



بررسی عددی اثرات بکارگیری کانال انتقال جریان هوا و انحنای جانبی بدنه بر عملکرد آیرودینامیکی خودروی تارا

سعید باعصمت^۱، محمود پسندیده فرد^{۲*}، علیرضا تیمورتاش^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

چکیده

امروزه در صنعت خودروسازی، آیرودینامیک وسایل نقلیه به دلیل اثرگذاری بر مصرف سوخت، میزان کنترل پذیری و پایداری خودرو از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر به روش عددی با استفاده از نرم افزار Ansys Fluent عملکرد آیرودینامیکی خودروی تارا از طریق ایجاد کانال هوا با ابعاد و هندسه‌های مختلف بین پیشانی و اطراف چرخ جلو و همچنین اطراف چرخ عقب و پشت خودرو مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از اعمال تغییرات مذکور برقراری جریان میان نواحی از بدنه که اختلاف فشار بالایی دارند بود که در هر دو بخش اصلاح آیرودینامیک جلو و اصلاح آیرودینامیک عقب موجب کاهش نیروهای آیرودینامیکی شد؛ بطوری که در بهترین مدل‌های دو بخش مذکور، کاهش ضریب پسا به ترتیب به میزان ۱۰/۳٪ و ۱۱/۱٪ بود؛ همچنین تاثیر ایجاد انحنای جانبی بر بدنه نیز مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج حاصل نشان داد به طور کلی میزان اثرگذاری آن‌ها به طراحی و هدایت جریان هوای جوانب به پشت خودرو بستگی دارد، با این وجود در همه حالت‌ها ضریب پسا کاهش یافت، بطوری که برای بهترین مدل بررسی شده مقدار کاهش آن ۴/۷٪ بود. در بخش پایانی ترکیبی از بهترین روش‌های بررسی شده به صورت همزمان بر روی خودرو پیاده‌سازی شد که بهترین حالت از ترکیب تغییرات فوق در آیرودینامیک جلو و عقب با کاهش نیروی پسا و برآ به ترتیب به میزان ۱۶/۳٪ و ۴/۱٪ حاصل گردید و مقدار ضریب پسا از ۰/۳۳۲ به ۰/۲۷۸ رسید.

کلمات کلیدی: آیرودینامیک؛ نیروی پسا؛ خودرو؛ تارا؛ عددی.

Numerical investigating of using the air duct and body side curvature effects on the Tara aerodynamic performance

S.Baesmat¹, M.Pasandidehfard^{2*}, A.R.Teymourtash²

¹ MSc. Student, Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Prof., Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

In the transportation industry, the vehicles aerodynamics is important because it affects on fuel consumption and stability of cars. In this numerical research by using Ansys Fluent software, the aerodynamic performance of the Iranian car Tara was investigated by creating an air duct with different dimensions and geometries in the modification of front aerodynamics and the modification of rear aerodynamics. The purpose of these changes was to establish air flow between areas of the body that have a high pressure difference, which in both aerodynamic developments reduced drag force and lift force. Also, the effect of creating side curvature on the body was also studied. The results showed that design and direction of the air flow from the sides to the back of the car is very important in aerodynamics forces, however, drag force was reduced in all cases. Finally, the best methods were combined simultaneously on the car. In the most optimal model, through the combination of the the front aerodynamic modifications and rear aerodynamic modifications the drag coefficient and lift coefficient reduced 16.3% and 4.1% respectively as the drag coefficients reduced from 0.332 to 0.278.

Keywords: Aerodynamic; Drag Force; Sedan; Vehicle; Tara; Numerical.

۱- مقدمه

از زمانی که صنعت خودروسازی در جهان رونق یافت، استفاده زیاد از سوخت‌های فسیلی بر اقتصاد کشورها و آلودگی محیط زیست تاثیر بسزایی برجای گذاشت از این رو کاهش مصرف انرژی در خودروها مورد توجه قرار گرفت [۱]. به طور میانگین بخش اعظم مصرف سوخت در یک خودروی سواری بستگی به آیرودینامیک به ویژه نیروی پسا، مقاومت ناشی از حرکت چرخ‌ها بر روی زمین، وزن و سرعت آن دارد که به ترتیب سهم هر کدام از کل مصرف سوخت به میزان ۴۰٪، ۲۳٪، ۱۵٪ و ۱۳٪ است که نشان‌دهنده اهمیت بسیار بالای آیرودینامیک خودرو است [۲].

علم آیرودینامیک با بررسی عبور جریان هوا از روی یک جسم و اثرات ناشی از آن، کمک بسزایی در این جهت به صنعت حمل و نقل جهانی کرده است تا با بهبود عملکرد وسایل نقلیه موجب کاهش مصرف سوخت، افزایش سرعت، شتاب و کنترل-پذیری خودروها شود [۳]. دینامیک جریان هوا در این زمینه به سه روش تئوری، تجربی و عددی قابل بررسی است. روش تئوری به علت پیچیدگی‌های تحلیل معادلات حاکم در حل این نوع مسائل مرسوم نیست، در حالی که روش تجربی با توجه به تناسب با واقعیت و دقت مناسب در شبیه‌سازی جریان از اهمیت بالایی برخوردار است؛ همچنین روش عددی به دلیل دسترسی آسان و عدم وجود محدودیت در تحلیل مسائل مختلف مهندسی، در میان تحقیقات علمی گسترش بیشتری یافته است. با استفاده از روش‌های فوق می‌توان به مطالعه نیروهای آیرودینامیکی شامل نیروی پسا و نیروی برآ در خودروها پرداخت [۴].

نیروی پسا به دو نوع فشاری و اصطکاکی تقسیم‌بندی می‌شود که سهم نیروی فشاری بین ۸۰٪ تا ۹۰٪ از کل نیروی پسا است. نیروی پسای فشاری به دلیل اختلاف فشار بدنه در قسمت جلو و پشت خودرو هنگام عبور جریان هوا از روی آن به وجود می‌آید. با برخورد مستقیم جریان به پیشانی خودرو در ناحیه‌ای که ضریب فشار برابر ۱ است، بیشنه فشار استاتیکی وجود دارد در حالی که در قسمت عقب خودرو با جدایش جریان از سطح بدنه، ناحیه کم فشار^۱ ایجاد

می‌شود. نیروی پسای اصطکاکی نیز به علت اصطکاک میان هوای مجاور خودرو و بدنه تولید می‌گردد که وابسته به لایه مرزی و برهم‌کنش جریان و سطح است [۵].

مهم‌ترین عامل موثر بر نیروی پسا، شکل کلی بدنه است که ۴۰٪ تا ۴۵٪ آن را شامل می‌شود؛ همچنین چرخ‌ها و زیربدنه هر کدام به میزان ۳۰٪ تا ۳۵٪ و ۱۵٪ تا ۲۰٪ بر مقدار کل نیروی پسا اثرگذار هستند [۲]. از جمله راه‌های بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروها، کاهش نیروی پسای فشاری است که با استفاده از کاهش فشار وارده توسط جریان هوا به قسمت جلوی خودرو، کاهش گردابه‌های ناشی از جدایش جریان در قسمت عقب و یا انتقال جریان از نواحی دارای فشار بالا به نواحی دارای فشار پایین در اطراف بدنه میسر می‌گردد [۶].

به طور کلی کاهش نیروی پسا در وسایل نقلیه به دو روش کنترل جریان هوای اطراف بدنه به صورت فعال^۲ و انفعالی^۳ صورت می‌پذیرد. در روش کنترل فعال، سیستم‌ها یا محرک‌هایی که برای کاهش نیروی پسا نیاز به برق یا انرژی دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ برای نمونه می‌توان به مکش و دمیدن هوا اشاره نمود. در روش کنترل انفعالی، ایجاد تغییر در مسیر حرکت جریان هوای اطراف خودرو از طریق طراحی بدنه یا اتصال دستگاه‌هایی که برای فعالیت نیازی به انرژی ندارند، مورد توجه قرار گرفته است؛ به عنوان مثال می‌توان به استفاده از کانال انتقال هوا در بدنه اشاره کرد [۵].

تحقیقات متعددی از گذشته تاکنون بر روی روش‌های کنترل انفعالی جریان اطراف خودرو انجام شده است که مین و همکاران [۶] با مروری بر آن‌ها به بررسی هر کدام پرداختند که بر اساس نتایج حاصل ثابت شد، میزان تاثیرگذاری هر روش بر آیرودینامیک وسایل نقلیه به عوامل متعددی از جمله نوع خودرو بستگی دارد. استفاده از پخش‌کننده در زیربدنه، نصب اسپویلر در عقب بدنه و بکارگیری مولد گردابه در سقف از جمله روش‌های تحلیل شده در پژوهش مذکور بودند. از دیگر راه‌های کاهش نیروی پسا از طریق کنترل انفعالی جریان، استفاده از مکانیزم‌هایی جهت انتقال جریان از نواحی فشار بالا به محدوده کم فشار در اطراف بدنه می‌باشد. آلمی‌هو و همکاران [۷] به روش عددی در بدنه احمد^۴ که یک مدل مبنا در خودروها

⁴ Ahmed Body

¹ Wake

² Active Flow Control

³ Passive Flow Control

خودرو را مورد بررسی قرار دادند. از جمله روش‌های بکار رفته در این تحقیق می‌توان به استفاده از کرکره، کانال و دریچه^۴ انتقال جریان هوا در اطراف چرخ‌ها و عقب بدنه اشاره نمود. به طور کلی این تحقیق نشان‌دهنده بهینه‌ترین حالت در هنگام توسعه آیرودینامیک میانی با تاثیر مطلوب بر ضرایب پسا و برآ است که علت آن انتقال مناسب جریان از جلوی خودرو به عقب است. تغییرات اعمال شده در این بخش موجب کاهش ضریب پسا به میزان ۷/۳٪ و کاهش ضریب برآ به میزان ۳۳/۵٪ گردید. یکی از راه‌های کنترل جریان بر روی بدنه، ایجاد انحنای بر روی آن است که با انتقال جریان هوا باعث تاثیرگذاری بر نیروهای آیرودینامیکی خودرو می‌شود. از این رو ازنی و همکاران [۱۲] با تحلیل تاثیر ایجاد تورفتگی در کناره‌های کاپوت خودروی سدان به این نتیجه دست یافتند که هر چه تورفتگی بیشتر باشد، جریان بیشتری به طرفین منتقل می‌شود که مستقیماً بر نیروی پسا و نیروی برآ اثرگذار است.

واری و همکاران [۱۳] در بخشی از تحقیق خود اثرات انتقال جریان هوا از طرفین بدنه به پشت یک مدل خودروی ساسی بلند از طریق ایجاد تورفتگی در انتهای بدنه و کاهش سطح مقطع عقب خودرو به منظور افزایش فشار در ناحیه ویک را مطالعه نمودند. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که ایجاد تورفتگی به زاویه ۱۵ درجه باعث کاهش ضریب پسا به میزان ۰/۲۵٪ و افزایش ضریب برآ به میزان ۰/۰۸٪ شد.

بهروان و مهدی [۳] اثرات ایجاد انحنای در یک خودروی سدان با ایجاد تورفتگی در سطح کناری بدنه و درب‌ها را مورد تحلیل قرار دادند. تغییرات مذکور موجب شد، جریان هوای اطراف خودرو از جوانب بدنه به پشت آن منتقل گردد و فشار ناحیه ویک پشت خودرو افزایش یابد. در پی آن به علت کاهش اختلاف فشار جلو و عقب خودرو، ضریب پسا به میزان ۲۰/۵٪ به طور چشمگیری کاهش یافت؛ اما بر خلاف اثرگذاری مطلوب بر روی نیروی پسا، ضریب برآ به میزان ۲۹/۶٪ با افزایش روبرو شد.

با توجه به عدم بررسی اثرات انتقال جریان اطراف بدنه به ویژه تاثیر بکارگیری کانال هوا با ابعاد و هندسه‌های مختلف بر آیرودینامیک خودروهای ایرانی در تحقیقات گذشته، در پژوهش عددی حاضر با طراحی خودروی تارا به کمک نرم‌افزار

است، اثرات استفاده از کانال هوا با ابعاد مختلف جهت انتقال مستقیم جریان از جلو به پشت آن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد هر چه اندازه کانال بزرگ‌تر باشد، تاثیر بیشتری بر کاهش نیروی پسا خواهد داشت. این کاهش ناشی از کاهش نیروی فشاری است در حالی که نیروی اصطکاکی با افزایش اندکی مواجه شد. آن‌ها در سال ۲۰۲۱ [۸] پژوهش خود را با بررسی تاثیر ایجاد چمفر در لبه کانال جهت انتقال بهتر جریان به داخل آن در سرعت‌های مختلف گسترش دادند و در بهترین حالت در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت به دلیل انتقال مستقیم جریان از جلو به عقب بدنه، نیروی پسا ۱۴/۳٪ کاهش یافت.

در همان سال فراری و همکاران [۹] با استفاده از نرم‌افزار Star CCM به مطالعه و کاهش نیروی پسای یک مدل خودروی هاچ‌بک پرداختند. در جلوی خودرو، ایجاد کرکره هوا^۱ و شکاف گریز هوا^۲ موجب انتقال آسان جریان از کناره سپر به جوانب بدنه شد که به همین دلیل ضریب پسا ۰/۵۸٪ کاهش یافت. در عقب خودرو نیز به ایجاد مجرای خروج هوا^۳ جریان از اطراف چرخ عقب به پشت خودرو هدایت گردید که باعث کاهش ضریب پسا به میزان ۰/۹۷٪ شد. دلیل اثرگذاری پایین در مکانیزم‌های بکاررفته، هندسه آن‌ها بود که مانند شکاف‌هایی در داخل بدنه ایجاد شده بودند و موجب می‌شد جریان کمی از آن عبور کند.

اکتاس و عبدالله [۱۰] در مطالعه عددی خود یک مدل خودروی سواری شرکت NEVS اثرات ایجاد کرکره هوا و شکاف گریز هوا را مورد بررسی قرار دادند. در بهترین مدل از کرکره هوایی با سطح مقطع متفاوت، ۲/۸٪ کاهش ضریب پسا بدست آمد در حالی که شکاف گریز هوا موجب کاهش ضریب مذکور به میزان ۲/۲٪ شد؛ همچنین پژوهش آن‌ها ثابت کرد که افزایش سطح مقطع بیش از یک مقدار مشخص که از تحقیقات بدست می‌آید، موجب کاهش اثرگذاری کرکره هوا و شکاف گریز هوا بر میزان ضریب پسای مدل اصلی می‌گردد.

دیکسون و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۰ عملکرد آیرودینامیکی یک خودروی اسپرت با اعمال تغییراتی در بدنه جهت کنترل جریان غیرفعال در سه بخش توسعه آیرودینامیک جلو، توسعه آیرودینامیک میانی و توسعه آیرودینامیک عقب

^۳ Air Blow

^۴ Vent

^۱ Air Curtain

^۲ Air Relief

در معادلات فوق u_i بیانگر سرعت، v لزجت سینماتیکی و v_t لزجت آشفتگی سیال است.

با توجه به این که در تحقیق حاضر مدل توربولانسی SST k- ω برای تحلیل عددی انتخاب شده است، در روابط ۳ و ۴ به ترتیب معادلات انرژی جنبشی آشفتگی (k)، انرژی اتلاف شده (ϵ) و نسبت انرژی جنبشی به تلفات (ω) آورده شده است [۱۴]:

$$\frac{Dk}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_m} \left(u'_m \left(\frac{p'}{\rho} + k \right) - \nu u'_i \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_m} + \frac{\partial u'_m}{\partial x_i} \right) - u'_i u'_m \frac{\partial u_i}{\partial x_m} - \nu \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_m} + \frac{\partial u'_m}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u'_i}{\partial x_m} \right) \quad (3)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_T}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + C_{1\omega} \frac{\omega}{k} P_k + C_{2\omega} \omega^2 \quad (4)$$

در معادلات بیان شده، مقدار ثابت C با استفاده از آزمایشات تجربی محققان پیشین [۱۳] موجود است.

۳- اعتبارسنجی

به دلیل عدم وجود تحقیق آکادمیک بر روی خودروی تارا، برای اعتبارسنجی نتایج پژوهش پیش رو با داده‌های تجربی مدل بین‌المللی بدنه احمد [۱۵] مقایسه شد. به این منظور هندسه نیم‌بدنه آن مطابق شکل ۱ با استفاده از نرم افزار Catia طراحی گردید و در نرم‌افزار Ansys Fluent به تحلیل عددی آن پرداخته شد. در ابتدا با توجه به پژوهش‌های انجام شده [۱۱] ابعاد محیط حل معادلات حاکم در اطراف بدنه مطابق شکل ۲ انتخاب شد.

در شکل ۳ شبکه بندی محیط اطراف بدنه نشان داده شده است. شبکه بندی به صورت مثلثی نامنتظم به کمک Ansys Meshing انجام شد، به گونه‌ای که در نزدیکی بدنه اندازه شبکه‌ها ریز و با افزایش فاصله بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است؛ همچنین مش لایه مرزی نیز به تعداد ۱۰ سلول و ارتفاع اولین سلول برابر ۰/۰۰۹ میلی‌متر از دیواره تعیین شد که نتایج تحلیل مطابق شکل ۴ نشان دهنده ماکزیمم مقدار y^+ برابر با ۰/۹۱ است.

Catia و تحلیل آیرودینامیکی آن در نرم‌افزار Ansys Fluent به بررسی اثرات بکارگیری کانال انتقال جریان هوا در جلو و عقب خودرو و انحنای جانبی بدنه جهت کاهش نیروی پسا در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت پرداخته شده است. در بخش توسعه آیرودینامیک جلو کانال‌هایی با هندسه‌های متفاوت از موقعیت‌های مختلف در پیشانی خودرو به محدوده اطراف چرخ‌های جلو ایجاد گردید. علاوه بر آن تاثیر استفاده از کرکه هوا در زیر چراغ جلو نیز مورد بررسی قرار گرفت. در بخش توسعه آیرودینامیک میانی انحنای مختلف بر روی بدنه پیاده‌سازی و تحلیل شدند؛ همچنین در توسعه آیرودینامیک عقب تاثیر بکارگیری کانال‌هایی با ابعاد ورودی و خروجی مختلف از محدوده اطراف چرخ عقب به پشت خودرو مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت نیروهای آیرودینامیکی در نمونه‌هایی با استفاده همزمان تغییرات ایجاد شده در جلو، جوانب و عقب بدنه استخراج گردید.

۲- معادلات حاکم

در دینامیک سیالات محاسباتی جریان آشفته، مسائل به دو روش ^۱RANS و ^۲LES شبیه‌سازی می‌شوند. مدل‌های آشفتگی در روش RANS با صرف نظر کردن از گردابه‌های کوچک و مدل کردن گردابه‌های بزرگ به تحلیل جریان سیال می‌پردازند. اساس کار این روش بر میانگین‌گیری زمانی است در حالی که روش LES با استفاده از میانگین‌گیری مکانی به مدل کردن گردابه‌های کوچک و حل گردابه‌های بزرگ می‌پردازد. روش دیگری به نام ^۳DES نیز از ترکیب دو روش فوق بدست آمده است که در نواحی نزدیک دیواره مانند روش RANS عمل کرده و در مناطق دور از دیواره با استفاده از LES جریان را شبیه‌سازی می‌کند. معادلات اساسی حاکم در تمامی مسائل دینامیک سیالات محاسباتی، معادلات پیوستگی و ناویر استوکس هستند که در روابط ۱ و ۲ بیان شده‌اند [۳]:

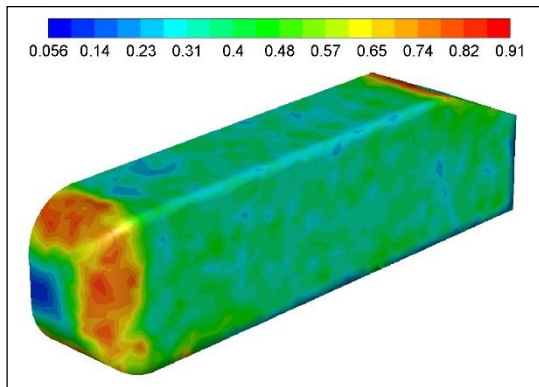
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

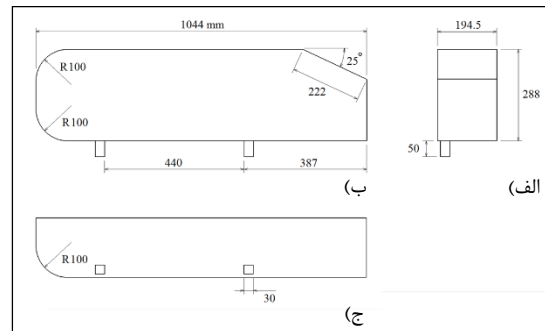
³ Detached Eddy Simulation

¹ Reynolds Averaged Navier-Stokes

² Large Eddy Simulation



شکل ۴- توزیع y^+ بر روی بدنه احمد

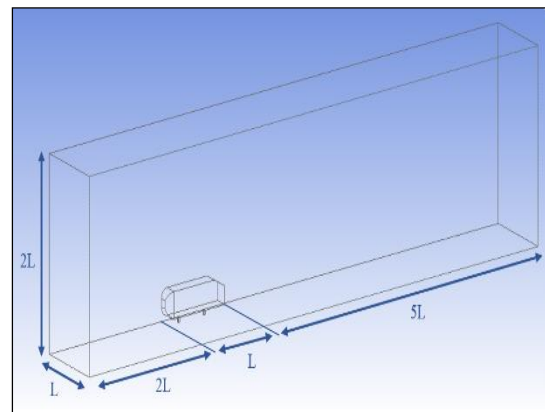


شکل ۱- ابعاد و نمای الف (عقب، ب) چپ و ج) بالای هندسه بدنه احمد

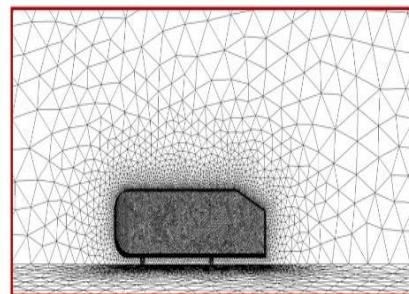
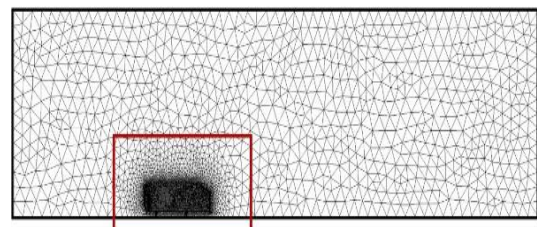
لازم به توضیح است، مدل به صورت پایا، فشار مینا، نیم-بدنه و با استفاده از مدل آشفتگی SST $k-\omega$ مورد تحلیل قرار گرفته است. چگالی $1/225$ کیلوگرم بر مترمکعب، لزجت سینماتیکی $10^{-5} \times 1/79$ پاسکال در ثانیه، رینولدز $2/74 \times 10^6$ می‌باشد و مساحت نیم‌بدنه مقابل جریان برابر $0/056$ مترمربع است. شرایط مرزی شامل سرعت ورودی برابر با 40 متر بر ثانیه، فشار خروجی و سطح زیرین محیط حل دیواره با شرط عدم لغزش و صفحه میانی بدنه شرط تقارن است. شرط توقف در تحلیل‌های عددی، همگرایی و ثابت شدن نمودار باقیمانده حل به ازای تکرارهای مختلف است؛ همچنین نمودار ضرایب پسا و برآ به ازای تکرارهای مختلف حل معادلات نیز ترسیم شد که پس از دستیابی به یک الگوی ثابت در نمودارها، حل عددی متوقف گردید. قابل ذکر است که نمودار ضرایب آیرودینامیکی نوسانی بودند و برای استخراج نتایج ضرایب میانگین مقادیر نوسان شده در نظر گرفته شد.

ابتدا استقلال نتایج از شبکه محاسباتی مطابق با شکل ۵ مورد بررسی قرار گرفت. تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف با تغییر اندازه شبکه بر روی بدنه و دیواره‌های دامنه حل حاصل شد در حالی که در تمامی شبکه‌های بررسی شده، تغییری بر روی تنظیمات مش لایه مرزی و روش شبکه بندی نامنتظم اعمال نشد. میزان تغییرات ضریب پسا در تعداد شبکه بیشتر از 712 هزار، کمتر از 5% است؛ همچنین ضریب برآ به علت عدم تاثیرگذاری اصطکاک بر مقدار آن، نسبت به ضریب پسا در تعداد شبکه کمتری مستقل از مش است.

سپس استقلال نتایج از ابعاد دامنه محاسباتی اطراف مدل مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، در مدل



شکل ۲- ابعاد محیط حل معادلات حاکم



شکل ۳- شبکه بندی اطراف بدنه احمد

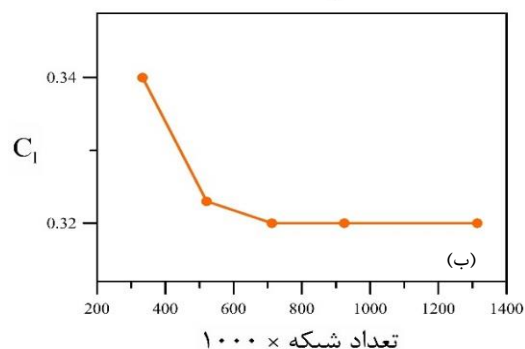
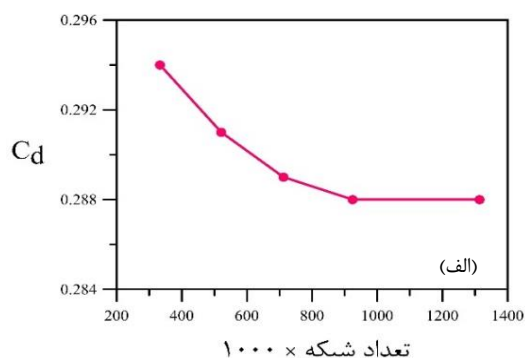
جدول ۲- استقلال نتایج از ابعاد محیط حل

مدل	C_d	اختلاف	C_l	اختلاف
اول	۰/۲۸۹		۰/۳۲۰	
دوم	۰/۲۹۰	۰/۳٪	۰/۳۲۵	۱/۸٪
سوم	۰/۲۸۷	۰/۷٪	۰/۳۲۲	۰/۶٪
چهارم	۰/۲۸۷	۰/۷٪	۰/۳۲۶	۱/۹٪
پنجم	۰/۲۸۸	۰/۳٪	۰/۳۲۰	۰٪

همچنین تاثیر شدت آشفتگی جریان هوا که بیانگر درصد نسبت سرعت‌های نوسانی در جهت‌های مختلف به سرعت کل جریان است نیز در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش شدت آشفتگی تاثیر زیادی بر ضرایب آیرودینامیکی بر جای نمی‌گذارد و فقط مقداری نوسان در نتایج بوجود می‌آید. به دلیل ابعاد بزرگ خودرو، عدد رینولدز بسیار بالا و جریان کاملاً آشفته ترم‌های نوسانی سرعت جریان آزاد تاثیر چندانی بر آیرودینامیک آن ندارند و مقدار ضرایب پسا و برآ بیشتر وابسته به سرعت متوسط جریان است. لازم به توضیح است، در تحقیق حاضر شدت آشفتگی به صورت پیش‌فرض در نرم افزار Ansys برابر با ۵٪ در نظر گرفته شده است.

در تحلیل آیرودینامیکی اجسام، مدل‌های آشفتگی RNG k- ϵ و SST k- ω مناسب هستند. در سال‌های گذشته مدل RNG k- ϵ به دلیل شبیه‌سازی مناسب جریان‌های گردابه‌ای و سطوح دارای انحنای زیاد مورد توجه محققان بوده‌اند؛ اما مدل‌های k- ϵ به گونه‌ای هستند که لزجت سیال در کنار دیواره را بالا و سرعت را کم پیش‌بینی می‌کنند. با توسعه مدل‌های آشفتگی امروزه مدل k- ω به ویژه SST k- ω کاربرد بیشتری در این نوع مسائل پیدا کرده است؛ زیرا در لایه مرزی و کنار دیواره از روابط k- ω و در نواحی دورتر از معادلات k- ϵ برای شبیه‌سازی جریان سیال استفاده می‌شود [۱۳]. در جدول ۴ نتایج تحلیل عددی برای دو مدل مذکور با مدل تجربی [۱۵] بدنه احمد مقایسه شده است که نشان از دقت مناسب مدل SST k- ω است. مقدار خطایی که وجود دارد به دلیل استفاده از مدل RANS است که با صرف نظر کردن از گردابه‌های کوچک به مدلسازی گردابه‌های بزرگ می‌پردازد، بخصوص گردابه‌های پشت اجسام را نمی‌تواند به درستی پیش‌بینی کند؛ همچنین مطابق شکل ۶ مقدار ضریب پسای اصطکاکی در مدل RNG

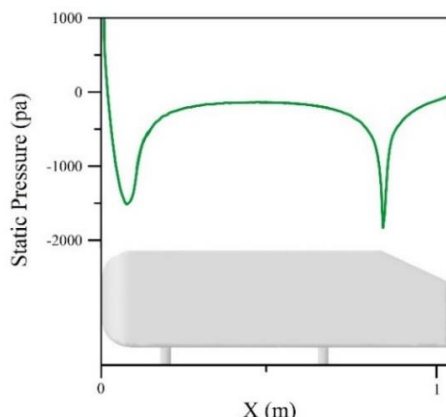
اولیه ابعاد محیط حل بر اساس تحقیقات گذشته انتخاب گردید سپس در مدل‌های دوم و سوم به ترتیب فاصله بدنه از صفحه ورودی و خروجی جریان افزایش داده شد. افزایش ارتفاع و فاصله محیط حل در عرض بدنه نیز در مدل‌های چهارم و پنجم مورد بررسی قرار گرفت که در جدول ۱ جزئیات مدل‌های مطالعه شده موجود است. بر اساس جدول ۲، نتایج حاصل نشان از اثرگذاری ناچیز افزایش ابعاد دامنه حل بر نتایج تحلیل عددی مدل اولیه دارد.



شکل ۵- نتایج الف) ضریب پسا و ب) ضریب برآ در بدنه احمد در تعداد شبکه مختلف

جدول ۱- ابعاد محیط حل

مدل	راستای فاصله از بدنه			
	+z	+y	-x	+x
اول	L	2L	5L	2L
دوم	L	2L	5L	3L
سوم	L	2L	7L	2L
چهارم	L	3L	5L	2L
پنجم	1/5L	2L	5L	2L



شکل ۸- نمودار فشار استاتیکی بر روی خط میانی سطح فوقانی بدنه احمد

در ادامه اعتبارسنجی روش حل، پروفیل سرعت جریان در پشت بدنه به فاصله‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر از انتهای مدل با مقادیر تجربی و عددی تحقیقات پیشین [۱۵] مقایسه شده است که با توجه به شکل ۷ انطباق مناسبی میان نتایج موجود مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که در منطقه ویک اگر شبکه مناسب نباشد یا روش عددی درست پیاده نشود، مدل‌های RANS معمولاً نتایج دقیقی ارائه نمی‌کنند، اما همانطور که این شکل نشان می‌دهد، نتایج عددی حاضر کاملاً قابل قبول است. در شکل ۸ نیز نمودار فشار استاتیکی سطح فوقانی بدنه احمد نشان داده شده است که برخی پژوهشگران [۱۶] جهت نمایش چگونگی تغییر فشار بر روی بدنه از آن استفاده می‌کنند. در این شکل کاهش فشار در نواحی دارای انحنا که سرعت جریان با افزایش مواجه می‌شود، به خوبی مشهود است. همچنین اختلاف فشار ابتدا و انتهای بدنه که موثر بر نیروی پسا است نیز مشاهده می‌گردد.

۴- آیرودینامیک تارا

آنچه در مطالعه حاضر مدنظر است، تحلیل آیرودینامیکی خودروی تارا است. از این رو بدنه این خودرو مطابق شکل ۹ به کمک ابعاد موجود در دفترچه فنی آن که توسط شرکت سازنده منتشر شده است [۱۷] در نرم‌افزار Catia به صورت نیم‌بدنه با صرف نظر از برآمدگی‌های زیربدنه و آینه‌ها طراحی شد که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

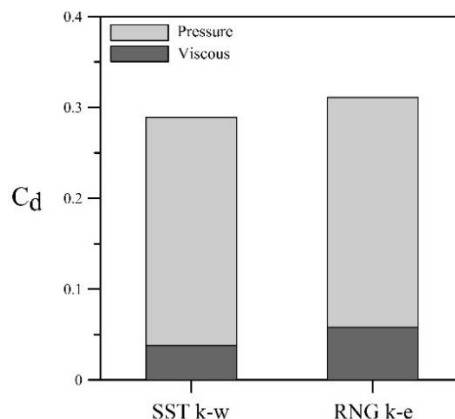
k-ε نسبت به مدل SST k-ω مطابق انتظار به میزان ۰/۰۲۰ بیشتر است.

جدول ۳- اثرات شدت آشفتگی بر ضرایب آیرودینامیکی

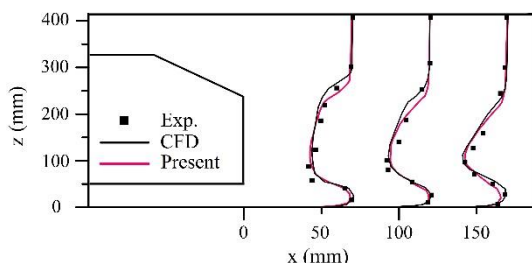
شدت آشفتگی	C_d	اختلاف	C_l	اختلاف
۵٪	۰/۲۸۹		۰/۳۲۰	
۱۰٪	۰/۲۸۶	-۱٪	۰/۳۰۰	-۶/۲٪
۱۵٪	۰/۲۸۸	+۰/۷٪	۰/۳۱۰	+۳/۳٪

جدول ۴- اعتبارسنجی ضریب پسا

پژوهش	مدل آشفتگی	C_d	خطا	C_l	خطا
تجربی [۱۵]		۰/۲۹۹		۰/۳۴۵	
عددی حاضر	SST k-ω	۰/۲۸۹	۳/۳٪	۰/۳۲۰	۷/۲٪
عددی حاضر	RNG k-ε	۰/۳۱۱	۴٪	۰/۳۰۰	۱۳٪

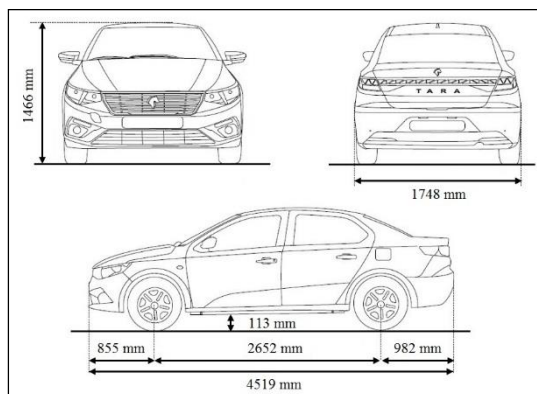


شکل ۶- تفکیک ضریب پسا در هر مدل آشفتگی

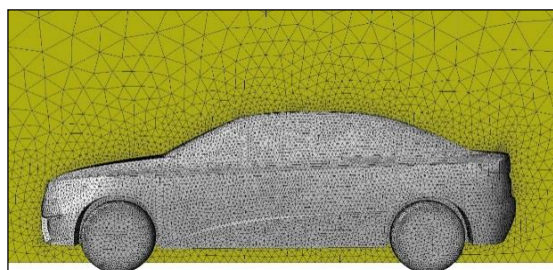


شکل ۷- پروفیل سرعت در پشت بدنه احمد

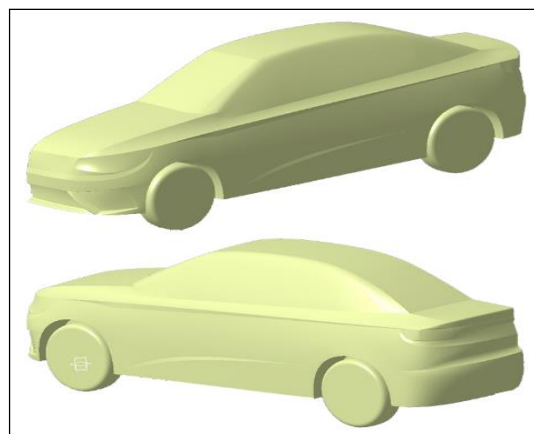
شکل ۱۱ SST k- ω شرط $y^+ < 1$ بر روی بدنه برقرار شد. شبکه‌بندی محیط اطراف بدنه تارا و شکل ۱۲ توزیع ارتفاع اولین شبکه از دیواره را نشان می‌دهد. شرایط مرزی سرعت ورودی، فشار خروجی و صفحه زیرین محیط حل به عنوان جاده متحرک فرض و به عنوان دیواره دارای سرعت برابر با جریان هوا در جهت ورودی به خروجی محیط حل تعریف گردید؛ همچنین چرخ‌ها به صورت دیواره در نظر گرفته شد که با توجه به سرعت خودرو و ابعاد چرخ‌ها [۱۶]، در حلگر محاسباتی سرعت دورانی ۸۱ رادیان بر ثانیه حول راستای z برای آن‌ها وارد گردید. لازم به توضیح است، مساحت نیم‌بدنه مقابل جریان برای خودرو تارا برابر با ۱/۰۹ مترمربع در نظر گرفته شد.



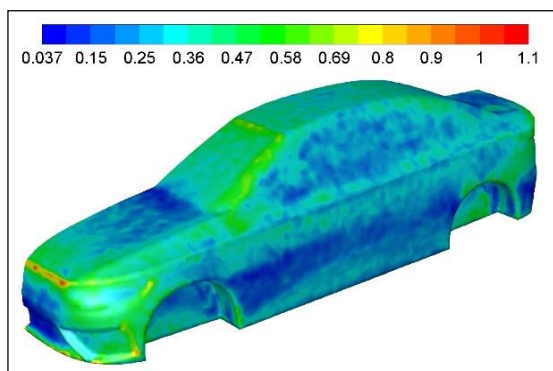
شکل ۹- ابعاد بدنه خودروی تارا



شکل ۱۱- شبکه‌بندی محیط اطراف و بدنه تارا



شکل ۱۰- نمای بدنه طراحی شده از خودروی تارا



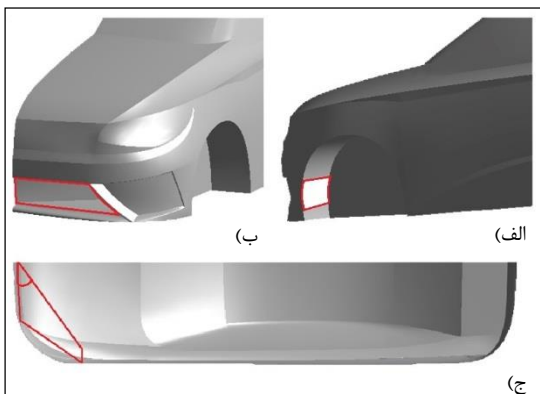
شکل ۱۲- توزیع y^+ بر روی بدنه تارا

با توجه به نتایج تحلیل عددی، ضریب پسا در خودرو تارا برابر ۰/۳۳۸ و ضریب برآ برابر ۰/۳۶- بدست آمد. توجه شود که ضریب برآ منفی به معنای نیرو به سمت پایین^۱ در خودرو است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ۸۸٪ از کل نیروی پسا

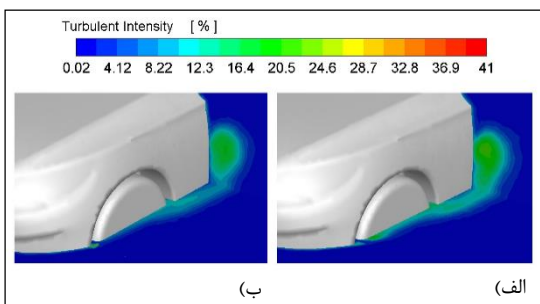
لازم به ذکر است، به علت این که نیروی پسای خودروها در جاده‌ها قابل توجه است، در این تحقیق سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت انتخاب شد که به سرعت متوسط خودروها در جاده های ایران نزدیک تر است. براین اساس با توجه به طول بدنه برابر با ۴/۵ متر، عدد رینولدز برابر $7/7 \times 10^6$ بدست می‌آید. لذا با توجه به عدد رینولدز بالای جریان، نتایج حاصل برای این مدل خودرو قابل تعمیم به سرعت‌های کمی بالاتر نیز است، اما باید توجه شود که میزان دقیق تاثیرگذاری می‌تواند کمی متفاوت باشد؛ همچنین شبکه بندی دامنه حل به گونه‌ای انجام پذیرفت که در دورترین فاصله از بدنه اندازه سلول‌ها بیشینه باشد و با کاهش فاصله کوچکتر شود. ارتفاع اولین سلول لایه مرزی از بدنه ۰/۱۵ میلی متر در نظر گرفته شد و تعداد ۷۳۸ هزار سلول بدست آمد که مطابق آن با توجه به مدل آشفتگی

^۱ Downforce

خروجی از کانال در سرعت پایین تر پس از برخورد با چرخها که در حال چرخش هستند، موجب ایجاد گردابه‌های اضافه در محدوده اطراف چرخ جلو شد، به همین دلیل نیروی پسا با افزایش مواجه گردید. این مهم در شکل ۱۵ با نمایش توزیع شدت آشفتگی به منظور نمایش میزان گردابه‌ها در جریان اطراف چرخ جلو در مدل‌های توسعه یافته نشان داده شده است.



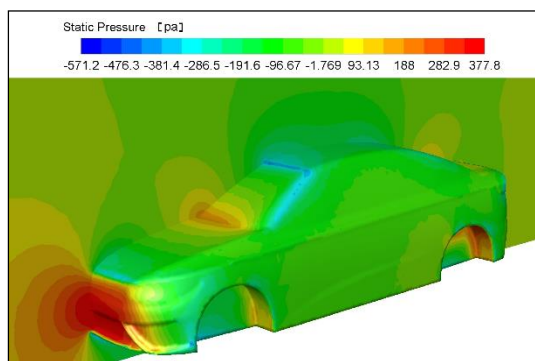
شکل ۱۴- هندسه الف) خروجی، ب) ورودی و ج) فوقانی کانال پیشانی بدنه



شکل ۱۵- توزیع شدت آشفتگی مدل دارای کانال پیشانی در سرعت الف) ۹۰ و ب) ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت

برای رفع این مشکل در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت که سرعت مورد نظر در پژوهش حاضر است، سطح مقطع خروجی کانال هوا را کاهش داده و به گونه‌ای طراحی شد تا کمترین میزان برخورد با چرخ جلو را داشته باشد. شکل ۱۶ خروجی کانال‌های مختلف و جدول ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد.

مربوط به نیروی فشاری وارد بر بدنه است. در شکل ۱۳ توزیع فشار استاتیک بر روی نیم‌بدنه نمایش داده شده است که بیانگر وجود بیشینه فشار در پیشانی خودرو، اطراف چرخ عقب و شیشه جلو است.



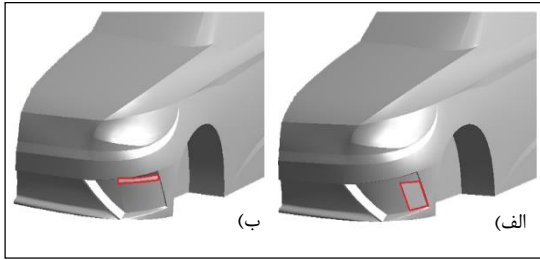
شکل ۱۳- توزیع فشار استاتیکی بر روی بدنه و اطراف آن

به منظور بهبود عملکرد آیرودینامیکی، تغییراتی در سه بخش جلو، جوانب و عقب بدنه اعمال گردید و در نهایت با ترکیب بهترین روش‌های کاهش نیروی پسا در بخش‌های مذکور، مدل نهایی توسعه یافته آیرودینامیکی تارا معرفی خواهد شد.

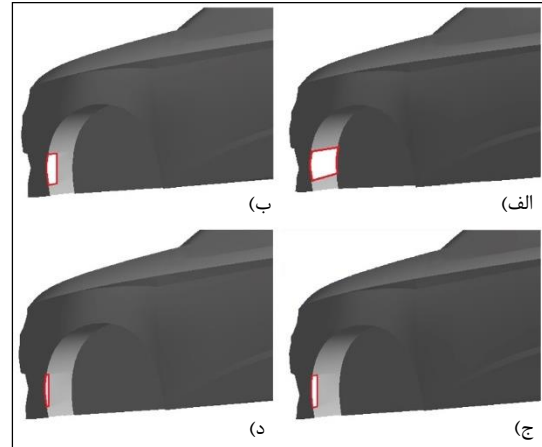
۴-۱- اصلاح آیرودینامیک جلو

همانطور که پیش تر بیان شد پیشانی خودرو دارای بیشینه فشار است؛ آنچه در این بخش مدنظر است، انتقال جریان هوا به وسیله کانال از این ناحیه به محدوده اطراف چرخ جلو به دلیل کم بودن فشار است. از این رو کانالی با هندسه مطابق شکل ۱۴ بکار گرفته شد که دارای سطح مقطع خروجی برابر $383/7$ سانتی‌متر مربع با زاویه دیواره داخلی برابر 30 درجه است.

علی‌رغم انتظار این روش در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت موجب افزایش ضریب پسا به میزان ۷٪ گردید. برای یافتن دلیل این اتفاق، خودرو در سرعت ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت نیز مورد تحلیل عددی قرار گرفت که باعث کاهش ضریب پسا به میزان ۸/۳٪ نسبت به مدل اصلی در این سرعت شد. اختلاف فشار استاتیکی جریان هوا در دو سر کانال برای سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت برابر 304 پاسکال و برای سرعت ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت برابر 698 پاسکال بود؛ در نتیجه جریان



شکل ۱۷- محل ورودی جریان به الف) کانال جانبی و ب) کرکره هوا



شکل ۱۶- سطح مقطع خروجی کانال هوا برابر الف) A (ب) $\frac{1}{3}A$ (ج) $\frac{1}{6}A$ (د) $\frac{1}{12}A$

جدول ۶- ضریب پسا در مدل‌های اصلاح شده آیرودینامیک جلو

تغییرات	C_d	مدل‌های اصلاح شده
- ۲/۱ %	۰/۳۲۵	$\frac{1}{6}A$ کانال پیشانی با مقطع
- ۴/۵ %	۰/۳۱۷	کانال جانبی
- ۴/۲ %	۰/۳۱۸	پرده هوایی
- ۱۰/۲ %	۰/۲۹۸	نهایی (کانال جانبی + پرده هوایی)
	۰/۳۳۲	مدل اصلی

در جدول ۶ تغییرات ضریب پسا در مدل‌های اصلاح شده آیرودینامیک جلو آورده شده است. کانال جانبی انتقال هوا و کرکره هوا به دلیل کوتاه بودن طول کانال، نسبت به کانال هوای پیشانی اثرگذاری بیشتری بر نیروی پسا داشتند. این در حالی است که اختلاف فشار دو سر کانال پیشانی بدنه بیشتر است، اما چون طول آن زیاد است، به علت افت فشار تاثیر کمی بر کاهش نیروی پسا برجای گذاشت.

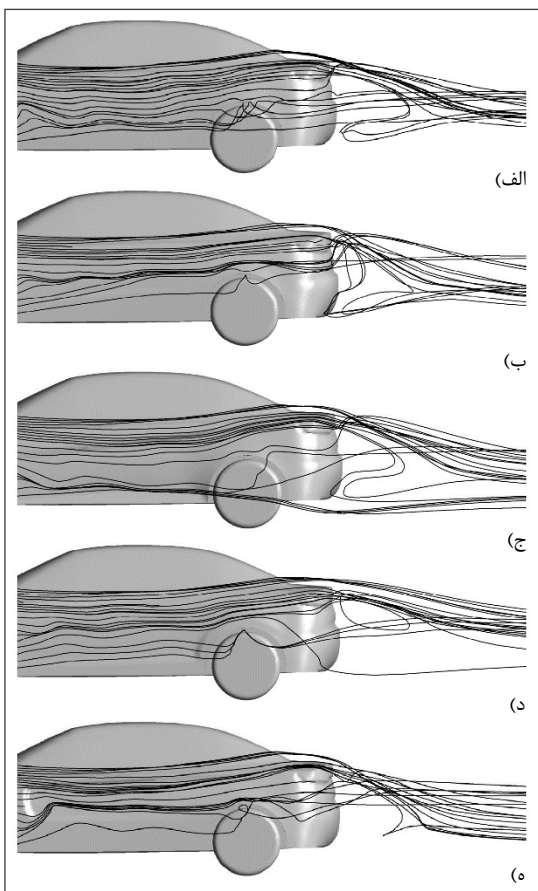
در مدل نهایی توسعه یافته بخش آیرودینامیک جلو، کانال جانبی و کرکره هوا به صورت همزمان بر روی خودرو پیاده‌سازی شدند که باعث کاهش ضریب پسا به میزان ۱۰/۲٪ گردید که بسیار مطلوب است؛ همچنین در این مدل ضریب پسا برآ به میزان ۴/۲٪ کاهش یافت که نتیجه مطلوبی است و موجب پایداری بیشتر خودرو می‌گردد. دلیل این امر آن است که در مدل نهایی اصلاح شده آیرودینامیک جلو جریان هوای جلوی بدنه وارد کانال شده و از طریق آن به جوانب خودرو منتقل می‌شود، در حالی که در مدل اصلی جریان جلو به زیر خودرو منتقل می‌شد. این عامل موجب کاهش فشار در زیر بدنه مدل نهایی اصلاح شده نسبت به مدل اصلی گردید که باعث ایجاد نیروی برای منفی شد.

جدول ۵- ضریب پسا در مدل‌های دارای کانال هوای پیشانی

تغییرات	C_d	مساحت خروجی
+ ۷/۲ %	۰/۳۵۶	$A = 383.7 \text{ cm}^2$
- ۱/۲ %	۰/۳۲۸	$\frac{1}{3}A$
- ۲/۱ %	۰/۳۲۵	$\frac{1}{6}A$
- ۰/۹ %	۰/۳۲۹	$\frac{1}{12}A$
	۰/۳۳۲	مدل اصلی

همانطور که ملاحظه می‌شود با کاهش سطح مقطع خروجی کانال هوا نسبت به مدل اولیه نیروی پسا کاهش می‌یابد. این اتفاق به دلیل فرار جریان هوا با سرعت بالا از کنار چرخ در هنگام خروج از کانال و عدم اختلاط با جریان متلاطم اطراف چرخ جلو است. نکته دیگر این است که با کاهش بیش از اندازه مقطع خروجی، به دلیل عدم برقراری مناسب جریان در کانال، اثرگذاری آن بر روی ضریب پسا کاهش می‌یابد که در میان حالت‌های بررسی شده مدل دارای مقطع خروجی برابر با $\frac{1}{6}A$ بیشترین کاهش بر روی ضریب پسا را نشان داد. در بخش دیگر اصلاح آیرودینامیک جلو با ثابت نگه داشتن محل و مقطع خروجی جریان، ورودی کانال به جای پیشانی در کناره سپر جلو قرار داده شد؛ همچنین تاثیر بکارگیری کرکره هوا نیز مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل ۱۷ هندسه موارد مذکور نمایش داده شده است.

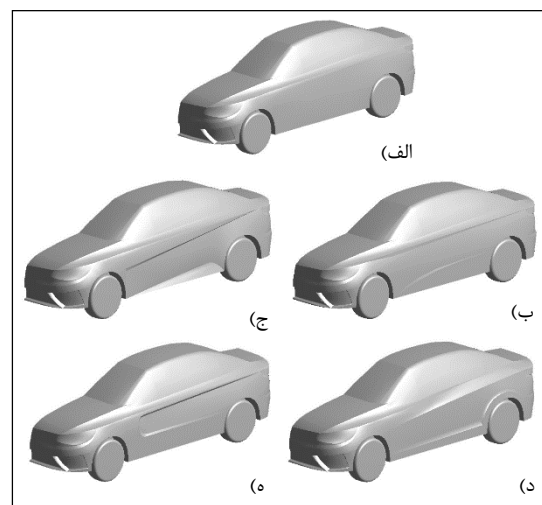
بالای چرخ عقب منتقل گردید و در بهترین مدل که انحنای خودروی النترا بود، جریان با برخورد به برآمدگی و شکستگی- های جوانب، به ناحیه ویک انتقال داده شد. تمامی این مدل‌ها با افزایش فشار عقب خودرو موجب کاهش نیروی پسا گردیدند. اما اثرگذاری انحنای بر نیروی برآ متفاوت بود. در انحنای خودروی تارا و دنا به علت نوع انحنای بخش قابل توجهی از جریان به محدوده چرخ عقب منتقل شد که به دلیل افزایش فشار در اطراف این چرخ باعث ایجاد نیرو به سمت بالا گردیدند. در نتیجه با مطالعه انحنای بیان شده در بخش اصلاح آیرودینامیک میانی بهترین مدل که از نظر نیروی پسا و همچنین از نظر عملکرد مطلوبی را نشان داد انحنای خودروی النترا بود. در شکل ۱۹ خطوط جریان در جوانب مدل‌های توسعه‌یافته و بدون انحنای نمایش داده شده است.



شکل ۱۹- خطوط جریان هوا در اطراف الف) مدل بدون انحنای و مدل‌های دارای انحنای جانبی ب) تارا، ج) دنا، د) النترا و ه) هایما

۴-۲- اصلاح آیرودینامیک میانی

با توجه به این که امروزه خودروها دارای انحنای بسیاری بر روی جوانب بدنه هستند، در این بخش با بررسی انحنای مختلف در تلاش برای انتقال جریان از جلو به عقب خودرو بودیم. از این رو با الهام‌گیری از انحنای جانبی خودروهای تارا، دنا، هیوندای النترا و هایما اس ۵ و مقایسه آن‌ها با مدل بدون انحنای خودروی تارا به تحلیل نیروهای آیرودینامیکی پرداخته شد که در شکل ۱۸ جزئیات طراحی جوانب بدنه و در جدول ۷ ضرایب آیرودینامیک هر طرح نشان داده شده است.



شکل ۱۸- هندسه الف) مدل بدون انحنای و مدل‌های دارای انحنای جانبی ب) تارا، ج) دنا، د) النترا و ه) هایما

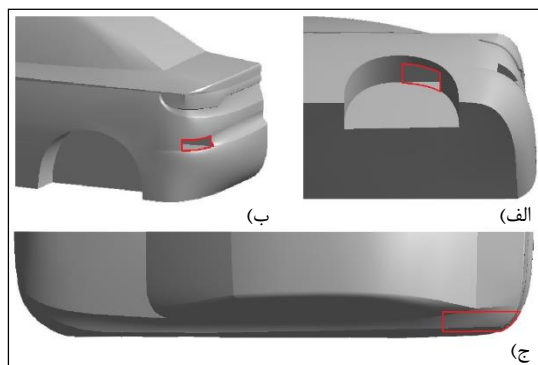
جدول ۷- ضرایب آیرودینامیکی در مرحله اصلاح میانی

انحنای جانبی	C_d تغییرات	C_l	تغییرات
تارا	۰/۳۳۲	-۲/۴٪	-۰/۳۶
دنا	۰/۳۲۸	-۳/۵٪	-۰/۳۷
النترا	۰/۳۲۴	-۴/۷٪	-۰/۳۹
هایما	۰/۳۳۴	-۱/۸٪	-۰/۳۹
مدل بدون انحنای	۰/۳۴		-۰/۳۸

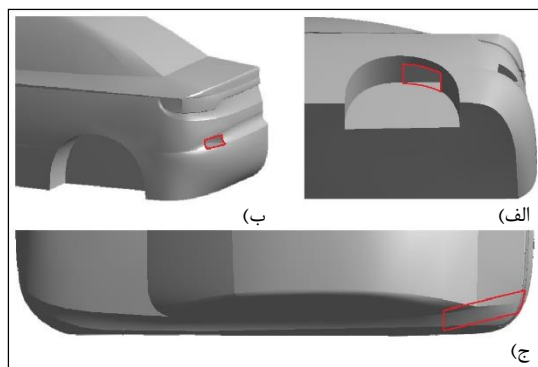
در خودروی تارا و هایما با ایجاد تورفتگی بر روی درب‌ها، جریان هوای اطراف به بدنه چسبیده و به راحتی به فضای پشت شیشه عقب که ناحیه کم‌فشاری است منتقل شد. در مدل دنا نیز با ایجاد تورفتگی با انحنای خاصی گردابه‌های چرخ جلو به

۳-۴- اصلاح آیرودینامیک عقب

همانگونه که پیش تر بیان شد، در محدوده اطراف چرخ عقب جریان هوا فشار استاتیکی بالایی دارد. دلیل این امر چرخش چرخ، به دام افتادن هوا و اضافه شدن جریان عبوری از چرخ جلو است که دارای گردابه است، لذا کاهش فشار این ناحیه تاثیر بسزایی بر کاهش نیروی پسای فشاری دارد. از طرفی به فاصله کمی از این ناحیه فشار بالا، محدوده ویک پشت خودرو که بخش کم فشاری است وجود دارد، در نتیجه انتقال جریان هوا از اطراف چرخ عقب به پشت بدنه بر کاهش نیروی پسای موثر خواهد بود از این رو با طراحی کانال هوا این امر محقق می شود. در اولین مدل توسعه یافته کانال مستقیم و مدل دوم کانال مورب جهت انتقال جریان هوا بکار رفته است که در شکل های ۲۰ و ۲۱ هندسه آنها نشان داده شده است.



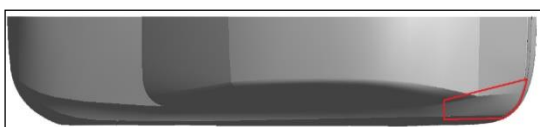
شکل ۲۰- نمای الف) ورودی، ب) خروجی و ج) فوقانی مدل کانال مستقیم



شکل ۲۱- نمای الف) ورودی، ب) خروجی و ج) نمای فوقانی مدل کانال مورب

در این دو مدل محل و ابعاد ورودی کانال یکسان است و تفاوت در محل خروجی جریان از کانال است. نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول ۸ موجود است که حاکی از اثرگذاری بیشتر کانال مستقیم بر کاهش ضریب پسا است. در این مدل در مسیر جریان داخل کانال صفحه های وجود ندارد که در برابر حرکت هوا مقاومت کند، در حالی که در مدل کانال مورب دیواره های از کانال باعث تغییر مسیر جریان می شود که همین عامل موجب اثرگذاری پایین این مدل نسبت به مدل کانال مستقیم شده است.

در مدل ترکیبی این دیواره از مدل کانال مورب حذف شده و به صورت مستقیم طراحی شده است. این کار به نوعی ترکیب مدل های کانال مستقیم و مورب است که در شکل ۲۲ نمای فوقانی این مدل نشان داده شده است؛ همچنین بهبود عملکرد آیرودینامیک خودرو با کاهش ضریب پسا در مدل ترکیبی نسبت به مدل های کانال مستقیم و مورب مشاهده شد که دلیل آن علاوه بر حذف دیواره مقاوم در برابر حرکت جریان داخلی، افزایش سطح مقطع خروجی کانال نیز است.



شکل ۲۲- نمای فوقانی مدل کانال ترکیبی

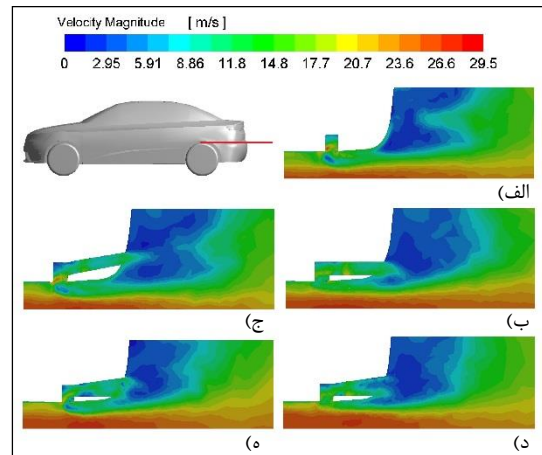
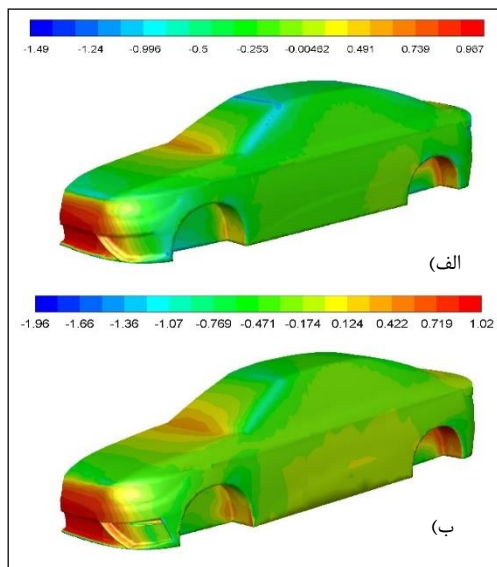
جدول ۸- ضریب پسا در مدل های اصلاح شده آیرودینامیک عقب

تغییرات	C_d	مدل های اصلاح شده
- ۷/۱۸ %	۰/۳۰۶	کانال مستقیم
- ۵/۱۱ %	۰/۳۱۵	کانال مورب
- ۹/۶ %	۰/۳۰۰	کانال ترکیبی
- ۱۱/۱ %	۰/۲۹۵	کانال نهایی
	۰/۳۳۲	مدل اصلی

بخش اصلاح آیرودینامیک جلو، میانی و عقب انجام شده است. همچنین نتایج حاصل از ترکیب این روش‌ها با یکدیگر نیز آورده شده است. شکل ۲۴ هم نشان دهنده توزیع ضریب فشار بر روی بدنه خودروی تارا در مدل اصلی و بهترین مدل‌های بخش‌های توسعه آیرودینامیک جلو، میانی، عقب و ترکیبی است که با توجه به مقادیر بیشینه و کمینه آن‌ها می‌توان میزان اثرگذاری هر مکانیزم بر ضرایب بی‌بعد آیرودینامیکی را مشاهده نمود.

جدول ۹- ضرایب آیرودینامیک در بهترین مدل‌های توسعه یافته و ترکیبی

تغییرات	C_d	تغییرات	C_{di}	مدل‌های توسعه یافته
- ۴/۱٪	-۰/۳۷۵	- ۱۰/۲٪	۰/۲۹۸	بهترین در آیرودینامیک جلو
- ۲/۶٪	-۰/۳۹	- ۴/۷٪	۰/۳۲۴	بهترین در آیرودینامیک میانی
- ۴/۱٪	-۰/۳۷۵	- ۱۱/۱٪	۰/۲۹۵	بهترین در آیرودینامیک عقب
+ ۲/۸٪	-۰/۳۵	- ۸/۱٪	۰/۳۰۵	ترکیبی ۱
+ ۵/۶٪	-۰/۳۴	- ۱۲/۴٪	۰/۲۹۱	ترکیبی ۲
- ۴/۱٪	-۰/۳۷۵	- ۱۶/۳٪	۰/۲۷۸	ترکیبی نهایی
	-۰/۳۶		۰/۳۲۲	مدل اصلی



شکل ۲۳- نمای فوقانی توزیع سرعت در پشت بدنه مدل اصلی و دارای کانال (ب) مستقیم، (ج) مورب، (د) ترکیبی و (ه) نهایی

به دلیل فشار بسیار بالا در ناحیه اطراف چرخ عقب، در مدل توسعه یافته نهایی مساحت ورودی کانال هوا در مدل ترکیبی به میزان دو برابر افزایش یافت تا جریان بیشتری به محدوده ویک منتقل شود و این تغییر موجب کاهش بیشتر نیروی پسا نسبت به مدل ترکیبی شد. در مدل نهایی ضریب پسای خودرو به میزان ۱۱/۱٪ کاهش یافت و ضریب برآ نیز به میزان ۴/۱٪ با کاهش مواجه شد زیرا در مدل اصلی خودرو که اطراف چرخ عقب فشار بالایی داشت، نیرویی از طرف جریان هوا به سمت بالا به محدوده طوقه اطراف چرخ وارد می‌شد. در مدل نهایی توسعه یافته عقب، با جریان یافتن هوا در کانال مقدار این نیرو کاهش یافت. در شکل ۲۳ نمای فوقانی سرعت در انتهای خودرو برای مدل‌های بررسی شده در اصلاح آیرودینامیک عقب نمایش داده شده است. به وضوح حرکت جریان به سمت پشت بدنه در همه مدل‌ها و کاهش ناحیه ویک به صورت محسوس در مدل توسعه یافته نهایی نسبت به مدل اصلی مشاهده گردید.

۴-۴- اصلاح آیرودینامیک ترکیبی

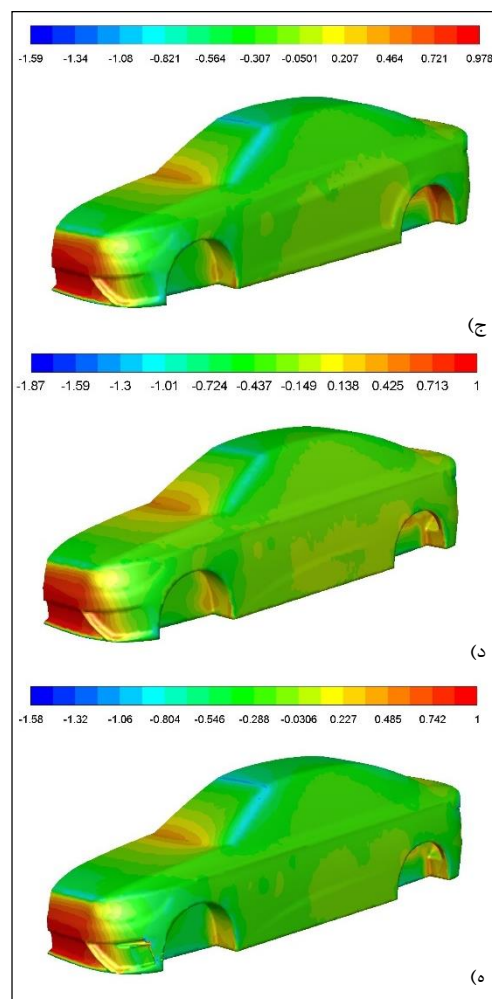
یکی از دغدغه‌های مهم در بحث استفاده از روش‌های بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروها، اثرات بکارگیری همزمان مکانیزم‌هاست زیرا هر تغییری در حرکت جریان می‌تواند عملکرد جریان در پایین‌دست بدنه را تحت تاثیر قرار دهد. در جدول ۹ مروری بر موثرترین روش‌های کاهش نیروی پسا در

نیروی پسا از خود نشان داد. از این رو مقدار فشار استاتیکی وارد بر بدنه در اطراف چرخ عقب برای بهترین مدل توسعه یافته آیرودینامیک عقب در حدود ۲۲۴ پاسکال بود، در حالی که برای مدل ترکیبی ۱ در حدود ۱۵۳ پاسکال مشاهده شد. به منظور بهبود عملکرد آیرودینامیکی مکانیزم‌های ترکیبی، در مدل ترکیبی ۲ کانال عقب حذف گردید و صرفاً بهترین مدل‌های توسعه یافته در آیرودینامیک جلو و میانی با یکدیگر ترکیب شدند. نتایج حاصل کاهش بیشتری نسبت به مدل ترکیبی ۱ در ضریب پسا را نشان داد و نقش مخرب کانال هوای عقب در هنگام بکارگیری همزمان سه مکانیزم اثبات شد؛ اما دو روش ترکیبی ۱ و ۲ موجب افزایش ضریب برآ گردیدند که اثر مخربی برای پایداری خودرو به شمار می‌آید. به منظور رفع این ایراد، مدل ترکیبی نهایی با بکارگیری همزمان کانال هوا در جلو و عقب بدنه بدون اعمال انحنای جدید و با همان انحنای مدل اصلی خودروی تارا مورد بررسی قرار گرفت. در واقع در این طرح بهترین مدل‌های بخش اصلاح آیرودینامیک جلو و عقب با یکدیگر ترکیب شدند که نتایج حاصل کاهش ضریب پسا به میزان ۱۶/۳٪ را نشان داد که اثرگذاری بیشتری نسبت به دو مدل ترکیبی ۱ و ترکیبی ۲ دارد و همچنین کاهش ضریب برآ به میزان ۴/۱٪ را دربرداشت.

جدول ۱۰- تفکیک ضریب پسا در مدل اصلی و ترکیبی

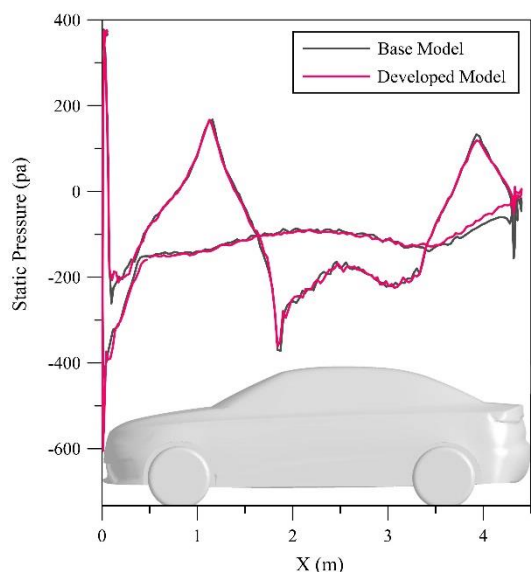
نهایی			مدل
$C_{d,v}$	$C_{d,p}$	$C_{d,total}$	
۰/۰۳۸	۰/۲۹۴	۰/۳۳۲	اصلی
۰/۰۴۰	۰/۲۳۸	۰/۲۷۸	ترکیبی نهایی

همانطور که در جدول ۱۰ آورده شده است، ضریب پسای اصطکاکی در مدل ترکیبی نهایی نسبت به مدل اصلی به علت بکارگیری کانال، افزایش یافته است؛ این درحالی است که ضریب پسای فشاری به میزان ۱۹٪ کاهش چشمگیری داشته است. در شکل ۲۵ و ۲۶ توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در ناحیه ویک به ترتیب در صفحه چسبیده به انتهای بدنه و به فاصله ۵۰ سانتی‌متر از آن برای دو مدل مذکور آورده شده است. نمای نشان داده شده از روبرو برای نیم‌بدنه می‌باشد و کاهش محدوده انرژی جنبشی آشفتگی در مدل ترکیبی نهایی نسبت به مدل اصلی به وضوح مشهود است. به علت وجود کانال



شکل ۲۴- توزیع ضریب فشار بر روی بدنه در مدل الف) اصلی و بهترین مدل‌های بخش توسعه ب) جلو، ج) میانی، د) عقب و ه) ترکیبی

در مدل ترکیبی ۱ بهترین مدل‌های اصلاح آیرودینامیک جلو، میانی و عقب به صورت همزمان بر روی بدنه پیاده‌سازی شد. نتایج حاصل در این مورد از کاهش در ضریب پسا حکایت داشت در حالی که انتظار می‌رفت با بکارگیری همه روش‌ها نیروی پسا با کاهش بیشتری مواجه شود. دلیل این امر کاهش فشار استاتیکی در اطراف چرخ عقب و عملکرد نامطلوب کانال در این محدوده بود. بخش قابل توجهی از جریان توسط انحنای جانبی به محدوده بالای صندوق عقب منتقل شد، در نتیجه فشار در اطراف چرخ عقب کاهش یافته و کانال هوای عقب به علت عدم برقراری مناسب جریان عملکرد مخربی بر روی



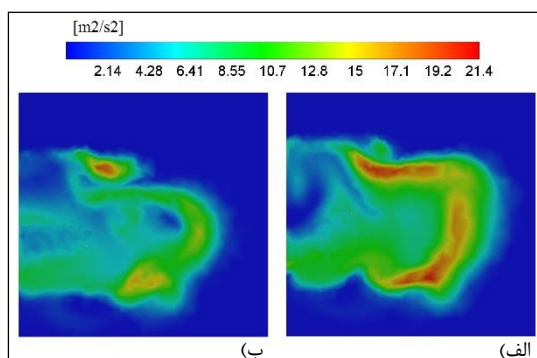
شکل ۲۷- نمودار فشار استاتیکی بر روی بدنه در مدل اصلی و ترکیبی نهایی

۵- جمع بندی

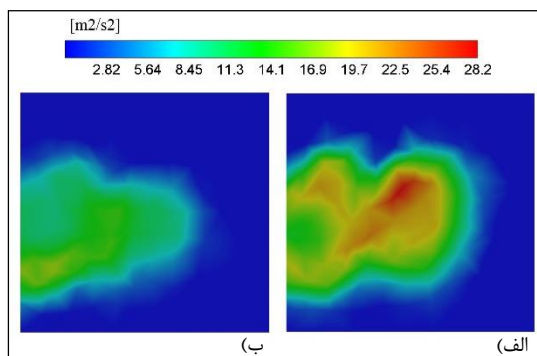
در پژوهش حاضر به صورت عددی به بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروی ایرانی تارا با مطالعه تغییرات ضریب پسا و ضریب برآ پرداخته شد. جهت طراحی نیم‌بدنه با صرف نظر کردن از برآمدگی‌های زیر بدنه و آینه بغل از نرم‌افزار Catia و برای تحلیل دینامیک سیالات از نرم‌افزار Ansys Fluent استفاده شد. مطالعه کاهش نیروی پسا در سه بخش اصلاح آیرودینامیک جلو و عقب خودرو با استفاده از کانال انتقال جریان هوا از نواحی فشار بالا به کم فشار و بخش اصلاح آیرودینامیک میانی با طراحی انحناهای جانبی بر روی بدنه صورت پذیرفت.

در اصلاح آیرودینامیک جلو بیشترین تاثیر بر روی کاهش ضریب پسا و ضریب برآ در هنگام بکارگیری همزمان کانال جانبی و کرکره هوا با انتقال هوا کنار سپر به اطراف چرخ جلو صورت گرفت. نتایج حاصل نشان داد، کاهش طول کانال تاثیر مناسبی بر انتقال جریان دارد؛ همچنین ابعاد ورودی و خروجی باید به گونه‌ای در نظر گرفته شود که جریان برگشتی در کانال رخ ندهد. در بخش آیرودینامیک میانی با الهام گرفتن از انحناهای جانبی خودروهای مختلف به بررسی اثرات انتقال جریان از جلو به عقب خودرو پرداخته شد که نتایج این بخش نشان‌دهنده تاثیر مطلوب همه انحناها بر کاهش ضریب پسا است؛ در حالی

در عقب خودرو، انرژی جنبشی آشفتگی در محدوده میانی در نزدیکی بدنه کاهش یافته است، اما در جوانب همچنان مقدار آن زیاد است که دلیل این امر آشفتگی ناشی از چرخ‌ها در طرفین خودرو است؛ همچنین در شکل ۲۷ نیز نمودار فشار استاتیکی بر روی بدنه مشاهده می‌شود. لازم به توضیح است، نتایج ارائه شده در شکل مذکور مربوط به خط میانی بدنه می‌باشد و با توجه به این که تغییرات اعمال شده در مدل توسعه‌یافته نهایی در جوانب بدنه صورت گرفته است، نتایج مدل‌های ترکیبی نهایی و اصلی اختلاف قابل توجهی ندارند.



شکل ۲۵- توزیع انرژی جنبشی آشفتگی چسبیده به پشت بدنه مدل الف) اصلی و ب) ترکیبی نهایی



شکل ۲۶- توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در فاصله ۰/۵ متر از انتهای بدنه مدل الف) اصلی و ب) ترکیبی نهایی

- [5] Sudin M, Abdullah M, Shamsuddin S, Ramli F, Tahir M (2014) Review of research on vehicles aerodynamic drag reduction methods, IJMME 14(2): 37-47.
- [6] Sarkar S, Thummar K, Shah N, Vagreacha V (2019) A review paper on aerodynamic drag reduction and CFD analysis of vehicles. Proc. A Rev. Paper Aerodyn. Drag Reduction CFD Anal. Vehicles, 231-235.
- [7] Huluka A, Kim C (2020) Effect of the Air Duct System of a Simplified Vehicle Model on Aerodynamic Performance, IJAME 17(2): 7985-7995.
- [8] Huluka A, Kim C (2021) A Numerical Analysis on Ducted Ahmed Model as a New Approach to Improve Aerodynamic Performance of Electric Vehicle, Int. J. Automot 22(2): 291-299.
- [9] Ferraris A, Pinheiro H, Airale A, Carello M, Polato D (2021) City Car Drag Reduction by Means of Flow Control Devices, SAE Technical Paper, Torino Politecnico, Italy.
- [10] Aktas U, Abdallah K (2017) Aerodynamics concept study of electric vehicles, Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [11] Dickison M, Ghaleeh M, Milady S, Wen L, Qubeissi M (2020) Investigation into the aerodynamic performance of a concept sports car, JAFM 13(2): 583-601.
- [12] Nie B, Zhou Q, Xia Y, Tang J (2014) Influence of feature lines of vehicle hood styling on headform kinematics and injury evaluation in car-to-pedestrian impact simulations. SAE Int. J. Transp. Saf 2(1): 182-189.
- [13] Varney M, Passmore M, Gaylard A (2017) The effect of passive base ventilation on the aerodynamic drag of a generic SUV vehicle, SAE SAE Int. J. Passeng 10: 345-357.
- [۱۴] حیدری نژاد ق (۱۳۹۸) مقدمه‌ای بر توربولانس، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، چاپ سوم: ۲۱۲-۱۷۱.
- [15] Meile W, Brenn G, Reppenhagen A, Lechner B, & Fuchs A (2011) Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body, CFD letters, 3(1): 32-39.
- [16] Franck G, Nigro N, Storti M, D'elia J (2009) Numerical simulation of the flow around the Ahmed vehicle model, Latin American applied research, 39(4):295-306.
- [۱۷] گروه صنعتی ایران خودرو (۱۴۰۰) دفترچه راهنمای خودرو تارا: ۱۴۲-۱۴۱

که تغییرات ضریب برآ به طراحی انحنای بستگی دارد. در بخش اصلاح آیرودینامیک عقب کانال‌هایی جهت انتقال هوای اطراف چرخ عقب به پشت بدنه طراحی شد. مشاهده گردید، هر چه ابعاد ورودی و خروجی بزرگتر شد، به علت اختلاف فشار بالا در دو سر کانال، ضریب پسا و ضریب برآ با کاهش بیشتری مواجه گردید. در بخش نهایی با ترکیب بهترین روش‌های پیاده شده در سه بخش مذکور، به مطالعه تاثیر استفاده همزمان از مکانیزم‌های بهبود عملکرد آیرودینامیکی پرداخته شد که در بهترین حالت با ترکیب کانال جانبی، کرکره هوا و کانال عقب به دلیل انتقال مناسب جریان هوا از جلو به عقب خودرو، ضریب پسا از ۰/۳۳۲ به ۰/۲۷۸ به میزان ۱۶/۳٪ کاهش یافت؛ همچنین ضریب برآ نیز به میزان ۴/۱٪ با کاهش مواجه شد.

ایجاد کانال انتقال جریان هوا و انحنای بدنه از جمله جدیدترین روش‌های بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروها هستند. شایسته است، پژوهشگران با پیاده‌سازی مکانیزم‌های دیگر از جمله روش‌های فعال و انفعالی کنترل جریان بر روی خودروهای داخلی مانند تارا به بررسی تاثیر هر کدام و مقایسه با نتایج تحقیق پیش‌رو جهت دستیابی به بهترین روش کاهش نیروی پسا برای رفع نیازهای گروه‌های صنعتی بپردازند.

مراجع

- [۱] پسندیده‌فرد م، حسینی‌کیا م (۱۳۸۴) بررسی نیروهای آیرودینامیک وارد بر بدنه خودرو سمند، سیزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
- [2] Choi W (2015) Study on Ultra-Low Aerodynamic Drag Vehicle through Optimization of Rear Shape and Aerodynamic Drag Reduction Devices. Master's Degree Thesis, Seoul National University, South Korea.
- [۳] بهروان ر، مهدی م (۱۳۹۷) بررسی عددی اثرات ترکیبی اسپویلر عقب و و انحنای سطوح جانبی بر نیروی برآ و پسای وارد بر خودروی سدان، ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس ۱۸(۲): ۳۱۳-۳۰۵.
- [۴] خوشنویس ع، دانش‌پژوه و، امینی ح (۱۳۹۳) بررسی تجربی تاثیرات زبری بر پروفیل سرعت و پسای خودروی سمند، بیست و دومین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.