابه مقایسه شده و ملاحظه می شود تطابق خوبی بین نتایج حاصل از مدل سازی عددی با آزمایشهای تونل باد به دست آمده است. وضعیت انتخاب شده برای بررسی در این مقاله به این صورت است که قطار از روبرو با باد با زوایای مختلف مواجه است. این انتخاب بر اساس قطار نمونه پاریسی که با سرعتهای

در تعریف نیروهای آیرودینامیک بررسی شد. او به طور خاص عرضی پرداختند که در آن اثرات بخشهای مختلف هندسه قطار منحنی مشخصه باد که محدودیت سرعت باد را جهت حفظ ایمنی قطار و جلوگیری از خطر واژگون شدن ارائه می کند عرضه کرد [Cheli et al, 2006]. حمیدا و کراجنویک جریان اطراف یک قطار سریع السیر کلی را تحت تأثیر بادهای عرضی با استفاده از LES مدل سازی نمودند. محاسبات آنها برای دو زاویه وزش ۳۵ و ۹۰ درجه بود. جریان باد عرضی در زاویه وزش ۹۰ درجه عمدتاً گردابه های ناپایداری را نشان می دهد، در حالی که جریان باد عرضی در زوایای وزش کوچک تر مشابه بدنه بلند و باریک قطار است [Hemida and Kraajnic, 2006]. حمیدا، کراجنویک و داویدسون در بررسی جریان اطراف یک مدل ساده شده قطار سریع السیر تحت اثر باد عرضی به این مطلب دست یافتند که حباب های جدایش در وسط صفحه سقف پدید می آید. جریان محوری پدید آمده در لبه کناری نزدیک دماغه قطار، به ایجاد دو گردابه قوی در دنباله ای که از دماغه قطار شروع می شود، منجر می گردد [Hemida, Kraajnic and Davidson, 2005]. حمیدا و بیکر در شبیه سازی LES جریان اطراف یک قطار باری در معرض وزش باد ۹۰ درجه به این مطلب پی بردند که جریانهای اطراف واگنهای باری نسبت به واگنهای مسافربری پیچیدگی زیادی دارند [Hemida and Baker, 2010]. مطالعات عددی میسون و همکارانش نشان داد بهبود هندسه زیر بدنه قطار به عنوان یک پارامتر کلیدی در بهبود ضرایب آیرودینامیک قطار نقش دارد [Masson, Allain and Parardot, 2009]. سوزوکی، تانموتو و مایدا بیان کردند که مشخصه های آیرودینامیکی قطار بر روی بستر به توزیع لایه مرزی روی زمین بستگی دارد و ضریب نیروی جانبی قطار بر روی بستر با ارتفاع بلند، بیشتر از بستر با ارتفاع کم است [Suzuki, Tanemoto and Maeda, 2003]. دیدریکس پایداری قطار سریع السیر ICE2 را در برابر

گرفته شود. در شرایط خاص، تراکم ناپذیری برای سرعت های جریان حدوداً زیر ۱۰۰ m/s تعیین می شود. همچنین فرض ویسکوزیته ثابت در موارد گرادیان فشار کوچک صحیح است. معادلات به دست آمده برای یک سیال نیوتنی با ویسکوزیته و چگالی ثابت به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \quad (1) \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \quad (2) \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt} \quad (3) \end{aligned}$$

این معادلات، معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی مرتبه دوم (PDE)^۲ که رفتار سیالات را بیان می کند است. در این معادلات p فشار نسبی، ρ چگالی و μ ویسکوزیته سیال است. متغیرهای u, v, w مولفه های بردار سرعت در مختصات کارتزین x, y و z به ترتیب هستند [White, 2008]. محاسبات جریان با افزایش قدرت رایانه کارآمدتر ارابه می شود. معادلات ناویر-استوکس به عنوان مبنایی برای این محاسبات هستند.

۳. معادله پیوستگی

با پایداری جرم و خواص سیال که به صورت ثابت در نظر گرفته می شود، بقای جرم می تواند با یک معادله دیفرانسیل با مشتق جزئی (PDE) برای حجم کنترل بی نهایت کوچک که حاوی مشتقات چگالی و سرعت است بیان شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (4)$$

معادله فوق، معادله پیوستگی است و به هیچ فرضی نیاز ندارد، بجز آن که چگالی و سرعت بایستی توابعی پیوسته در نظر گرفته شوند. پیوستگی به طور یکنواخت، متفاوت از توابع زمان و مکان

تا ۱۶۰ km/h حرکت می کند، با وزش بادی که در بدترین حالت به صورت ۹۰ درجه نسبت به قطار می وزد انتخاب شده است. این روش با دقت مناسبی، کل احتمالات بحرانی نیروهای باد عملیاتی را ارابه می کند. انتخاب این گزینه به طور کامل در بخش های بعدی شرح داده شده است.

۲. نظریه

در جریان خارجی، سیالات اطراف بدنه ها، تغییراتی در فشار و میدان های سرعت پدید می آورند. هنگام طراحی و ساخت بدنه های در معرض جریان های خارجی، این مطلب اهمیت زیادی دارد که مشخصه های جریان مانند توزیع فشار و میدان های سرعت که افزایش می یابند در نظر گرفته شود. هر چند نظریه های لایه مرزی تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی ابزارهایی مفید در فهمیدن این شرایط هستند، مقایسه ای با نتایج تجربی کمک به اعتبارسنجی نتایج است، هنگامی که با هندسه های پیچیده سروکار داریم. در این بخش، شماری از جنبه های فیزیکی مکانیک سیالات مورد نیاز برای درک صحیح از این تحقیق ارائه شده است.

روش دیفرانسیل در آنالیز جریان سیال بر اساس شماری از معادلات حاکم است که جریان در جنبه های مختلف را توصیف می کند. این معادلات، صورت های ریاضی قوانین بقای فیزیک هستند. حوزه های قوانین بقا که جرم، مومنتوم (بر اساس قانون دوم نیوتن) و انرژی (بر اساس قانون اول ترمودینامیک) است را بایستی در نظر داشت [Versteeg and Malalasekera, 2007]. معادلات ناویر-استوکس از قوانین نامبرده قبل به دست می آیند. این معادلات برای حجم کنترل بی نهایت کوچک کاربرد دارند و برای جریان تراکم ناپذیر با ویسکوزیته ثابت و سیال نیوتنی معتبرند (سیالی که تنش های برشی ویسکوز در آن متناسب با گرادیان سرعت تغییر شکل باشد). به عنوان یک قانون کلی جریان برای عدد ماخ $Ma \leq 0.3$ می تواند تراکم ناپذیر در نظر

مغشوش در جهت X به صورت به دست می آید:

معادلات ناویر- استوکس در جهت Y و Z نیز به همین روش بالا به دست می آیند. با مقایسه با نمونه آرام ملاحظه می شود که سه ترم اضافه پدید آمده است.

5. تعریف ضرایب آیرودینامیک

هنگامی که قطارها تحت باد عرضی قرار می گیرند، نیروها و مومنت های آیرودینامیک را تجربه می کنند. نیروهای آیرودینامیک شامل نیروی درگ (نیروی کشش) (F_{Drag}) که در برابر حرکت رو به جلوی قطار مقاومت می کند، نیروی جانبی (F_{Side}) که در نتیجه باد جانبی است و قطار را به کنار هل می دهد و نیروی بالابرنده (F_{Lift}) که به سمت بالا است و تمایل به بلند کردن قطار از ریل دارد. مومنت های آیرودینامیک که به علت باد عرضی به وجود می آیند شامل مومنت های چرخشی $(M_{Rolling})$ ، پیچشی $(M_{Pitching})$ و انحرافی (M_{Yawing}) هستند. اندازه این نیروها و مومنت ها به عدد رینولدز و شکل قطار وابسته است. نیروها و مومنت های آیرودینامیک توسط پارامترهای بدون بعد مختلفی به منظور ساده تر شدن مقایسه بین مطالعات عددی و تجربی ارائه می شوند. بر طبق استاندارد EN 14067-1، می آید. در نمونه قطار در مقیاس کامل این عمل می تواند با ضرایب آیرودینامیک بی بعد به صورت زیر بیان می گردند. نیروها:

[prEN :14067-1]

4. جریان مغشوش

جریان مغشوش (یا توربولانت) با خصوصیات تغییرات مبهم در زمان و مکان مشخص می شود. سرعت و فشار در همه سه بعد در حال تغییر هستند. اغتشاش اغلب با یک جریان آرام شروع می شود، اما اگر عدد رینولدز به اندازه کافی بالا باشد جریان مغشوش می شود. این واقعیت که جریان متشکل از گردابه هایی با سرعت و ابعاد مختلف است، همراه با این واقعیت که با زمان نیز تغییر می کند، باعث دشوار شدن پیش بینی جریان می شود. معادلات ناویر- استوکس برای جریان مغشوش در مقایسه با جریان آرام بسیار پیچیده تر هستند که این به علت نوسانات سرعت و فشار است. سرعت u (درجهت X) با اضافه کردن مولفه متوسط زمانی \bar{u} و مولفه نوسانی u' محاسبه می شود. در جهات Y و Z نیز می تواند به همین صورت بیان شود:

$$u = \bar{u} + u' \quad (4)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (5)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (6)$$

فشار p نیز به همین روش سرعت ها با اضافه کردن مولفه متوسط زمانی \bar{p} و مولفه نوسانی p' به دست می آید:

$$p = \bar{p} + p' \quad (7)$$

برای جریان تراکم ناپذیر با صرف نظر از جاذبه، معادله ناویر- استوکس در جهت X می تواند به صورت زیر ساده سازی شود جایگزینی u, v, w و p در معادله (4) الی (7) و ساده سازی پارامترهای متوسط زمانی، معادله ناویر- استوکس برای جریان

$$\rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right\} - \frac{\partial}{\partial x} \bar{u}'^2 - \frac{\partial}{\partial y} \bar{u}'v' - \frac{\partial}{\partial y} \bar{u}'w' \quad (9)$$

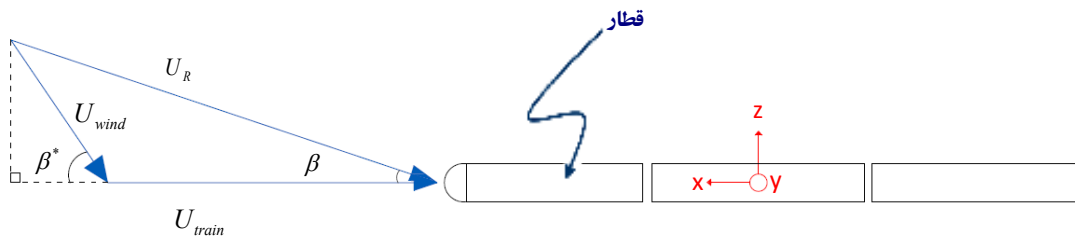
۶. باد عرضی

برای ماشین های ریلی و جاده ای تحت شرایط باد عرضی، توزیع فشار و بنابراین نیروها و مومنتم های آیرودینامیک به چندین متغیر که از خصوصیات باد و ماشین منشا می گیرند وابسته هستند. سطح مرجع A_t ، ارتفاع مرجع h_t ، و سرعت ماشین U_{train} (در باب خصوصیات ماشین)؛ و چگالی هوا ρ ، ویسکوزیته ν ، همچنین سرعت باد U_{wind} ، زاویه باد با خط β^* ، مقیاس طول استاندارد و اختلاف استاندارد سرعت باد (در باب خصوصیات باد) وجود دارد.

شکل (۱) ارتباط بین سرعت قطار U_{train} ، سرعت باد U_{wind} شامل زاویه وزش نسبت به خط β^* ، همچنین سرعت باد برآیند U_R و زاویه باد برآیند با خط β برای نمونه قطار نشان داده شده است.

۷. مدل قطار

اولین گام ساخت هندسه مطلوب است. هندسه مدل قطار نمونه پارسی از یک لکوموتیو GT26 امریکایی در جلو و دو واگن مسافربری پارس در دنباله آن تشکیل شده است. ابعاد انتخاب شده نهایی قطار در مقیاس ۱:۳۰ است. ابعاد مدل و نمونه واقعی قطارها در جدول (۱) ذکر شده است. بوژیها برای هر مدل قطار ساده سازی شده اند. سعی شده است هندسه قطار با دقت بسیار بالایی تا حد امکان ایجاد شود. قطار به صورت ساکن در نظر گرفته شده و از باد برآیند در سرعت مشخص استفاده می شود. این عمل با جایگذاری مجموعه واگن در زاویه وزش به دست



شکل ۱. موقعیت باد و بردارهای سرعت برای قطار در معرض باد عرضی-نما از بالا

(۱۰)

$$(F_{Drag}, F_{Side}, F_{Lift}) = q \cdot A_t (C_{Drag}, C_{Side}, C_{Lift})$$

مومنتم ها:

$$(M_{Rolling}, M_{Pitching}, M_{Yawing}) = q \cdot A_t \cdot l_t (C_{Rolling}, C_{Pitching}, C_{Yawing}) \quad (۱۱)$$

فشار هد دینامیک:

$$q = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2}{2} \quad (۱۲)$$

فشار:

$$p - p_{\infty} = q \cdot C_p \quad (۱۳)$$

که در آن :

F_i : نیروی کار

M_i : مومنتم کار

C_p : ضریب فشار

ρ : چگالی متوسط جریان

U_{∞} : سرعت جریان آزاد

A_t : سطح مقطع

L_j : مشخصه طول

P : فشار استاتیک محلی

P_{∞} : فشار استاتیک جریان آزاد است

اختلاف بین فشار استاتیک محلی P و فشار استاتیک جریان آزاد P_{∞} ، مستقیماً به فشار دینامیکی جریان آزاد $1/2 \rho U_{\infty}^2$ وابسته است. بنابراین ضریب فشار در همه سرعت ها ثابت باقی می ماند.

شبیه سازی عددی جریان هوای اطراف قطار مسافربری پاریس تحت اثر بادهای عرضی

مورد استفاده قرار گیرد.

نمایی از هندسه ساخته شده قطار در شکل (۲) آمده است.

• Large Eddy Simulations (LES) مقیاس های بزرگ تر

جریان مغشوش را با استفاده از مش محاسباتی حل می

کند. مقیاس های کوچک تر و پراکندگی انرژی که غیر قابل

حل هستند را می توان با این مدل حل کرد. در خصوص

محاسبات باد عرضی قطارهای با عدد رینولدز بالا، LES نیز

به تلاش های محاسباتی بالایی نیاز دارد و به این دلیل است

که LES در صنایع استفاده نمی شود.

• Detached Eddy Simulations (DES) یک روش نسبتاً

جدید را ارائه می کند و مخلوطی از LES و RANS است.

این روش از LES در نواحی دور از دیوارهای توپر استفاده

حرکت رو به جلوی قطاری در سرعت مشخص و بادی که با

سرعت نسبی خاصی با زاویه ۹۰ درجه نسبت به وجوه جانبی

قطار می وزد مقایسه شود. مبدا سیستم مختصات کارتزین در مرکز

قطار و در بالای ریل قرار گرفته است.

۸. شبیه سازی عددی (CFD)

در CFD، چهار روش مدل سازی کلی وجود دارد:

• Direct Numerical Simulations (DNS) که معادلات

ناویر-استوکس توسعه یافته را مستقیماً حل می کند.

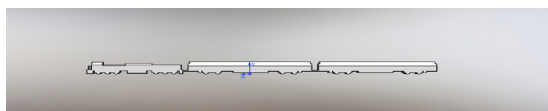
این روش، زمان بسیار زیادی مصرف می کند و اکثراً در

تحقیقات استفاده می شود. به علت تلاش های محاسباتی

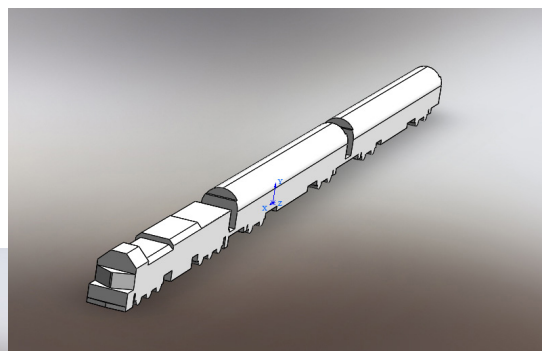
بالا، DNS امروزه نمی تواند برای محاسبات باد عرضی

جدول ۱. ابعاد واقعی و مدل مقیاس قطار پاریس

ابعاد مدل مقیاس (متر)			ابعاد واقعی (متر)			
ارتفاع	عرض	طول	ارتفاع	عرض	طول	
۰/۱۳۲	۰/۱۰۰	۰/۶۹۰	۳/۹۰	۲/۸۰	۲۰/۸۰	لکوموتیو GT26
۰/۱۳۷	۰/۰۹۱	۰/۸۸۵	۴/۰۵	۲/۸۲	۲۶/۴۰	واگن مسافری پاریس



(ب)



(الف)

شکل ۲. مدل قطار (الف) نمای ایزومتریک، (ب) نمای جانبی

و مدل تنش رینولدز که پیچیده ترین در بین این مدل‌ها است نیازمند قدرت رایانه ای بسیار عظیمی است. بنابراین تنها دو مدل دو معادله ای $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ باقی می ماند. هر دوی این مدل‌ها مدل ویسکوزیته ادی نامیده می‌شوند و به معنای آنست که بر اساس ویسکوزیته اغتشاش هستند. در مدل $k-\varepsilon$ دو معادله انتقالی برای انرژی سینتیک اغتشاش k و اتلاف آن ε حل می‌شود. ω نرخ اتلاف در انرژی سینتیک اغتشاشی واحد است، به عبارت دیگر نرخ اتلاف ω تقریباً برابر است با ε/k . یکی از تفاوت‌های اصلی بین این دو مدل این است که مدل $k-\varepsilon$ استاندارد نیاز به توابع دیواره برای حل لایه مرزی دارد، درحالی که مدل $k-\omega$ از هر راهی به سمت دیواره استفاده می‌کند. مدل $k-\omega$ به عبارتی با مسایلی سروکار دارد که مقدار اولیه ω در جریان آزاد وجود دارد، از نتایج این طور فهمیده می‌شود که به این پارامتر وابسته هستند. بنابراین به منظور پیش بینی صحیح میدان جریان و نتیجه بخش بودن تنش دیواره روی سطوح قطار و همچنین اعتبارسنجی نتایج با داده های تجربی موجود، از مدل اغتشاشی قابل درک $k-\varepsilon$ با رفتار توابع بدون دیواره استفاده شد. این مدل بسیار کارآمد و دقیق است و به طور گسترده در آیرودینامیک ماشین‌ها استفاده می‌شود.

۱۰. فرضیات جریان سیال

اندازه فیزیکی دامنه محاسباتی بایستی بقدر کافی بزرگ باشد تا از اثرات نادرست مرزها جلوگیری کند. اکسلسون و همکارانش در طی مطالعه بر روی یک واگن مسافربری نشان دادند که فاصله نامناسب می‌تواند میدان فشار نادرستی اطراف قطار ایجاد کند [Axelsson, Ramnefors and Gustafsson, 1998]. خیر و همکارانش در سال ۲۰۰۰ و رولن و همکارانش در سال ۲۰۰۴ و همکارانش از مدل‌های قطار ساده شده مرکب از دو واگن استفاده کردند [Khier, Breuer and Durst, 2000, Rolen, Rung and Wu,

می‌کند و برای نزدیک دیواره‌ها از RANS استفاده می‌کند. هر دوی LES و DES روش‌هایی برای محاسبات جریان ناپایدار هستند.

- Reynolds Average Navier Stokes (RANS) جریان مغشوش را با یک متوسط زمانی و واریانس میدان‌های جریان تخمین می‌زند که برای متوسط زمانی $t \rightarrow \infty$ زمان را مستقل از RANS هدایت می‌کند. RANS اغلب حلهای حالت پایدار^۹ عملی برای کاربردهای مهندسی را اجرا می‌کند. اگر جدایش در مقیاس‌های زمانی برای جریان متوسط و مغشوش اتفاق بیافتد، می‌تواند به جای متوسط زمانی $t \rightarrow \infty$ ، متوسط زمان انتگرالی به اندازه کافی طولانی برای نوسانات مغشوش را انتخاب کند. این رویکرد با عنوان Unsteady Reynolds Average Navier Stokes (URANS) شناخته می‌شود. تاکنون مروری کلی بر روش‌های محاسباتی ارائه گردید. بنابراین با توجه به بررسی سایر روش‌ها، تصمیم بر آن شد که در مقاله حاضر از متد چهارم یعنی RANS استفاده شود.

۹. مدل‌های اغتشاشی برای Reynolds Average Navier Stokes (RANS)

چندین مدل اغتشاشی متفاوت در بکارگیری روش RANS وجود دارد که از راه‌های مختلفی ترم‌های اضافی را در هنگام متوسط گیری زمانی معادلات ناویر استوکس مدل می‌کنند. برخی از این مدل‌ها شامل مدل طول ترکیبی^{۱۰}، مدل $k-\varepsilon$ ، مدل $k-\omega$ و مدل تنش رینولدز^{۱۱} هستند که به ترتیب صفر، دو، دو و هفت معادله انتقال اضافی را دارند که نیازمند حل به همراه معادلات RANS هستند [Versteeg and Malalasekera, 2007]. ترکیبی برای جریان‌های جدایشی و چرخشی مناسب نیست، [2007] به طور کلی هر مدلی مزیت‌ها و نقص‌هایی دارد. مدل

شبیه سازی عددی جریان هوای اطراف قطار مسافربری پاریسی تحت اثر بادهای عرضی

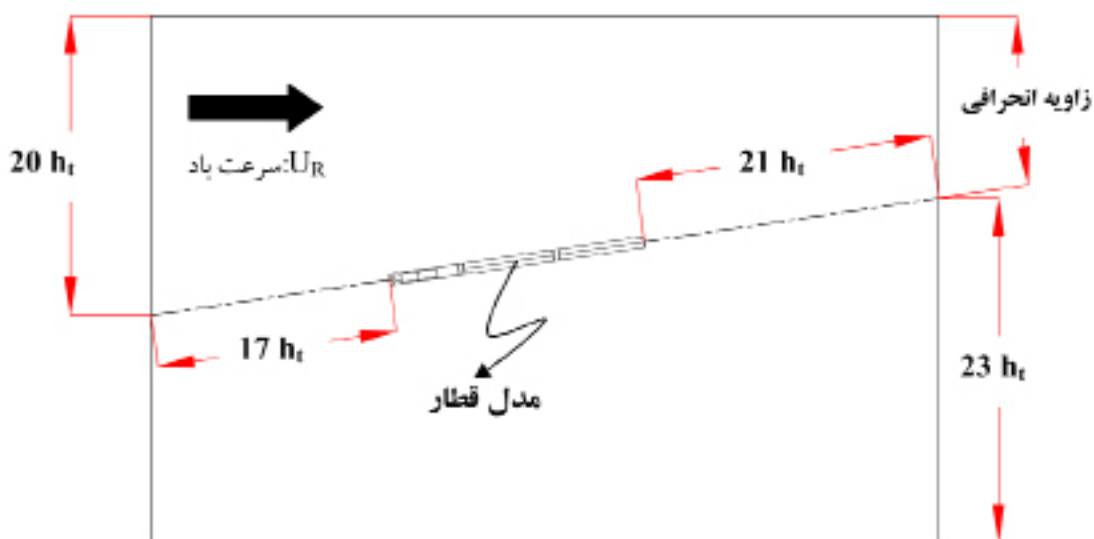
سطوح قطار و زمین در نظر گرفته شده است. (ج) سقف و دیوارهای محدوده از شرایط مرزی متقارن استفاده می کند. (د) شرط خروجی، فشار خروجی ثابت در نظر گرفته شده است. به منظور انجام محاسبات، دامنه محاسباتی نیازمند مش است. کیفیت نامناسب مش در طی خطوط جریان نقاط سکون از مرز می تواند کاهش اشتباهی از فشار کل بدهد. به منظور ساختن مش با کیفیت بالا و هنوز نگهداشتن تعداد سلول نسبتاً کم، بخش هایی از دامنه محاسباتی خیلی خوب ساخته می شود، درحالی که بقیه تا حد امکان با سلول های بزرگ تری مش زده می شود. با انتخاب سطوحی خاص که در برابر تغییرات هندسه ناگهانی قرار دارند، احتمال پالایش در این نواحی وجود دارد. سطوح قطار از اهمیت خاصی برخوردار است که حداقل اندازه سلول حدود 0.2 mm استفاده شده است، درحالی که سلول های نسبتاً بیرونی تر در دامنه تا 25 mm نیز اندازه دارند. سلول های خوب در ناحیه دنباله پشت قطار نیز اهمیت بسیاری دارد. از آنجایی که انتخاب به یک روش منظم تنها در یک سطح ایجاد می شود، اشپای سه بعدی به

[2004]. خبیر دامنه ای حدوداً $20:10:10$ برابر ارتفاع قطار از جلو: کنار: پشت قطار را در نظر گرفت. دامنه متناظر امتداد یافته توسط رولن $5:9:19$ بود. بنابر اکسلسون دامنه گسترش یافته در جلوی قطار به نظر می رسد برای زوایای وزش به قدر کافی کوچک و مناسب نباشد. در مقاله حاضر دامنه در نظر گرفته شده شامل یک مدل قطار بر روی بستر صاف است. دامنه محاسباتی از مکعب مستطیلی با ارتفاع $7.5h_t$ تشکیل شده است (منظور از h_t ارتفاع قطار است). برای اجتناب از فشار در ورودی و تداخل با ماشین، و ایجاد ناحیه دنباله به اندازه کافی طولانی، مکعب قبل و بعد از محدوده قطار $17h_t$ و $21h_t$ به ترتیب امتداد داده شده است. شرایط زمین بدون لغزش بر روی این امتدادها در نظر گرفته شده است. شکل (۳) دامنه محاسباتی را نشان می دهد.

در ادامه خلاصه ای از کل شرایط مرزی آورده شده است:

الف) شرط ورودی پروفیل بلوک برای U_R ، سرعت یکنواخت با مقدار معین در نظرگفته شده است.

ب) قانون لگاریتمی استاندارد بدون لغزش مرزهای دیواره برای



شکل ۳. دامنه محاسباتی - نما از بالا

۱۱. بررسی و اعتبارسنجی نتایج

پارامترهای مورد علاقه در شبیه سازی، ضرایب نیروها، مومنتم ها و میدان سرعت پیرامون قطار است. نیروها و مومنتم ها، به عنوان برآیند نیرو و مومنتم برای کل مجموعه قطار مشخص می شود. در CFD این امکان وجود دارد که برای هر واگن منفرد این نیروها را بتوان به دست آورد، اما این کار با تجهیزات مقیاس یافته در تونل باد امکان پذیر نیست.

ارزیابی محاسبات در درجه اول با بخش تجربی است. با این وجود اعتبار بخش محاسباتی نیز بر اساس تعداد پارامترهای بیان شده در بخش تئوری اثبات می شود.

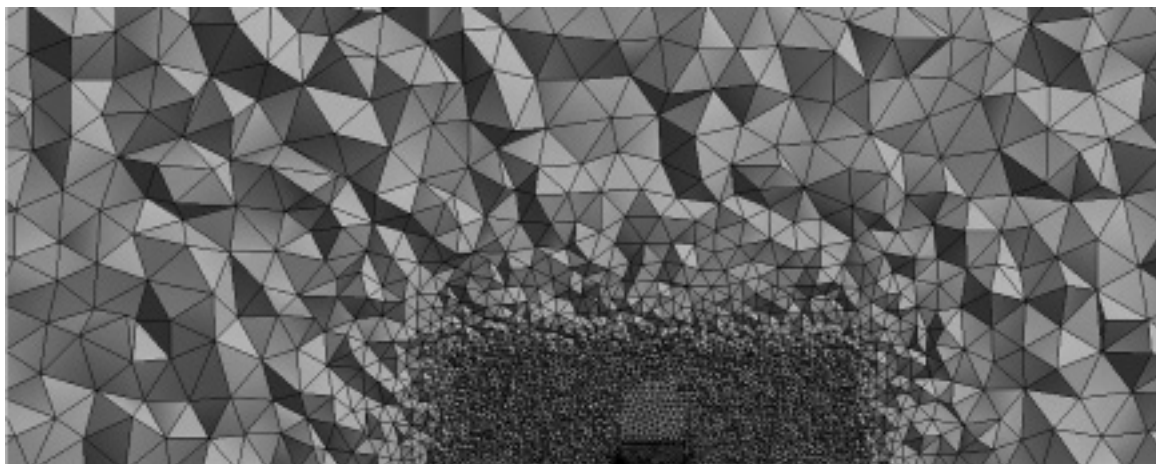
به عنوان اولین اشاره از صحت محاسبات، حس اولیه و دانش مکانیک سیالات و ویژگی های آن مورد نیاز است. برای مثال برخی ظواهر معمولی همانند نقاط سکون^{۱۳}، نقاط جدایش^{۱۴} و دنباله ها^{۱۵} مشاهده می شوند. با این حال، این صرفاً رفتار عمومی جریان را نشان می دهد و به اندازه کافی اعتبار کامل شبیه سازی را مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که تعداد لایه های مرزبیه اندازه کافی است و حداقل اندازه سلول کاهش می یابد (شکل ۵).

شکل مکعب هایی جایگزین می شود. پالایش پس در اینها ایجاد می شوند. با استفاده از این روش، احتمال اینکه سلول های بهتری در هر دوی سطوح و هوای پشت قطار به منظور حل مشخصه های جریان در دنباله داشته باشیم بیشتر است.

مش های ایجاد شده از ابزار مش زنی چند ناحیه ای^{۱۲} که ترکیبی از مش زنی با ساختار و بدون ساختار است استفاده می کنند. حداکثر اندازه سلول، ۲۵ mm تنظیم شده است تا مش هایی با کیفیت خوب تولید می کند.

هنگامی که مش زده می شود، بررسی کیفیت جهت اطمینان از ایجاد نشدن حجم منفی انجام می گیرد. در مواردی که محاسبات واگرا می شوند، فرآیند مش زنی با پارامترهای مختلف دوباره راه اندازی می شود. مش نهایی که در محاسبات استفاده می شود حدود 8×10^6 سلول دارد (شکل ۴).

محاسبات با CFD نیاز به قدرت رایانه ای بسیار زیادی دارد. تقریباً غیرممکن است که با رایانه های بسیار قوی خانگی بتوان این محاسبات را اجرا کرد. به این منظور اکثر محاسبات در سیستم کلاستر محاسبات گروهی^۱ دانشکده راه آهن اجرا شده است.



شکل ۴. مش چهار وجهی^۱ با وضوح فضایی بهتر در سطوح نزدیک قطار



شکل ۵. مقادیر y^+ در فاصله مورد نظر، در نواحی اطراف قطار پاریسی



شکل ۶. مقادیر CFL در فاصله مورد نظر، در نواحی اطراف قطار پاریسی

محاسباتی غیر معقول می شود. بنابراین فاصله با مقدار بزرگ تر از حد مطلوب $C_{II} < 1$ انتخاب شد.

۱۲. ساختار جریان اطراف قطار پاریسی

قطاری که در معرض بادهای عرضی قرار می گیرد تولید جریانی می کند که در بعضی جهات مشابه جریان اطراف بال هواپیما است. شکل (۷) جریان اطراف قطار پاریسی را برای زاویه ۸ درجه نشان می دهد. مشاهده می شود که گردابه ای از لبه بادپناه پایینی دماغه جلویی ظاهر شده و به سرعت از قطار دور می شود (A). به علاوه گردابه جدید دیگری در پایین دست تولید می شود و به صورت پایدار در امتداد محور قطار رشد می کند (B). گردابه سومی نیز از جدایش سه بعدی بالای دماغه جلویی و جدایش جریان از سقف توسعه می یابد (C).

y^+ فاصله بی بعدی است که برای توصیف کیفیت مش برای الگوی جریان استفاده می شود. در مدل سازی جریان های مغشوش، تخمین اندازه درست سلول های نزدیک دیواره مهم است. به منظور اعتبارسنجی محاسبات، فاصله مورد علاقه $0 < y^+ < 300$ در نظر گرفته شد. هیچ مقداری از y^+ بیشتر از ۳۰۰ در ناحیه بحرانی اطراف قطار نیست.

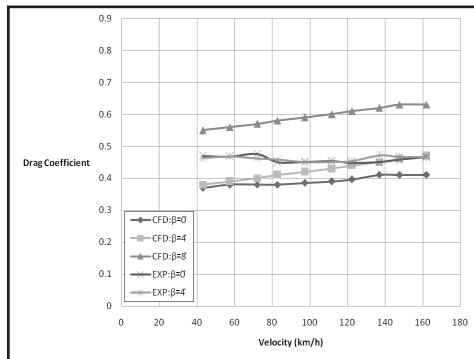
در شبیه ای مشابه نیز کانتور عدد کورنت (CFL) رسم شد و ارزیابی صحیح و مناسبی از گام زمانی در رابطه با اندازه های سلول در محاسبات صورت گرفت (شکل ۶).

این اعتبار دوگانه، از یک سو اندازه سلول و از سوی دیگر گام زمان انتخاب شده را تایید می کند. در هنگام رسیدگی به عدد CFL و نواحی بحرانی، برخی مقادیر بالای محلی مشاهده می شود، که از هندسه پیچیده که خواستار سلول های کوچک است این انتظار می رفت. می توان گام زمانی را کاهش داد که این کار منجر به زمان

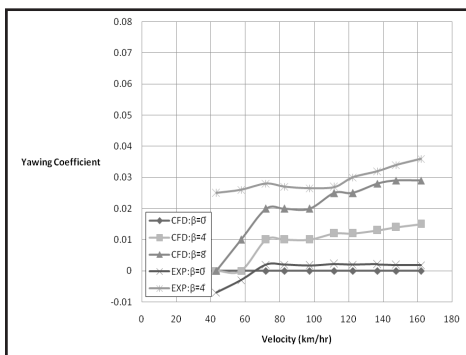
۱۳. ضرایب آیرودینامیک

(الف) $\frac{x}{l} = 0.1$ و (ب) $\frac{x}{l} = 0.4$ از دماغه

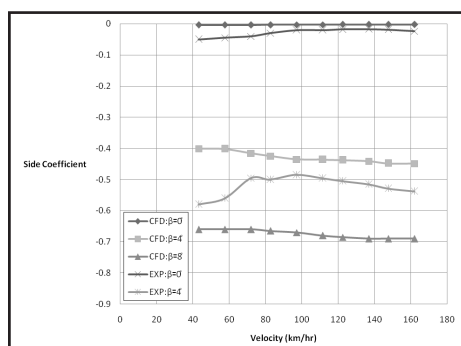
شکل (۸) تغییرات ضرایب آیرودینامیک برای سرعت ها و زوایای وزش متفاوت در قطار پارسی را نشان می دهد. نتایج با داده های تجربی موجود [Taghavi and Babaei, 2003] مقایسه شده و تطابق بسیار خوبی بین نتایج شبیه سازی عددی و داده های تجربی مشاهده می شود. همان طور که پیداست ضریب نیروی کشش وابستگی اندکی به تغییرات سرعت دارد، به طوری که می توان این ضریب را در کل بازه سرعت تقریباً ثابت در نظر گرفت. همچنین مشخص است که این ضریب با افزایش زاویه وزش، روند افزایشی از خود نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود زوایای وزش بزرگ تر، اثرات بیشتری بر ضرایب آیرودینامیک دارند.



(الف)



(ب)



(ج)

جدول (۲) مقایسه ای از نتایج شبیه سازی عددی و نتایج آزمایش های تونل بادی که توسط پژوهشگران دیگررا، برای قطار پارسی در زاویه وزش ۴ درجه و سرعت باد برآیند ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت گزارش شده است، نشان می دهد. همچنین درصد انحراف نیز بر اساس رابطه (۱۴) به دست آمده و درج شده است.

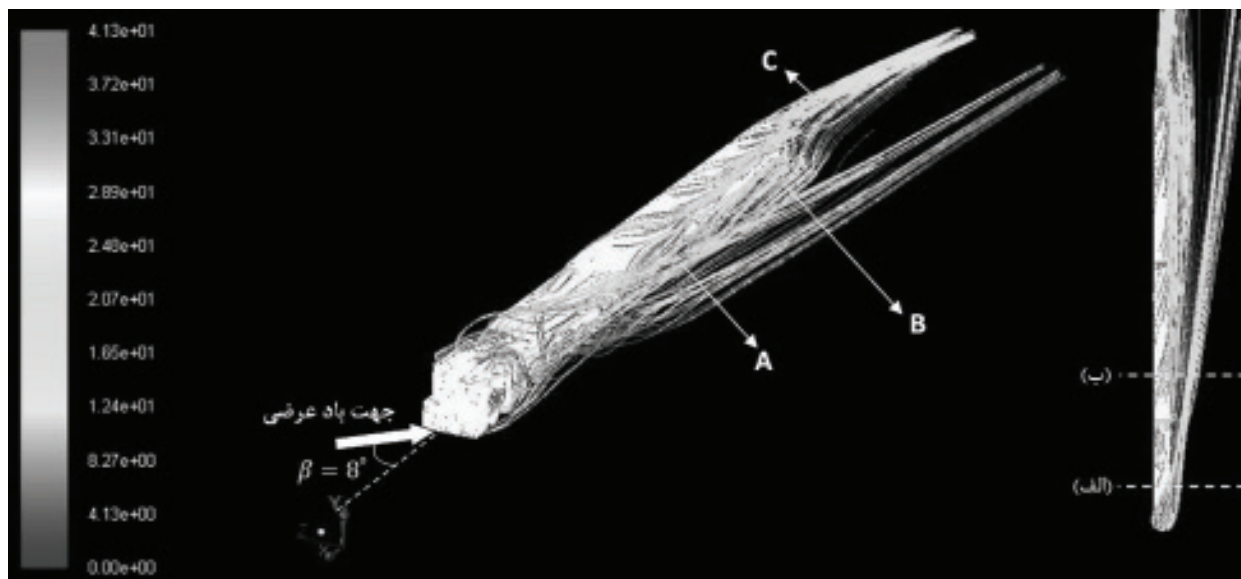
$$Deviation = 1 - \left(\frac{C_{CFD}}{C_{Wind\ tunnel}} \right) \quad (14)$$

شکل های (۹) تا (۱۱) ضرایب آیرودینامیک را در زوایای وزش مختلف برای فاصله نسبی بین واگنی ۰/۰۲۲۳ ، ۰/۰۵۵۶ و ۰/۰۸۸۹ نشان می دهد. فاصله بین واگنی در محدوده ۰ و ۰/۰۸۸۹ متر نسبت به طول واگن بی بعد شده است. این پارامتر در شکل ها با x نشان داده شده است.

کاهش فاصله بین واگنی منجر به کاهش ضرایب نیروی کشش وارده بر واگن ها می شود. حداقل ضریب نیروی درگ متناظر با نداشتن فاصله بین واگنی است. همچنین تغییر در فاصله بین واگنی، اثر مهمی در ضریب نیروی جانبی و مومتم انحرافی ندارد.

شکل ۸. تغییرات ضرایب آیرودینامیک برای سرعت ها و زوایای وزش متفاوت (الف) نیروی درگ، (ب) نیروی جانبی و (ج) مومتم انحرافی

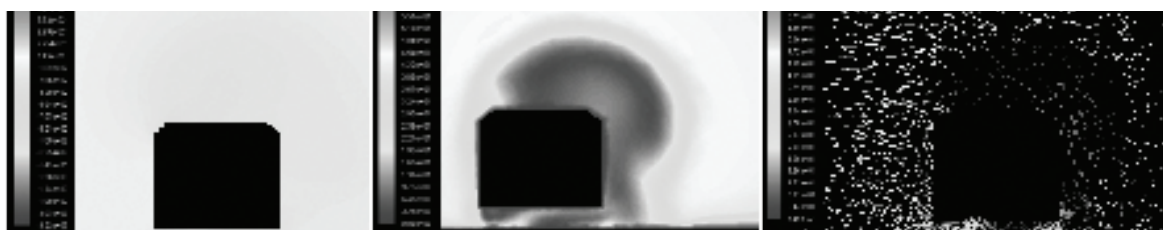
شبیه سازی عددی جریان هوای اطراف قطار مسافری پاریسی تحت اثر بادهای عرضی



فشار استاتیکی

اندازه سرعت

بردارهای سرعت

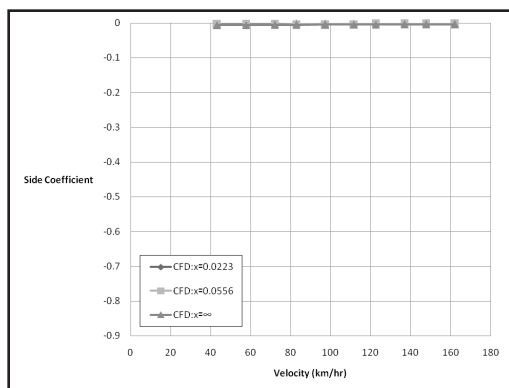


(الف)

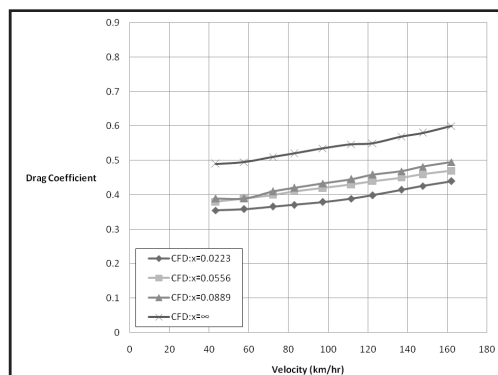


(ب)

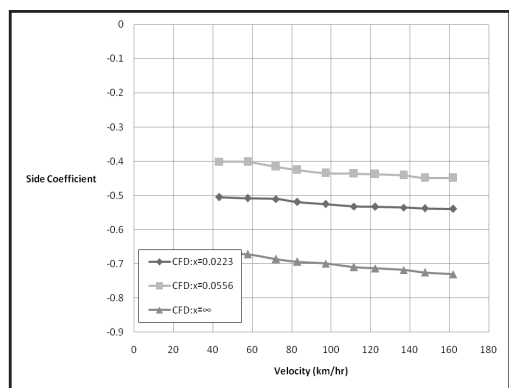
شکل ۷. تصویر سطوح فشار، گردابه بادپناه و میدان سرعت برای قطار پاریسی در



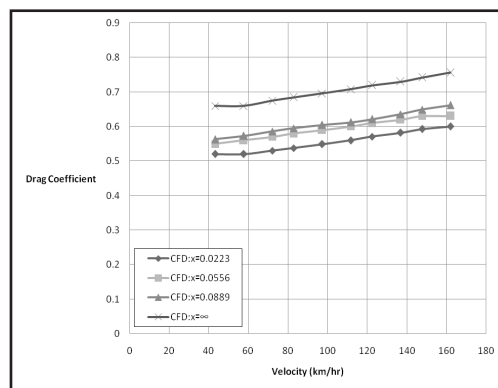
(الف)



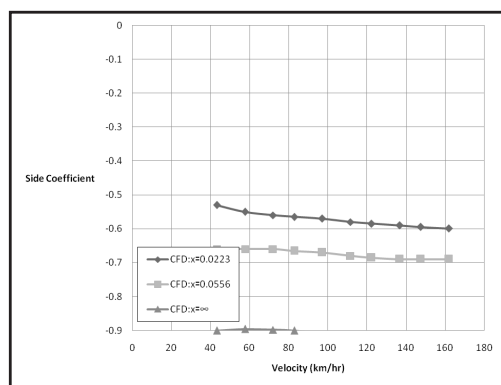
(الف)



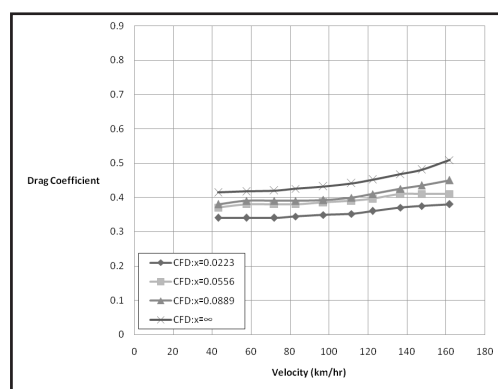
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۱۰. تغییرات ضریب نیروی جانبی در سرعت ها و فواصل بین واگنی متفاوت در زوایای وزش (الف) صفر درجه، (ب) چهار درجه و (ج) هشت درجه

شکل ۹. تغییرات ضریب نیروی درگ در سرعت ها و فواصل بین واگنی متفاوت در زوایای وزش (الف) صفر درجه، (ب) چهار درجه و (ج) هشت درجه

شبیه سازی عددی جریان هوای اطراف قطار مسافری پاریسی تحت اثر بادهای عرضی

جدول ۲. ضرایب آیرودینامیک برای قطار پاریسی و درصد انحراف آنها

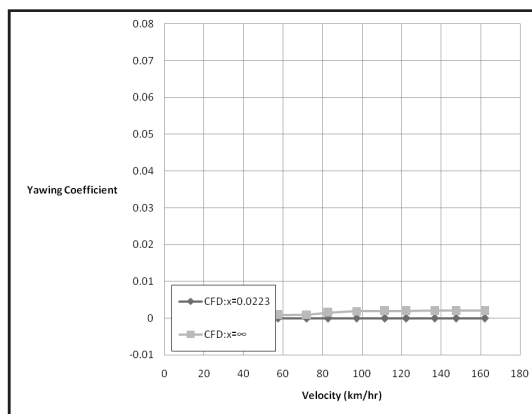
C_{Yawing}	C_{Side}	C_{Drag}	ضرایب آیرودینامیک
۰/۰۱	-۰/۴۴	۰/۴۳	شبیه سازی عددی
۰/۰۲	-۰/۴۸	۰/۴۵	تونل باد
%۵۰	%۸	%۴	انحراف

۱۴. نتیجه گیری

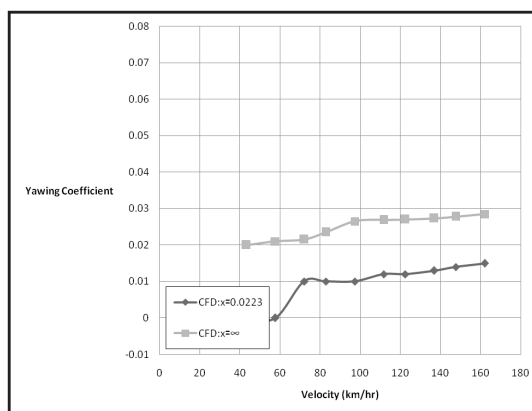
تحقیقات در خصوص آیرودینامیک وسایل نقلیه دارای تاریخچه‌ی نسبتاً طولانی است. اغلب پژوهش‌های انجام شده در این زمینه در صنعت حمل و نقل ریلی، متوجه قطارهای پرسرعت بوده است. با توجه به اهمیت روزافزون مساله و با نگاه به اهداف راه آهن جمهوری اسلامی ایران در راستای توسعه خطوط ریلی و استفاده از ناوگان پرسرعت، تحقیق حاضر مد نظر قرار گرفته است. با استفاده از ابزارهای شبیه سازی عددی، جریان هوای اطراف قطار مسافری پاریسی تحت اثر زوایای باد جانبی بررسی شده است. این نوع از ناوگان در حال حاضر با سرعت تردد ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت سریع ترین ناوگان ریلی کشور است. روش مورد استفاده در مورد ناوگان های ریلی که با سرعت های دیگری نیز تردد می کنند قابل تعمیم است.

نوآوری ارائه شده در وهله اول مربوط به روش حل مساله است که شامل شبیه سازی عددی سوژه و جریان های اطراف آن است. در این روش به بررسی رفتار قطار پاریسی در زوایای وزش باد مختلف و سرعت های عملیاتی قطار پرداخته شده است. آنگاه با تغییر در فواصل بین واگنی، تغییرات ضرایب آیرودینامیک و الگوی جریان اطراف قطار به دست آمده است.

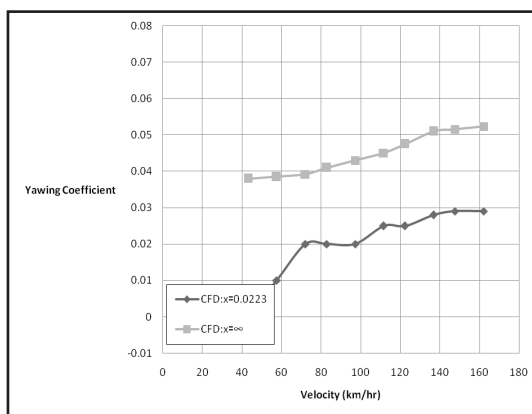
روش مورد استفاده در مقایسه با آزمون تونل باد دارای خطای کمتری بوده و نتایج آن صحیح تر است، زیرا که در واقعیت فضای اطراف قطاری که بر روی ریل حرکت می کند از تمام



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱. تغییرات ضریب مومتم انحرافی در سرعت ها و فواصل بین واگنی متفاوت در زوایای وزش (الف) صفر درجه، (ب) چهار درجه و (ج) هشت درجه

- با افزایش دو برابری سرعت باد برآیند از ۷۰ به ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت در زاویه وزش ۸ درجه، ضرایب آیرودینامیک نیروی درگ، جانبی و مومتم انحرافی رشد ۱۰٪، ۴٪ و ۴۵٪ دارند.
- در قطار پارسی، کاهش فاصله بین واگنی منجر به کاهش ضرایب نیروی درگ وارده بر واگن ها می شود. حداقل ضریب نیروی درگ متناظر با نداشتن فاصله بین واگنی است. همچنین تغییر در فاصله بین واگنی، اثر مهمی در ضریب نیروی جانبی و مومتم انحرافی ندارد.

۱۵. پی نوشت ها

1. Fluid Dynamics
2. Partial Differential Equation
3. The drag force
4. The side force
5. The lift force
6. The rolling moment
7. The pitching moment
8. The yawing moment
9. Steady State
10. The mixing length model
11. The Reynolds stress model
12. Multi Zone Meshing
13. Tetrahedral meshes
14. The nodal compute cluster
15. Stagnation points
16. Separation points
17. Wakes

جهات نامحدود بوده و ریل تنها سطح محدود کننده آن است. ولی با توجه به محدود بودن ابعاد تونل باد، نزدیکی مرزهای جریان به وسیله نقلیه باعث تغییر شکل جریان اطراف وسیله نقلیه نسبت به فضای نامحدود می شود. بنابراین زاویه جریان، توزیع سرعت و فشار اطراف وسیله نقلیه و تنشهای برشی سطوح همگی تغییر کرده و در نتیجه نیروها و ممانهای اعمالی به وسیله نقلیه نیز تغییر خواهند کرد. به علت حضور دیواره های جامد، تونل باد مانع گسترش خطوط جریان اطراف جسم مورد آزمایش در مقایسه با هوای آزاد می شود. در نتیجه سرعت های محلی مجاور جسم آزمایشی در مقایسه با هوای آزاد بزرگ تر است. همچنین ضخامت لایه مرزی دیوارها از ورودی مقطع آزمون تا خروجی افزایش یافته و سبب کاهش فشار استاتیکی می شود که چنین رفتاری در هوای آزاد وجود ندارد. همچنین محدودیت هایی که در تست های تونل باد در خصوص افزایش سرعت باد وجود دارد، در این روش وجود ندارد. بنابراین تصمیم بر آن شد که روش حل مساله را با شبیه سازی عددی بررسی کرده تا حداقل خطاها در محاسبات ایجاد شوند.

در این پژوهش به بررسی آیرودینامیک قطار تحت باد عرضی پرداخته شده است. هدف، تعیین بارهای آیرودینامیک و الگوی جریان اطراف قطار پارسی با استفاده از نرم افزار شبیه سازی CFD بوده است. محاسبات با نتایج آزمایش های تونل باد که توسط پژوهشگران دیگری گزارش شده اند با هندسه و اعداد رینولدز بسیار مشابه مقایسه شده اند. تطابق خوبی بین نتایج حاصل از مدل سازی عددی با آزمایشات تونل باد مشاهده شده است.

- با افزایش زاویه وزش از صفر به ۸ درجه، در سرعت باد برآیند ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت، ضرایب آیرودینامیک نیروی درگ، جانبی و مومتم انحرافی از ۰/۳۹، ۰/۰۰ و ۰/۰۰ به ۰/۶۰ و ۰/۴۳ و ۰/۰۲ به ترتیب می رسند.

“The effect of turbulence simulation on the wind induced loads on ground vehicles”, Proceedings of Aerodynamics and Transportation II, ASME Winter Meeting, Boston.

- Cheli, F., Ripamonti, F., Rocchi, D., Tomasini, G., and Zanetti, G. (2006) “Aerodynamic sensitivity analysis of the New EMUV250 train to cross wind using wind tunnel tests and CFD analysis”, European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, Portugal.

- Chiu, T. W. (1991) “A two-dimensional second-order Vortex Panel Method for the flow in cross-wind over a train and other two-dimensional bluff bodies”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, No. 37, pp.43-64.

- Cooper, R. K. (1979) “The probability of trains overturning in high winds”, Proceedings of the Fifth Conference on Wind Engineering, Fort Collins, pp. 1185-1194.

- Cooper, R. K. (1979) “The effect of cross-wind on trains”, Proceedings of Aerodynamics of Transportation, ASME-CSME Conference, Niagara, June 18-20, pp. 51-127.

۱۶. مراجع

- Axelsson, N., Ramnefors, M., and Gustafsson, R. (1998) “Accuracy in computational aerodynamics, Part1: Stagnation pressure”, SAE 980037.

- Baker, C. J. and Robinson, C. G. (1990) “The assessment of wind tunnel testing techniques for ground vehicles in cross winds”, Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, No. 33, pp. 429-438.

- Baker, C. J. (2002) “The wind tunnel determination of crosswind forces and moments on a high speed train”, Notes on Numerical Fluid Mechanics, Springer, Berlin, Vol. 79, pp. 46-60.

- Baker, C. J., Jones, J., Lopez-Calleja, F., and Munday, J. (2004) “Measurements of the cross wind forces on trains”, Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, No. 92, pp. 547-563.

- Baker, C. J. (2008) “The flow around high speed train”, BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications Milano, Italy, July pp. 20-24.

- Baker, C. J., and Gawthrope, R. G. (1983)

- (2005) “Large Eddy simulations of flow around a simplified high-speed train under the influence of a crosswind”, 17th AIAA Computational Dynamics Conference, Toronto, Ontario, Canada, AIAA paper number AIAA-2005-5354.
- Hemida, H. and Baker, C. J. (2010) “Large-Eddy simulation of the flow around a freight wagon subjected to a crosswind”, *Computers and Fluids*, No. 39, pp. 1944-1956.
- Krajinovic, S., Georgii, J. and Hemida, H. (2008) “DES of the flow around a high-speed train under the influence of wind gusts”, 7th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence, Modeling and Measurements, ETMM7, Amathus, Cyprus, June 4-6.
- Khier, W., Breuer, M. and Durst, F. (2000) “Flow structure around trains under side wind conditions: A Numerical study”, *Journal of Computers & Fluids*, No. 29, pp. 179-195.
- Masbernat, F., Wolffhugel, Y. F. and Dumas, J. C. (1993) “CFD aerodynamics of the French high-speed train”, GEC ALSTHOM Technical Review No. 11.
- Masson, E., Allain, E. and Parardot, N. (2009) - Copley, J. M. (1987) “The three dimensional flow around railway trains”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No. 26, pp. 21-52.
- Diedrichs, B. (2003) “On computational fluid dynamics modeling of crosswind effects for high-speed rolling stock”, *Journal of Rail and Rapid Transit*, No. 217, pp. 203-226.
- Diedrichs, B. (2009) “Unsteady aerodynamic crosswind stability of a high-speed train subjected to gusts of various rates”, *EUROMECH Colloquium 509 Vehicle Aerodynamics - External aerodynamics of railway vehicles, trucks, buses and cars*, Berlin, Germany, March 24-25.
- Gaylard, A.P. (1993) “The application of computational fluid dynamics to railway aerodynamics”, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 1993, pp. 133-207.
- Hemida, H. and Kraajnic, S. (2006) “Exploring the flow around a generic high-speed train under the influence of side winds using LES”, *CWE2006*, Yokohama, Japan, July.
- Hemida, H., Kraajnic, S. and Davidson, L.

- Taghavi, R. and Babaei, H. (2003) "The experimental research to reduce drag force on Parsi Passenger Trains", (in Farsi), 8th Conference on Fluid Dynamics, Tabriz, Iran.
- Versteeg, H. and Malalasekera, W. (2007) "An introduction to computational fluid dynamics", 2nd. ed.
- White, F. M. (2008) "Fluid mechanics", 6th ed. New York: McGraw-Hill.
- "CFD analysis of the under floor aerodynamic of a complete TGV high speed train set at full scale", EUROMECH Colloquium 509 Vehicle Aerodynamics - External Aerodynamics of Railway Vehicles, Trucks, Buses and Cars, Berlin, Germany, 2009, March, pp. 24-25.
- prEN 14067-6.(2007) "Railway Applications – Aerodynamics – Part 6: Requirements and Test Procedures for Cross Wind Assessment", European Standard.
- Rocchi, D., Schober, M., Cheli, F., Orellano, A. and Tomasini, G. (2009) "Comparison of wind tunnel tests results on the ATM train", Euromech Colloquium 509, Vehicle Aerodynamics, Berlin, Germany, March, pp. 24-25.
- Rolen, C., Rung, T. and Wu, D. (2004) "Computational modeling of crosswind stability of high speed trains", European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS, July, pp. 24-28.
- Suzuki, M., Tanemoto, K. and Maeda, T. (2003) "Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, No. 91, pp. 209-218.

