

## بررسی عددی اثرات بکارگیری کانال هوا در عقب و ایجاد انحنای جانبی بر آیرودینامیک خودرو

سعید باعصمت<sup>۱\*</sup>، محمود پسندیده فرد<sup>۲</sup>، علیرضا تیمورتاش<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، [saeed.baesmat@mail.um.ac.ir](mailto:saeed.baesmat@mail.um.ac.ir)

۲ و ۳- استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، [fard\\_m@um.ac.ir](mailto:fard_m@um.ac.ir) و [teymourtash@um.ac.ir](mailto:teymourtash@um.ac.ir)

\*نویسنده مخاطب

### 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 مختلف بین محدوده اطراف چرخ عقب و پشت خودرو مورد بررسی قرار گرفت. هدف از اعمال تغییرات مذکور برقراری جریان میان نواحی از بدنه که اختلاف فشار بالایی دارند بود که در بهترین حالت موجب کاهش ضریب پسا به میزان ۱۱/۱٪ و کاهش ضریب برآ به میزان ۴/۱٪ شد. همچنین در بخش توسعه آیرودینامیک میانی 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 نیروی پسا کاهش یافت و در بهترین مدل ضریب پسا به میزان ۴/۷٪ با کاهش مواجه گردید.

**واژه های کلیدی:** آیرودینامیک - نیروی پسا - خودرو - تارا - عددی.

### 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 بر جای 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، 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 می‌باشد. [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 شبیه سازی 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 می‌باشد. نیروی پسی 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 بیشینه فشار استاتیکی وجود دارد در حالی که در قسمت عقب خودرو با جدایش جریان از سطح بدنه، ناحیه کم فشار ویک (Wake) ایجاد می‌شود. نیروی پسی اصطکاکی نیز به علت اصطکاک میان هوای مجاور خودرو و بدنه تولید می‌گردد که وابسته به لایه مرزی و برهم کنش جریان و سطح می‌باشد. [۵]

مهم‌ترین عامل موثر بر نیروی پسا، شکل کلی بدنه است که ۴۰٪ تا ۴۵٪ آن را شامل می‌شود. همچنین چرخ‌ها و زیربند 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 پسی فشاری می‌باشد 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 (Active) و غیرفعال (Passive) صورت می‌پذیرد. در روش کنترل فعال، سیستم‌ها یا محرک‌هایی که برای کاهش نیروی پسا نیاز به برق یا انرژی دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ برای نمونه می‌توان به مکش و دمیدن هوا اشاره نمود. در روش کنترل غیرفعال، 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 غیرفعال جریان اطراف خودرو انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده پخش‌کننده در زیربند، نصب اسپویلر در عقب بدنه، بکارگیری مولد گردابه در سقف اشاره کرد. [۷] از دیگر راه‌های کاهش

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 ۰/۰۲۵ و افزایش ضریب برآ به میزان ۰/۰۸ شد.

بهروان و مهدی [۳] اثرات ایجاد انحنا 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.

در پژوهش عددی حاضر با طراحی خودروی تارا به کمک نرم افزار Catia و تحلیل آیرودینامیکی آن در نرم افزار Ansys Fluent به بررسی اثرات بکارگیری کانال انتقال جریان هوا در عقب خودرو و انحنای جانبی بدنه جهت کاهش نیروی پسا در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت پرداخته شده است. در بخش توسعه آیرودینامیک میانی انحنای مختلف بر روی بدنه پیاده سازی 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.

## ۲- معادلات حاکم و مدل آشفتگی

در دینامیک سیالات محاسباتی جریان آشفته، مسائل به دو روش RANS<sup>۱</sup> و LES<sup>۲</sup> شبیه سازی می شوند. مدل های آشفتگی در روش RANS با صرف نظر کردن از گردابه های کوچک و مدل کردن گردابه های بزرگ به تحلیل جریان سیال می پردازند. اساس کار این روش بر میانگین گیری زمانی است در حالی که روش LES با استفاده از میانگین گیری مکانی به مدل کردن گردابه های کوچک و حل گردابه های بزرگ می پردازد. روش دیگری به نام DES<sup>۳</sup> 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 شبیه سازی می کند. معادلات اساسی حاکم در تمامی مسائل دینامیک سیالات محاسباتی، معادله پیوستگی و ناویر استوکس هستند که در روابط ۱ و ۲ بیان شده اند [۳]:

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

نیروی پسا از طریق کنترل غیرفعال جریان، استفاده از روشهایی جهت انتقال جریان از نواحی فشار بالا به محدوده کم فشار در اطراف بدنه می باشد. آلمی هو و همکاران [۸] به روش عددی در بدنه احمد (Ahmed Body) که یک مدل مینا در خودروها است، اثرات استفاده از کانال هوا با ابعاد مختلف جهت انتقال مستقیم جریان از جلو به پشت آن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد هر چه اندازه کانال بزرگ تر 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. آن ها در سال ۲۰۲۱ [۹] پژوهش خود را با بررسی تاثیر ایجاد چمفر در لبه کانال جهت انتقال بهتر جریان به داخل آن در سرعت های 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 [۱۰] با استفاده از نرم افزار Star CCM به مطالعه و کاهش نیروی پسای یک مدل خودروی هاچ بک پرداختند. در جلوی خودرو، ایجاد کرکه هوا (Air Curtain) و شکاف گریز هوا (Air Relief) موجب انتقال آسان جریان از کنار سپر به جوانب بدنه شد که به همین دلیل ضریب پسا ۰/۵۸٪ کاهش یافت. در عقب خودرو نیز به ایجاد مجرای خروج هوا (Air Blow) جریان از اطراف چرخ عقب به پشت خودرو هدایت گردید که باعث کاهش ضریب پسا به میزان ۰/۹۷٪ شد. دلیل اثرگذاری پایین در مکانیزم های بکاررفته، هندسه آن ها بود که مانند شکافهایی در داخل بدنه ایجاد شده بودند و موجب می شد جریان کمی از آن عبور کند.

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 خودرو را مورد بررسی قرار دادند. از جمله روش های بکار رفته در این تحقیق می توان به استفاده از کرکه، کانال و دریچه (Vent) انتقال جریان هوا در اطراف چرخ ها و عقب بدنه اشاره نمود. به طور کلی این تحقیق نشان دهنده بهترین 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 می باشد. تغییرات اعمال شده در این بخش موجب کاهش ضریب پسا به میزان ۷/۳٪ و کاهش ضریب برآ به میزان ۳۳/۵٪ گردید.

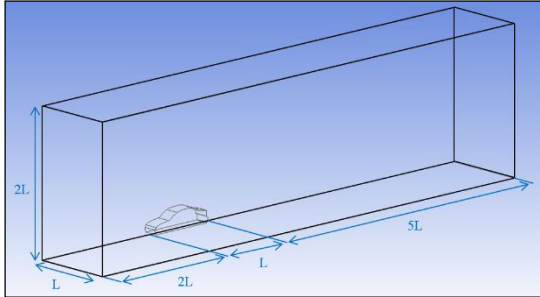
واری و همکاران [۱۲] در بخشی از تحقیق خود اثرات انتقال جریان هوا از طرفین بدنه به پشت یک مدل خودروی شاسی بلند از

<sup>۳</sup> Detached Eddy Simulation

<sup>۱</sup> Reynolds Averaged Navier-Stokes

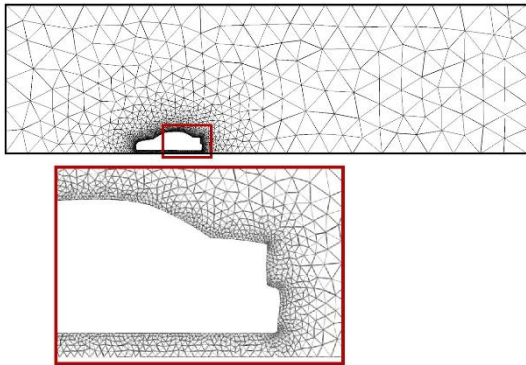
<sup>۲</sup> Large Eddy Simulation

شد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده [۱۱] ابعاد محیط حل معادلات حاکم در اطراف بدنه در شکل ۱ نمایش داده شده است:

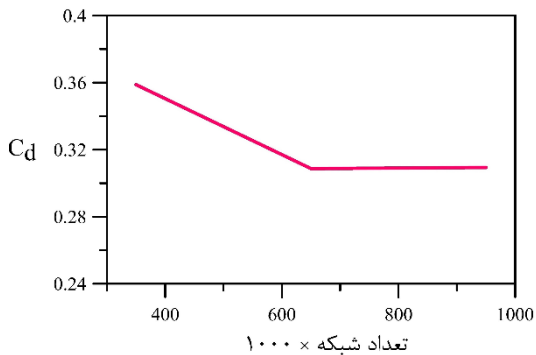


شکل ۱- ابعاد محیط حل معادلات حاکم

لازم به ذکر است خودرو به صورت پایا، فشار مینا، نیم‌بدنه و با استفاده از مدل آشفتگی RNG k-ε مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط مرزی شامل سرعت ورودی برابر با ۲۵ متر بر ثانیه، فشار خروجی و سطح زیرین محیط حل مانند جاده متحرک می‌باشد. در شکل ۲ شبکه بندی محیط اطراف بدنه نشان داده شده است:



شکل ۲- شبکه بندی اطراف بدنه سمند



(الف)

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

در معادلات فوق  $u_i$  بیانگر سرعت،  $\nu$  لزجت سینماتیکی و  $\nu_t$  لزجت آشفتگی سیال است.

در تحلیل آیرودینامیکی سیالات، مدل‌های آشفتگی k-RNG و  $\epsilon$  و SST k- $\omega$  مناسب هستند. در سال‌های گذشته مدل k-RNG  $\epsilon$  به دلیل شبیه‌سازی خوب جریان‌های چرخشی و سطوح دارای انحنا زیاد مورد توجه محققان بوده‌اند. اما مدل‌های k- $\epsilon$  به گونه‌ای هستند که لزجت سیال در کنار دیواره را بالا و سرعت را کم پیش-بینی می‌کنند. با توسعه مدل‌های آشفتگی امروزه مدل k- $\omega$  به ویژه SST k- $\omega$  کاربرد بیشتری در این نوع مسائل پیدا کرده است زیرا در لایه مرزی و کنار دیواره از روابط k- $\omega$  و در نواحی دورتر از معادلات k- $\epsilon$  برای شبیه‌سازی جریان سیال استفاده می‌شود. در روابط ۳، ۴ و ۵ به ترتیب معادلات انرژی جنبشی آشفتگی (k)، انرژی اتلاف شده ( $\epsilon$ ) و نسبت انرژی جنبشی به تلفات ( $\omega$ ) آورده شده است [۱۳]:

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

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

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + C_{1\omega} \frac{\omega}{k} P_k + C_{2\omega} \omega^2 \quad (5)$$

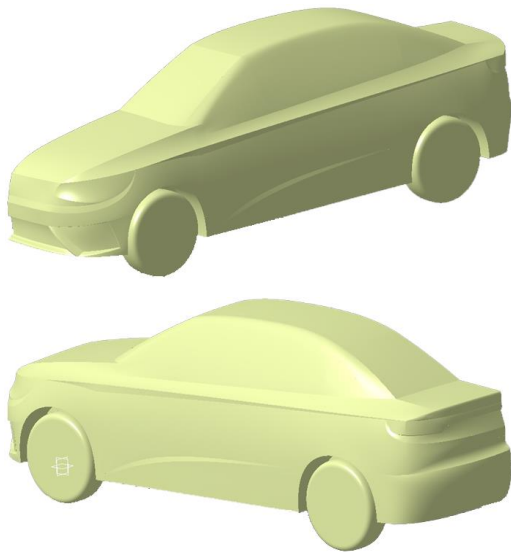
در معادلات بیان شده، مقدار ثوابت C با استفاده از آزمایشات تجربی محققان پیشین موجود می‌باشد. [۱۳]

### ۳- اعتبارسنجی

به دلیل عدم وجود تحقیق آکادمیک بر روی خودروی تارا، برای اعتبارسنجی نتایج پژوهش پیش‌رو با تحقیقات احمدی و همکاران [۱۴] که بر روی مدل ساده شده‌ای از خودرو سمند صورت گرفته بود مقایسه شد. به این منظور بدنه خودروی سمند با استفاده از نرم افزار Catia بدون انحنا و با صرف نظر از چرخ‌ها طراحی گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent به تحلیل عددی آن پرداخته

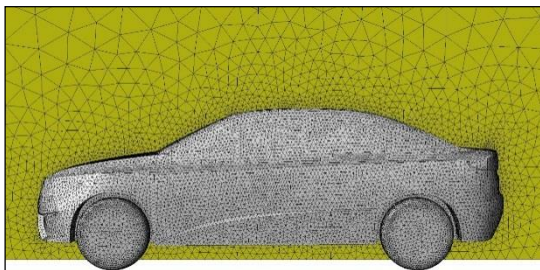
#### ۴- آیرودینامیک تارا

آنچه در مطالعه حاضر مدنظر است تحلیل آیرودینامیکی خودروی تارا می‌باشد. از این رو بدنه این خودرو به کمک ابعاد موجود در دفترچه فنی آن که توسط شرکت سازنده منتشر شده است [۱۵] در نرم‌افزار Catia به صورت نیم‌بدنه با صرف نظر از برآمدگی‌های زیربدنه و آینه‌ها طراحی شد که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد:

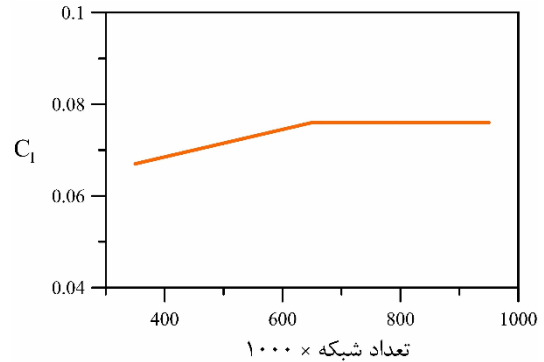


شکل ۵- نمای بدنه طراحی شده از خودروی تارا

همچنین تحلیل عددی در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت با استفاده از مدل آشفتگی SST k- $\omega$  صورت پذیرفت. صفحه زیرین محیط حل به عنوان جاده متحرک و چرخ‌ها با سرعت دورانی ۴۲ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شد. شبکه‌بندی نیز با همان تنظیماتی که در بخش اعتبارسنجی بیان شد، انجام پذیرفت و بیشینه مقدار  $y^+$  نیز بر روی بدنه مقدار ۴ را نشان داد. شکل ۶ شبکه‌بندی محیط اطراف تارا نشان می‌دهد و در شکل ۷ استقلال از شبکه برای این مسئله مورد بررسی قرار گرفته است:



شکل ۶- شبکه‌بندی محیط اطراف و بدنه تارا



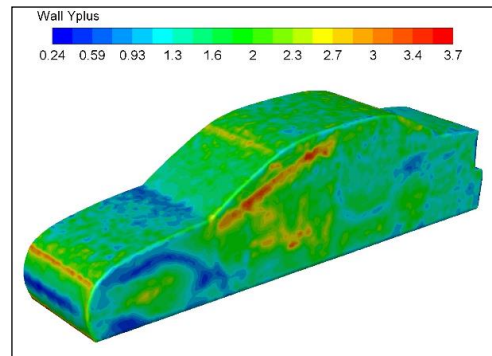
(ب)

شکل ۳- استقلال از شبکه سمند در الف) راستای جریان و ب) عمود بر آن

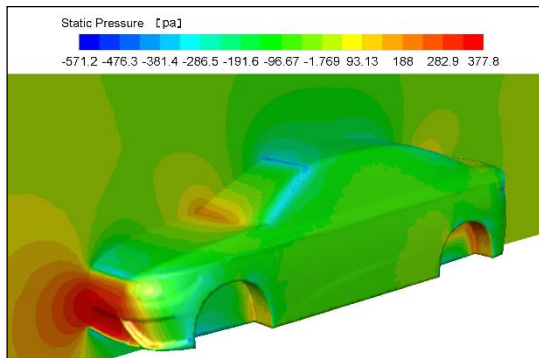
جدول ۱- اعتبارسنجی ضرایب پسا و برآ

اختلاف	$C_d$	اختلاف	$C_l$	اختلاف
احمدی و همکاران [۱۴]	۰/۲۸۲	۰/۸۰		
پژوهش حاضر	۰/۳۰۸	۹/۲٪	۰/۰۷۶	۵٪

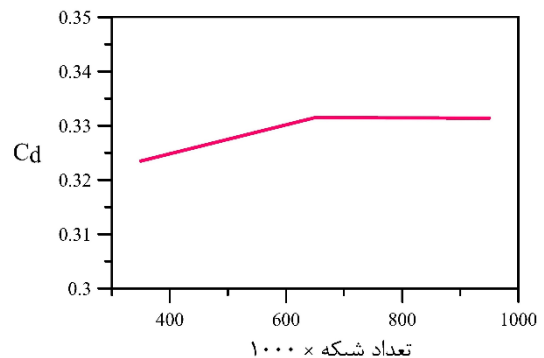
همانطور که در شکل ۳ ملاحظه گردید نتایج تحلیل عددی در تعداد شبکه بیشتر از ۶۵۰ هزار مستقل از شبکه بندی است. جدول ۱ نیز نشان دهنده مقایسه نتایج پژوهش حاضر با تحقیقات گذشته می‌باشد که از دقت خوبی برخوردار است. لازم به توضیح است دلیل اختلاف نتایج در ضریب پسا و ضریب برآ، تفاوت در شبکه‌بندی محیط حل می‌باشد که تحقیق مدنظر جهت اعتبارسنجی با استفاده از نرم‌افزار Gambit و در مقاله حاضر با Ansys Meshing به روش نامنتظم انجام شده است که شبکه موجود از کیفیت مناسب‌تری برخوردار است. همچنین با تراکم شبکه در لبه‌های بدنه و تعریف مش لایه مرزی،  $y^+$  نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که مقادیر آن در تمام بدنه کمتر از ۵ بود و توزیع آن در شکل ۴ نمایش داده شده است:



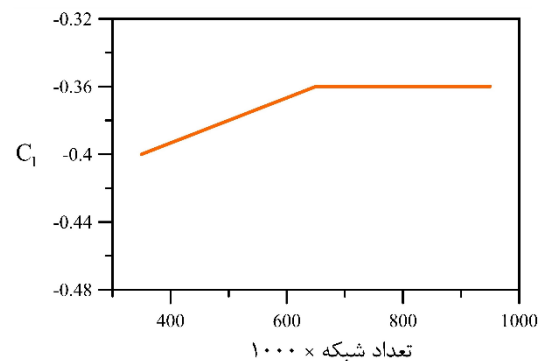
شکل ۴- توزیع  $y^+$  بر روی نیم‌بدنه سمند



شکل ۸- توزیع فشار استاتیکی بر روی بدنه و اطراف آن



(الف)



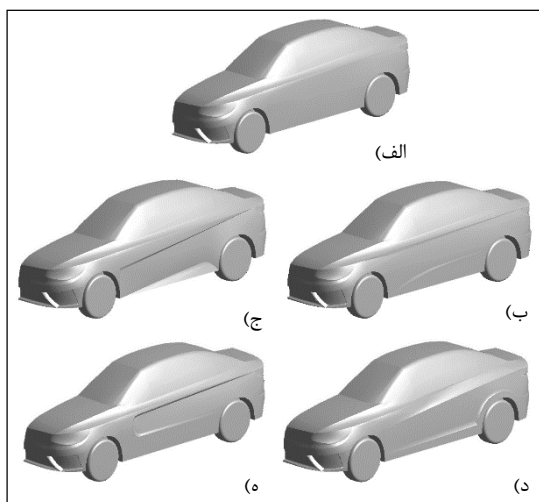
(ب)

شکل ۷- استقلال از شبکه تارا در (الف) راستای جریان و (ب) عمود بر 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.

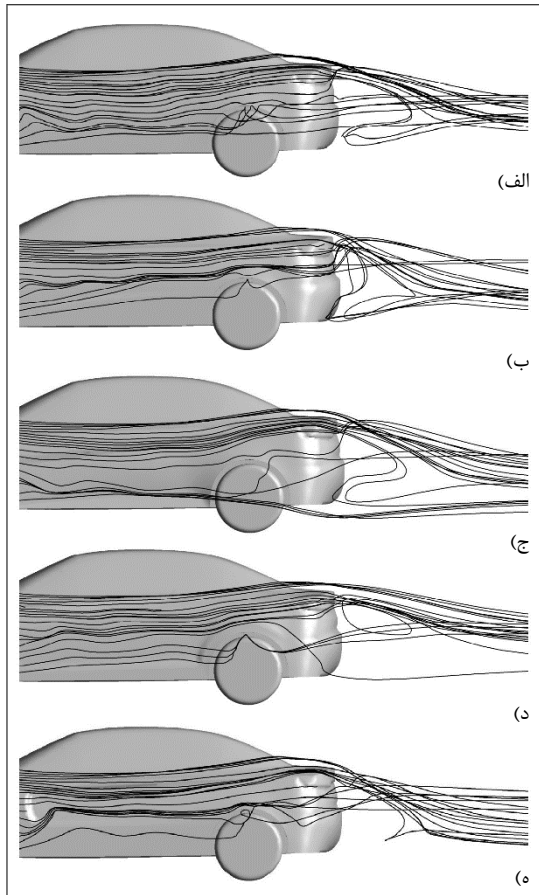
#### ۴-۱- توسعه آیرودینامیک میانی

با توجه به این که امروزه خودروها دارای انحناهای بسیاری بر روی جوانب بدنه هستند، در این بخش با بررسی انحناهای مختلف در تلاش برای انتقال جریان از جلو به عقب خودرو بودیم. از این رو با الهام‌گیری از انحناهای جانبی خودروهای تارا، دنا، هیوندای النترا و هایما اس ۵ و مقایسه آن‌ها با مدل بدون انحناهای خودروی تارا به تحلیل نیروهای آیرودینامیکی پرداخته شد که در شکل ۹ جزئیات طراحی جوانب بدنه و در جدول ۲ ضرایب آیرودینامیک هر طرح نشان داده شده است:

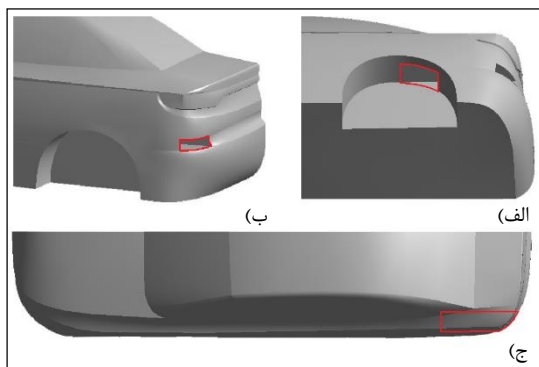


شکل ۹- هندسه (الف) مدل بدون انحنا و مدل‌های دارای انحناهای جانبی (ب) تارا، (ج) دنا، (د) النترا و (ه) هایما

همانطور که در شکل ۷ آورده شده است، 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 در خودرو می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد که ۸۸٪ از کل نیروی پسا مربوط به نیروی فشاری وارد بر بدنه است. در شکل ۸ توزیع فشار استاتیکی بر روی نیم‌بدنه نمایش داده شده است که بیانگر وجود بیشینه فشار در پیشانی خودرو و اطراف چرخ عقب می‌باشد.



شکل ۱۰- خطوط جریان هوا در اطراف الف) مدل بدون انحنا و مدل‌های دارای انحنای جانبی ب) تارا، ج) دنا، د) النترا و ه) هایما



شکل ۱۱- نمای الف) ورودی، ب) خروجی و ج) فوقانی مدل کانال

مستقیم

جدول ۲- ضرایب آیرودینامیک در توسعه میانی

تغییرات	$C_d$	تغییرات	$C_i$	تغییرات
تارا	۰/۳۳۲	- ۲/۴ %	-۰/۳۳۶	+ ۵/۲ %
دنا	۰/۳۲۸	- ۳/۵ %	-۰/۳۲۷	+ ۲/۶ %
النترا	۰/۳۲۴	- ۴/۷ %	-۰/۳۳۹	- ۲/۶ %
هایما	۰/۳۳۴	- ۱/۸ %	-۰/۳۳۹	- ۲/۶ %
مدل بدون انحنا	۰/۳۴		-۰/۳۳۸	

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 بالا چرخ عقب منتقل گردید و در بهترین مدل که انحنای خودروی النترا بود، جریان با برخورد به برآمدگی و شکستگی‌های جوانب، به ناحیه ویک انتقال داده شد. تمامی این مدل‌ها با افزایش فشار عقب خودرو موجب کاهش نیروی پسا گردیدند.

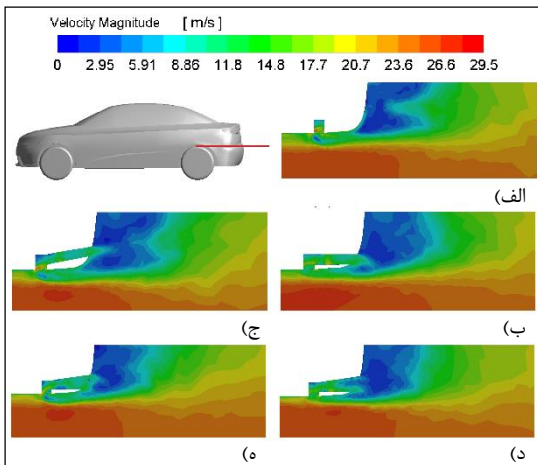
اما اثرگذاری انحنای بر نیروی برآ متفاوت بود. در انحنای خودروی تارا و دنا به علت نوع انحنا بخش قابل توجهی از جریان به محدوده چرخ عقب منتقل شد که به دلیل افزایش فشار در اطراف این چرخ باعث ایجاد نیرو به سمت بالا گردیدند. در نتیجه با مطالعه انحنای بیان شده در بخش توسعه آیرودینامیک میانی بهترین مدل که از نظر نیروی پسا و همچنین از نظر نیروی برآ عملکرد مطلوبی را نشان داد انحنای خودروی النترا بود. در شکل ۱۰ خطوط جریان در جوانب مدل‌های توسعه یافته و بدون انحنا نمایش داده شده است.

#### ۲-۴- توسعه آیرودینامیک عقب

همانگونه که پیش‌تر 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 که دارای گردابه است می‌باشد 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 پسا موثر خواهد بود از این رو با طراحی کانال هوا این امر محقق می‌شود. در اولین مدل توسعه یافته کانال مستقیم و مدل دوم کانال مورب جهت انتقال جریان هوا بکار رفته است که در شکل ۱۱ و ۱۲ هندسه آن‌ها نشان داده شده است:

کانال ترکیبی	۰/۳۰۰	- ۹/۶ %
کانال نهایی	۰/۲۹۵	- ۱۱/۱ %
مدل اصلی	۰/۳۲۲	

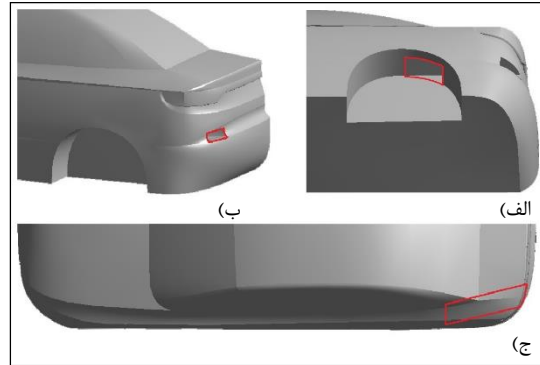
به دلیل فشار بسیار بالا در ناحیه اطراف چرخ عقب، در مدل توسعه یافته نهایی مساحت ورودی کانال هوا در مدل ترکیبی به میزان دو برابر افزایش یافت تا جریان بیشتری به محدوده ویک منتقل شود و این تغییر موجب کاهش بیشتر نیروی پسا نسبت به مدل ترکیبی شد. در مدل نهایی ضریب پسای خودرو به میزان ۱۱/۱٪ کاهش یافت و ضریب 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 ۱۴ سرعت در انتهای خودرو برای مدل‌های بررسی شده در توسعه 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.



شکل ۱۴- توزیع سرعت در پشت بدنه مدل الف) اصلی و دارای کانال ب) مستقیم، ج) مورب، د) ترکیبی و ه) نهایی

#### ۵- جمع بندی

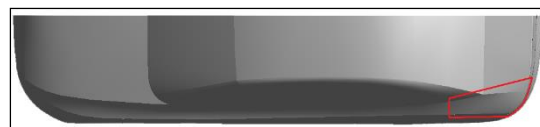
در پژوهش حاضر به صورت عددی به بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروی ایرانی تارا با مطالعه تغییرات ضریب پسا و ضریب برآ پرداخته شد. جهت طراحی نیم‌بدنه با صرف نظر کردن از برآمدگی‌های زیر بدنه و آینه بغل از نرم‌افزار Catia و برای تحلیل دینامیک



شکل ۱۲- 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 می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول ۳ موجود است که حاکی از اثرگذاری بیشتر کانال مستقیم بر کاهش ضریب پسا می‌باشد. در این مدل در مسیر جریان داخل کانال صفحه‌ای وجود ندارد که در برابر حرکت هوا مقاومت کند در حالی که در مدل کانال مورب دیواره‌ای از کانال باعث تغییر مسیر جریان می‌شود 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 مدل‌های کانال مستقیم و مورب می‌باشد. که در شکل ۱۳ نمای فوقانی این مدل نشان داده شده است. همچنین بهبود عملکرد آیرودینامیک خودرو با کاهش ضریب پسا در مدل ترکیبی نسبت به مدل‌های 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 می‌باشد.



شکل ۱۳- نمای فوقانی مدل کانال ترکیبی

جدول ۳- ضریب پسا در مدل‌های توسعه یافته آیرودینامیک عقب

تغییرات	$C_d$	مدل‌های توسعه یافته
- ۷/۸ %	۰/۳۰۶	کانال مستقیم
- ۵/۱ %	۰/۳۱۵	کانال مورب

- [۵] M. Sudin, M. Abdullah, S. Shamsuddin, F. Ramli, M. Tahir, "Review of research on vehicles aerodynamic drag reduction methods" *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, v. ۱۴, n. ۲, pp. ۳۷-۴۷, ۲۰۱۴.
- [۶] A. Khalesi Doost, A. Yazdi, "Green nature and reducing of air pollution with vehicle drag coefficient correction" *Journal of Advances in Energy Engineering*, v. ۱, n. ۲, pp. ۲۸-۳۳, ۲۰۱۳.
- [۷] M. Maine, M. El Oumami, O. Bouksour, A. Tizliouine, "Review of research on cars wake flow control methods to reduce aerodynamic drag" *International Journal of Innovation and Applied Studies*, v. ۲۵, n. ۳, pp. ۱۰۶۹-۱۰۸۹, ۲۰۱۹.
- [۸] A. Huluka, C. Kim, "Effect of the Air Duct System of a Simplified Vehicle Model on Aerodynamic Performance" *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, v. ۱۷, n. ۲, pp. ۷۹۸۵-۷۹۹۵, ۲۰۲۰.
- [۹] A. Huluka, C. Kim, "a Numerical Analysis on Ducted Ahmed Model as a New Approach to Improve Aerodynamic Performance of Electric Vehicle" *International Journal of Automotive Technology*, v. ۲۲, n. ۲, pp. ۲۹۱-۲۹۹, ۲۰۲۱.
- [۱۰] A. Ferraris, H. Pinheiro, A. Airale, M. Carello, D. Polato, "City Car Drag Reduction by Means of Flow Control Devices" *SAE Technical Paper*, Torino Politecnico, Italy. ۲۰۲۱.
- [۱۱] M. Dickison, M. Ghaleeh, S. Milady, L. Wen, M. Qubeissi, "Investigation into the aerodynamic performance of a concept sports car" *Journal of Applied Fluid Mechanics*, v. ۱۳, n. ۲, pp. ۵۸۳-۶۰۱, ۲۰۲۰.
- [۱۲] M. Varney, M. Passmore, A. Gaylard, "The effect of passive base ventilation on the aerodynamic drag of a generic SUV vehicle" *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, v. ۱۰, pp. ۳۴۵-۳۵۷, ۲۰۱۷.
- [۱۳] ق. حیدری نژاد، «مقدمه‌ای بر توربولانس» انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، چاپ سوم، ص. ۱۷۱-۲۱۲، ۱۳۹۸.
- [۱۴] س. احمدی، ا. کاکایی، ا. گودرزی، «تحلیل عددی جریان حول بالک عقب خودروی سمند و تعیین نیروهای آیرودینامیکی وارد بر آن» کنفرانس دانشجویی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۱۳۹۱.
- [۱۵] گروه صنعتی ایران خودرو، «دفترچه راهنمای خودرو تارا» ص. ۱۴۲-۱۴۱، ۱۴۰۰.

سیالات از نرم‌افزار Ansys Fluent استفاده شد. مطالعه کاهش نیروی پسا در دو بخش توسعه آیرودینامیک عقب خودرو با استفاده از کانال انتقال جریان هوا از نواحی فشار بالا به کم فشار و بخش توسعه آیرودینامیک میانی با طراحی انحنا جانبی بر روی بدنه صورت پذیرفت.

در بخش آیرودینامیک میانی با الهام گرفتن از انحنا 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 بود در حالی که تغییرات ضریب برآ به طراحی انحنا بستگی دارد. در بخش توسعه 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.

ایجاد کانال انتقال جریان هوا و انحنا بدنه از جمله جدیدترین روش‌های بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروها هستند. شایسته است پژوهشگران با پیاده‌سازی مکانیزم‌های دیگر از جمله روش‌های فعال و غیرفعال 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.

#### ۶- مراجع

- [۱] پسندیده فرد م، حسینی کیا م، «بررسی نیروهای آیرودینامیک وارد بر بدنه خودرو سمند» سیزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، ۱۳۸۴.
- [۲] W. Choi, "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. ۲۰۱۵.
- [۳] ر. بهروان، م. مهدی، «بررسی عددی اثرات ترکیبی اسپویلر عقب و انحنا سطوح جانبی بر نیروی برآ و پسای وارد بر خودروی سدان» ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، ج. ۱۸، ش. ۲، ص. ۳۱۳-۳۰۵، ۱۳۹۷.
- [۴] ع. خوشنویس، و. دانش‌پژوه، ح. امینی، «بررسی تجربی تاثیرات زبری بر پروفیل سرعت و پسای خودروی سمند» بیست و دومین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران، ۱۳۹۳.