

تحلیل روش‌هایی مختلف جهت بهبود ایرودینامیک خودرو

بهناز بهشتی برومند

محمد حسین کریمیان

کارشناس ارشد مهندسی هوافضا

دانشیار دانشکده مهندسی هوافضا

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

hkarim@aut.ac.ir

چکیده در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از روش‌های عددی، جریان سیال بر روی بدنه خودروی پراید به صورت دو بعدی و سپس به صورت سه بعدی حل شود. برای انجام این کار با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، معادلات حاکم بر جریان سیال به همراه مدل $K-\epsilon$ استاندارد با استفاده از شرایط مرزی مناسب حل گردیده‌اند. با مطالعه نتایج حاصل از این تحقیق و مشاهده خطوط جریان، گردابه‌های ایجاد شده در اطراف اتومبیل و توزیع فشار، می‌توان منطقه‌هایی را که باعث افزایش پسا می‌گردند، مشخص کرده و با توجه به آن‌ها، روش‌هایی را برای کاهش پسا ارائه نمود. بنابراین در این مقاله، ایده‌های مختلفی که در جهت بهبود ایرودینامیک یک خودرو به نظر می‌رسید، بررسی شده و با مدل‌سازی و تحلیل عددی جریان بر روی اتومبیل پراید مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در نهایت از بین ایده‌های بررسی شده، نتایج دو مورد از آن‌ها با عنوان استفاده از سطح صاف جهت پوشاندن اجزا کف خودرو و تزریق هوا از روی سپر عقب به سمت بیرون، در مقاله حاضر شرح داده شده است، چرا که این دو ایده نتایج بسیار مناسبی از لحاظ کاهش پسا داشته و عملی‌تر به نظر می‌رسند.

واژه‌های کلیدی ایرودینامیک - خودرو - پسا

۱- مقدمه

هرچند که تحقیقات با استفاده از تونل باد از اهمیت شایانی برخوردار است اما استفاده از روش‌های محاسباتی جهت شبیه‌سازی بدنه خودروها به نحو گسترده‌ای در کشورهای توسعه یافته و با استفاده از کامپیوترهای با قابلیت بالا، زمان طراحی و تعداد آزمایشات تونل باد را کاهش داده است. با وجود تمام پیشرفتهایی که در روش‌های محاسباتی حاصل شده است پیش‌بینی دقیق و صحیح جریان با توجه به فیزیک جریان و پیچیدگی‌های هندسی موجود کار آسانی نیست. در جریان حول خودروها، با جریان‌های کاملاً مغشوش سه بعدی، جدایش جریان و جریان‌های برگشتی مواجه هستیم. لذا ایجاد هندسه، تولید شبکه و حل آن نیاز به ابزارهای قوی شبکه‌سازی و الگوریتم‌های حل قابل اعتماد و منابع کامپیوتری مناسب دارد. روش‌های حجم محدود یا اختلاف محدود که به معادلات حاکم اعمال می‌شود، به عنوان روش‌های استاندارد در حل مسائل صنعتی جریان خارجی مطرح هستند و میزان حافظه و زمان محاسباتی مورد نیاز عامل محدود کننده‌ای در انتخاب تعداد سلولهای بکار رفته و نوع مدل اغتشاشی است.

در این خصوص کارهای عددی و تجربی بسیاری صورت گرفته است. بخشی از کارهای انجام شده در این زمینه که در راستای اهداف مقاله حاضر بوده و مربوط به کار بر روی قسمت زیرین خودرو (underbody) می‌باشد ارائه می‌گردد. در زمینه ایرودینامیک خودرو مطالعات و تحقیقات بسیاری از سالها پیش تا به امروز صورت گرفته است. تحقیقات نشان می‌دهد که تا به حال پیشرفتهای در زمینه ایرودینامیک خودرو بطور عمده با پیشرفت کار بر روی شکل بالایی خودرو (upper body) صورت گرفته است. در یک خودروی مدرن، شکل اصلی تقریباً ۴۵ درصد نیروی درگ، چرخ‌ها و محل قرارگیری آن‌ها ۳۰

درصد نیروی درگ، و زمین و جزئیات آن ۲۵ درصد درگ اصلی را شامل می‌گردند. اما پس از تمام مطالعات و تحقیقات انجام شده بر روی قسمت بالای خودرو، اکنون مسأله بخش زیرین بسیار مورد توجه قرار گرفته است. Hoerner [۱] در سال ۱۹۵۸ مسأله بخش زیرین خودرو را یکی از مهمترین و اجتناب‌ناپذیرترین جز در ایجاد درگ خودرو می‌داند و می‌گوید که درگ برای یک ماشین مرسوم با بخش زیرین صاف از ۰/۳ تا ۰/۶ برای بخش زیرین ناصاف و باز تغییر می‌کند. در سال ۱۹۶۵ G.W.Carr [۲] اثرات ایرودینامیکی جزئیات بخش‌های زیرین خودرو را روی یک مدل نمونه ماشین نشان می‌دهد. در سال ۱۹۸۲ Holt [۳] روشن می‌کند که جریان بخش زیرین خودرو موضوع اصلی در آینده ایرودینامیک خودرو خواهد بود. در سال ۱۹۹۸ Cooper.et.al [۴] تحقیقی انجام داد که نشان می‌دهد درصد بسیاری از نیروی لیفت و درگ از بخش زیرین خودرو اثر می‌پذیرد. Skea.et.al [۵] و [۶] در سال‌های ۱۹۹۸، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ روش‌هایی درباره ایرودینامیک بخش زیرین ارائه داده است و امکانات این را می‌سنجد که آیا CFD وسیله مناسبی برای تحلیل اینگونه مسایل مهندسی هست یا نه. در سال ۲۰۰۰ Casella.et.al [۷] امکانات CFD در زمینه جریانات بخش زیرین را می‌سنجد و به نتیجه مناسبی نیز می‌رسد چرا که پاسخ‌هایش با مقادیر تجربی همخوانی خوبی را نشان می‌دهد. شرکت Mitsubishi Lancer در جدیدترین مدل خودروی خود در سال ۲۰۰۳ به ایرودینامیک بخش زیرین توجه ویژه‌ای نشان داده است. در این خودرو تجهیزات بخش زیرین با یک سطح صاف کاملاً پوشانده شده‌اند.

۲- روش حل معادلات

با انتخاب دستگاه مختصات کارتزین به عنوان دستگاه مرجع، معادلات حاکم بر یک جریان مغشوش تراکم‌ناپذیر دائم سه بعدی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد. این معادلات شامل معادله پیوستگی، سه معادله اندازه حرکت در جهت‌های سه‌گانه مختصات و معادلات مدل اغتشاشی به کار رفته هستند. مدل اغتشاشی بکار رفته در این پروژه مدل K-ε استاندارد می‌باشد. برای گسسته سازی معادلات از روش مرتبه دو و برای همبسته کردن سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. [۸]

۳- شرایط مرزی

با توجه به مرزهای مختلف موجود در مساله شرایط مرزی متفاوتی را باید مد نظر قرار داد. در ورودی سرعت ۳۳/۳ متر بر ثانیه و شدت اغتشاش، معلوم می‌باشد. در خروجی از شرط فشار ثابت استفاده شده است. همچنین برای زمین و سطوح جامد، شرط عدم لغزش، اعمال شده که با استفاده از توابع دیوار شبیه‌سازی شده‌اند. هوا گاز کامل فرض شده، و جریان هوا مغشوش و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. در ضمن با توجه به سرعت کم خودروها در مقایسه با سرعت صوت، چگالی هوا ثابت فرض می‌شود که این مقدار در شرایط استاندارد برابر $1/225 \text{ Kg/m}^3$ می‌باشد. با توجه به تراکم‌ناپذیر بودن جریان، مقدار عددی لزجت، در شرایط استاندارد برابر $1/7894 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$ می‌باشد. [۹]

۴- شبکه بندی

با توجه به پیچیدگی‌های هندسی موجود می‌توان از سلول‌های چهار وجهی و شش وجهی برای شبکه‌بندی میدان حل استفاده کرد. از آنجا که ایجاد شبکه‌های چهار وجهی برای هندسه‌های پیچیده وقت کمتری را می‌گیرد، از این نوع شبکه استفاده شده است. این شبکه به گونه‌ای ایجاد شده است که نزدیک بدنه خودرو سلول‌ها ریزتر بوده و با دور شدن از آن سلول‌ها درشت‌تر می‌گردند. جهت نشان دادن استقلال نتایج حل از اندازه شبکه، نتایج حل در مدل دو بعدی خودروی پراید برای چهار شبکه دارای ۴۱۷۹، ۱۹۲۳۸، ۲۸۰۶۳ و ۳۵۱۲۴ سلول ارزیابی شد که مقدار ضریب درگ برای این چهار شبکه به ترتیب ۰/۷، ۰/۴۸، ۰/۴۳ و ۰/۴۳ می‌باشد.

و ۰/۴۳ بدست آمد. در نهایت مشاهده شد که در مدل دو بعدی با افزایش تعداد نقاط شبکه از ۲۸۰۶۳ به ۳۵۱۲۴ عملاً تغییر محسوسی در نتایج حاصل نمی‌گردد. لذا در مدل‌ها و شبکه‌های بعدی از ۲۸۰۶۳ سلول استفاده می‌شود. در مدل سه بعدی نیز نتایج حل برای چهار شبکه دارای ۴۰۱۹۰، ۶۶۶۶۱۳، ۹۵۲۵۱۴ و ۱۴۲۴۲۲۴ سلول ارزیابی گردید که مقدار ضریب درگ برای این چهار شبکه به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۴۴، ۰/۳۸ و ۰/۳۸ بدست آمد. همچنین در مدل سه بعدی با افزایش تعداد نقاط شبکه از ۹۵۲۵۱۴ به ۱۴۲۴۲۲۴ تغییر محسوسی در نتایج حاصل نمی‌گردد. لذا در مدل‌ها و شبکه‌های بعدی از ۹۵۲۵۱۴ سلول استفاده می‌شود. در شکل‌های (۱) و (۲) نمودار ضریب نیروی درگ بر حسب نوع شبکه برای مدل دو بعدی و سه بعدی نشان داده شده است.

۵- روش‌های بررسی شده جهت کاهش نیروی درگ

در این قسمت به صورت دو بعدی و سه بعدی به بررسی جریان بر روی خودروی پراید، می‌پردازیم. می‌دانیم که در ایرودینامیک اتومبیل معمولاً فشار استاتیک و توزیع آن حول اتومبیل مورد توجه می‌باشد. با توجه به کانتورهای فشار حول اتومبیل، فشار در برخی نواحی بیش از فشار محیط و در برخی نواحی کمتر از فشار محیط است. فشار روی شیشه عقب و صندوق عقب هم معمولاً کمتر از فشار محیط می‌باشد. زیرا انحنای در این قسمت‌ها همچنان ادامه دارد. در این ناحیه احتمال جدایی جریان بسیار زیاد است و از دیدگاه ایرودینامیک، جزئیات سطوح در این ناحیه، نیازمند بیشترین توجه می‌باشد. الگوی عمومی جریان هوا در بالا و اطراف اتومبیل‌ها نشان می‌دهد که جریان طرفین اتومبیل به داخل این ناحیه کم‌فشار کشیده شده در ترکیب با جریانی که از روی سقف می‌آید، در پشت اتومبیل ایجاد گردابه می‌کند. بنابراین از آنجا که ناحیه جدایی بزرگی در قسمت عقب اتومبیل وجود دارد، بیشترین نیروی پسا از این ناحیه ناشی می‌شود و در همین قسمت است که در زمینه کاهش نیروی پسا باید کار کرد. به منظور بهبود ایرودینامیکی خودرو، ایده‌های متعددی به ذهن رسیده، بررسی گردید. این ایده‌ها به طور خلاصه و به ترتیب در زیر آورده شده‌اند. اما در بخش نتایج، تنها دو ایده‌ای که نتیجه مناسب‌تری داشته، و نیز کارتر می‌باشند، به طور کامل شرح داده خواهند شد.

۱- تزریق هوا

جهت تضعیف گردابه‌های پشت خودرو، اولین ایده‌ای که به ذهن رسید، تزریق هوا از سپر عقب به سمت بیرون بود. با تزریق هوا ممکن است بتوان تا حدی از شدت جدایی جریان در این ناحیه جلوگیری کرد. در تحلیل دو بعدی جریان، این روش امتحان شد. به منظور تزریق هوا به بیرون، محل‌های متفاوت و مقادیر مختلفی انتخاب شدند. این قسمت‌ها بر اساس محل تزریق، دسته‌بندی شده و در قسمت نتایج، به ترتیب شرح داده خواهند شد.

۲- باز نمودن قسمتی از کف اتومبیل

به منظور عملی نمودن ایده تزریق هوا از روی سپر به بیرون، باید راهی برای تزریق یا مکش این هوای اضافی پیدا می‌شد. با توجه به افزایش فشار موضعی در قسمت عقب اتومبیل و کم بودن فشار در زیر ماشین، تصمیم بر این شد که قسمت کف اتومبیل یعنی زیر صندوق عقب باز در نظر گرفته شود و روی سپر هم تعدادی سوراخ فرض شود. انتظار می‌رفت که به دلیل اختلاف فشار، جریان در این قسمت برقرار شود و هدف مورد نظر تحقق یابد. مدل‌های متفاوتی از نظر شکل و تعداد سوراخ‌های ایجاد شده در سپر و نیز شکل فضای خالی ایجاد شده در کف، تست شد. اما در تمام آن‌ها در این فضای خالی، گردابه تشکیل شد و مانع از برقراری جریان در این منطقه گردید. [۱۰]

۳- ایجاد لوله به جای باز کردن کف اتومبیل

همانطور که گفته شد. بین قسمت عقب خودرو با کف آن اختلاف فشار وجود دارد و در بخش عقب اتومبیل فشار بالاتر از کف آن است. بنابراین به منظور از بین بردن گردابه تشکیل شده در فضای خالی کف خودرو، ایده‌ای که به ذهن رسید، ایجاد

یک لوله در همین مسیر به جای باز کردن کف زیر صندوق بود. لذا لوله مورد نظر با قطر ۱۳/۵ سانتی متر و طول ۱۳۰ سانتی متر ایجاد شد. انتظار می رفت که در لوله، جریان از پشت سپر به سمت کف اتومبیل برقرار گردد. در این حالت اگر جریان در لوله برقرار می شد، هدف مورد نظر تأمین می شد. تحلیل جریان حاکی از این بود که در این حالت جریان ضعیفی برقرار شده است و جهت آن همانطور که انتظار می رفت، از پشت اتومبیل به سمت کف می باشد. اما نتایج تحلیل این مدل، از دیدگاه کاهش پسا رضایت بخش نبود، چرا که این برقراری جریان باعث افزایش میزان ضریب پسا تا ۰/۴۷ شد. علت این مسأله ایجاد اغتشاش در جریان زیر خودرو است. [۱۰]

۴- ایجاد لوله از سپر عقب به پشت شیشه عقب

کانتور فشار در مدل دو بعدی ساده نشان می دهد که فشار در ناحیه پشت اتومبیل بیشتر از فشار در پشت شیشه عقب است. لذا، مسأله ای که در این شرایط به ذهن می رسد، این بود که شاید بتوان از نتایج قبلی برای کم کردن اثر گردابه پشت شیشه عقب استفاده کرد. برای این منظور لوله ای از سپر عقب به پشت شیشه عقب و انتهای صندوق در نظر گرفته شد. زیرا انتظار می رفت با اختلاف فشاری که در این دو منطقه وجود دارد جریانی در لوله برقرار گردد. مدل های متعددی برای این منظور ساخته شد که محل لوله و قطر آن در هر یک از این مدل ها متفاوت بود. با تحلیل جریان حول خودرو در این مدل ها، مشاهده شد جریان در لوله مذکور به سمت بالا برقرار می گردد زیرا همانطور که گفته شد، فشار در قسمت عقب خودرو بیشتر از فشار در پشت شیشه عقب است. با برقراری این جریان یک حالت مکش ضعیف روی سپر ایجاد می شود و گردابه پشت شیشه عقب نیز ضعیف می گردد. پس از بررسی مدل های متعدد لوله از نظر ابعاد، هندسه بهینه لوله بدست آمد. با تحلیل جریان در نهایت مشاهده شد که در مدل بهینه، میزان نیروی پسا تا حدود ۷ درصد کاهش پیدا می کند. به دلیل حاصل شدن نتیجه بسیار خوبی از این ایده، این موضوع در حالت سه بعدی هم پیگیری شد. در مدل سه بعدی نیز جریان به سمت بالا برقرار شد، با مشاهده بردارهای سرعت در مدل سه بعدی، نتایج مدل دو بعدی کاملاً تأیید شد زیرا در حالت سه بعدی نیز گردابه پشت شیشه عقب ضعیف شد و در نهایت، ضریب نیروی پسا به میزان ۵ درصد کاهش یافت. [۱۰]

۵- پوشاندن تجهیزات کف خودرو توسط یک سطح صاف

پس از تحقیقاتی که در رابطه با ایرودینامیک خودرو و روش های کاهش پسا انجام شد و با مطالعه بر روی مقالات متعدد در این زمینه، اهمیت پوشاندن تجهیزات کف خودرو کاملاً مشهود گردید، چرا که بررسی ها نشان می دهد که صاف بودن کف خودرو در کاهش نیروی درگ تاثیر بسزایی دارد. سیستم تعلیق، سیستم تخلیه گازهای خروجی موتور (اگزوز) و سایر اجزا بیرون زده از قسمت زیر بدنه باعث ایجاد نیروی پسا می شوند. جریان هوا در این ناحیه حالت برشی دارد، زیرا سرعت آن از صفر بر روی سطح جاده به سرعت حرکت اتومبیل در کف اتومبیل می رسد. سرعت جریان، میان زمین و زیر اتومبیل، به دلیل حالت همگرایی بین این دو از سرعت جریان آزاد هم بالاتر می رود. لذا راه علاج شناخته شده برای کاهش پسای قسمت زیر بدنه، استفاده از یک صفحه صاف با سطحی نرم در زیر بدنه (سینی زیر بدنه) است. نتایج بررسی این موضوع به تفصیل شرح داده خواهد شد.

۶- افزایش سطح جانبی خودرو

ایده دیگری که در راستای کاهش نیروی درگ امتحان شد، افزایش سطح جانبی خودرو بود. به این صورت که در راستای طول هرچه از سمت جلو به سمت عقب اتومبیل برویم، سطح جانبی اتومبیل به تدریج و با یک ضریب خاص افزایش می یابد. به نظر می رسد که شاید با افزایش سطح در قسمت عقب خودرو در دو طرف بدنه، شکل جریان حالت بهتری به خود بگیرد. چرا که سطح دو طرف، به تدریج زیاد می شود و جریان هنگامی که طول بدنه را طی می کند و به پشت خودرو می رسد، Smooth تر و آرام تر وارد منطقه عقب اتومبیل می شود. به منظور امتحان این ایده، یک مدل جدید از اتومبیل پراپد ساخته شد.

این مدل ساده‌تر از مدل پیشین در نظر گرفته شد و فاقد برخی جزئیات و انحناها بود تا بتوان سطح جانبی را با ضریب معینی افزایش داد. پس از تحلیل دو مدل و مشاهده رفتار جریان در قالب بردارهای سرعت و فشار، مطالب بالا تایید شد. و مشاهده شد که گردابه‌های تشکیل شده نسبت به حالت معمول، کوچکترند و به سمت کناره‌ها حرکت کرده‌اند. در ضمن بررسی کانتورهای فشار در هر دو مدل حاکی از این است که میزان فشار در مدل پهن شده نسبت به حالت عادی در مناطق گردابه‌ها کمتر است و در نتیجه گردابه‌ها ضعیف‌ترند. در نهایت با بکارگیری این روش، نتیجه نسبتاً مناسبی حاصل شد، چرا که ضریب نیروی پسا ۵/۵ درصد کاهش یافت. [۱۰]

۷- استفاده از فلپ در بدنه خودرو

روش دیگری که امتحان شد، استفاده از فلپ در بدنه خودرو بود. با این دید که شاید بتوان با بکارگیری فلپ در کناره‌های اتومبیل، شکل جریان را کنترل کرد و جریان را به صورت آرام‌تر و صاف‌تری به پشت خودرو رساند. در این راستا چندین مدل متفاوت بررسی شد. در مدل اول در هریک از دو پهلوی اتومبیل، از انتهای در عقب تا فاصله ۱۰ سانتی‌متر به سمت عقب خودرو، ۴ فلپ با عرض ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله فلپ‌ها از یکدیگر حدود ۸ سانتی‌متر بود. علت انتخاب محل این فلپ‌ها این بود که از این ناحیه به بعد یعنی به سمت عقب اتومبیل عرض خودرو با یک قوس، کم‌تر می‌شود لذا طول فلپ‌ها طوری در نظر گرفته شد که تا ابتدای این منطقه ادامه یابند. پس از تحلیل این مدل، تغییری در نتایج بدست آمده مشاهده نشد. لذا با بررسی نتایج، مدل بعدی طوری انتخاب شد که عرض فلپ‌ها بیشتر باشد. در این حالت عرض فلپ‌ها، ۱۰ سانتی‌متر فرض شد و سایر مشخصات، مشابه مدل اول در نظر گرفته شد. اما تحلیل این مدل هم تغییر چندانی را در شکل جریان نشان نمی‌داد، به همین دلیل این بار، فلپ‌ها با حفظ مشخصات قبلی و با طول ۵۴/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند. و در واقع تا انتهای بدنه کشیده شدند. با این روش میزان نیروی درگ ۰/۵ درصد، یعنی به اندازه بسیار اندکی کاهش یافت و نتیجه مطلوب ما در مقیاس بسیار کوچکتر از حد مورد نظر بدست آمد. بنابراین به نظر رسید که شاید با استفاده از فلپ‌ها در قسمت‌های دیگر بتوان نتیجه مناسب‌تری گرفت. بخش‌های انتهایی شیشه‌های عقب برای این منظور انتخاب شدند، تا بتوان بر روی جریانی که به منطقه پشت شیشه عقب می‌رسد و باعث ایجاد گردابه در این منطقه می‌گردد، کنترل داشت. نتیجه تحلیل این مدل، کاهش ۱/۸ درصدی نیروی پسا بود. بررسی نتایج و شکل جریان حاکی از این بود که استفاده از فلپ هنگامی مفید است که تعداد این فلپ‌ها زیاد باشد و عرض آن‌ها نیز تقریباً زیاد باشد تا بتوان روی جریان کنترل داشت و آن را با شکل بهتری در طول بدنه هدایت کرد. اما این طرح از نظر عملی بودن، مناسب به نظر نمی‌رسد. [۱۰]

لازم به ذکر است که از بین ایده‌های مذکور، نتایج دو مورد شماره ۱ و ۵ در این مقاله شرح داده خواهد شد، چرا که این دو ایده علاوه بر داشتن نتایج مناسب، از دیدگاه عملی نیز کاربردی‌تر به نظر می‌رسند. خصوصاً مساله پوشاندن تجهیزات کف، که نتیجه بسیار مثبتی را به همراه دارد.

۶- ایجاد هندسه به دو صورت دو بعدی و سه بعدی

به علت عدم دسترسی به نقشه‌های مناسب از تجهیزات زیر اتومبیل، مدل کردن این اجزا کاری دشوار و وقت‌گیر بود. ابتدا یک اتومبیل نمونه، روی جک قرار گرفت سپس از جهات مختلف از اجزا کف اتومبیل عکسبرداری شد. با استفاده از این عکس‌ها و با یک مقیاس صحیح اجزا کف خودرو، در نرم‌افزار Mechanical Desktop مدل شدند. در شکل (۳) این مدل در حالت دو بعدی نشان داده شده است. مدلهایی که در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند، مدل خودروی پراید به صورت سه بعدی است، در حالیکه تجهیزات کف مدل نشده‌اند و در واقع کف خودرو با یک سطح صاف پوشانده شده است. در شکل (۶)، مدل سه بعدی شامل قطعات اصلی کف نیز می‌گردد البته در این مدل لوله آگزوز مدل نشده است. علت این امر

این بود که بتوان مرحله به مرحله پیش رفت و اثر این تجهیزات را در پاسخ نهایی مشاهده کرد. و در نهایت در شکل (۷) نمای سه بعدی خودرو همراه با تمام تجهیزات کف به طور کامل مدل شده است.

۷- نتایج

در این قسمت نتایج تحلیل جریان حول خودرو برای دو ایده تزریق هوا از سپر عقب به بیرون و پوشاندن تجهیزات کف خودرو، بررسی شده، به تفصیل شرح داده می‌گردد.

۱- تزریق هوا از سپر عقب به بیرون

همانطور که ذکر شد، به منظور تضعیف گردابه‌های پشت خودرو، ایده تزریق هوا از سپر عقب به سمت بیرون آزمایش گردید. مدل‌های مختلفی جهت بررسی این روش در تحلیل دو بعدی جریان امتحان شد و در نهایت مدلی که نتیجه مناسب‌تری داشت به صورت سه بعدی هم تحلیل شد.

به منظور تزریق هوا به بیرون، محل‌های متفاوت و مقادیر مختلفی انتخاب شدند که بر اساس محل تزریق، دسته‌بندی شده و به ترتیب در زیر شرح داده شده است:

۱- از قسمت بالای سپر عقب، هوا با نرخ 0.5 کیلوگرم بر ثانیه در ارتفاعی برابر 5 سانتی‌متر به بیرون تزریق شد. پس از تحلیل جریان با این شرایط مشاهده شد که نیروی پسا تغییر قابل توجهی نکرده است و مقدار آن 0.42 می‌باشد. اما شکل بردارهای سرعت در قسمت عقب خودرو تغییر کرده است. در این حالت گردابه بالا کمی ضعیف‌تر شده و به پشت خودرو نزدیک شده است. گردابه پایین نیز به زیر منطقه تزریق هوا کشیده شده و کوچکتر شده است. این مطلب با مقایسه شکل‌های (۸) و (۹) کاملاً تأیید می‌گردد. بنابراین به نظر رسید که با افزایش نرخ جریان، ممکن است بتوان میزان درگ را کاهش داد. به همین جهت، نرخ جریان تا 2 Kg/s افزایش پیدا کرد، در حالی که بر خلاف انتظار این بار شکل گردابه‌ها تغییر چندانی نیافت و ضریب نیروی درگ اندکی نیز افزایش یافت و حدود 0.45 شد. همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، هنگامی که هوا با سرعت بالاتری به بیرون فرستاده می‌شود، جریان پشت اتومبیل مغشوش می‌گردد. در این حالت، گردابه پایین کمی بزرگتر شده و دنباله جریان دچار اغتشاش شده است، بنابراین میزان نیروی پسا اندکی افزایش یافته است.

از آنجا که تزریق هوا با نرخ 0.5 Kg/s ، اندکی در تضعیف گردابه‌ها تأثیر داشت، تصمیم بر این شد که محل تزریق تغییر کند. از نظر عملی انتقال محل تزریق به سمت بالا و روی صندوق عقب، معقول به نظر نمی‌رسید. به همین جهت، این محل، به سمت پایین انتقال یافت. انتظار می‌رفت تغییر محل تزریق به سمت پایین، در تضعیف گردابه پایین اثر مثبتی داشته باشد. بنابراین به صورت زیر عمل شد.

۲- از قوس بالایی سپر عقب، با ارتفاع 5 سانتی‌متر، هوا با نرخ 0.5 کیلوگرم بر ثانیه به بیرون تزریق شد. در این حالت، شکل جریان و همچنین مقدار ضریب نیروی پسا، مشابه حالت قبل و مساوی 0.42 بود چرا که در هر دو مورد، تزریق، بالای سپر و در یک منطقه کوچک انجام شده است. به نظر می‌رسید که جهت ضعیف کردن گردابه پایین بهتر است منطقه تزریق، گسترش یابد. بنابراین آزمایش زیر تعریف گردید. شکل (۱۱)

۳- با مشاهده نتایج دو مدل قبل، این بار تمام سپر عقب، با ارتفاع معادل $19/5$ سانتی‌متر، به غیر از قوس ابتدایی آن برای تزریق انتخاب شد. نرخ جریان، مشابه حالت قبل 0.5 کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شد. همانطور که گفته شد، با تزریق هوا از قسمت بالای سپر، گردابه پایین، زیر ناحیه تزریق تشکیل می‌شد و مقدار اندکی بر روی ضریب پسا تأثیر می‌گذاشت. اما با تزریق از تمامی قسمت پایین سپر، این گردابه تقریباً از بین رفت. شکل (۱۲)

بنابراین با از بین بردن گردابه پایین در این روش، نتیجه مناسبی در کاهش نیروی پسا بدست آمد. بدین ترتیب تا حدود ۶/۸ درصد ضریب نیروی درگ کاهش یافت. اکنون که روش ارائه شده مؤثر می‌باشد روی تغییرات نرخ جریان تحقیق به عمل آمد. نرخ جریان از ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه به مقادیر بیشتر افزایش یافت که باعث تغییر جزئی در مقدار CD گردید. البته افزایش نرخ جریان به دلیل غیر عملی بودن، قابل بررسی بیشتر نیز نمی‌باشد. در جدول (۱) تغییرات ضریب نیروی درگ بر حسب تغییرات نرخ جریان نشان داده شده است.

لازم به ذکر است، پس از مشاهده نتایج تصمیم گرفته شد تا حالت مکش بر روی سپر عقب نیز امتحان گردد تا کارایی این ایده مشخص گردد. در صورتی که ایده مکش نتیجه مشابه ایده تزریق هوا را داشته باشد، می‌توان بر روی این روش کار کرد و از مکان‌هایی که با قسمت عقب خودرو اختلاف فشار دارند، جهت ایجاد جریان استفاده کرد. با نرخ‌های جریانی که برای حالت تزریق بکار گرفته شد، ایده مکش نیز آزمایش گردید و در نهایت، نتایجی مشابه حالت تزریق بدست آمد. یعنی در حالتی که مکش از تمام سپر عقب منهای قوس ابتدایی آن انجام گردد، ضریب نیروی درگ حدود ۶/۵ درصد کاهش یافته که با نتایج تزریق مشابهت دارد. روش فوق در حالت سه بعدی نیز آزمایش گردید. در مدل سه بعدی هم نتایج مشابه مدل دو بعدی بود، بدین صورت که هنگامی که تزریق از تمامی سپر عقب انجام شود، نیروی درگ تا ۷ درصد کاهش می‌یابد.

۲- استفاده از سطح صاف جهت پوشاندن اجزا کف خودرو

با مشاهده خطوط هم‌فشار در مدلی که اجزا کف خودرو در آن مدل شده‌اند و مقایسه آن با مدل پیشنهادی (مدلی که در آن تجهیزات کف خودرو با یک صفحه صاف پوشانده شده‌اند)، متوجه تفاوت شکل جریان در ورود به بخش زیرین خودرو خواهیم شد. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) کانتور فشار در این دو مدل نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود میزان فشار در مدل با تجهیزات کف، هنگام ورود به بخش زیرین، در اثر برخورد به اجزا کف ابتدا افت شدیدی پیدا می‌کند و تا حدود ۱۳۸۰- پاسکال نسبت به فشار محیط می‌رسد. بنابراین در فضای میان اجزا و کف اتومبیل گردابه تشکیل می‌گردد. در صورتی که این محل با سطح صاف پوشانده شود (مطابق شکل (۱۴))، میزان افت فشار در ورود به بخش زیرین خودرو کمتر شده، از ایجاد گردابه جلوگیری می‌گردد. مقایسه بردارهای سرعت در بخش زیرین خودرو، برای دو مدل فوق نیز مطالب مذکور را تأیید می‌کند (شکل‌های (۱۵) و (۱۶)). در مدل همراه با تجهیزات کف، سرعت جریان هنگام ورود به بخش زیرین خودرو، تا ۴۱ متر بر ثانیه بالا می‌رود تا حدی که از سرعت جریان آزاد نیز بیشتر می‌گردد و در برخورد با اجزا کف دچار اغتشاش می‌شود. در صورتیکه در مدل همراه با سطح صاف، سرعت جریان در ورود به بخش زیرین اتومبیل حدود ۳۵ متر بر ثانیه است و آرام‌تر از این بخش می‌گذرد و گردابه تشکیل نمی‌گردد.

در نهایت پس از تحلیل جریان دو مدل مذکور در حالت دو بعدی، نتایج مقایسه، مؤثر بودن این روش را در کاهش نیروی درگ تأیید کرد و در این حالت نیروی پسا حدود ۷٪ کاهش یافت. بنابراین ایده پیشنهادی پوشاندن تجهیزات کف اتومبیل مانند موتور و گارد و ... توسط یک صفحه صاف ایده مناسبی به نظر رسید و در حالت سه بعدی نیز بررسی شد.

همانطور که ذکر شد، اولین مدلی که همراه با تجهیزات کف در نرم‌افزار Mechanical Desktop ساخته شد، شامل قطعات اصلی کف به جز لوله آگزوز بود. البته مسیر این لوله مدل شده است. پس از تحلیل این مدل، نتایج مطرح شده در مدل دو بعدی، در این بخش هم تأیید شد. با دقت در شکل بردارهای سرعت در مدل سه بعدی نیز متوجه تشکیل گردابه در محل اجزا بخش زیرین خودرو خواهیم شد. پس از تحلیل جریان در مدل سه بعدی همراه تجهیزات کف و مدلی که در آن تجهیزات بخش زیرین با سطح صاف پوشانده شده‌اند و مقایسه نتایج این دو مدل با یکدیگر، مشاهده می‌گردد که نیروی درگ ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. چرا که با پوشاندن اجزا قسمت زیرین خودرو توسط صفحات صاف، جریان زیر خودرو آرام‌تر می‌شود و از برخورد جریان هوا به چرخ‌ها و سایر اجزا جلوگیری می‌شود.

در نهایت تجهیزات بخش زیرین خودرو به صورت کامل تر و همراه با لوله آگزوز مدل شد. نتایج حاصل از تحلیل این مدل با نتایج حاصل از تحلیل مدلی که تجهیزات کف، کاملاً پوشانده شده‌اند، مقایسه شد. میزان ضریب نیروی پسا این بار تا حدود ۱۴ درصد کاهش یافت و این مسأله تأثیر اجزا کف اتومبیل در افزایش نیروی پسا را می‌رساند. در جدول (۲) حالات مختلفی که با این روش، به منظور کاهش ضریب پسا بررسی شد، نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌گردد، با اضافه شدن چرخ‌ها به هندسه سه بعدی، ضریب پسا حدود ۱۵ درصد افزایش داشته است. و با اضافه شدن سایر تجهیزات این مقدار به ۲۷ درصد می‌رسد. این موضوع، تأثیر اجزا بخش زیرین خودرو و چرخ‌ها را در افزایش نیروی درگ کاملاً بیان می‌کند. با مقایسه مدل همراه با تجهیزات کف خودرو و مدلی که دارای چرخ است اما سایر اجزا کف در آن با سطح صاف پوشانده شده‌اند، این مسأله واضح تر می‌شود. در این حالت ضریب نیروی پسا ۱۴ درصد کاهش یافته است. بنابراین، بر اساس نتایج فوق، استفاده از یک سطح صاف در پوشاندن اجزا بخش زیرین اتومبیل پرايد، ایده بسیار مؤثری در کاهش پسا می‌باشد.

۸- نتایج و جمع‌بندی

ایده‌های مختلفی در جهت بهبود ایرودینامیک یک خودرو، بررسی شده و با مدل‌سازی و تحلیل عددی جریان بر روی اتومبیل پرايد مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت از بین ایده‌های بررسی شده، نتایج دو مورد از آن‌ها با عنوان استفاده از سطح صاف جهت پوشاندن اجزا کف خودرو و تزریق هوا از روی سپر عقب به سمت بیرون، به جهت داشتن نتیجه بسیار مثبت در راستای کاهش پسا شرح داده شد.

بررسی‌ها نشان داد که با تزریق هوا از سپر عقب به سمت بیرون نیروی پسا تا ۷ درصد کاهش می‌یابد و نیز صاف بودن کف خودرو در کاهش نیروی درگ تأثیر بسزایی دارد. با پوشاندن تجهیزات بخش زیرین خودروی پرايد با یک سطح صاف نیروی پسا تا ۱۴ درصد کاهش یافت.

مراجع

- [1] Hoerner S. F. , ' Fluid dynamic drag. Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance', Published by author, Midland Park, N. J. ,1958
- [2] Carr G. W. , ' New MIRA drag reduction prediction method for cars.', Automotive Engineer , June/July, 1987
- [3] Holt, D. J. , Underbody Aerodynamics: The next area of refinemant, SAE Journal, 1982
- [4] Cooper K. R. , Bertenyi T. , Dutil G. , Syms J. and Sovran G. , " The aerodynamic performance of underbody diffusers", SAE 980030,1998
- [5] Skea, A. F. and Bullen, P. R. and Qiao, J. , Underbody Aerodynamics: Using CFD to simulate the air flow around a rotating wheel of a passenger car, Autotech, Birmingham, 1999
- [6] Skea, A. F. and bullen, P. R. and Qiao, J. , Review of Underbody Aerodynamics: Testing Techniques; Airflow characteristics; CFD Contribution, Ford Technical journal, 2000
- [7] Casella, M. , Mirolo, E. , Ribaldone, E. and scantamburlo.G. , The use of CFD Techniques in the solution of automotive problems, JSAE spring convention, paprer 20005346,2000
- [8] Fluent Users Manual, Chapter 9, Turbulence Models, 1998
- [9] Hucho, W. H. , 'Aerodynamics of road vehicles, Society of Automotive Engineers Inc', 1998

۱۰- بهشتی برومند، بهناز، بررسی پارامترهای مؤثر در بهینه‌سازی ایرودینامیک خودرو، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده

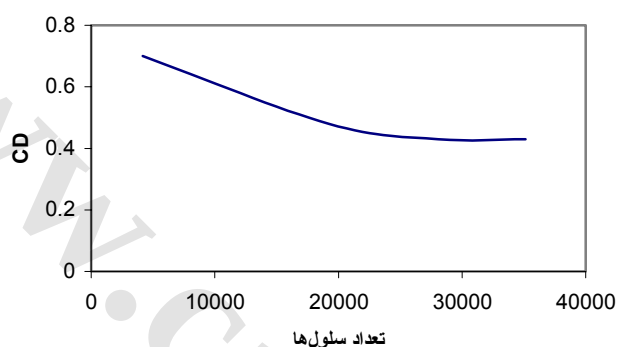
مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.

جدول (۱) تغییرات ضریب پسا بر حسب نرخ جریان

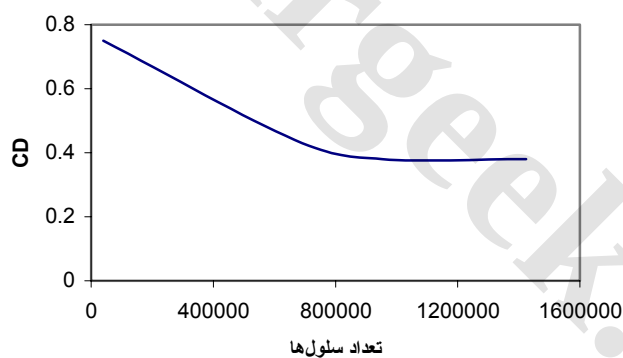
نرخ جریان (Kg/s)	۰/۵	۰/۷	۰/۹	۱/۵	۲
ضریب پسا	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۴	۰/۴

جدول (۲) تأثیر استفاده از سطح صاف جهت پوشاندن تجهیزات بخش زیرین خودرو

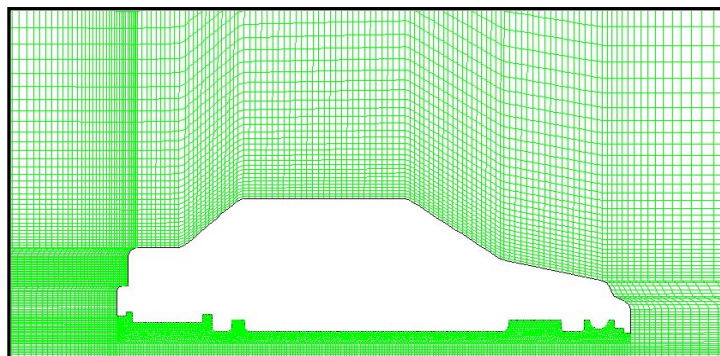
انواع مدل‌های تست شده	ضریب پسا	افزایش ضریب پسا نسبت به مدل بدون چرخ (%)	افزایش ضریب پسا نسبت به مدل با چرخ (%)
فاقد چرخ و تجهیزات کف	۰/۳۹	-	-
با چرخ و فاقد تجهیزات کف	۰/۴۶	۱۵/۲	-
با چرخ و تجهیزات کف منهای لوله آگزوز	۰/۵۱۷	۲۴/۵	۱۱
با چرخ و تجهیزات کف و لوله آگزوز	۰/۵۳۵	۲۷/۱	۱۴



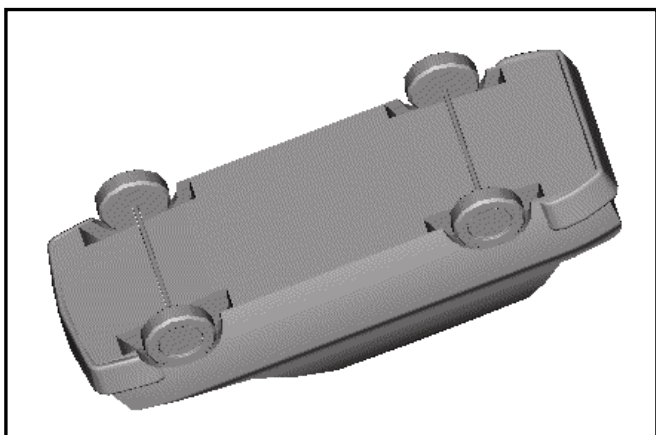
شکل (۱) نمودار تغییرات ضریب درگ نسبت به افزایش تعداد سلول‌های شبکه در مدل دو بعدی



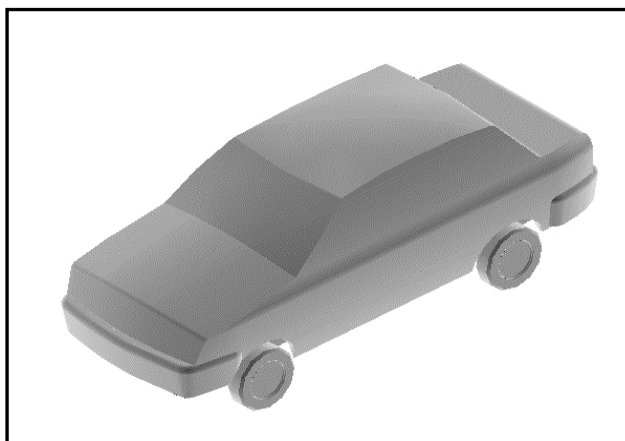
شکل (۲) نمودار تغییرات ضریب درگ نسبت به افزایش تعداد سلول‌های شبکه در مدل سه بعدی



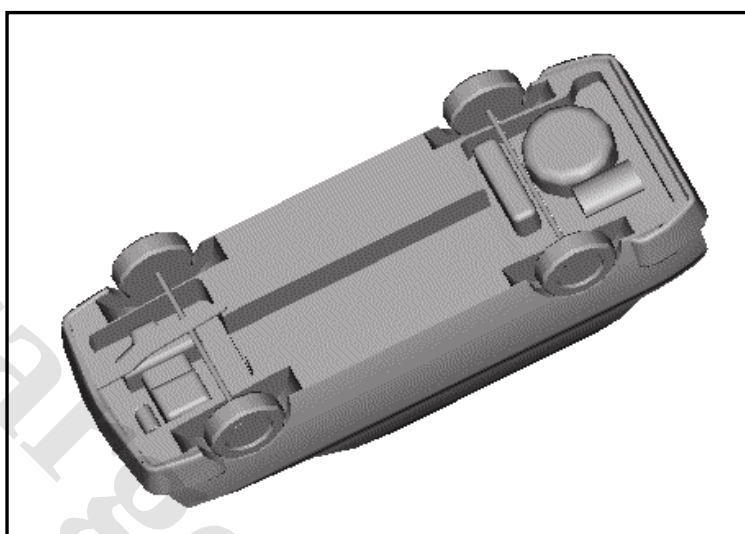
شکل (۳) مدل کردن تجهیزات کف خودرو به صورت دو بعدی



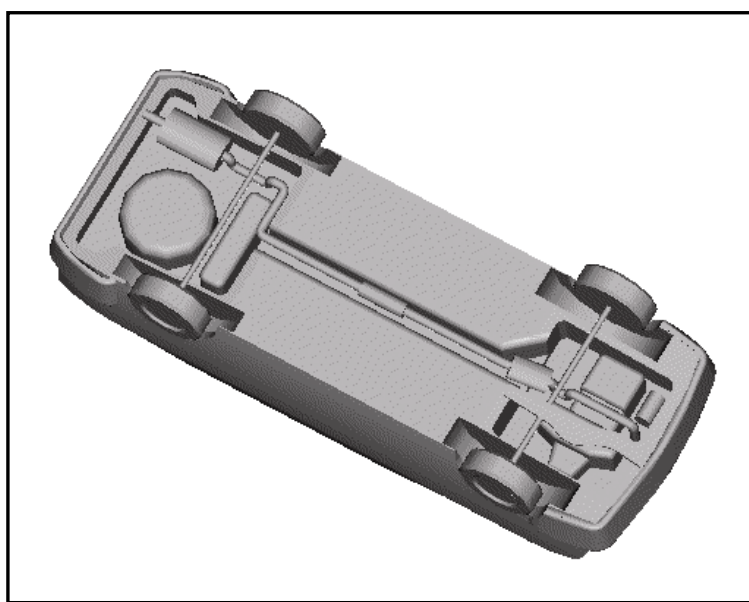
شکل (۵) خودروی پراید با کف صاف



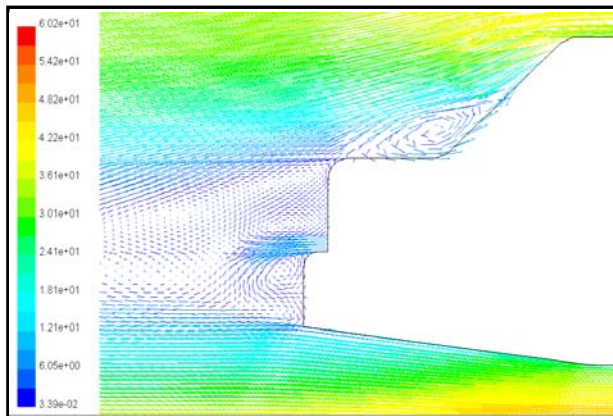
شکل (۴) مدل نمونه برای حالت سه بعدی



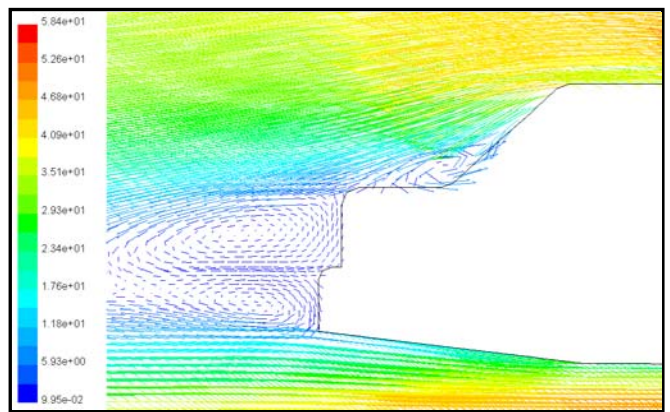
شکل (۶) خودروی پراید همراه با تجهیزات کف منهای لوله آگروز



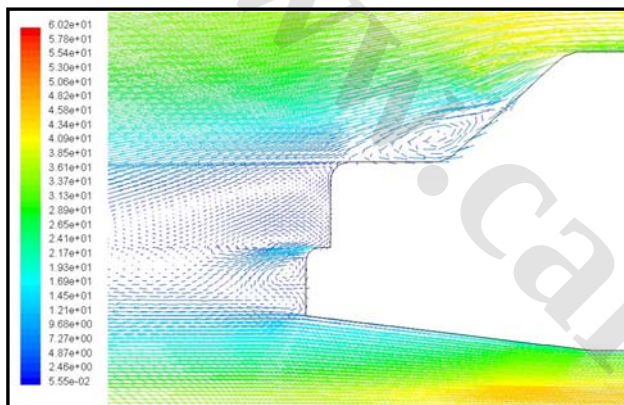
شکل (۷) خودروی پراید همراه با تجهیزات کف



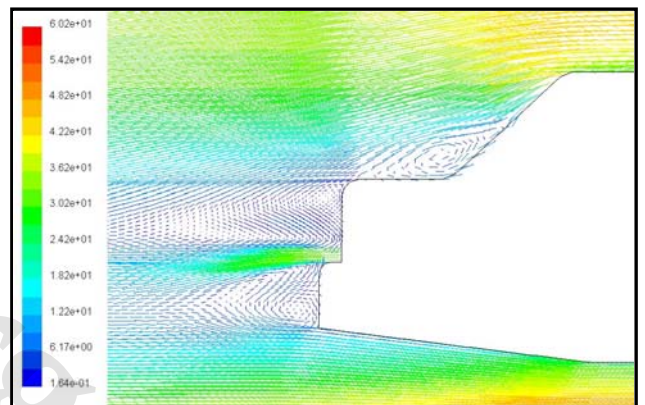
شکل (۹) تزریق هوا از بالای سپر عقب با نرخ 0.5 Kg/s



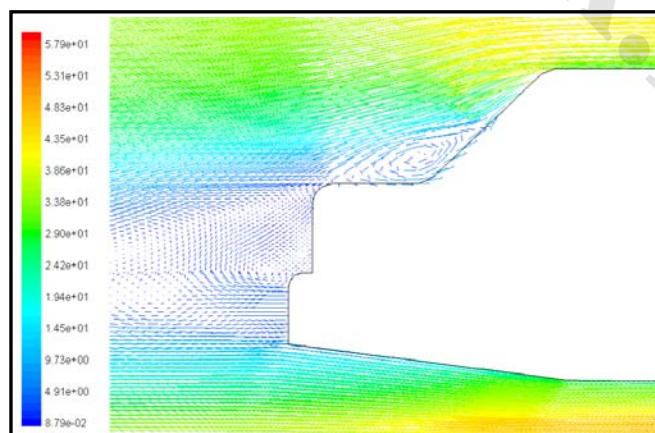
شکل (۸) گردابه‌های پشت خودرو در حالت بدون تزریق



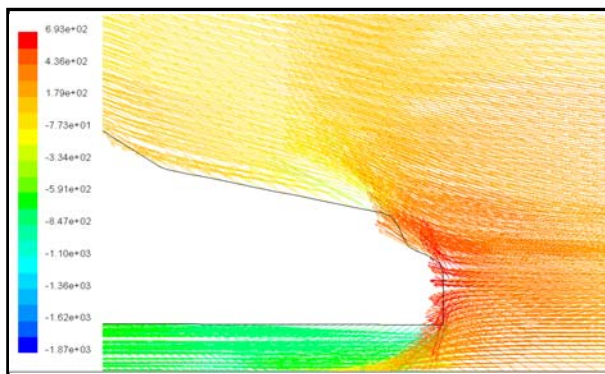
شکل (۱۱) تزریق هوا از قوس بالایی سپر عقب



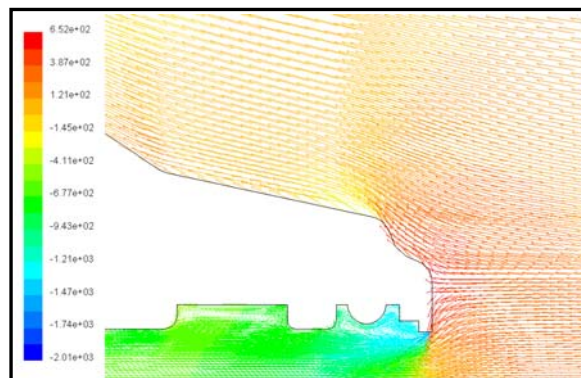
شکل (۱۰) تزریق هوا از بالای سپر عقب با نرخ 2 Kg/s



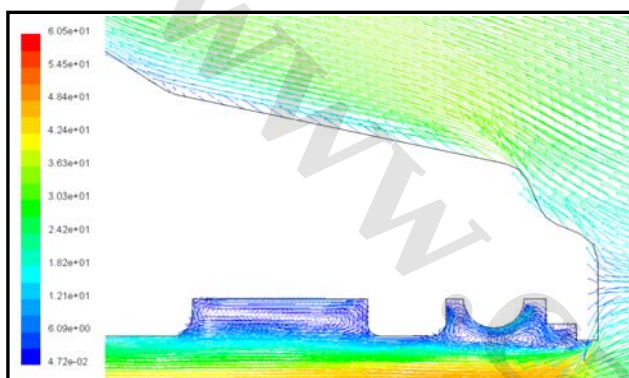
شکل (۱۲) تزریق هوا از تمام سپر عقب به بیرون



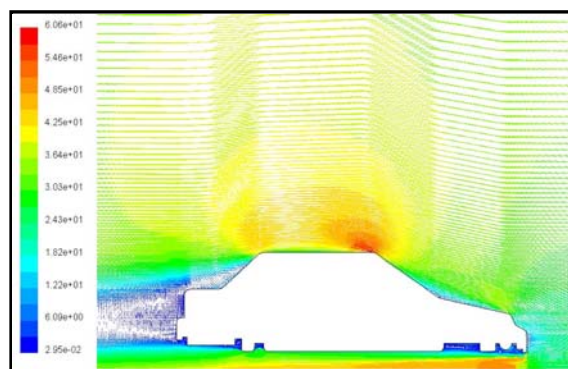
شکل (۱۴) کانتور فشار در مدل همراه با سطح صاف



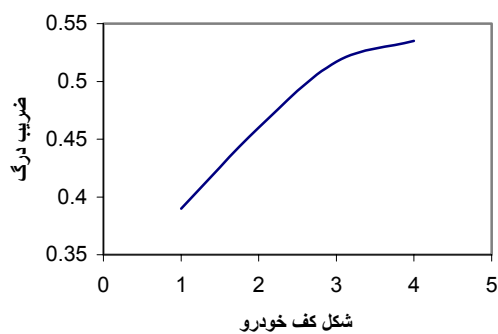
شکل (۱۳) کانتور فشار در مدل همراه با تجهیزات کف



شکل (۱۶) گردابه‌های ایجاد شده در اجزا زیر خودرو



شکل (۱۵) بردارهای سرعت در مدل همراه با تجهیزات کف



شکل (۱۷) ضریب درگ بر حسب تغییرات کف خودرو

- مدل سه بعدی فاقد چرخ و تجهیزات کف: ۱
- مدل سه بعدی با چرخ و فاقد تجهیزات کف: ۲
- مدل سه بعدی با چرخ و تجهیزات کف منتهای لوله آگزوز: ۳
- مدل سه بعدی با چرخ و تجهیزات کف همراه لوله آگزوز: ۴