

# بررسی اثر موج فشار آیرودینامیکی ناشی از قطار پرسرعت بر روی طرح های عمرانی

وحید سرافرازی\*

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

محمدرضا طلائی

استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

## چکیده

یکی از مسائل مرتبط با طراحی آیرودینامیکی قطار پرسرعت پدیده جریان هوای ایجاد شده در اطراف قطار می باشد. این خصوصیت علاوه بر اینکه موجب اتلاف قابل توجهی در انرژی و سوخت می شود، سبب ایجاد اثرات متعددی نیز در حوال قطار می شود. یکی از این اثرات آیرودینامیکی که اهمیت اساسی در طراحی سازه های موجود در اطراف قطار دارد پدیده فشار هوا ناشی از سرعت قطار است که الزامات ایمنی مورد نیاز خود را ایجاد می کند. اهمیت این پدیده به دلیل آن است که وقتی یک قطار با سرعت بالا از زیر یک مانع (سازه های عمرانی) عبور می کند، نیروهای آیرودینامیکی وارد بر مانع را به صورت ناگهانی تغییر می دهد. بنابراین این موضوع باید در طراحی ساختار موانع در اطراف قطار مورد توجه قرار گیرد. در این شبیه سازی عددی از روش شبکه بندی متحرک با معادله آشفتگی  $k-\epsilon$  و نرم افزار محاسبات سیالاتی Fluent استفاده شده است. هدف از این تحقیق، بررسی اثر پدیده فشار هوای ایجاد شده در اطراف قطار پرسرعت با سرعت سیر حدود ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت به کمک شبیه سازی یک قطار پرسرعت در نرم افزار Fluent در دو حالت عادی و با ترمز آیرودینامیک و بررسی اثرات سرعت باد ناشی از عبور قطار برای جلوگیری از تخریب موانع عمرانی موجود در کنار خط یا بالای سر قطار است و به عنوان خروجی این کار به کمک نرم افزار المان محدود (ABAQUS) مقدار بیشینه تنش وارد شده به موانع (سازه های عمرانی) در فواصل مختلف محاسبه و با مقدار تنش بحرانی مربوط به موانع به منظور تعیین فاصله مجاز قرارگیری موانع مقایسه شد.

واژه های کلیدی: آیرودینامیک قطار، نیروی پسا، مش متحرک، پدیده فشار هوا.

## The Effect of the Aerodynamic Pressure Wave on Construction Projects Caused by High-Speed train

V. Sarafrazi

Railway Engineering, University of Science & Technology, Tehran, Iran

M. R. Talaei

Railway Engineering, University of Science & Technology, Tehran, Iran

### Abstract

A problem associated with the aerodynamic design of high-speed trains is the air flow and slipstream effects caused by their passage. These effects can have some level of impact on fuel and energy efficiency of the train, but their other important consequence is the emergence of turbulent flows at higher speeds which can cause aerodynamic drag forces followed by noise and vibration. Thus, slipstream effects have significant importance in the design of trackside installations which necessitate unique safety measures. A high-speed train passing under a structure or object makes sudden impacts on aerodynamic forces acting on that object. So this issue needs to be considered in the design of structures and installations to be built around high-speed rails. In this study, a numerical simulation with moving mesh and k-epsilon turbulence model was carried out in FLUENT software to study the slipstream and aerodynamic effect of a passing high-speed train on overhead and trackside installations with the objective of preventing aerodynamics-induced damage. This simulation was conducted in two scenarios of absence and presence of aerodynamic brake on top side of the train. In the end, ABAQUS finite element software was used to determine the maximum stress exerted on objects (installations) positioned at different distances from the rail, and the results were compared with the maximum allowable stresses to determine a minimum permissible distance between installations and high-speed train.

**Keywords:** Train aerodynamics, drag force, moving mesh, slipstream.

### ۱- مقدمه

سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت طراحی شده است. نیروهای آیرودینامیکی تولید شده در چنین سرعت های بالایی بسیار مورد توجه است چرا که نیروهای آیرودینامیکی با مربع سرعت سیر قطار رابطه مستقیم دارد. بهره برداری از این قطارهای پرسرعت در صورت فراهم نشدن شرایط کاری آن ها خطر ساز خواهد بود. پدیده فشار هوا در مناطق اطراف یک وسیله نقلیه در حال عبور که جریان هوا و نوسانات فشار شدید است، به وجود می آید. سرعت ناپایدار ناشی از عبور قطار سرعت جریان لغزشی<sup>۱</sup> نامیده می شود. سرعت موج هوای قطار بر روی موانع کنار خط، بالای سر قطار و تجهیزات عمرانی اطراف خط

قطارهای پرسرعت در طول چند سال گذشته در بسیاری از نقاط جهان رشد چشمگیر و پیوسته ای هم در سرعت و هم در تعداد خطوط داشته اند. در کشورهایی مانند سوئد، ایتالیا، ژاپن، آلمان و دیگر کشورها، بیشینه سرعت قطارها روی خطوط ریلی پرسرعت بیش از ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت است. رکورد بالاترین سرعت در سال ۲۰۱۵ بر روی خطوط ریلی پرسرعت راه آهن ژاپن و در اختیار قطار مگلو هفت واگنه موجود در استان یاماناشی است که سرعت آن در مسیر آزمایشی به ۶۰۴ کیلومتر بر ساعت رسید [۱] البته لازم به ذکر است که سرعت سیر قطار پرسرعت ژاپن ۴۳۰ کیلومتر بر ساعت است. نخستین قطار سریع السیر ایران نیز در مسیر تهران- قم- اصفهان در حال ساخت است، طول این مسیر ۴۱۲ کیلومتر بوده و برنامه حرکت قطار بر مبنای

<sup>1</sup> Slipstream velocity

تأثیر گذار است. بر طبق استاندارد مربوط به اتحادیه اروپا<sup>۱</sup> [۲] یک قطار در طول عبور کامل آن در هوای آزاد با سرعت عملکردی قطار بین ۱۹۰ تا ۲۴۹ کیلومتر بر ساعت نباید باعث ایجاد سرعت موج هوا بیشتر از مقدار ۲۰ متر بر ثانیه در کنار خط و برای سرعت عملکردی قطار بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت نباید باعث ایجاد سرعت موج هوا بیشتر از ۲۲ متر بر ثانیه در کنار خط شود. این مقادیر مجاز سرعت موج هوا می‌بایست برای ارتفاع ۰/۲ متری از تاج ریل و در فاصله ۳ متری از مرکز خط قطار اندازه‌گیری شود. همچنین مقدار تغییرات فشار باید بین قله‌ها تا اوج اندازه‌گیری شود و این تغییرات فشار می‌بایست در ارتفاع بین ۱/۵ متر تا ۳/۳ متر از بالای تاج ریل و در فاصله ۲/۵ متری از مرکز مسیر و در طول عبور تمام قطار (از جمله عبور سر، دم و کوپلینگ) اندازه‌گیری شود و برای قطار با بیشینه سرعت بین ۱۹۰ تا ۲۴۹ کیلومتر بر ساعت تغییرات فشار نباید از ۷۲۰ پاسکال و برای قطار با بیشینه سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت و بالاتر تغییرات فشار نباید از ۷۹۵ پاسکال تجاوز کند. [۲] هوا و همکارانش (۱۹۶۸) برخی از نتایج اولیه برای پدیده فشار هوا را با استفاده از بادسج سیم داغ<sup>۲</sup> اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان می‌دهد میزان قابل توجهی از پراکندگی در مقدار سرعت موج هوا روی دماغه قطار و نزدیک قسمت پشتی قطار است. [۳] جیل و همکارانش (۲۰۱۰) پدیده فشار هوا را بر روی یک مدل قطار دارای چهار واگن و بر روی مسیر قوس دار متحرک و با مقیاس ۱ به ۵۰ بررسی کردند. دستگاه از یک مسیر با قطر ۳/۶۱ متر ساخته شده است که حداکثر سرعت آزمون در آن ۲۲ متر بر ثانیه است. قطار هشتاد دور با سرعت ۱۶ متر بر ثانیه روی این قوس طی مدت ۱ ثانیه حرکت کرد سپس تمام اندازه‌گیری‌های مربوط به حالت مسیر مستقیم متحرک در این مسیر قوس دار نیز صورت پذیرفت. [۴] حمیدا و همکارانش (۲۰۱۰) رفتار پدیده فشار هوا را بر روی یک مدل قطار داخل قوس دارای چهار واگن و در مقیاس ۱ به ۲۵ با قطر قوس ۳/۶۱ متر، بررسی کردند. در مدل‌سازی عددی از تعداد ۶،۱۰۱،۱۵ میلیون المان استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها در دو عدد رینولدز ۷۷۰۰۰ و ۹۴۰۰۰ که به سرعت و ارتفاع قطار وابسته است صورت گرفت. فهمیده شد که تأثیر عدد رینولدز روی ساختار فشار هوا و شدت آشفتگی ناچیز است و پروفیل‌های سرعت موج هوا در دو مورد شبیه اند. [۵] گیلبرت و همکارانش (۲۰۱۲) در دانشگاه بیرمنگام، اطلاعات یک مدل با مقیاس ۱ به ۲۵ از قطار آلمان با یک مدل کامل به طول ۴/۲۴ متر با سرعت ۳۲ متر بر ثانیه (۱۱۵ کیلومتر بر ساعت) از طریق یک تونل به طول ۸ متر که در آن سرعت باد با یک کاوشگر کبری<sup>۳</sup> اندازه‌گیری شده را برای ۲۵ قطار در حال عبور بدست آورده‌اند. این کاوشگر در فاصله مقیاس کامل ۴/۸۸ متر از ورودی تونل قرار گرفته است و نسبت انسداد تونل (نسبت مقطع قطار به مقطع تونل) ۳۰ درصد می‌باشد. [۶] بیکر و همکارانش (۲۰۱۲) تحقیقی تجربی را برای اندازه‌گیری بارهای گذرا ناشی از عبور قطار بر روی سازه‌های اطراف خطوط راه‌آهن انجام دادند و نتایج تجربی کار را با استاندارد های موجود مقایسه کردند و نشان دادند که استانداردها برای کشور انگلستان خیلی

محافظه کارانه است و تا حد زیادی به دلیل این است که استانداردها از روی آزمون و محاسبات مربوط به هندسه خطوط اروپا به دست آمده‌اند و قطارها در انگلستان تا حدی کوچک‌تر هستند. دو روش برای اصلاح ابعاد قطار ارائه شد که هر دو نشان می‌دهد که بارهای پیش‌بینی شده از استاندارد به نتایج تجربی نزدیک است. [۷] هانا بلان (۲۰۱۳) به دنبال راه حل جایگزینی برای اندازه‌گیری فشار هوای اطراف قطار ناشی از سرعت باد به جای آزمون مدل کامل بود. او از یک مدل با مقیاس ۱ به ۱۵ از قطار پرسرعت استفاده کرد و نتایج خود را با نتایج حاصل از قطار موجود در خط تورینو<sup>۴</sup> سوئد مقایسه کرد و نتایج شبیه‌سازی خود را با آزمون تونل باد صحنه‌گذاری کرد. [۸] حمیدا و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه شبیه‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی اثر ارتفاع سکو را در سرعت باد ناشی از فشار هوا بررسی کردند. سرعت باد ناشی از فشار هوا بر روی یک سکوی بالاتر بیشتر است. آنها همچنین جریان لحظه ای که در دنباله قطار بوجود آمده را بررسی کردند و حداکثر سرعت و بزرگترین شدت آشفتگی را در نزدیکی دنباله قطار مسافری مشاهده کردند. [۹] خیرولینا و همکارانش (۲۰۱۵) تأثیر عبور قطار مسافری و قطار باری را در شرایط ایجاد باد ناشی از پدیده فشار هوا بر روی لبه سکو و محل ایستادن مسافران در داخل یک تونل زیر زمینی با روش شبیه‌سازی گردابه ای بزرگ<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار دادند نتایج این تحقیق نشان داد که مسافرینی که بر روی سکو ایستاده‌اند می‌توانند در اثر عبور قطار مسافری و باری به ترتیب با سرعت ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت تأثیر نیروی باد قوی را احساس کنند که این اثر باد ممکن است برای مسافرین آزاردهنده و حتی خطرناک باشد و باید در طراحی تونل و سکو و در مقررات ایمنی راه‌آهن مورد توجه قرار گیرد. [۱۰] نایانگ و همکارانش (۲۰۱۵) شبیه‌سازی عددی و تجربی برای عبور قطار از زیر یک پل در ایستگاه راه‌آهن را برای مطالعه بارهای آیرودینامیکی وارد بر سازه‌های بالای سر قطار انجام دادند. شبیه‌سازی عددی با استفاده از مش متحرک و مدل آشفتگی دو معادله‌ای و در نرم‌افزار Fluent صورت گرفته است. توزیع فشار و ارتباط بین فشار و سرعت قطار مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که هنگامی که قطار از زیر یک پل عبور می‌کند یک آشفتگی جریان ناپایدار و پیچیده بین قطار و پل به وجود خواهد آمد که این موضوع باید در طراحی سازه‌هایی که در بالای سر قطار هستند مورد توجه قرار گیرد. [۱۱]

با توجه به تحقیقات انجام شده ملاحظه می‌گردد که بررسی نیروهای آیرودینامیکی در قطارهای پرسرعت از جمله دغدغه‌های جاری محققین بوده و استانداردها در این زمینه تنها به بیان محدوده سرعت باد مجاز ایجاد شده در کنار خط پرداخته‌اند. هدف از این تحقیق مطالعه بر روی پدیده آیرودینامیکی فشار هوا به کمک شبیه‌سازی یک قطار پرسرعت در نرم‌افزار Fluent در دو حالت عادی و با ترمز آیرودینامیک و بررسی اثرات سرعت باد ناشی از عبور قطار برای جلوگیری از تخریب سازه‌های عمرانی موجود در بالای سر قطار و کنار آن مانند لوله‌های انتقال، کابل‌های برق و... است. در این تحقیق در مقایسه با سایر پژوهش‌ها، با مدل‌سازی قطار به صورت متحرک، تأثیر

<sup>1</sup> TSI, 2008/232/CE. (2008)

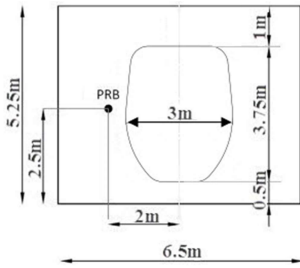
<sup>2</sup> Hot-wire anemometers

<sup>3</sup> Cobra probe PRB1

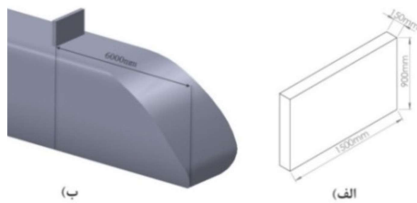
<sup>4</sup> Torino-Novara high speed line

<sup>5</sup> Large-Eddy simulations (LES)

متر، ضخامت ۰/۱۵ متر و ارتفاع ۰/۹ متر در بالای سر قطار و به فاصله ۶ متر از دماغه قطار مدلسازی شده، در شکل ۴ قابل مشاهده است.



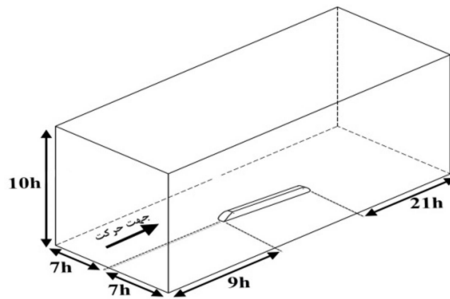
شکل ۳- ابعاد سطح مقطع قطار مدلسازی شده در Solidworks



شکل ۴- نمایی از مدل قطار با ترمز آیرودینامیک (الف) ابعاد پنل (ب) فاصله از دماغه قطار

### ۳- دامنه محاسباتی مورد استفاده قطار پر سرعت

اندازه فیزیکی دامنه محاسباتی بایستی به قدر کافی بزرگ باشد تا از اثرات نادرست مرزها جلوگیری نماید بنابراین در تحقیق حاضر دامنه در نظر گرفته شده شامل یک مدل قطار بر روی بستر صاف مطابق شکل ۵ است و دامنه محاسباتی اطراف قطار نیز مکعب مستطیلی به ارتفاع  $10h$  ( $h$  ارتفاع قطار است) در نظر گرفته شده است همچنین ناحیه دنباله در پشت و جلوی قطار نیز به اندازه کافی طولانی در نظر گرفته شده است بدین صورت که مکعب قبل و بعد از محدوده قطار به مقدار  $9h$  و  $21h$  امتداد داده می شود که این امر برای اجتناب از تاثیر شرایط دیواره در ورودی و خروجی بر نتایج تحلیل است.



شکل ۵- دامنه محاسباتی هندسه قطار پر سرعت

### ۴- مدل آشفتگی پیشنهادی برای قطار پر سرعت

معادلات ناویر- استوکس برای جریان آشفته در مقایسه با جریان لایه‌ای بسیار پیچیده‌تر می‌باشند که این به خاطر نوسانات سرعت و فشار است. سرعت  $u$  (سرعت در جهت  $x$ ) با اضافه کردن مؤلفه متوسط زمانی  $\bar{u}$  و مؤلفه نوسانی  $u'$  محاسبه می‌گردد همچنین فشار

پدیده فشار هوا در مقدار فاصله مجاز قرارگیری موانع عمرانی در حین عبور قطار در دو حالت عادی و با ترمز آیرودینامیک، مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نوآوری‌های این تحقیق در مقایسه با ادبیات فن موجود، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بررسی اثر موج فشاری تولید شده روی موانع عمرانی کنار خط
- تعیین مقدار فاصله مجاز اطراف قطار پرسرعت بر مبنای بیشینه تنش مجاز قابل تحمل بوسیله موانع عمرانی
- بررسی پروفیل موج سرعت ایجاد شده از قطار در دو حالت حرکت عادی و مود ترمزگیری با ترمز آیرودینامیک و اثر آن بر فاصله مجاز قرارگیری موانع عمرانی

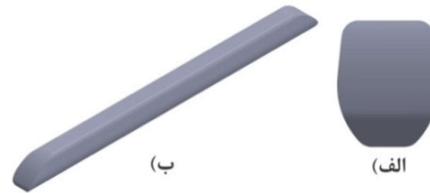
### ۲- مدلسازی هندسه مدل

اولین گام ساخت هندسه مطلوب است. هندسه سطوح اصلی قطار از روی مدل قطار آلمان<sup>۱</sup> تهیه شده توسط کارخانه بمباردیر<sup>۲</sup> استخراج شده است. ساخت قطار شامل یک واگن موتورکشنده<sup>۳</sup> و یک واگن کنترل<sup>۴</sup> به دنبال آن می باشد. قطار به صورت متحرک در نظر گرفته شده است. مبدا مختصات در مرکز قطار و در بالای ریل قرار دارد. قطار مدلسازی شده دارای طول ۳۵/۵۵ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۳/۸۵ متر است. قطار مدلسازی شده دارای سطح مقطعی برابر ۸/۱۸۵ مترمربع است. [۸] مشخصه طول قطار همان قطر هیدرولیکی<sup>۵</sup>  $(d_H)$  آن است و در این مدل برابر ۳ متر است. [۱۰] نحوه چیدمان واگن ها در قطار پرسرعت آلمان به منظور کاهش حجم محاسبات مطابق با شکل ۱ است.



شکل ۱- آرایش واگن ها در قطار پرسرعت با دو واگن [۸]

نمایی از هندسه مدل در نرم افزار Solidworks مطابق شکل ۲ و سطح مقطع مدل به همراه ابعاد آن مطابق با شکل ۳ می باشد.



شکل ۲- نمایی از هندسه مدلسازی شده در سالیدورک (الف) سطح مقطع مدل (ب) مدل سه بعدی

پس از ساختن دامنه در نرم افزار Solidworks مدل به محیط نرم افزار Ansys وارد می شود. شکل ۳ محل اندازه گیری تغییرات سرعت بر حسب زمان است. از آنجایی که قطار پر سرعت در دو مود یعنی به همراه ترمز آیرودینامیک نیز در این تحقیق مدلسازی شده است. مشخصات پنل ترمزی که به صورت مستطیل شکل دارای طول ۱/۵

<sup>1</sup> ICE

<sup>2</sup> Bombardier factory

<sup>3</sup> A leading motor car

<sup>4</sup> A trailing control car

<sup>5</sup> Hydraulic diameter

$P$  نیز به همین روش سرعت‌ها با اضافه کردن مؤلفه متوسط زمانی  $\bar{p}$  و مؤلفه نوسانی  $p'$  قابل محاسبه است. برای جریان تراکم ناپذیر با صرف‌نظر از جاذبه، معادله ناویر-استوکس در جهت  $x$  می‌تواند به صورت رابطه (۱) ساده‌سازی شود: [۱۲]

$$\rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} \quad (1)$$

با جایگزینی مقادیر سرعت و فشار به صورت مجموع مؤلفه متوسط زمانی و مؤلفه نوسانی و ساده‌سازی، معادله ناویر-استوکس برای جریان آشفته در جهت  $x$  مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید:

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

مشکل شبیه‌سازی جریان آشفته با حرکات گردابه در سیالات آشکار می‌شود. این حرکات از مقیاس‌های طولی متفاوتی هستند که می‌توانند تا حداقل مقدار ۱ میکرومتر باشند. حفظ مسیر همه این حرکات کوچک نیازمند مش آنقدر ریزی است که کامپیوترهای امروزی قدرت حل آن را ندارند. برای جبران این مشکل، مهندسان مجبورند مقادیر متوسط خصوصیات جریان را در نظر بگیرند. این عمل با شکل‌های متوسط زمانی معادله ناویر-استوکس انجام می‌گیرد که طی آن شش داده نامعلوم

$$\left( \rho \bar{u}'^2, \rho \bar{v}'^2, \rho \bar{w}'^2, \rho \bar{u}'\bar{v}', \rho \bar{u}'\bar{w}', \rho \bar{v}'\bar{w}' \right)$$

رینولدز بوجود می‌آیند. تنش‌های رینولدز خصوصیات جریان را بیان می‌کنند و تعیین مستقیم آن‌ها غیر ممکن است. یکی از مدل‌های آشفته‌گی مدل صفر معادله‌ای است که نمی‌تواند اثرات اغتشاشات ایجادشده در بالادست جریان را بر روی جریان پایین‌دست پیش‌بینی کند. از نقطه‌نظر ریاضی سیستم معادلات جریان به‌دست‌آمده از مدل‌سازی جریان آشفته از نوع صفر معادله‌ای تقریباً همانند سیستم معادلات مربوط به جریان‌های لایه‌ای است. یکی دیگر از مدل‌های آشفته‌گی مدل اسپالارت یا تک معادله‌ای است که مدل جدیدی بوده و هنوز هیچ ادعایی مبنی بر مناسب بودن این مدل برای تمام جریان‌های مهندسی پیچیده ارائه نشده است. این مدل به دلیل عدم توانایی در وفق دادن خود با تغییرات سریع در مقیاس‌های طولی<sup>۱</sup> همواره مورد انتقاد قرار داشته است. این تغییرات شدید به‌ویژه در تغییرات ناگهانی از جریان‌های محدود به دیواره<sup>۲</sup> به جریان‌های برشی آزاد<sup>۳</sup> (همانند تخلیه یک جت با ابعاد محدود به درون محیطی با ابعاد نامتناهی نظیر هوای اتمسفر) قابل مشاهده است. یکی دیگر از مدل‌های آشفته‌گی مدل‌های دو معادله‌ای هستند که به‌عنوان زیربنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریان‌های آشفته، به‌ویژه در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند این مدل برای طیف وسیعی از مسائل خوب جواب می‌دهد. اما برای مسائلی که شامل غیر ایزوتروپ‌های شدید و نیز اثرات غیر تعادلی هستند، این مدل در نهایت به جواب‌های تا حدی

فراپخش<sup>۴</sup> خواهد رسید. قدرت حل، هزینه معقول و دقت بالا برای محدوده وسیعی از مسائل جریان‌های آشفته، دلایل محبوبیت این روش در شبیه‌سازی انتقال گرما و جریان‌های صنعتی محسوب می‌شود و از طرفی انتخاب یک مدل آشفته‌گی مناسب به در نظر گرفتن ملاحظات از قبیل فیزیک جریان، تکنیک مسلم برای گروه خاصی از مسائل، دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی موجود و زمان لازم برای شبیه‌سازی بستگی دارد. [۱۴]

نایانگ و همکاران [۱۱] به منظور بررسی پاسخ سرعت فشارهای ناشی از عبور قطار بر سازه پل در بالای سر قطار و همچنین بیادگو<sup>۵</sup> و همکاران [۲۱] برای شبیه‌سازی اثر باد عرضی بر روی پایداری قطار بر سرعت در شبیه‌سازی خود از نرم افزار Fluent و مدل آشفته‌گی دو معادله‌ای جریان  $k-\epsilon$  استفاده کردند از آنجایی که نیروهای وارد بر موانع موضوع بحث این تحقیق است و همچنین مزایا و معایبی که برای مدل‌های دو معادله‌ای ذکر گردید بنابراین در این تحقیق از روش  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شده است.

## ۵- شرایط مرزی مورد استفاده قطار پرسرعت

شرایط مرزی مورد استفاده قطار پرسرعت شرایط ورودی، خروجی، دیواره و تقارن مطابق شکل ۶ است. شرط مرزی دیواره یک شرط مرزی عدم لغزش است که به معنی سرعت مماسی صفر است. دیواره‌ها نفوذ ناپذیر هستند که به معنی جزء نرمال صفر است چون هیچ مایعی از طریق دیواره عبور نمی‌کند. دو مدل دیواره ثابت و متحرک وجود دارد. دیواره متحرک به معنی آن است که ذرات مایع در مجاورت دیواره با سرعتی برابر دیواره حرکت می‌کنند. در مورد قطار پرسرعت همه هندسه قطار متحرک فرض شده و دیواره‌ها، زمین، هوای اطراف و موانع ثابت فرض شده‌اند. [۱۱] و برای تعیین تلاطم ذرات کنار دیواره از تابع دیواره نامتعادل<sup>۶</sup> استفاده شده است. [۱۵] متحرک فرض شدن قطار به معنی آن است که حرکت نسبی بین قطار و بستر خط وجود دارد. از شرط مرزی سرعت ورودی برای تعیین سرعت و پارامترهای اسکالر جریان در مرز ورودی استفاده شده است و با توجه به اینکه در دینامیک سیالات محاسباتی پس از گسسته‌سازی معادلات نیاز به اعمال شرایط اولیه است برای این حالت در مرز ورودی شرط اولیه مقدار سرعت جریان هوا برابر صفر اعمال شده است و حل معادلات جریان از این مرز آغاز می‌گردد. مؤلفه سرعت مربوط به قطار متحرک به صورت  $(U_\infty, 0, 0)$  در نظر گرفته شده است. مقادیر آشفته‌گی مشخص شده برای هندسه قطار شامل شدت آشفته‌گی ( $TI$ ) و مقیاس طول آشفته‌گی ( $L_t$ ) نسبت به زمان و در سطح ورودی ثابت در نظر گرفته شده است. وینترگست و همکارش [۱۶] در تحقیقات مقدار شدت آشفته‌گی را برابر ۳ درصد و مقیاس طول آشفته‌گی را برابر  $d_n/10$  تخمین زدند. شرط مرزی خروجی از نوع شرط مرزی فشار خروجی است و لازم است که فشار استاتیک در مرز خروجی جریان مشخص گردد.

<sup>4</sup> Over Diffusive

<sup>5</sup> Biadgo AM

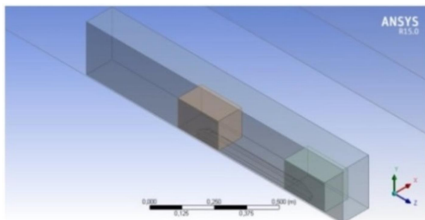
<sup>6</sup> Non-equilibrium wall functions

<sup>1</sup> Length Scale

<sup>2</sup> Wall- bounded Flows

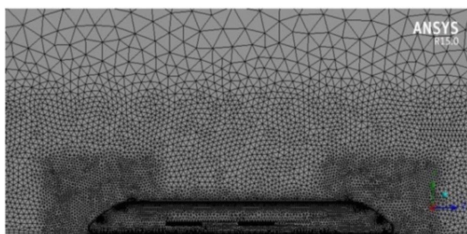
<sup>3</sup> Free-Shear Flows

بندی و بهبود آن در قسمت دم قطار و نواحی پشتی آن، دماغه قطار و نواحی جلوی آن نیاز است. المان های مورد استفاده بر روی موانع نیز به دلیل اهمیت تاثیر پدیده فشارها بر روی آنها باید پالایش گردد. به منظور پالایش المان بندی از روش گسسته سازی ترجیحی منهارت و ونگل سال (۱۹۹۳) [۱۷] استفاده شده است. دامنه پالایش شامل یک مکعب به ابعاد  $8/97 d_h$  در طول،  $4 d_h$  در عرض و  $1/83 d_h$  در ارتفاع اطراف قطار و یک مکعب به ابعاد  $0/65 d_h$  در طول،  $4 d_h$  در عرض و  $0/42$  در ارتفاع در دماغه و دم قطار است. نمایی از نحوه پالایش المان بندی در شبیه سازی مطابق شکل ۷ است.

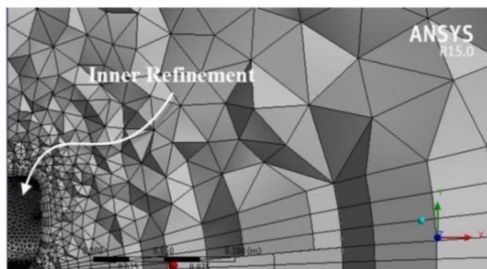


شکل ۷- ساختار توزیع المان بکار رفته در شبیه سازی

برای یک شبکه بندی متوسط<sup>۶</sup> اندازه پایه<sup>۷</sup> المانی برابر  $0/5$  متر که در نواحی نسبتا دور اندازه کمینه<sup>۸</sup> المان  $20$  درصد اندازه پایه و اندازه هدف<sup>۹</sup>  $80$  درصد اندازه پایه است مورد استفاده قرار گرفته است اندازه المان ها در نقاط دور از میدان بزرگتر در نظر گرفته شده است چرا که حل دقیق و با المان بندی عالی در این نقاط نیاز نبوده و حجم محاسبات و زمان تحلیل را افزایش می دهد.



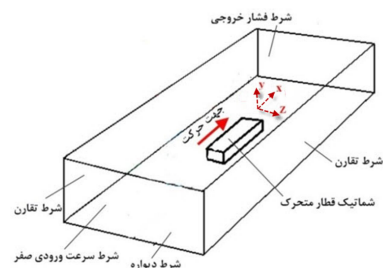
شکل ۸- المان بندی شش وجهی در اطراف قطار پر سرعت



شکل ۹- توزیع فضایی المان ها در مقطع برش خورده قطار

ضخامت لایه های منشوری<sup>۱۰</sup>  $25$  درصد، تعداد لایه های منشوری

برای سطوح کناری و بالایی هوای مدل شده اطراف قطار شرط مرزی تقارن مورد استفاده قرار گرفته است در شرط مرزی تقارن مؤلفه عمودی سرعت و گرادیان های نرمال تمام متغیرها در مرز تقارن صفر است. بنابر این با تعریف مرز تقارن برای یک سطح، تمام شارها در آن سطح صفر می باشند همچنین از آنجائیکه، تنش برشی در سطح تقارن صفر است، می توان اینگونه تفسیر کرد که یک شرط مرزی تقارن، به نوعی شرط مرزی دیواره لغزان در یک جریان آشفته می شود. [۸]



شکل ۶- شرایط مرزی اعمال شده برای قطار متحرک

## ۶- المان بندی قطار پر سرعت

به منظور ساختن المان بندی با کیفیت بالا و داشتن تعداد سلول مناسب نیاز است که بخشی از دامنه محاسباتی خیلی خوب ساخته شود و دیگر بخش ها تا حد امکان با سلول های بزرگتری المان بندی شوند. با انتخاب کردن سطوحی خاص که در برابر تغییرات هندسه ناگهانی قرار دارند مانند دماغه و دم قطار، احتمال پالایش در این نواحی وجود دارد. با توجه به آنچه در مقدمه این تحقیق بیان شده، از آنجائیکه در این تحقیق قطار ثابت نبوده و متحرک فرض شده است بنابر این استفاده از روش المان بندی متحرک<sup>۱</sup> مورد نیاز است. به طور کلی دو نوع المان بندی متحرک با نام المان بندی لغزشی<sup>۲</sup> و المان بندی پویا<sup>۳</sup> وجود دارد. روش المان بندی لغزشی اجازه می دهد که مسئله را به مناطق جداگانه ای که نسبت به یکدیگر حرکت دارند تقسیم کرد. حرکت ها میتوانند چرخشی یا انتقالی باشد. حرکت نسبی بین اجزای ثابت و متحرک (مانند ماشین دوار) منجر به استفاده از روش تحلیل گذرا برای شبیه سازی دوره ای زمان خواهد شد اما روش المان بندی پویا اجازه می دهد تا مرزهای موجود در یک منطقه جداگانه را در داخل همان منطقه حرکت دهید. مرزها میتوانند نسبت به یکدیگر حرکت چرخشی یا انتقالی داشته و یا تغییر شکل دهند. بسیاری از مسائل را میتوان با هر دو روش حل کرد روش المان بندی پویا می تواند برای حالتی که مش تغییر فرم داشته و یا حرکت مش تابعی از راه حل است مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به تحقیقات انجام شده، شبکه بندی شش وجهی<sup>۴</sup> با لایه های منشوری<sup>۵</sup> در نزدیک سطح دیواره به منظور بهبود رفتار دیواره نتایج رضایت بخش تری داشته است. [۱۳] به همین منظور شبکه بندی شش وجهی بیرونی در مناطق اطراف قطار به منظور ایجاد ساختاری مناسب پالایش شده است. به نظر می رسد که پالایش المان

<sup>6</sup> Medium mesh

<sup>7</sup> Base size

<sup>8</sup> Relative minimum size

<sup>9</sup> Relative target size

<sup>10</sup> Prism layer thickness

<sup>1</sup> Moving element

<sup>2</sup> Sliding mesh

<sup>3</sup> Dynamic mesh

<sup>4</sup> Trim-hexahedral grids

<sup>5</sup> Prism layers

۵، کشیدگی لایه های منشوری<sup>۱</sup> ۱/۲ و نرخ رشد با سرعت کم برای ایجاد اندازه المان برابر در لایه ها در نظر گرفته شده است. [۱۸] نمایی از المان بندی در نزدیکی قطار مطابق شکل ۸ است و توزیع فضایی المان ها نیز مطابق شکل ۹ می باشد که در آن از ۲/۸ میلیون المان با شبکه بندی متوسط استفاده شده است.

### ۷- شبیه سازی قطار پر سرعت

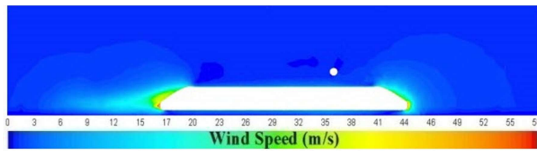
با توجه به اینکه در تعریف قطار پرسرعت توسط اتحادیه بین المللی راه آهن ها<sup>۲</sup> سرعت قطار پر سرعت بالاتر از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. مقدار سرعت قطار برابر ۵۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به مقدار چگالی هوا ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، ویسکوزیته ۱۸/۲۷ میکرو پاسکال- ثانیه، قطر هیدرولیکی ۳ متر مقدار عدد رینولدز جریان ۱۱۲۶۴۰۰۰ خواهد شد. شبیه سازی قطار پر سرعت در حالتی که قطار از زیر مانع عبور کند در ۲ حالت باز یا بسته بودن ترمز آیرودینامیک انجام شده است. یک مانع استوانه ای با قطر ۲ اینچ (۵/۰۸ سانتی متر) و طول ۶/۲۵ متر در فاصله عمودی ۵/۲۵ متر از سطح زمین به صورت افقی و در کنار آن به صورت عمودی مدلسازی شد. مقدار گام زمانی نیز برابر ۰/۰۰۰۶ ثانیه است که در نهایت برای تحلیل جمعا حدود ۱۰ روز زمان صرف شده است و از یک کامپیوتر ۱۶ هسته ای و دارای ۱۶ گیگابایت حافظه استفاده شده است. تنظیمات مربوط به حلگر نرم افزار Fluent نیز مطابق با (جدول ۱) است.

جدول ۱- تنظیمات محاسباتی در نرم افزار [۸Fluent]

تنظیمات کلی	مشخصات مربوط به تنظیم مورد نظر
حلگر	Pressure-based
شرایط مرزی ورودی و خروجی	Pressure outlet with zero static pressure (stationary subdomain) Velocity inlet with zero velocity and pressure outlet with zero static pressure (moving subdomain) No-slip; y+ at the sidewalls of the train reaches maximum and train surfaces value of 175, wall functions are employed if the grid is too coarse to resolve the laminar sub layer (Ground surface, tunnel Wall)
روش حل	Pressure-velocity (SIMPLE)
روش گسسته سازی	Least Squares Cell Based 2nd order Implicit, Non-Iterative Time Advancement (NITA) Cell zone conditions Moving mesh for train subdomain

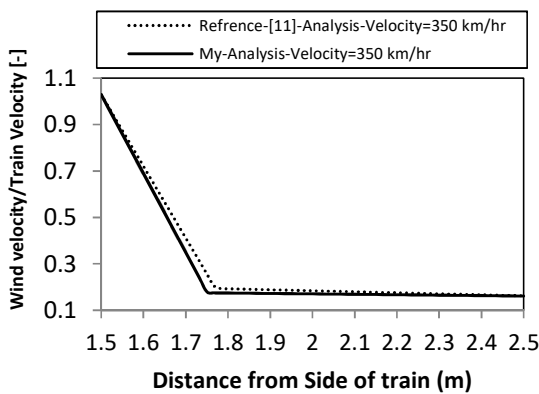
همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود مقدار بیشینه سرعت بر روی بدنه قطار است و مقدار سرعت با دور شدن از دماغه به صورت شعاعی کاهش پیدا می کند از طرف دیگر پس از عبور قطار از زیر مانع بالای سر آن آشفتگی ناشی از سرعت قطار در پشت آن به صورت گردابه هایی قابل مشاهده است که با دور شدن از دم قطار از بین می رود. مطابق شکل ۱۳ حضور ترمز آیرودینامیک سبب ایجاد سرعت

بیشینه در پشت پنل ترمزی و ایجاد گردابه جریان در محل ترمز آیرودینامیک شده است.



شکل ۱۰- تغییرات پروفیل سرعت در مقطع قطار و اطراف آن پس از عبور دماغه از زیر مانع بالای سر قطار

به منظور بررسی صحت نتایج تغییرات موج سرعت هوا ناشی از عبور قطار در کنار قطار و در فواصل مختلف بدست آمده است و با نتیجه موجود در شکل ۱۱ که در پژوهش نایانگ و همکارانش سال ۲۰۱۵ انجام شده است مقایسه گردید که طی این مقایسه کاملاً مشهود است که نتایج مشابهت قابل قبولی داشته و درصد خطا کمتر از ۵ درصد را نشان می دهد.



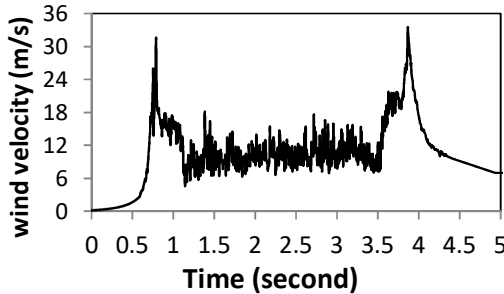
شکل ۱۱- پروفیل سرعت در کنار قطار بین مدلسازی انجام شده در کار حاضر و تحقیق مرجع [۱۱]

در ادامه به منظور بررسی مجدد صحت نتایج، تغییرات سرعت بی بعد شده هوا که توسط آزمایش گیلبرت و همکارانش [۶] استخراج شده با نتایج بدست آمده از شبیه سازی در این پژوهش مطابق شکل ۱۲ مقایسه گردید. که مطابق شکل ۱۲ در زمان ۱/۲ ثانیه و ۶/۴ ثانیه دماغه و دنباله قطار به ترتیب به نقطه اندازه گیری می رسند. نقطه اوج موج فشاری توسط شبیه سازی با نتایج حاصل از آزمایش مطابقت ندارد که این موضوع از فرض های ساده سازی شده در گسسته سازی و مدلسازی ریاضی معادلات جریان که از آن جمله میتوان به (معادله ۱) و (معادله ۲) اشاره کرد، نشات گرفته و با واقعیت متفاوت شده است همچنین سرعت باد قبل از عبور دماغه قطار از نقطه اندازه گیری (زمان کوچکتر از ۱/۲ ثانیه) و پس از عبور دنباله قطار از نقطه اندازه گیری (زمان بزرگتر از ۶/۴ ثانیه) بیشتر از مقدار اندازه گیری تجربی گیلبرت و همکارانش تخمین زده شده است که البته در نتایج تحقیق گیلبرت و همکارانش که برای ۲۵ قطار تکرار شده است نیز نقطه اوج موج فشاری دچار عدم قطعیت است.

<sup>1</sup> Prism layer stretching

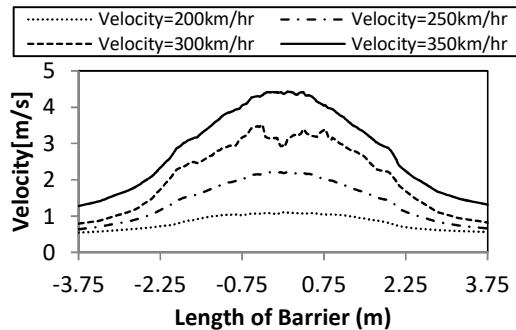
<sup>2</sup> International union of railways (UIC)

تغییرات پروفیل سرعت بر حسب زمان در نقطه اندازه گیری نشان داده شده در شکل ۳ نیز مطابق شکل ۱۶ خواهد بود که بر طبق آن نقاط بحرانی مسئله، در زمان عبور دماغه و دم قطار از کنار موانع است و همچنین نشان دهنده تغییرات ناگهانی سرعت باد بر روی موانع در حین عبور قطار است.



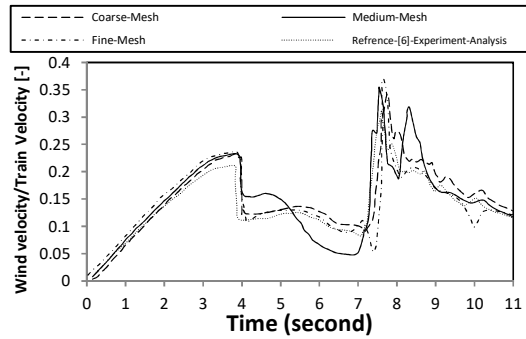
شکل ۱۶- تغییرات پروفیل سرعت بر حسب زمان برای مانع بالای سر قطار بر سرعت

در ادامه به بررسی اثر سرعت های مختلف قطار بر سرعت بر روی سرعت موج هوای تولید شده در اطراف قطار پرداخته شده است. بدین منظور سرعت قطار بر سرعت را به ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت افزایش داده و نتایج مربوط به سرعت موج هوا و فشار هوای ایجاد شده در اطراف قطار، مورد بررسی قرار گرفت البته لازم به ذکر است که این بررسی در حالت حضور و عدم حضور ترمز آیرودینامیک بررسی شده است. خط اندازه گیری با مختصات مبدا و مقصد (۰، ۳/۷۵، ۱۲/۵) و (۱۲/۵، ۲۱/۵، ۰) در بالای سر قطار و مقصد (۰، ۱/۵، ۱۲/۵) و (۱۲/۵، ۲۱/۵، ۰) در کنار قطار مطابق شکل ۱۴ برای نمایش تغییرات پارامترهای مختلف بر اساس فاصله از بدنه قطار انتخاب شده است. به منظور مقایسه تاثیر سرعت قطار بر روی موج فشاری حاصل از عبور قطار تغییرات سرعت موج هوا بر روی موانع بالای سر قطار برای چهار سرعت مختلف برای حالتی که دماغه قطار از محل اندازه گیری عبور کند بدست آمده است. تغییرات سرعت موج هوای ایجاد شده بر روی مانع بالای سر قطار مطابق شکل ۱۷ است. که با افزایش سرعت قطار مقدار سرعت موج هوای ایجاد شده در بالای سر قطار افزایش خواهد یافت.

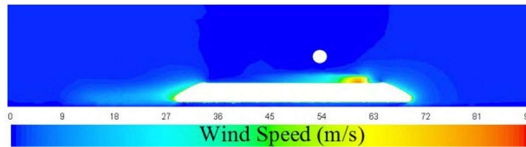


شکل ۱۷- تغییرات سرعت هوا در طول مانع موجود بالای سر قطار در لحظه عبور دماغه از محل اندازه گیری

همچنین تغییرات ضریب فشار هوای ناشی از عبور دماغه قطار برای این چهار سرعت برای مانع بالای سر قطار مطابق شکل ۱۸ است.

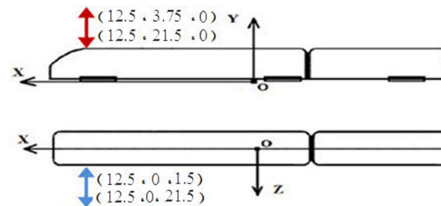


شکل ۱۲- سرعت نرمال در نقطه اندازه گیری توسط گیلبرت بصورت تجربی [۶] و این تحقیق حاضر با شبیه سازی عددی در نرم افزار

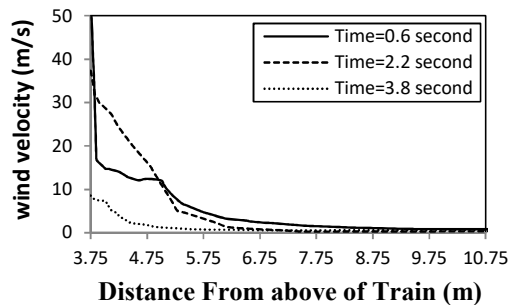


شکل ۱۳- تغییرات پروفیل سرعت در مقطع قطار با حضور ترمز آیرودینامیک پس از عبور دماغه از زیر مانع بالای سر قطار

در این تحلیل محور مرکزی قطار مطابق شکل ۱۴ در وسط آن قرار گرفته است که با توجه به این موضوع فاصله بدنه خارجی قطار تا مرکز مختصات در راستای قائم برابر ۳/۷۵ متر و در عرض حدود ۱/۵ متر خواهد بود. بدین منظور در شکل ۱۶ محور افقی از صفر شروع نشده است و مقدار ابتدایی آن ۳/۷۵ متر است که با توجه به دستگاه مختصات ارائه شده در شکل ۱۴ این مقدار محل بدنه قطار و بر روی سقف آن را مشخص می کند. مطابق شکل ۱۵ با گذشت زمان سرعت موج هوای ایجاد شده در بالای سر قطار افزایش می یابد و از طرف دیگر این مقدار سرعت موج هوا با دور شدن از بدنه قطار کاهش می یابد.

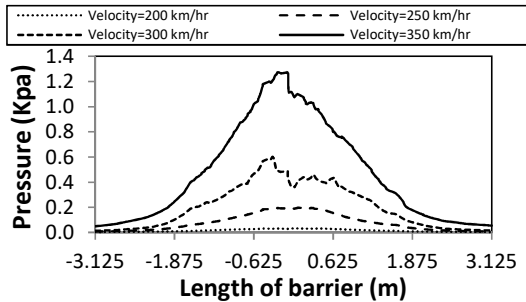


شکل ۱۴- مختصات و موقعیت محل اندازه گیری در بالای سر قطار و کنار قطار

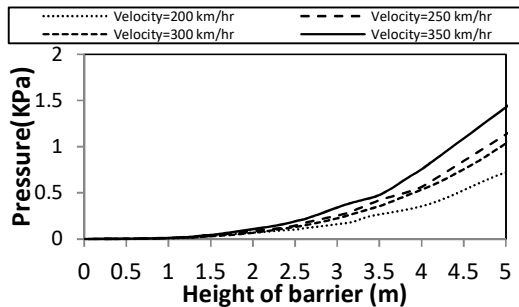


شکل ۱۵- تغییرات سرعت بر اساس فاصله از بدنه قطار در زمان عبور سر، وسط بدنه قطار و دم قطار از مانع

همچنین توزیع فشار اعمالی بر روی مانع موجود در بالای سر قطار مطابق شکل ۲۱ و برای مانع موجود در کنار قطار مطابق شکل ۲۲ بدست می آید. به جهت بررسی صحت مقادیر حداکثر فشارهای اعمالی به موانع بالای سر قطار با استاندارد مربوط به حداکثر فشار حاصل از سرعت باد موجود در مرجع [۲] انجام شده است.

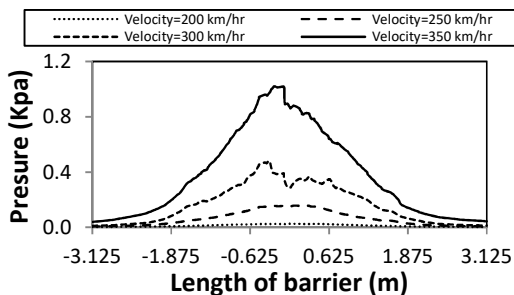


شکل ۲۱- تغییرات فشار وارد بر مانع بالای سر قطار در سرعت مختلف در لحظه عبور دماغه از نقطه اندازه گیری



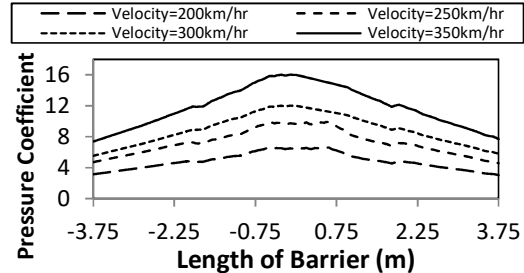
شکل ۲۲- تغییرات فشار وارد بر مانع کنار قطار در سرعت مختلف در لحظه عبور دماغه از نقطه اندازه گیری

نمودار مربوط به تنش ایجاد شده توسط عبور قطار بر روی موانع بالای سر قطار برای حالتی که در آن ترمز آیرودینامیک عمل کرده است نیز در عبور دماغه قطار از محل اندازه گیری مطابق با شکل ۲۳ و برای مانع موجود در کنار قطار مطابق شکل ۲۴ بدست می آید. همانطور که در شکل ۲۳ و شکل ۲۴ مشاهده می شود حضور ترمز آیرودینامیک سبب کاهش پیک فشاری وارد به موانع موجود در اطراف قطار شده است [۱۹] و برای یک خط لوله گاز استوانه ای میتوان بارگذاری را در مقطع به صورت شکل ۲۵ در نظر گرفت.



شکل ۲۳- تغییرات فشار وارد بر مانع بالای سر قطار دارای ترمز آیرودینامیک در سرعت مختلف در لحظه عبور دماغه از نقطه اندازه گیری

همانگونه که مشاهده می شود میزان افزایش موج سرعت و فشار ناشی از عبور قطار با افزایش سرعت قطار افزایش می یابد که در نتیجه، وجود این پدیده در سرعت های بالای قطار خطر آفرین خواهد بود. تغییرات پروفیل سرعت و ضریب فشار برای موانع قرار گرفته در بالای سر قطار به صورت شکل ۱۷ و شکل ۱۸ بدست می آید.

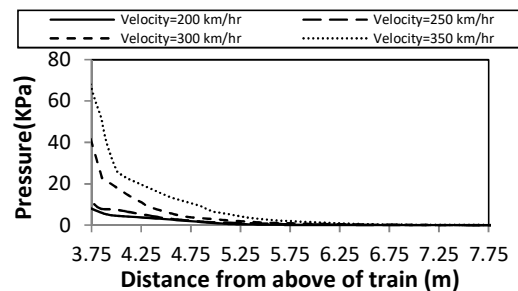


شکل ۱۸- تغییرات ضریب فشار در طول مانع موجود بالای سر قطار در لحظه عبور دماغه از محل اندازه گیری

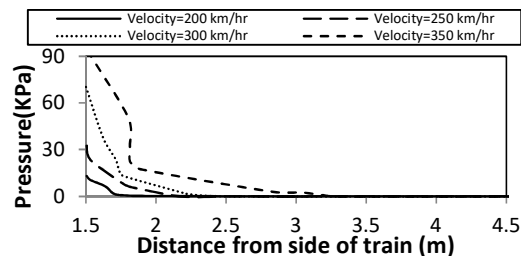
همانطور که در هر دو شکل ۱۷ و شکل ۱۸ مشخص است مقادیر سرعت و ضریب فشار در وسط مانع بیشینه و با فاصله گرفتن از مرکز مانع مقادیر سرعت و ضریب فشار کاهش می یابد. مقدار فشار وارد از طرف باد با سرعت  $V_w$  با رابطه (۳) بیان می شود:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p V_w^2 \quad (3)$$

که در آن  $\rho$  چگالی هوا و  $C_p$  ضریب فشار آیرودینامیک و  $P$  فشار ناشی از سرعت هوا هنگام عبور قطار است. با توجه به در دست داشتن تغییرات سرعت بر حسب فاصله از بدنه قطار میتوان مقدار تنش حاصل شده از سرعت باد را بر حسب فاصله در جهت عمودی و افقی از بدنه قطار محاسبه کرد. بنابر این توزیع تنش اعمالی بر حسب فاصله از بدنه قطار و در بالای سر آن مطابق شکل ۱۹ و در کنار قطار نیز مطابق شکل ۲۰ بدست می آید.



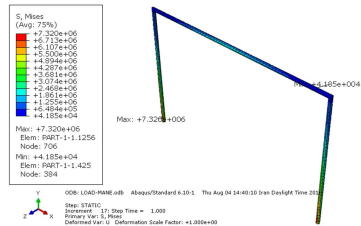
شکل ۱۹- تغییرات فشار بر حسب فاصله از بدنه قطار و در بالای سر آن در سرعت های مختلف در لحظه عبور دماغه از نقطه اندازه گیری



شکل ۲۰- تغییرات فشار بر حسب فاصله از مرکز خط و در کنار آن در سرعت های مختلف در لحظه عبور دماغه از نقطه اندازه گیری

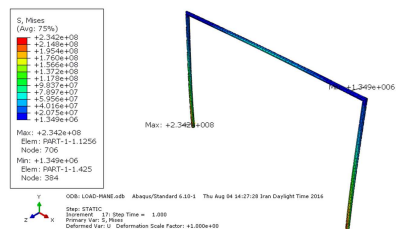
$$P = -3.6x^6 - 2.5x^5 + 70.8x^4 + 35.1x^3 - 445.8x^2 - 106.2x + 1.025 \quad (Pa) \quad (7)$$

پس از تحلیل توسط نرم افزار المان محدود و استخراج تنش ها مقادیر تنش بیشینه در دو حالت عادی و ترمزی برای مانعی به طول ۶/۲۵ در ارتفاع ۵/۲۵ از سطح زمین و مانع دیگری با طول ۵/۲۵ متری به فاصله ۳ متری از مرکز خط مطابق شکل ۲۶ با مقادیر تنش بیشینه  $7.32 \times 10^6$  و  $6.65 \times 10^6$  پاسکال بترتیب در حالت عدم حضور ترمز آیرودینامیک و حضور ترمز آیرودینامیک استخراج شد.



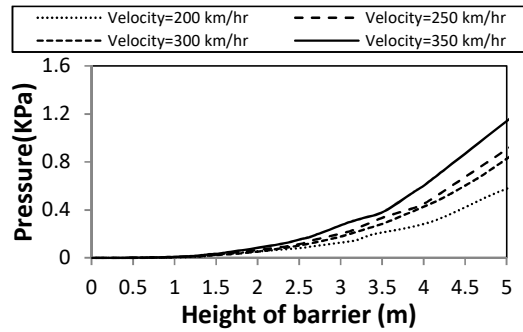
شکل ۲۶- توزیع تنش ناشی از موج هوا روی مانع کنار قطار و بالای سر قطار در عدم حضور ترمز آیرودینامیک (حالت ۱)

با توجه به مقادیر تنش بدست آمده مقادیر بیشینه تنش در محل پایه ها اتفاق افتاده و سازه از محل پایه واژگون می شود و بدلیل ناچیز بودن مقادیر آن در این حالت میتوان فاصله ۵/۲۵ متر از سطح زمین و فاصله ۳ متری از مرکز خط را بیشینه فاصله مجاز برای قرارگیری موانع عمرانی (لوله ها و...) در اطراف قطار در نظر گرفت و به منظور یافتن کمینه فاصله مجاز پروفیل فشار تولید شده بر روی مانعی به طول ۶/۲۵ در ارتفاع ۳/۸۵ از سطح زمین و مانع دیگری با طول ۳/۸۵ متری به فاصله ۱/۷۵ متری از مرکز خط را استخراج و مجدداً توزیع فشار استخراج شده در این فواصل از نرم افزار Fluent را در نرم افزار المان محدود مطابق شکل ۲۷ بر روی موانع قرار داده و مقادیر حداکثر تنش ایجاد شده در حالت عدم حضور ترمز آیرودینامیک و حضور ترمز آیرودینامیک بترتیب برابر  $2.34 \times 10^8$  و  $2.12 \times 10^8$  پاسکال استخراج گردید.

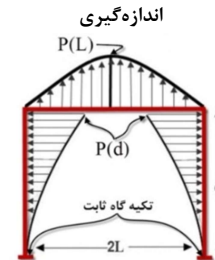


شکل ۲۷- توزیع تنش ناشی از موج هوا روی مانع کنار قطار و بالای سر قطار در عدم حضور ترمز آیرودینامیک (حالت ۲)

به منظور بررسی تاثیر قطر لوله بر میزان تنش اعمالی به آن محدوده قطر لوله را برحسب استاندارد بین ۲ تا ۵ اینچ تغییر داده و مقادیر تنش بر حسب قطر لوله مطابق شکل ۲۸ ترسیم شده است. با توجه به اینکه توزیع فشار با نزدیک شدن موانع به بدنه قطار مطابق شکل ۲۲ و شکل ۲۴ به صورت نمایی و با شیب تند افزایش می یابد، مشاهده شد که مقادیر حداکثر تنش ایجاد شده برای قطر لوله ای برابر با ۲ اینچ به ۲۳۴ مگاپاسکال رسیده و از مقدار تنش بیشینه مربوط به تسلیم ماده سازنده لوله ها (فولاد ST35) عبور کرده است و همچنین



شکل ۲۴- تغییرات فشار وارد بر مانع کنار قطار دارای ترمز آیرودینامیک در سرعت مختلف در لحظه عبور دماغه از نقطه



شکل ۲۵- توزیع بارگسترده ناشی از موج هوا روی مانع کنار قطار بالای سر قطار

## ۸- تعیین حریم مجاز برای موانع در اطراف قطار

به منظور یافتن فاصله مجاز برای قرارگیری موانع در اطراف قطار نیاز است تا به کمک توزیع بار گسترده بدست آمده در شکل ۲۷ مقدار تنش وارد بر موانع را به کمک مدلسازی خط لوله در نرم افزار المان محدود ABAQUS محاسبه و با حداکثر تنش قابل تحمل برای یک لوله ای استوانه ای شکل به قطر ۲ اینچ (۵/۰۸ سانتی متر) مقایسه کرد همچنین جنس فولاد مورد استفاده برای لوله ها در راه آهن با توجه به استاندارد<sup>۱</sup> St35 با حداقل تنش تسلیم ۲۲۰ مگاپاسکال برای قطر لوله بیشتر از ۴۰ میلیمتر می باشد. [۲۰] بدین ترتیب میتوان مقادیر فاصله  $d$  و  $L$  موجود در شکل ۲۵ را برای حالتی که مانع از تخریب لوله شود به کمک شبیه سازی بدست آورد. به منظور اعمال بارگذاری استاتیکی بر روی مانع موجود در اطراف قطار توزیع فشار استخراج شده از نرم افزار Fluent مطابق با شکل ۲۱ و شکل ۲۲ در عدم حضور ترمز آیرودینامیک و شکل ۲۳ و شکل ۲۴ در حضور ترمز آیرودینامیک بدست سرعت بیشینه ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت به کمک انطباق منحنی بدست آمد و معادلات آن به صورت رابطه (۴) برای موانع کناری و رابطه (۵) برای موانع بالاسری در عدم حضور ترمز آیرودینامیک و به صورت رابطه (۶) برای موانع کناری و رابطه (۷) برای موانع بالاسری در عدم حضور ترمز آیرودینامیک بوسیله توابع برازش منحنی<sup>۲</sup> استخراج شد.

$$P = 9y^3 + 13.1y^2 - 11.3y \quad (Pa) \quad (4)$$

$$P = -4x^6 - 2.8x^5 + 77.9x^4 + 38.6x^3 - 490.4x^2 - 116.9x + 1.128 \quad (Pa) \quad (5)$$

$$P = 8.1y^3 + 11.9y^2 - 10.2y \quad (Pa) \quad (6)$$

<sup>1</sup> DIN2448

<sup>2</sup> Curve fitting functions

[3] Hara T, Kawaguti M, Fukuchi G, Yamamoto A. Aerodynamics of high-speed train. In Monthly Bulletin of the International Railway Congress Association 1968 Feb (Vol. 45, No. 2, pp. 121-146).

[4] Gil N, Baker CJ, Roberts C, Quinn A. Passenger train slipstream characterization using a rotating rail rig. Journal of Fluids Engineering. 2010 Jun 1;132(6):061401.

[5] Hemida H, Gil N, Baker C. LES of the Slipstream of a Rotating Train. Journal of Fluids Engineering. 2010 May 1;132(5):051103.

[6] Gilbert T, Baker C, Quinn A, Sterling M. Aerodynamics of high-speed trains in confined spaces. In Proceedings of the 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications 2012 Sep (p. 10).

[7] Baker C, Jordan S, Gilbert T, Quinn A, Sterling M, Johnson T, Lane J. Transient aerodynamic pressures and forces on trackside and overhead structures due to passing trains. Part 1 Model scale experiments Part 2 Standards applications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2012 Nov 27:0954409712464859.

[8] Dhanabalan Y. Numerical study of a wind tunnel setup for measuring train slipstream with Detached Eddy Simulation.

[9] Hemida, H., Baker, C.J., and Gao, G.. The calculation of train slipstreams using large-eddy simulation. Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail Rapid Transit, 2014, 228: 25-36.

[10] Khayrullina A, Blocken B, Janssen W, Straathof J. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015 Apr 30;139:100-10.

[11] Yang N, Zheng XK, Zhang J, Law SS, Yang QS. Experimental and numerical studies on aerodynamic loads on an overhead bridge due to passage of high-speed train. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015 May 31;140:19-33.

[۱۲] محسن غضنفری، پریسا حسینی تهرانی، بهبود ضخامت و وزن نمونه جدید پنل ترمز آیرودینامیکی قطارهای پرسرعت با استفاده از نرم افزار آنسیس، چهارمین کنفرانس بین المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه آهن، ایران - تهران، محل دائم نمایشگاه‌های بین المللی تهران، اردیبهشت ماه، سال ۱۳۹۴.

[13] Guillou, Florian. "CFD Study of the Flow around a High-Speed Train." (2012).

[14] Stathopoulos T. The numerical wind tunnel for industrial aerodynamics: Real or virtual in the new millennium?. Wind and Structures. 2002;5(2\_3\_4):193-208.

[15] Krajnovic S. Numerical simulation of the flow around an ICE2 train under the influence of a wind gust. In Railway Engineering-Challenges for Railway Transportation in Information Age, 2008. ICRE 2008. International Conference on 2008 Mar 25 (pp. 1-7). IET.

[16] Casey M, Wintergerste T, Innotec S. ERCOFTAC special interest group on quality and trust in industrial CFD. Best practice guidelines. 2000.

[17] Manhart M, Wengle H. A spatiotemporal decomposition of a fully inhomogeneous turbulent flow field. Theoretical and computational fluid dynamics. 1993 Nov 1;5(4-5):223-42.

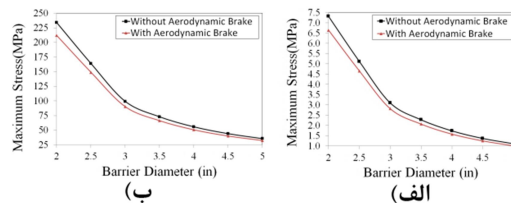
[18] Muld TW. Slipstream and flow structures in the near wake of high-speed trains.

[19] Wu ML, Zhu YY, Tian C, Fei WW. Influence of aerodynamic braking on the pressure wave of a crossing high-speed train. Journal of Zhejiang University SCIENCE A. 2011 Dec 1;12(12):979-84.

[20] STANDARD B. Seamless and welded steel tubes—Dimensions and masses per unit length.

[21] Biadgo AM, Simonović A, Svorcan J, Stupar S. Aerodynamic characteristics of high speed train under turbulent cross winds: A numerical investigation using unsteady-RANS method. FME Transactions. 2014;42(1):10-8.

مطابق شکل ۲۸ مشاهده می شود که افزایش قطر لوله از ۲ اینچ به ۵ اینچ سبب کاهش بیشینه تنش اعمالی و افزایش استحکام آن خواهد شد که در این شرایط میتوان موانع را به قطار در حال حرکت نزدیکتر کرد و فاصله مجاز برای عبور قطار را کاهش داد در نهایت برای موانعی به قطر ۲ اینچ فواصل ذکر شده را میتوان به عنوان محدوده طراحی موانع عمرانی (لوله ها و...) در اطراف قطار پر سرعت در نظر گرفت.



شکل ۲۸- مقادیر بیشینه تنش ناشی از موج هوا روی مانع اطراف قطار بر حسب قطر مانع الف) حالت ۱ ب) حالت ۲

## ۹- نتیجه گیری

این پژوهش اثر سرعت باد ناشی از عبور قطار بر روی موانع عمرانی قرار گرفته در بالای سر قطار و کنار قطار مثل لوله های انتقال یا کابل های برق را مورد بررسی قرار داد. اثر پدیده فشار هوا در مود عادی یا با حضور ترمز آیرودینامیک مورد بررسی قرار گرفت. برای این شبیه سازی از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم افزار Fluent استفاده شد. بین نتایج این پژوهش و نتایج مربوط به پژوهش نایانگ و همکارانش به منظور صحت سنجی تطابق مناسبی مشاهده شد. به عنوان نتیجه گیری نهایی مقدار حریم مجاز برای قرار گرفتن موانع عمرانی در بالای سرودکنار قطار پر سرعت به کمک شبیه سازی در نرم افزار المان محدود بدست آمد که مقادیر کمینه و بیشینه این حریم مجاز برای قطاری با سرعت بیشینه ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت و برای مانعی به قطر ۲ اینچ به ترتیب از مرکز بدنه قطار و از بدنه بالای قطار برابر  $d \in (3.85, 5.25)$  و  $L \in (1.75, 3)$  می باشد.

## ۹- نمادها

$t$	زمان و ضخامت، m
$u$	مؤلفه سرعت در جهت x، m/s
$v$	مؤلفه سرعت در جهت عرضی، m/s
$w$	مؤلفه سرعت در جهت عمودی، m/s
$\mu$	لزجت دینامیکی، kg/m-s
$\rho$	چگالی، kg/m <sup>2</sup>
$g$	شتاب جاذبه، m/s <sup>2</sup>
$C_p$	ضریب پسای فشاری

## ۱-۰ مراجع

[1] Tiwari DR, Sharma N, Khatri P, Panwar S. Design and Analysis of Maglev Trains. Global Journal For Research Analysis. 2016 Jun 8;5(5).

[2] TSI C. 648, Commission decision concerning a technical specification for interoperability relating to the rolling stock sub-system of the trans-european high-speed rail system. Technical report, official journal of the European union; 2008.