

## شبیه‌سازی یک قطار تندرو در برابر جریان هوای آشفته با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه

علیرضا حاجی‌پور<sup>۱</sup>، آرش میرعبداله لواسانی<sup>۲\*</sup> و محمد افتخاری یزدی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶	در این مطالعه، عملکرد آیرودینامیک یک قطار تندرو در برابر یک جریان هوای آشفته به صورت عددی از دو منظر تحلیل شده است. نخست با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی <sup>۱</sup> تحلیل مؤلفه‌های جریان و آیرودینامیک سیال انجام شده است و سپس با به‌کارگیری الگوریتم شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه، یک پیش‌بینی و مقایسه با مقادیر به‌دست آمده از نتایج دینامیک سیالات محاسباتی ارائه شده است. بدین منظور، با استفاده از روش میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس <sup>۲</sup> و روش آشفتگی (SST) $k-\omega$ ، یک جریان هوای غیرقابل تراکم و آشفته اطراف یک نمونه قطار تندروی عمومی با به‌کارگیری نرم‌افزار OpenFOAM شبیه‌سازی شده است. در این پژوهش، برخی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین مؤلفه‌های جریان و آیرودینامیک اعم از سرعت، فشار، خطوط جریان، ساختار جریان، ضرایب فشار و نیروهای پسا <sup>۴</sup> ، برآ <sup>۴</sup> و جانبی <sup>۵</sup> برای تغییرات زوایای حمله مختلف و تغییرات سرعت جریان هوا بررسی و مقایسه شده است. در ادامه، الگوریتم شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه <sup>۶</sup> که توسط داده‌های مختلف اصلاح شده است، برای پیش‌بینی مقادیر خروجی مسئله به‌کارگیری شده است. بر این اساس، نیروهای آیرودینامیک پسا، برآ و جانبی برای زوایای حمله و سرعت‌های مختلف توسط این روش الگوریتمی به‌دست آمده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شده است. مقایسه انجام شده نشان‌دهنده تناسب خوب میان داده‌های آیرودینامیک و شبکه عصبی به‌کارگرفته شده است.
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹	
<b>واژگان کلیدی:</b> دینامیک سیالات محاسباتی، آیرودینامیک، قطار تندرو، روش‌های آشفتگی، الگوریتم شبکه عصبی، OpenFOAM.	

### ۱- مقدمه

مطالعه جریان سیال بر روی اجسام به‌ویژه قطارهای تندرو یکی از محبوب‌ترین زمینه‌های پژوهش برای پژوهش‌گران مهندسی مکانیک و هوافضا در این زمان است. برخی از مهم‌ترین و متناسب‌ترین آن‌ها با پژوهش حاضر در ادامه آمده است: یک مقایسه بین شبیه‌سازی عددی و

آزمایشگاهی جریان هوای آشفته با عدد رینولدز بالا اطراف یک قطار تندروی فرانسوی توسط پارادوت و همکاران [۱] انجام شد. در این پژوهش از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی Star CD و بر اساس روش میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و روش آشفتگی  $k-\epsilon$  SST برای حل مسئله استفاده شد. توزیع نیروی پسای آیرودینامیک

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: arashlavasani@iauctb.ac.ir

۱. دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد

اسلامی، تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی،

تهران، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی،

تهران، ایران

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics

<sup>2</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

<sup>3</sup> Drag

<sup>4</sup> Lift

<sup>5</sup> Side

<sup>6</sup> Multi-Layer Feed-Forward Neural Network (MLFFNN)

قرارگرفت. در این پژوهش با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ویژگی‌های آیرودینامیک به‌ویژه نیروی پسا برای یک قطار سوئدی انجام شد.

لی و همکاران [۸] یک قطار تندرو در ورودی تونل با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و مدل آشفستگی  $k-\epsilon$  برای یک سیال قابل تراکم لزج شبیه‌سازی کردند.

وانگ و همکاران [۹] شبیه‌سازی یک قطار تندرو را با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و  $k-\epsilon$  RNG انجام دادند. هدف اصلی این پژوهش بررسی تغییرات فشار و نیروهای آیرودینامیک با دو قطار در حال عبور در کنار یکدیگر در یک تونل بوده است. بنابراین، یک قطار تندروی EMU با سرعت ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت و سه واگن برای حرکت در یک تونل ۳۰۰ متری مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس شبیه‌سازی عددی، نخست نوسانات فشار در تونل هنگام حرکت دو قطار مورد بررسی قرار گرفت. سپس پارامترهای مشابه در حالت حرکت یک قطار بررسی و مقایسه شدند. در ادامه، ویژگی‌های آیرودینامیک مانند نیروهای برآ، پسا و جانبی برای حرکت قطارها به‌صورت هم‌زمان و تک‌تک به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

اسرس و همکاران [۱۰] ویژگی‌های آیرودینامیک یک قطار تندرو را در برابر باد مخالف با استفاده از روش عددی سه‌بعدی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و  $k-\epsilon$  RNG بررسی کردند. در این شبیه‌سازی، دو طرح ساکن و متحرک برای زمین برای زوایای حمله از ۳۰ تا ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است. به عنوان نتایج، ساختار میدان و خطوط جریان در مقاله نشان داده شده است که بر اساس آن گرداب در قسمت‌های بالایی و پایینی لبه‌های قطار تولید می‌شود. همچنین خطوط سرعت برای زوایای مختلف محاسبه شده است.

پنگ و همکاران [۱۱] شبیه‌سازی عددی درمورد اثر باد روی یک قطار تندرو انجام شد. بدین منظور، یک شبیه‌سازی جریان هوا با عبور از روی یک قطار تندرو با استفاده از روش عددی سه‌بعدی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و  $k-\epsilon$  RNG انجام شد. در این شبیه‌سازی، دو طرح برای قطار عبوری از تونل وجود دارد. طرح اول: یک قطار که از تونل عبور می‌کند و طرح دوم

و جریان بحث شد و یک مقایسه بین نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی تونل باد انجام گردید.

خیر و همکاران [۲] با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و روش آشفستگی  $k-\epsilon$  SST، اثرات باد جانبی را روی قطار تندروی آلمانی InterRegio بررسی کردند. فلوچیر و همکاران [۳] اثرات باد مخالف را بر روی قطار تندروی آلمانی InterRegio تخمین زدند. برای این منظور، روش میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و روش آشفستگی  $k-\epsilon$  RNG برای شبیه‌سازی استفاده شد.

یک پژوهش در مورد خصوصیات جریان آیرودینامیک در یک قطار تندرو توسط شین و همکاران [۴] انجام شد. در این پژوهش عددی، تغییرات نیروهای آیرودینامیک قطار تندرو در ورودی یک تونل ارائه شد. برای دستیابی به اهداف در نظر گرفته شده، از حل معادله سه‌بعدی ناویر-استوکس قابل‌تراکم و ناپایدار برای تجزیه و تحلیل میدان جریان در قطار تندرو استفاده شد.

تیان [۵]، یک تحلیل آیرودینامیک روی یک قطار تندرو انجام داد. با توجه به نتایج عددی، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شرح زیر است: از آنجا که نیروی پسا به‌طور مستقیم با مربع سرعت در ارتباط است، وقتی سرعت قطار افزایش می‌یابد، نیروی پسا نیز افزایش می‌یابد. بسته به ماهیت فشار و اصطکاک، طراحی دماغه قطار در کاهش کل پسای آیرودینامیک مؤثر است.

ژائو و همکاران [۶] ویژگی‌های آیرودینامیک یک قطار تندروی چینی را با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس بررسی کردند. در این پژوهش، تأثیرات آیرودینامیک قطار در ورودی و خروجی یک تونل مورد بررسی قرار گرفت. به‌عنوان مثال، تأثیر فشار هوا بر بدنه قطار و پنجره آن، رابطه بین نیروهای آیرودینامیک و اندازه بخش‌های مختلف تونل و رابطه بین اندازه ورودی تونل و شدت فشار هوا مهم‌ترین نتایج پژوهش بوده است. با توجه به رویکرد عددی حل گر و مدل‌سازی آشفستگی، اثرات ویژگی آیرودینامیک قطار تندرو در تونل برای چهار سرعت مختلف در سرعت ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت و برای دو اندازه تونل محاسبه شده است.

بهینه‌سازی ویژگی‌های آیرودینامیک قطار تندرو با استفاده از روش عددی توسط کراینویچ [۷] مورد بررسی

موردن و همکاران [۱۵] و ژوانگ و همکاران [۱۶] به بررسی آیرودینامیکی قطارهای تندرو پرداختند. اثر برخی پارامترهای کلیدی بر روی آن، مقایسه بین شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی و سایر تحلیل‌های متداول از مهم‌ترین نتایج پژوهش ایشان بوده است.

کاتانزارو و همکاران [۱۷] یک شبیه‌سازی را با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس برای یک قطار تندرو در برابر باد مخالف برای دو حالت ساکن و متحرک انجام دادند. تأثیر هر دو حالت با جزئیات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به نتایج، برای زاویه حمله کمتر از ۳۰ درجه، تأثیر نیروهای آیرودینامیک کمتر از ۱۰ درصد است. در نهایت، تفاوت‌های بین دو حالت ساکن و متحرک مقایسه و تحلیل شد.

دینگ و همکاران [۱۸] یک طراحی آیرودینامیک روی قطارهای تندروی CRH6، CRH380AM، CRH380A، CRH2G و نمونه استاندارد EMU ارائه دادند. با توجه به بهبود سرعت قطارهای تندرو و افزایش اثر آیرودینامیک، اثرات و مسائل مربوط به آیرودینامیک به عنوان چالش اصلی این پژوهش در نظر گرفته شده است. بدین منظور، رابطه بین طراحی آیرودینامیک قطار، شاخص‌های عملکردی آیرودینامیک و شبیه‌سازی عددی آن ارائه شد و در ادامه یک بهینه‌سازی برای قطار انجام شد.

عملکرد آیرودینامیک یک قطار در برابر باد مخالف با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس توسط ليو و همکاران [۱۹] بررسی شده است. عدد رینولدز استفاده شده بر اساس سرعت و ارتفاع قطار برابر  $1.77 \times 10^7$  می‌باشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، هنگامی که زاویه حمله ۹۰ درجه بوده است، نیروهای آیرودینامیک در بیشترین مقدار خود قرار دارند.

پرمولی و همکاران [۲۰] یک مقایسه آیرودینامیک بین دو حالت ساکن و متحرک انجام دادند. در این پژوهش، با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس، نتایج شبیه‌سازی حرکت قطار و زیر ساخت‌های آن که در ضرایب آیرودینامیک مؤثر بوده، مقایسه شدند. نخست، توسط تونل باد آزمایشگاهی اعتبارسنجی لازم انجام شد و سپس با استفاده از شبیه‌سازی عددی، اثرات حرکت نسبی به‌دست آمد. لازم به ذکر است برای دستیابی به این هدف، یک مدل مقیاس ۱:۱۵ از یک قطار تندروی ETR500 برای شبیه‌سازی در

این‌که دو قطار در کنار هم که از یک تونل عبور می‌کنند. باتوجه به یافته‌ها، باد یک جریان پیچیده بود که با گذشت زمان و مکان تغییر می‌کند، بنابراین خطرات زیادی را برای کارمندان و مسافران ایجاد می‌کند. بنابراین باید اقدامات اساسی و مناسب در نظر گرفته شود.

شوانباتو و همکاران [۱۲] با استفاده از روش عددی، بهینه‌سازی پارامترهای آیرودینامیک را برای قطارهای تندرو ارائه دادند. در این پژوهش، مؤلفه‌های آیرودینامیک مانند نیروی برآ با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس برای قطار تندروی CRH380A شبیه‌سازی شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، یک بهینه‌سازی چندهدفه انجام شد. پس از بهینه‌سازی و رسیدن به شکل بهینه، نیروهای پسا و برآی شکل بهینه در برابر باد مخالف نسبت به نمونه اصلی کاهش یافت. علاوه بر این، نوسانات کم‌تر و جریان مناسب‌تر از مزایای این بهینه‌سازی بوده است.

چو و همکاران [۱۳] با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس، شبیه‌سازی آیرودینامیک دو قطار تندرو را در یک تونل انجام دادند. در این پژوهش از مدل تلاطم سه بعدی و قابل‌تراکم برای یافتن موج فشار استفاده شده است. در ادامه، تأثیر برخی مؤلفه‌های کلیدی مانند سرعت قطار و طول برای برهم‌کنش امواج آیرودینامیک تولید شده توسط قطارها استفاده شده است. سپس نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی تأیید شدند. یافته‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ضریب پسا و فشار آیرودینامیک در میانه تونل به بیشترین مقدار خود می‌رسند. همچنین، هنگامی که سرعت قطار افزایش می‌یابد، ضریب پسا و فشار نیز افزایش می‌یابند.

تحلیل آیرودینامیک یک قطار تندرو را با استفاده از روش عددی توسط ژانگ و همکاران [۱۴] انجام شد. تأثیر زاویه شیب و عمق برش در ساختار جریان اطراف قطار از مهم‌ترین اهداف این پژوهش بوده است. همچنین، فشار سطح و نیروهای آیرودینامیک قطار با استفاده از روش عددی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به نتایج، هنگامی که زاویه شیب بهبود و عمق برش افزایش یافته، پایداری قطار در سرعت‌های بالا تضمین شده و احتمال سرنگونی آن کمتر می‌شود. بر اساس یافته‌ها، زاویه بهینه پیشنهادی ۷۵ درجه می‌باشد.

پژوهش‌های انجام‌شده روی قطارهای تندرو با روش‌های آزمایشگاهی و عددی انجام‌دادند.

حاجی‌پور و همکاران [۲۵]، به بررسی اثرات توابع دیواره روی رفتار آیرودینامیک یک قطار تندرو در مقابل جریان هوای آشفته پرداختند. در این پژوهش، برخی از توابع رایج و پیش‌فرض نرم‌افزار OpenFOAM با توابع اصلاحی ایجادشده مقایسه شدند.

یو و همکاران [۲۶]، به بررسی مشخصات آیرودینامیک یک قطار تندرو که در معرض محیط بارانی شدید قرار دارد، پرداختند. در این پژوهش خصوصیات غیرکروی قطرات باران و ارتباط آن با سرعت قطار و شدت باران در ضرایب آیرودینامیک تجزیه و تحلیل شد.

اثرات آیرودینامیک یک قطار تندرو در حال حرکت در تونل‌های مجزا و مجاور توسط لی و همکاران [۲۷] ارائه شد. دنگ و همکاران [۲۸]، به بررسی عکس‌العمل آیرودینامیک یک قطار تندرو روی یک پل در دو حالت با و بدون مانع باد پرداختند. سیستم تجزیه و تحلیل بر اساس روش DDES پیشنهاد شد. همچنین، یک عملکرد از مانع باد روی پل و یک طرح بهینه موانع بادی ارائه گردید.

همچنین تائو و همکاران [۲۹]، با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی بدنه یک قطار تندرو پرداختند در این پژوهش دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از طراحی آزمایشگاهی یک قطار تندرو به‌کارگیری شد تا یک شبیه‌سازی آیرودینامیک ارائه شود. سپس با ادغام الگوریتم ژنتیک پایه و یک الگوریتم شبکه عصبی تعمیم‌یافته هزینه‌های محاسباتی را کاسته و به کاهش ضرایب آیرودینامیک در مدل ارائه‌شده و بهینه پرداختند.

در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن فرضیات (برقراری شرط عدم لغزش، نیوتنی بودن سیال، آشفتگی رژیم جریان، پیوسته بودن، دائم بودن، سه‌بعدی بودن و تراکم‌ناپذیر بودن جریان)، با استفاده از روش عددی سه‌بعدی میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و رویکرد آشفتگی (SST)  $k-\omega$ ، مؤلفه‌های اساسی جریان و آیرودینامیک مانند فشار، سرعت و نیروهای آیرودینامیک پسا، برآ و جانبی اطراف یک قطار تندروی عمومی برای چند زاویه حمله مختلف جریان هوا (صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) و چند سرعت مختلف (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ متر بر ثانیه) شبیه‌سازی و مقایسه شده‌اند.

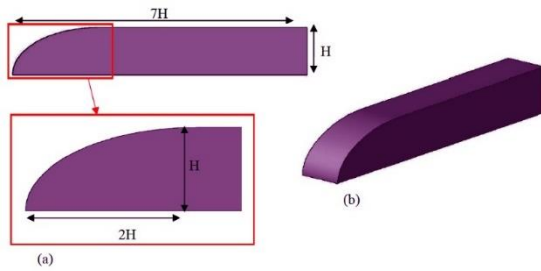
امروزه نیروهای آیرودینامیک و بررسی چگونگی آن‌ها در

نظر گرفته شده است. نتایج ضرایب آیرودینامیک به‌دست آمده از حالت‌های ساکن و متحرک قطار نشان داد که نیروی جانبی برای حالت ساکن نسبت به حالت متحرک در حدود ۵ درصد پایین‌تر بوده است. همچنین اختلاف نیروی عمودی بین دو حالت حدود ۱۲ درصد بوده است.

لی و همکاران [۲۱] با استفاده از روش‌های جدید به بررسی حرکت آیرودینامیک قطار تندرو در حال عبور از تونل در برابر جریان هوای آشفته پرداختند. با توجه به قابلیت نفوذپذیری استفاده از تونل باد برای اندازه‌گیری ضریب آیرودینامیک پسا روی یک قطار تندرو که به یک تونل وارد می‌شود، یک روش جدید آزمایشگاهی برای حرکت ارائه شده است. یک حس‌گر فوتوالکتریک در قسمت پایینی قطار نصب شده است که از آن می‌توان جابجایی قطار، سرعت و شتاب آن را محاسبه کرد. ضریب پسای آیرودینامیک قطار قبل از ورود به تونل و مقدار آن که در داخل تونل می‌تواند براساس قانون دوم نیوتن به‌دست آید. نتایج نشان می‌دهد که ضریب پسای آیرودینامیک قطار قبل از ورود به تونل به‌سختی در موقعیت‌های مختلف تغییر می‌کند که می‌تواند ثابت در نظر گرفته شود، اما با عبور قطار از تونل، مقدار آن کاهش می‌یابد. این پدیده در درجه اول توسط جریان هوای گذرا در داخل تونل ایجاد می‌شود. مقایسه‌هایی با شبیه‌سازی عددی تأییدشده انجام شده و توافق خوبی با اختلاف کمتر از ۷ درصد حاصل شده است که این بدان معنی است که روش حالت متحرک ارائه‌شده در این پژوهش امکان‌پذیر و قابل‌اعتماد است.

لی و همکاران [۲۲]، بررسی زاویه حمله جریان هوا در عملکرد آیرودینامیک ناپایدار یک قطار تندرو را در برابر باد مخالف انجام دادند. همچنین، نیروهای آیرودینامیک و میدان‌های جریان متوسط و لحظه‌ای به طور متوسط مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، با افزایش زاویه حمله جریان باد، عدم تقارن میدان جریان و شدت گردابه افزایش می‌یابد. همچنین، ضرایب آیرودینامیک متوسط زمانی و نوسانات آن‌ها با افزایش زاویه حمله افزایش خواهد یافت.

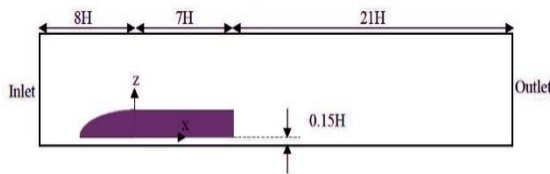
لی و همکاران [۲۳] یک قطار تندروی مدل را در نظر گرفته و با استفاده از اثر شبه‌رینولدز، ساختار آیرودینامیک را برای جریان باد مخالف بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش بیش‌ازحد جریان در نزدیکی شانه قطار باعث اثر شبه رینولدز روی ساختارهای آیرودینامیک جریان می‌شود. رشیدی و همکاران [۲۴]، یک مرور کلی روی مهم‌ترین



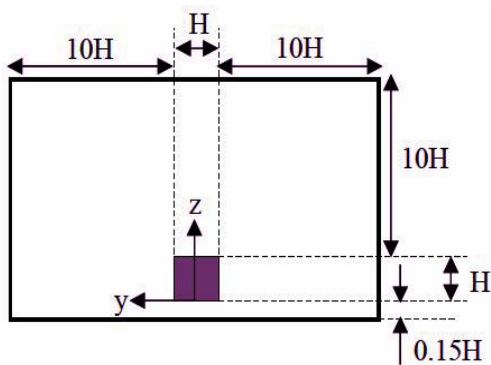
شکل ۱- هندسه قطار استفاده شده در پژوهش، آ: نمای جانبی، ب: نمای ایزومتریک

## ۲-۲- دامنه محاسباتی

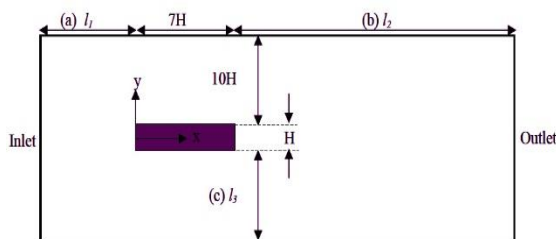
همان طور که در شکل های (۲) تا (۴) مشخص است، دامنه محاسباتی که قطار در آن قرار گرفته است به صورت طول و عرض و ارتفاع  $11/15H \times 21H \times 36H$  بوده که قطار  $0/15H$  بالاتر از سطح زمین قرار دارد. فاصله ابتدای دامنه محاسباتی تا ابتدای قطار  $8H$  و فاصله انتهای دامنه محاسباتی تا انتهای قطار  $21H$  می باشد. همچنین قطار از هر سمت جانبی دامنه محاسباتی  $10H$  فاصله دارد.



شکل ۲- نمای جانبی دامنه محاسباتی



شکل ۳- نمای روبرویی دامنه محاسباتی



شکل ۴- نمای بالایی دامنه محاسباتی

مرزهای علم و فناوری و در زندگی روزمره ما نقش بسیار مهمی ایفا می کنند. به کارگیری ماشین ها با استفاده از الگوهای مکان - زمان در تعیین کمیت دقیق جریان سیال و استفاده همزمان با روش های سنتی محاسبات مشخصات سیال، نتایج دقیق تر و کاربردی تری را ارائه می دهد. جریان های آشفته به طور کلی فیزیک چندمقیاسی (مکانی و زمانی) را به نمایش می گذارند که دارای ابعادی بالا با ساختارهای متناوب چرخشی و انتقالی هستند. چنین داده هایی فرصتی را برای شبکه عصبی فراهم می کنند تا در مدل سازی و تجزیه و تحلیل جریان های آشفته سهیم باشند. در آینده، شبکه های عصبی تقریباً در مدل سازی سیستم های پیچیده با ابعاد بالا مانند جریان های آشفته تأثیر تحول آفرین خواهند داشت. موفقیت در بسیاری از مجموعه های داده پیچیده، پژوهشگران را وادار می کند تا از این ابزار تجزیه و تحلیل داده ها که به سرعت در حال پیشرفت است، برای بهبود قابلیت های پیش بینی استفاده کنند. شبکه های عصبی مانند یک تغییر الگوی جامعه هستند. از آنجایی که بسیاری از نوآوری ها از نمونه های قابل تفسیر فیزیکی الهام گرفته شده اند، شبکه های عصبی با ساخت موتورهای پیش بینی که به سادگی از روش های رقابتی بهتر عمل می کنند، این مفهوم سنتی را به چالش کشیده اند. بنابراین، با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی پیش روی چندلایه، مقادیر به دست آمده از تحلیل و شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه و پیش بینی شده اند و مقادیر ناپیوستگی نقاط مورد نظر، به صورت پیوسته بررسی شده اند. بررسی همزمان اثر زاویه حمله جریان هوا و سرعت باد روی مؤلفه های آیرودینامیک و ضرایب فشار و همچنین استفاده از روش های الگوریتمی از نوآوری های پژوهش حاضر می باشد.

## ۲- شبیه سازی عددی

### ۲-۱- هندسه

در این پژوهش یک قطار تندروی نمونه ساده شده عمومی است که در بسیاری از مقالات مانند [۱۷] مورد استفاده قرار گرفته است، شبیه سازی شده است. هندسه این قطار در شکل (۱) نشان داده شده است. دماغه قطار بیضی شکل می باشد. طول، عرض و ارتفاع قطار به ترتیب  $7H$ ،  $H$  و  $H$  می باشد که اندازه  $H = 0/56m$  است.

که در آن،  $\Delta A_i$  و  $\Delta V_i$  به ترتیب سطح و حجم سلول  $i$ ام و  $N$  تعداد سلول‌های به کار رفته در محاسبات می‌باشد. برای کاهش بیشتر هزینه‌های محاسباتی از توابع دیواره در سلول‌های نزدیک سطح استفاده می‌شود. فاصله لایه سلول اول تا سطح قطار ( $y^+$ ) که بهتر است بین ۳۰ تا ۳۰۰ قرار گیرد که در مطالعه حاضر حدود ۸۰ تا ۹۰ می‌باشد.

جدول ۱- مؤلفه‌های شبکه دامنه محاسباتی

نمونه	شبکه درشت	شبکه ریز
تعداد کل سلول‌ها	۷۸۰،۵۰۵	۳،۴۵۶۷۸۸
اندازه سلول، $h_{ave}$	۰/۱۳۶۱	۰/۰۷۸۸۶
متوسط $y^+$	۹۸/۴	۸۳/۷
نسبت اصلاح	۱/۴	۱/۴

#### ۴-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی تعریف‌شده برای این مسئله به صورت زیر می‌باشد: یک جریان یکنواخت،  $U_\infty$ ، که سرعت جریان آزاد را در جهت  $x$  تعریف می‌کند به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. مرز جریان آزاد برای خروجی، مرزهای بالا و مرزهای جانبی در نظر گرفته شده است. برای زمین و بدنه قطار هم مرز دیوار در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر زیر برای دیگر مشخصات جریان هوا طبق جدول ۲ استفاده شده است:

جدول ۲- مشخصات هندسی و جریان هوا

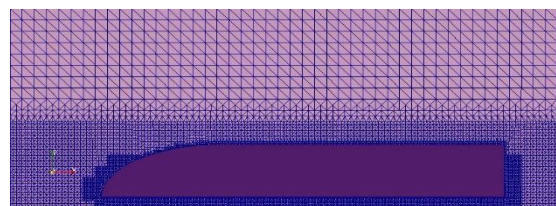
ردیف	مشخصات	مقادیر
۱	$H$	۰/۵۶ m
۲	سرعت آزاد، $U_\infty$	۵۰ تا ۹۰ متر بر ثانیه
۳	ویسکوزیته سینماتیک	$1/5 \times 10^{-5}$ متر مربع بر ثانیه
۴	عدد رینولدز، $Re$	$1/9 \times 10^6$ تا $3/4 \times 10^6$

#### ۵-۲- روش حل و معادلات حاکم

جریان هوای اطراف قطار تندروی این پژوهش به صورت یک جریان سه‌بعدی، غیرقابل تراکم و آشفته توسط معادلات رینولدز ناویر-استوکس حل شده است. با توجه به اینکه رینولدز در ناحیه آشفته قرار دارد، آشفتگی به روش  $k-\omega$  (SST) شبیه‌سازی شده است. روش حل معادلات رینولدز متوسط ناویر-استوکس یک روش متوسط زمانی برای توصیف جریان سیال می‌باشد که در آن مقادیر لحظه‌ای با مقادیر میانگین و نوسانی جایگزین می‌شوند. بر این اساس،

#### ۳-۲- شبکه‌بندی

شبکه موجود در دامنه محاسباتی با استفاده از یک ساختار دکارتی<sup>۱</sup> غیریکنواخت ساختاری با استفاده از ابزار blockMesh که از ابزارهای اصلی نرم‌افزار OpenFOAM می‌باشد، طراحی شده است. به منظور بررسی نتایج و تأثیر ساختار گردابه نزدیک به دیواره قطار و همچنین افزایش صحت شبیه‌سازی عددی، دو شبکه محاسباتی مختلف طراحی شده است: یک شبکه با گره‌های درشت و دیگری با گره‌های ریز. نوع شبکه‌بندی اطراف قطار و به‌ویژه نزدیک سطح آن به صورت شش‌وجهی<sup>۲</sup> بوده و به منظور کاهش حجم محاسبات در CPU، شبکه‌بندی در ناحیه‌های دورتر از قطار به صورت چهاروجهی<sup>۳</sup> طراحی شده است. این اختلاف بین میزان گره‌ها در شبکه‌ها توسط ضریب نسبت اصلاح شبکه،  $r$ ، مشخص می‌شود. با توجه به پژوهش انجام‌شده در مطالعه [۲۵]، این ضریب بهتر است بزرگ‌تر از ۱/۳ باشد که در مطالعه حاضر ۱/۴ در نظر گرفته شده است (معادله ۱). از آنجایی که شبکه یکنواخت نیست، نسبت اصلاح شبکه با توجه به اندازه شبکه متوسط ( $h_{ave}$ ) تعیین می‌شود که در معادلات ۲ و ۳ آمده است. جزئیات بیشتر وضوح شبکه را می‌توان در جدول ۱ ملاحظه کرد. اصلاح شبکه در نزدیکی سطح قطار و مناطق اطراف آن با استفاده از ابزار تولید شبکه SnappyHexMesh، که آن هم توسط نرم‌افزار OpenFOAM تهیه شده است، اعمال می‌شود.



شکل ۵- شبکه‌بندی نزدیک به دیواره اطراف قطار تندرو

$$r = \frac{h_{ave}(\text{شبکه درشت})}{h_{ave}(\text{شبکه ریز})} \quad (1)$$

$$h_{ave} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta A_i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$h_{ave} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

<sup>3</sup> Tetrahedral<sup>1</sup> Cartesian<sup>2</sup> Hexahedral

$$v_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega \text{ and } SF_2)} \quad (13)$$

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y} \text{ and } \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (14)$$

$$P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \text{ and } 10\beta^* k \omega \right) \quad (15)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y} \text{ and } \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right] \right\}^4 \text{ and } \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right\} \quad (16)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \text{ and } 10^{-10} \right) \quad (17)$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \quad (18)$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9} \quad \alpha_2 = 0.44 \quad (19)$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40} \quad \beta_2 = 0.0828 \quad \beta^* = \frac{9}{100} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{k1} &= 0.85, \\ \sigma_{k2} &= 1, \\ \sigma_{\omega 1} &= 0.5, \\ \sigma_{\omega 2} &= 0.856 \end{aligned} \quad (21)$$

مهم ترین ضرایب آیرودینامیک برای شبیه سازی جریان هوا یعنی ضرایب برآ، پسا، و جانبی باتوجه به سرعت جریان هوا و مساحت سطوح در جهتهای مختلف به صورت زیر تعریف می شوند:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A_L} \quad (22)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A_D} \quad (23)$$

$$C_S = \frac{F_S}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A_S} \quad (24)$$

که در آن ها،  $F_L$ ،  $F_D$  و  $F_S$  به ترتیب نیروهای برآ، پسا و جانبی بوده و  $A_S$  و  $A_L$ ،  $A_D$  مساحت قطار در جهتهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  می باشند. همچنین، ضریب فشار به صورت زیر تعریف

معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به صورت زیر است [۳۰-۳۲]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \\ - \frac{\partial p_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

همچنین، مؤلفه های سرعت و فشار به دو بخش میانگین و نوسانی تقسیم می شوند:

$$u_i = U_i + u'_i \quad (6)$$

$$p_i = P_i + p'_i \quad (7)$$

با جایگذاری در معادلات بالا، معادلات رینولدز متوسط ناویر-استوکس به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

همچنین، مفهوم آشفتگی برای نمونه به کاررفته به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} -\rho \overline{u'_i u'_j} = \\ \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \end{aligned} \quad (10)$$

انرژی جنبشی آشفته و نرخ اتلاف ویژه هم به ترتیب به صورت زیر می باشند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \\ P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \\ \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_{\omega} v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ 2(-F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (12)$$

به‌طور مستقیم به گیرنده لایه خروجی،  $Z_1$  و  $Z_2$  متصل می‌شوند.

از طریق این ارتباط بین شبکه‌های عصبی تک لایه و هم‌پوشانی خطی و منطقی، شبکه‌های عصبی تک لایه گاهی به جای هم‌پوشانی خطی و منطقی استفاده می‌شوند. پیچیده‌ترین شبکه عصبی یکی با دو لایه است. از این لایه اضافی به عنوان یک لایه پنهان یاد می‌شود. به‌طور کلی محدودیتی در تعداد لایه‌های پنهان وجود ندارد. اگرچه، از نظر ریاضی نشان داده شده است که یک شبکه عصبی دو لایه دقیقاً می‌تواند عملکردهای قابل تشخیص را احیا کند، اما تعداد گیرنده‌های موجود در لایه پنهان نامحدود است.

اما افزایش تعداد گیرنده‌ها باعث افزایش تعداد وزنی می‌شود که باید در شبکه ارزیابی شود و به‌نوبه خود زمان اجرای شبکه را افزایش می‌دهد. به جای افزایش تعداد گیرنده‌های موجود در لایه‌های پنهان برای اصلاح دقت، گاهی بهتر است لایه‌های پنهان دیگری اضافه شود، که به‌طور معمول هم تعداد کل زمان محاسبات و هم وزن شبکه را کاهش می‌دهد. با این حال، در عمل دیدن شبکه‌های عصبی با بیش از دو یا سه لایه پنهان غیرمعمول به‌نظر می‌رسد. در این شبکه، تابع  $\text{trainlm}$  به‌عنوان تابع آموزش استفاده شده است. این تابع آموزش وزن مقادیر را به‌روز کرده و آن‌ها را با توجه به بهینه‌سازی Levenberg-Marquardt پیش‌بینی می‌کند. الگوریتم Levenberg-Marquardt (LM) معمولاً یک الگوریتم آموزشی است که سریع‌ترین الگوریتم انتشار پس‌رو می‌باشد؛ اگرچه به حافظه بیشتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر نیاز دارد. تابع عملکرد شبکه که استفاده می‌شود میانگین مربع خطا است. این تابع عملکرد شبکه را با توجه به میانگین خطاهای مربع عملکرد اندازه‌گیری می‌کند. همچنین خطای میانگین مربع عملکرد شبکه با توجه به میانگین خطاهای مربع اندازه‌گیری می‌شود. این میانگین مربعات تفاوت بین مشاهدات واقعی و پیش‌بینی شده است.

بر اساس توضیحات بالا، شبکه مورد استفاده در مقاله حاضر در جدول ۳ آمده است. علاوه بر این، زاویه حمله باد (درجه) و سرعت باد (متر بر ثانیه) به عنوان ضریب ورودی و فشار، نیروهای برآ، پسا و جانبی به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شوند.

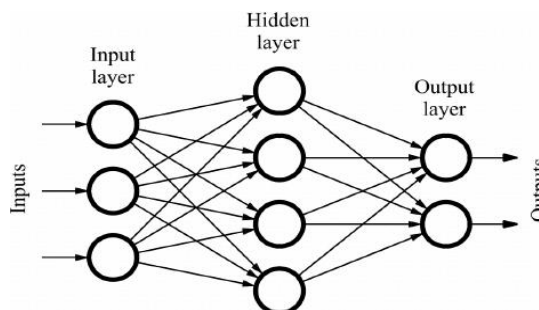
می‌شود:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (25)$$

که در آن،  $P_\infty$ ،  $U_\infty$  و  $\rho$  به ترتیب فشار و سرعت جریان آزاد هوا و چگالی هوا می‌باشند.

## ۲-۵- الگوریتم شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه

الگوریتم شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه از مهم‌ترین انواع شبکه‌های عصبی می‌باشد [۳۳]. این نوع شبکه‌های عصبی، که با الگوریتم یادگیری انتشار مجدد آموزش دیده‌اند، محبوب‌ترین شبکه‌های عصبی هستند [۳۴]. یک شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه شامل سلول‌های عصبی است که درون لایه‌ها قرار گرفته‌اند (شکل ۶). لایه اول، آخرین لایه و لایه بین آن‌ها به ترتیب لایه‌های ورودی، خروجی و پنهان نام دارند [۳۴]. هر لایه شامل تعدادی نورون<sup>۱</sup> (عناصر پردازش ریاضی) است. با این حال، سلول‌های عصبی در هر لایه به یکدیگر متصل نیستند (به عنوان مثال سلول‌های عصبی لایه پنهان به یکدیگر متصل نمی‌شوند)، هر نورون در لایه ورودی توسط مسیرهای اتصال به همه سلول‌های عصبی در لایه میانی زیر متصل می‌شود. به همین ترتیب هر نورون در لایه میانی توسط مسیرهای اتصال به نورون منفرد در لایه خروجی پیوند می‌یابد [۳۳]. هر نورون می‌تواند یک ورودی واحد یا مجموعه‌ای از ورودی‌ها را به‌دست آورد، علاوه بر این، فقط یک خروجی واحد تولید می‌کند. در مورد این نوع شبکه عصبی، اطلاعات پشت‌سرهم فقط در جهت رو به جلو، یعنی از لایه ورودی از طریق لایه میانی به لایه خروجی جریان می‌یابد. مسیرهای ارتباطی وسیله‌ای برای انتقال اطلاعات در بین لایه‌های پیوسته است [۳۳].



شکل ۶- یک شبکه عصبی پیش‌روی معمولی سه‌لایه

در شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه، ورودی‌های شبکه

<sup>1</sup> Neuron



همکاران [۱۶] انجام شده است. (البته، هندسه مورد استفاده در پژوهش ژوانگ و همکاران [۱۶] با هندسه مورد استفاده در این پژوهش تقریباً یکسان بوده و یک اختلاف بسیار جزئی دارد. در [۱۶] فقط ضرایب آیرودینامیک پسا و جانبی محاسبه شده است. همچنین استفاده از الگوریتم شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه در پیش‌بینی و مقایسه مقادیر به‌دست آمده، از دیگر امتیازات این مطالعه با پژوهش [۱۶] می‌باشد). نتایج مقایسه برای سرعت ۲۰ متر بر ثانیه در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین کمترین و بیشترین مقدار اختلاف بین این نتایج به ترتیب حدود یک تا ۱۶ درصد است.

جدول ۴- مقایسه مقادیر میانگین آیرودینامیک بین مطالعه حاضر و پژوهش [۱۶] در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه

پژوهش [۱۶]		پژوهش حاضر		زاویه حمله (درجه)
ضریب جانبی	ضریب پسا	ضریب جانبی	ضریب پسا	
۰/۴۲۴	۰/۱۳۶	۰/۴۰۷	۰/۱۱۳	۳۰
۱/۰۲۹	۰/۱۶۱	۱/۰۴۲	۰/۱۷۰	۶۰

### ۳-۲- مؤلفه‌های جریان

کاملاً واضح است که زوایای حمله حرکت باد تأثیر قابل‌توجهی در جریان و رفتار آن بر قطار تندرو دارند. در این بخش، تأثیر تغییر زوایای حمله حرکت باد بر روی مؤلفه‌های اصلی جریان مانند خطوط جریان، فشار و میدان سرعت به طور خلاصه نشان داده شده است.

خطوط جریان سه‌بعدی جریان هوای آشفته اطراف قطار تندروی مدنظر در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، شکل دماغه قطار تأثیر زیادی بر ساختار جریان دارد. دماغه قطار موجب ایجاد گردابه در جهت مثبت  $x$  می‌شود. همچنین، در شکل (۸) خطوط جریان سطحی اطراف قطار برای زوایای حمله مختلف جریان هوا نشان داده شده است. در مجموع، شکل‌های (۷) و (۸) خطوط جریان روی سطح و اطراف قطار تندروی مدنظر را برای چهار زاویه حمله مختلف صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه را به تصویر کشیده است.

شکل (۹) و (۱۰)، توزیع فشار و سرعت دوبعدی در اطراف قطار تندروی مدنظر را برای زوایای حمله مختلف حرکت باد (برای زوایای صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) نشان می‌دهد. بیشینه و کمینه مقادیر فشار و سرعت دوبعدی به‌طور واضح مشخص است. بر این اساس، جلو و عقب قطار بیشترین و

جدول ۳- مشخصات شبکه عصبی استفاده این پژوهش

۱	تعداد لایه‌های پنهان
۲۰	تعداد نورون‌ها
tansig خطی	تابع انتقال
trainlm	تابع آموزش
۲۰۰۰	تعداد تکرارها
$1 \times 10^{-5}$	مقدار خطا
٪۷۰	درصد آموزش
٪۱۵	درصد اعتبارسنجی
٪۱۵	درصد آزمون

بر این اساس داده‌های به‌دست آمده، نتایج پیش‌بینی نیروهای برآ، پسا و جانبی به ترتیب زیر است. نیروهای آیرودینامیک برای دو فاصله بزرگ سرعت (۵۰ تا ۹۰ متر بر ثانیه) و جهت باد (صفر تا ۶۰ درجه) به طور همزمان پیش‌بینی شده‌اند. در واقع، با استفاده از شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه، ما یک عملکرد عددی برای به‌دست آوردن نیروهای آیرودینامیک برای هر مقادیر سرعت و جهت باد (البته در محدوده تعریف) خواهیم داشت. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از سه مؤلفه آماری خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE)، ضریب هم‌پوشانی (R) و میانگین خطای مربع (MSE) استفاده شده است که این مؤلفه‌ها به شرح زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (26)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (27)$$

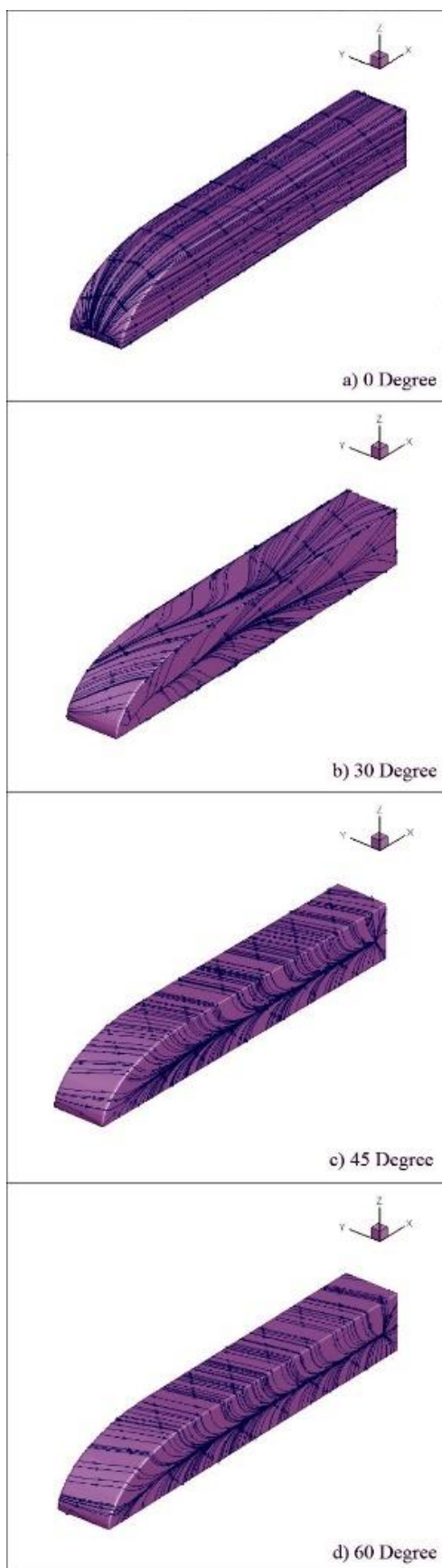
$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (28)$$

که در آن،  $x_i$ ،  $y_i$ ،  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  به ترتیب داده‌های مشاهده‌شده، داده‌های پیش‌بینی‌شده، میانگین داده‌های مشاهده‌شده، میانگین داده‌های پیش‌بینی‌شده و تعداد داده‌ها می‌باشند.

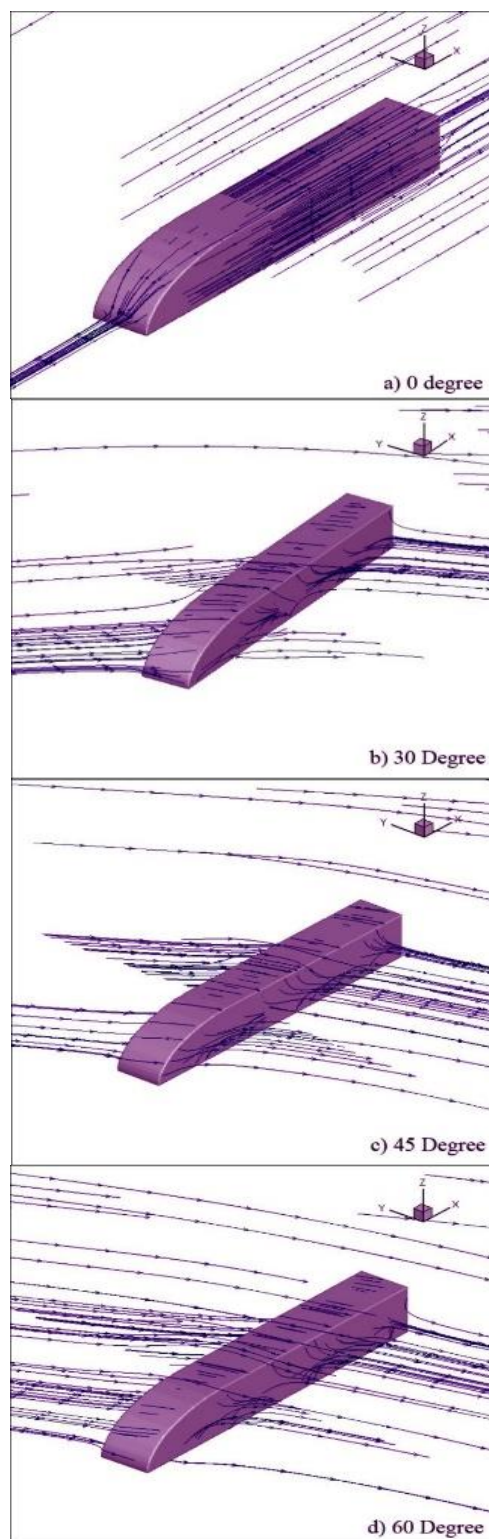
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت و اعتبار نتایج حاصل، مقایسه تقریبی بین نتایج پژوهش حاضر و پژوهش ژوانگ و

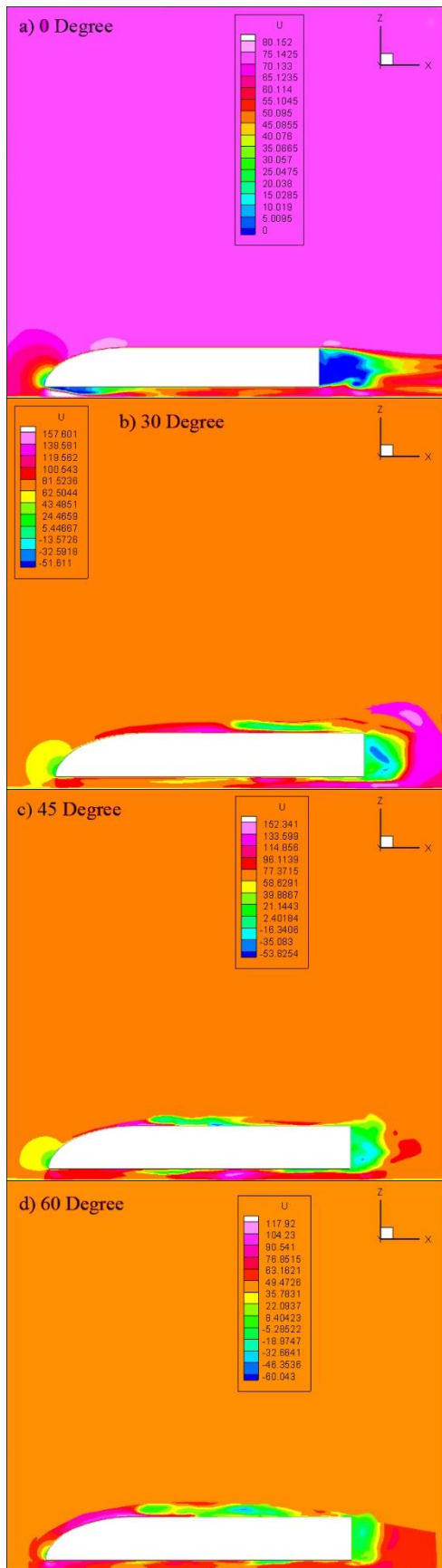


شکل ۸- خطوط جریان سطحی اطراف قطار برای زوایای حمله مختلف جریان هوا با سرعت ۷۰ متر بر ثانیه

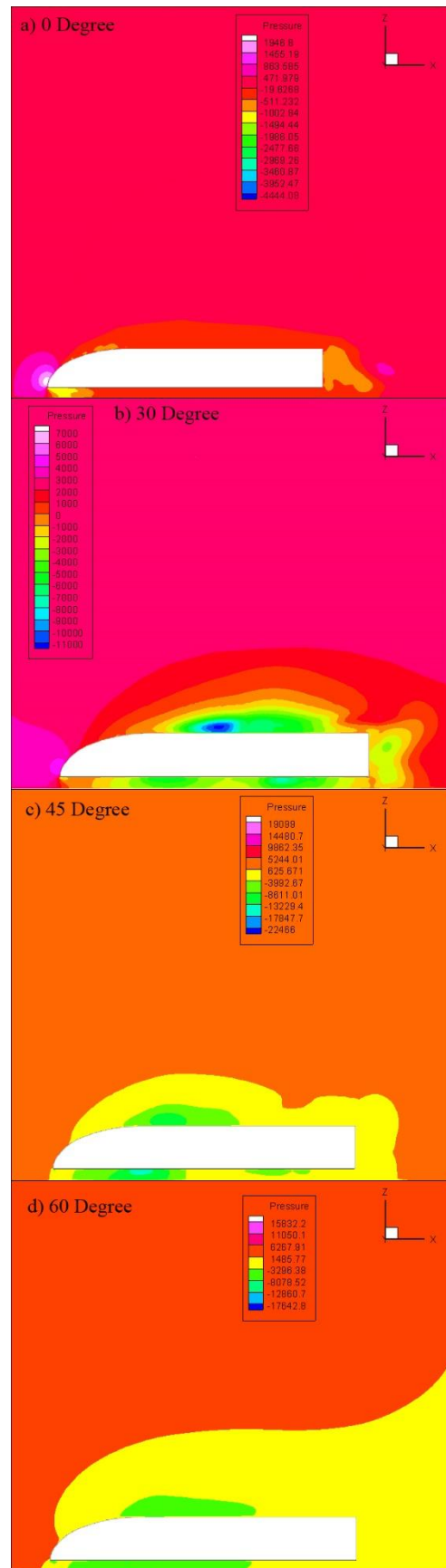


شکل ۷- خطوط جریان سه‌بعدی اطراف قطار برای زوایای حمله مختلف جریان هوا با سرعت ۷۰ متر بر ثانیه

کمترین فشار را دارا می‌باشد. همچنین، نزدیک به بدنه قطار سرعت افزایش می‌یابد و برعکس دور از آن، مقدار آن کمتر می‌شود. همچنین شکل‌های (۷) تا (۱۰)، برای سرعت جریان هوای ۷۰ متر بر ثانیه رسم شده‌اند.



شکل ۱۰- توزیع سرعت دویبعدی در اطراف قطار تندرو برای زوایای مختلف حمله باد با سرعت ۷۰ متر بر ثانیه



شکل ۹- توزیع فشار دویبعدی در اطراف قطار تندرو برای زوایای مختلف حمله باد با سرعت ۷۰ متر بر ثانیه

## ۳-۳- مؤلفه‌های آیرودینامیک

نیروهای برآ، پسا و جانبی مهم‌ترین مؤلفه‌های آیرودینامیک برای شبیه‌سازی جریان در اطراف بدنه اجسام به‌عنوان مثال یک قطار تندرو هستند. بنابراین، نیروهای موجود در قطار تندرو برای زوایای مختلف حرکت باد، شبیه‌سازی می‌شوند. معادلات نیروهای برآ، پسا و جانبی با جزئیات در پژوهش ژوانگ و همکاران [۱۶] توضیح داده شده است.

در ادامه، جدول ۵ ضرایب پسا، برآ و جانبی را برای زوایای حمله باد (صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) و برای سرعت ۷۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. بر این اساس، با افزایش زاویه حمله، ضریب برآ به‌میزان ۱/۵ تا ۲/۶ برابر، ضریب پسا به‌میزان ۱/۳ تا ۲/۶ برابر و ضریب جانبی به‌میزان ۱/۱ برابر افزایش می‌یابد.

همچنین در جدول ۶، سه مؤلفه فشار یعنی مقدار کمینه، بیشینه و متوسط برای زوایای حمله یادشده نشان داده شده و باهم مقایسه شده‌اند. بنابراین، مقدار عددی ضریب کمینه فشار به‌میزان ۱/۱ تا ۲/۶ برابر و مقدار عددی ضریب بیشینه فشار به‌میزان ۱ تا ۲/۹ برابر با افزایش زاویه حمله، افزایش می‌یابد. همچنین، بیشترین مقدار مؤلفه بیشینه فشار در زاویه ۶۰ درجه اتفاق می‌افتد.

جدول ۵- ضرایب نیروی آیرودینامیک برای زوایای مختلف حرکت باد برای سرعت ۷۰ متر بر ثانیه

زاویه حمله (درجه)	ضریب برآ	ضریب پسا	ضریب جانبی
صفر	۰/۳۴	۰/۴۸	۰/۰۱
۳۰	۰/۹۰	۰/۷۱	۲/۱۵
۴۵	۱/۰۶	۰/۹۳	۲/۶۱
۶۰	۱/۶۳	۱/۴۲	۳/۰۲

جدول ۶- کمینه، بیشینه و مقدار متوسط ضریب فشار برای زوایای مختلف حرکت باد برای سرعت ۷۰ متر بر ثانیه

زاویه حمله (درجه)	ضریب فشار کمینه	ضریب فشار بیشینه	ضریب فشار متوسط
صفر	-۱/۹۱	۰/۹۸	-۰/۱۰
۳۰	-۴/۱۰	۲/۸۸	-۰/۰۳
۴۵	-۶/۷۲	۴/۵۶	-۰/۴۰
۶۰	-۸/۰۷	۴/۶۶	-۰/۳۳

در این بخش، دو مقایسه روی مؤلفه‌های آیرودینامیک برای تغییرات سرعت جریان هوا (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ متر بر ثانیه) و به‌دنبال آن، تغییرات عدد رینولدز ( $1/9 \times 10^6$ )،

۲/۲×۱۰<sup>۶</sup>، ۲/۶×۱۰<sup>۶</sup>، ۳/۰×۱۰<sup>۶</sup> و ۳/۴×۱۰<sup>۶</sup> انجام شده است. در جدول ۷، ضرایب آیرودینامیک برآ، پسا و جانبی برای تغییرات سرعت جریان هوا آمده است که بر این اساس، با افزایش سرعت، نیروهای آیرودینامیک به‌دنبال آن افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت مقدار ضریب برآ به‌میزان ۱/۱۵ تا ۱/۲۷، مقدار ضریب پسا به‌میزان ۱/۱۰ تا ۱/۲۶ و مقدار ضریب جانبی به‌میزان ۱/۱۲ تا ۱/۵۰ افزایش می‌یابد. درنهایت، سه مؤلفه فشار یعنی مقدار کمینه، بیشینه و متوسط برای تغییرات سرعت یادشده در جدول ۸ نشان داده شده و باهم مقایسه شده‌اند. مقدار عددی ضریب کمینه فشار به‌میزان ۱/۲۶ تا ۱/۵۰ و مقدار عددی ضریب بیشینه فشار به‌میزان ۱/۲۶ تا ۱/۴۴ افزایش می‌یابد. به‌همین ترتیب، بیشترین مقدار مؤلفه بیشینه فشار در ۹۰ متر بر ثانیه درجه اتفاق می‌افتد.

جدول ۷- ضرایب نیروی آیرودینامیک برای تغییرات سرعت حرکت باد

سرعت باد (متر بر ثانیه)	ضریب برآ	ضریب پسا	ضریب جانبی
۵۰	۰/۲۳	۰/۳۶	۰/۰۱۲
۶۰	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۰۱۸
۷۰	۰/۳۶	۰/۴۸	۰/۰۲۱
۸۰	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۰۲۴
۹۰	۰/۵۳	۰/۶۹	۰/۰۲۷

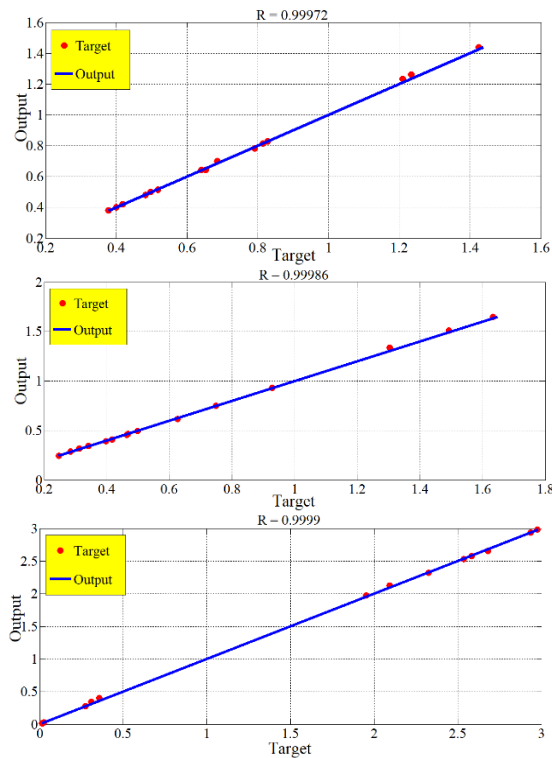
جدول ۸- کمینه، بیشینه و مقدار متوسط ضریب فشار برای تغییرات سرعت حرکت باد

سرعت باد (متر بر ثانیه)	ضریب فشار کمینه	ضریب فشار بیشینه	ضریب فشار متوسط
۵۰	-۰/۹۷	۰/۵۰	-۰/۰۵
۶۰	-۱/۴۰	۰/۷۲	-۰/۰۶
۷۰	-۱/۹۱	۰/۹۸	-۰/۱۰
۸۰	-۲/۵۰	۱/۲۹	-۰/۱۳
۹۰	-۳/۱۶	۱/۶۳	-۰/۱۷

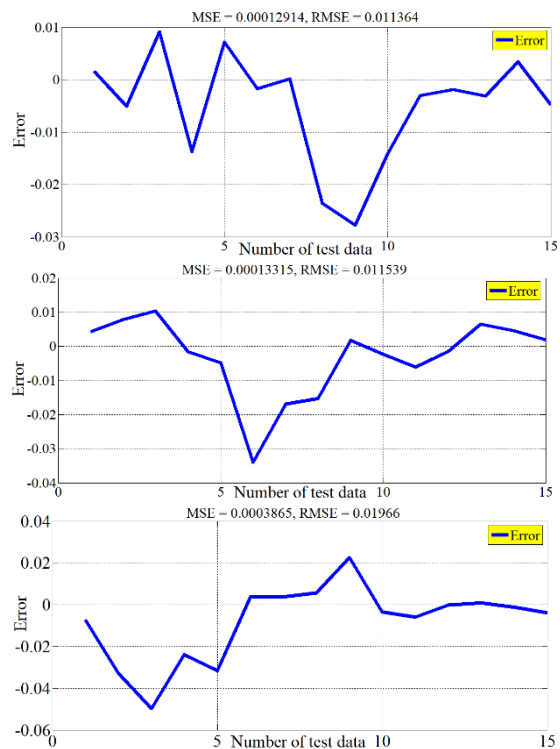
## ۳-۴- مؤلفه‌های شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه

برای تخمین اهداف در این مطالعه از یک شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه استفاده شده است. این شبکه با الگوریتم آموزش داده‌ها آموزش داده شده است. آزمایشات مختلفی با استفاده از تعداد زیادی نورون در لایه پنهان انجام شد. نتایج به‌دست آمده تعداد نورون‌های موجود در لایه پنهان و نوع الگوریتم آموزش داده‌ها می‌تواند برای کشف بیشترین

دارد و ضرایب هم‌پوشانی به‌ترتیب برای همه داده‌ها ۰/۹۹۹۷۲، ۰/۹۹۹۸۶ و ۰/۹۹۹۹۰ است.

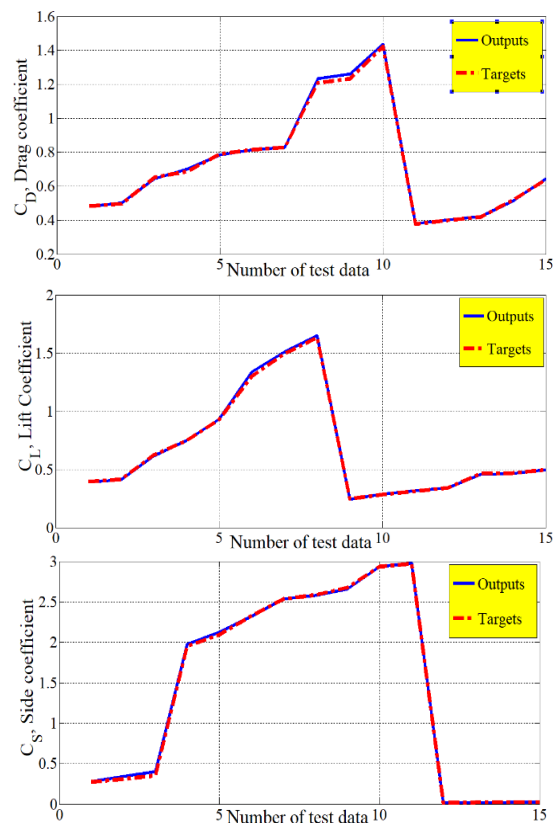


شکل ۱۲- هم‌پوشانی شبکه برای پیش‌بینی نیروهای پسا، برآ و جانبی برای مقادیر ورودی (جهت باد و سرعت)



شکل ۱۳- خطاهای شبکه برای پیش‌بینی نیروهای پسا، برآ و جانبی برای مقادیر ورودی (جهت باد و سرعت)

بهره‌وری برای رویکرد گسترش‌یافته کمک کند. بهترین عملکرد با ۲۰ نرون در لایه پنهان به‌دست آمده است. بر اساس توضیحات بالا، در سه نمودار بعدی، پیش‌بینی شبکه عصبی مورد استفاده برای ضرایب پسا، برآ و جانبی نشان داده شده است. شکل (۱۱) مرحله آزمایش مدل را نشان می‌دهد که به‌ترتیب مقادیر ضرایب آیرودینامیک پسا، برآ و جانبی را پیش‌بینی می‌کند. همچنین ارقام نشان می‌دهد پیش‌بینی ضرایب آیرودینامیک با مدل شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه به‌خوبی با داده‌های هدف متناسب است و میزان اختلاف بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است، اندک است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. کمترین و بیشترین مقدار اختلاف داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده به‌میزان ۱ تا ۴ درصد می‌باشد.



شکل ۱۱- ضرایب آیرودینامیک پسا، برآ و جانبی واقعی و پیش‌بینی‌شده (برای مقادیر ورودی جهت باد و سرعت)

همچنین، شکل (۱۲) هم‌پوشانی پیش‌بینی عددی را نشان می‌دهد. این نمودارها ارتباط بین اهداف و خروجی برای کلیه داده‌ها را نشان می‌دهد. این مدل بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی ضرایب آیرودینامیک یعنی پسا، برآ و جانبی

جدایش‌های جریان مشخص شده است. میدان‌های دوبعدی فشار و سرعت برای مقادیر مختلف زاویه حمله به تصویر کشیده شده است. بر این اساس، محل بیشترین و کمترین مقادیر فشار و سرعت به‌وضوح مشخص شده است. در ادامه، ضرایب آیرودینامیک پسا، برآ و جانبی و همچنین مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط ضریب فشار برای زوایای حمله مختلف جریان هوا و همچنین همین مؤلفه‌ها برای تغییرات سرعت هوا به‌صورت جداگانه تعیین شده است. در این بخش نیز بیشترین و کمترین مقدار مؤلفه‌ها برآورد شده است. بر این اساس، با افزایش زاویه حمله، مقادیر ضرایب آیرودینامیک و ضرایب فشار به‌میزان حدود  $1/1$  تا  $2/9$  برابر افزایش یافته است. همچنین، مقادیر ضرایب آیرودینامیک و ضرایب فشار با افزایش سرعت نیز به‌میزان  $1/1$  تا  $1/5$  برابر افزایش یافته‌اند. در بخش دوم این پژوهش، الگوریتم شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه برای پیش‌بینی مقادیر مؤلفه‌های آیرودینامیک این پژوهش به‌کارگیری شده است. بدین منظور، این الگوریتم، مقادیر نیروهای آیرودینامیک پسا، برآ و جانبی برای تغییرات زاویه حمله و سرعت جریان هوای یادشده به‌طور جداگانه پیش‌بینی شده و با مقادیر حاصل از تحلیل آیرودینامیک بخش اول مقایسه شده‌اند. همچنین، خطای میانگین مربعات متوسط و میانگین خطای مربع برای نمونه‌های مدنظر مشخص شده است. نتایج به‌دست آمده از الگوریتم شبکه عصبی نشان می‌دهد پیش‌بینی ضرایب آیرودینامیک با مدل شبکه عصبی پیش‌روی چندلایه به‌خوبی با داده‌های هدف متناسب است و میزان اختلاف بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده در بیشترین مقدار خود کمتر از ۴ درصد می‌باشد که قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

علاوه بر این، خطاهای پیش‌بینی عددی به ترتیب در شکل (۱۳) برای نیروهای پسا، برآ و جانبی نشان داده شده است که خطای میانگین مربعات متوسط و میانگین خطای مربع یعنی MSE و RMSE به‌ترتیب برای هر مورد مشخص شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

از آنجایی که شناسایی، اندازه‌گیری و کاهش نیروهای مخالف و مزاحم در برابر حرکت وسایل نقلیه تندرو به‌ویژه قطارهای تندرو بسیار حائز اهمیت می‌باشد، بررسی نیروهای آیرودینامیک در حرکت یک قطار تندرو در برابر جریان هوای آشفته موضوع جالب و چالش‌برانگیزی خواهد بود.

در این پژوهش، حرکت یک قطار تندروی عمومی در برابر جریان آشفته هوای شبیه‌سازی شده است. یک قطار تندروی نمونه برای شبیه‌سازی جریان هوای آشفته، غیرقابل تراکم و سه‌بعدی اطراف آن به‌کارگیری شده است تا مشخصات جریان هوا و آشفتگی و همچنین مؤلفه‌های کلیدی آیرودینامیک مانند نیروهای پسا، برآ و جانبی برای زوایای حمله مختلف جریان هوا (یعنی صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) و تغییرات سرعت آن (یعنی ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ متر بر ثانیه) به‌صورت جداگانه شبیه‌سازی، تحلیل و مقایسه شد. برای حل این مسئله، در بخش اول این پژوهش یک جریان هوای غیرقابل تراکم آشفته اطراف قطار تندروی مدنظر، با استفاده از روش میان‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و روش آشفتگی ( $k-\omega$  SST)، با به‌کارگیری از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی OpenFOAM شبیه‌سازی شده است. با توجه به نتایج، خطوط سطحی و سه‌بعدی جریان اطراف قطار و همچنین محل گردابه‌ها و

#### مراجع

- [1] N. Paradot, C. Talotte, H. Garem, J. Delville, and J. P. Bonnet, "A Comparison of the Numerical Simulation and Experimental Investigation of the Flow Around a High-Speed Train", ASME 2002 Fluids Engineering Division Summer Meeting Montreal, Quebec, Canada, July 14-18, 2002.
- [2] W. Khier, M. Breuer, and F. Durst, "Numerical Computation of 3-D Turbulent Flow Around High-Speed Trains Under Side Wind Conditions", TRANSAERO - A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation, Vol. 79, 2002, pp. 75-86.
- [3] C. Fauchier, E. Le Devehat, and R. Gregoire, "Numerical study of the turbulent flow around the reduced-scale model of an Inter-Regio", TRANSAERO - A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation, Vol. 79, 2002, pp. 61-74.
- [4] C. H. Shin, and W. G. Park, "Numerical study of flow characteristics of the high-speed train entering into a tunnel", Mechanics Research Communications, Vol. 30, No. 4, July-August 2003, pp. 287-296.

- [5] H. Tian, "Formation mechanism of aerodynamic drag of high-speed train and some reduction measures", *Journal of Central South University of Technology*, Vol.16, No. 1, 2009, pp. 166–171.
- [6] J. Zhao, and R. Li, "Numerical Analysis for Aerodynamics of High-Speed Trains Passing Tunnels", *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains*, Vol. 41, 2009, pp. 239-239.
- [7] S. Krajnović, "Optimization of Aerodynamic Properties of High-Speed Trains with CFD and Response Surface Models", *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains*, Vol. 41, 2009, pp. 197-211.
- [8] X. Li, J. Deng, D. Chen, F. Xie, and Y. Zheng, "Unsteady simulation for a high-speed train entering a tunnel", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, Vol. 12, 2011, pp. 957–963.
- [9] D. Wang, W. Li, W. Zhao, and H. Han, "Aerodynamic Numerical Simulation for EMU Passing Each Other in Tunnel", *Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways*, Vol. 148, 2012, pp. 143-153.
- [10] M. B. Asress, and J. Svorcan, "Numerical investigation on the aerodynamic characteristics of high-speed train under turbulent crosswind", *Journal of Modern Transportation*, Vol. 22, No. 4, 2014, pp. 225–234.
- [11] L. Peng, R. Fei, C. Shi, W. Yang, and Y. Liu, "Numerical Simulation about Train Wind Influence on Personnel Safety in High-Speed Railway Double-Line Tunnel", *Parallel Computational Fluid Dynamics*, Vol. 405, 2014, pp. 553-564.
- [12] Y. Shuanbao, G. Dilong, S. Zhenxu, Y. Guowei, and C. Dawei, "Optimization design for aerodynamic elements of high-speed trains", *Computers & Fluids*, Vol. 95, No. 22, May 2014, pp. 56–73.
- [13] C. R. Chu, S. Y. Chien, C. Y. Wang, and T. R. Wu, "Numerical simulation of two trains intersecting in a tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 42, May 2014, pp. 161–174.
- [14] J. Zhang, G. Gao, T. Liu, and Z. Li, "Crosswind stability of high-speed trains in special cuts", *Journal of Central South University*, Vol. 22, No. 7, 2015, pp. 2849–2856.
- [15] J. A. Morden, H. Hemida and C. J. Baker, "Comparison of RANS and Detached Eddy Simulation Results to Wind-Tunnel Data for the Surface Pressures Upon a Class 43 High-Speed Train", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 137, No. 4, April 2015, pp. 041108.
- [16] Y. Zhuang, and X. Lu, "Numerical investigation on the aerodynamics of a simplified high-speed train under crosswinds", *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, Vol. 5, No. 5, August 2015, pp. 181–186.
- [17] C. Catanzaro, F. Cheli, D. Rocchi, P. Schito, and G. Tomasini, "High-Speed Train Crosswind Analysis: CFD Study and Validation with Wind-Tunnel Tests", *The Aerodynamics of Heavy Vehicles III*, Vol. 79, 2016, pp. 99-112.
- [18] S. Ding, Q. Li, A. Tian, J. Du, and J. Liu, "Aerodynamic design on high-speed trains", *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 32, No. 2, 2016, pp. 215–232.
- [19] T. H. Liu, X. C. Su, and J. Zhang, "Aerodynamic performance analysis of trains on slope topography under crosswinds", *Journal of Central South University*, Vol. 23, No. 9, 2016, pp. 2419–2428.
- [20] A. Premoli, D. Rocchi, P. Schito, and G. Tomasini, "Comparison between steady and moving railway vehicles subjected to crosswind by CFD analysis", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 156, September 2016, pp. 29–40.
- [21] Z. Li, M. Yang, S. Huang, and X. Liang, "A new method to measure the aerodynamic drag of high-speed trains passing through tunnels", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 171, December 2017, pp. 110–120.
- [22] X. Li, D. Zhou, L. Jia, and M. Yang, "Effects of yaw angle on the unsteady aerodynamic performance of the pantograph of a high-speed train under crosswind", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 182, November 2018, pp. 49–60.
- [23] H. Li, X. He, H. Wang, and A. Kareem, "Aerodynamics of a scale model of a high-speed train on a streamlined deck in cross winds", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 91, November 2019, pp. 102717.
- [24] M. M. Rashidi, A. Hajipour, T. Li, Z. Yang, and Q. Q. Li, "A Review of Recent Studies on Simulations for Flow around High-Speed Trains", *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol. 5. No. 2, 2019, pp. 311-333.

[25] A. Hajipour, A. M. Lavasani, and M. E. Yazdi, "Investigation of wall function effects on aerodynamic characteristics of turbulent flow around a simplified high-speed train", *International Journal of Heat and Technology*, Vol. 39, No. 1, 2021, pp. 309-318.

[26] M. Yu, J. Liu, and Z. Dai, "Aerodynamic characteristics of a high-speed train exposed to heavy rain environment based on non-spherical raindrop", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 211, 2021, p. 104532.

[27] W. Li, T. Liu, P. Martinez-Vazquez, Z. Chen, Z. Guo, M. Li, Y. Xia, and H. Liu, "Aerodynamic effects of a high-speed train travelling through adjoining & separated tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 113, 2021, 103973.

[28] E. Deng, W. Yang, X. He, Z. Zhu, H. Wang, Y. Wang, A. Wang, and L. Zhou, "Aerodynamic response of high-speed trains under crosswind in a bridge-tunnel section with or without a wind barrier", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 210, 2021, p. 104502.

[29] F. Tao C. Zhaobo, and W. Zhonglon, "Genetically Aerodynamic Optimization of High-Speed Train Based on the Artificial Neural Network Method", Okada H., Atluri S. (eds) *Computational and Experimental Simulations in Engineering. ICCES 2019. Mechanisms and Machine Science*, Vol. 75, 2020, 1253-1270.

[۳۰] هادی دستورانی و محمدحسن جوارشکیان، «بررسی آیرودینامیکی جریان پتانسیل روی هواپیماهای بال و بدنه یکپارچه»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، سال چهاردهم، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۲۷-۱۴۰.

[۳۱] قاسم حیدری‌نژاد و محمد جدیدی، «شبیه‌سازی نحوه پخش آلودگی در پشت یک ساختمان با استفاده از یک روش RANS-LES»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، سال پانزدهم، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۷-۲۷.

[۳۲] پوریا اکبرزاده و مهسا مصطفوی، «بررسی اثر دمش و مکش از یک یا دو موقعیت روی سطح مکش ایرفویل NACA0012 بر عملکرد آیرودینامیکی آن در جریان آشفته»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، سال پانزدهم، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۳۳۱-۲۴۰.

[33] A. Y. Shamseldin, A. E. Nasr, and K. M. O'Connor, "Comparison of different forms of the Multi-layer Feed-Forward Neural Network method used for river flow forecasting", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 6, 2002, pp. 671-684.

[34] D. Svozil, V. Kvasnička, and J. Pospichal, "Introduction to multi-layer feed-forward neural networks", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 39, 1997, pp. 43-62.