



## مطالعه‌ی اثر گازهای خروجی از اگزوز خودرو Audi A4 Avant بر مقدار ضریب پسا

مهدی خیرخواه<sup>۱</sup>، احسان روحی<sup>۲\*</sup>، محمود پسندیده فرد<sup>۳</sup><sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوانوردی امبری ریدل، فلوریدا، آمریکا<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

## چکیده

در این پژوهش، به مطالعه‌ی اثر گازهای خروجی از اگزوز، روی منطقه‌ی دنباله‌ی خودروی Audi A4 Avant پرداخته می‌شود که شامل گردابه‌ها و جریان‌های جداشده از سطح آن است. این مدل خودرو، از لحاظ پیکربندی عقب، مشابه خودروی استاندارد DrivAer Estateback است که توسط مؤسسه‌ی آپرودینامیک دانشکده‌ی فنی مونیخ، مدل‌سازی شده‌است. با توجه به نوع مسئله و تحلیل پایای جریان، مدل آشفتگی SST  $k - \omega$  برای شبیه‌سازی به روش دینامیک سیالات محاسباتی انتخاب شد؛ همچنین به منظور اعتبارسنجی روش حل، نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی جریان با عدد رینولدز  $4.87 \times 10^6$  حول مدل استاندارد، با نتایج تجربی حاصل از تونل باد دانشکده‌ی فنی مونیخ، مقایسه شد. پس از انجام اعتبارسنجی روش حل، در اولین بررسی مشخص شد، در عدد رینولدز فوق، ضریب پسا خودروی آنودی دارای اگزوز،  $1.15\%$  کمتر از ضریب پسای خودروی بدون اگزوز است. در ادامه، اثر افزایش سرعت خودرو، اثر زاویه‌ی دهانه‌ی لوله‌ی اگزوز و سرانجام تأثیر وجود یک اگزوز در یک طرف آن، بر مقدار ضریب پسا بررسی شد.

کلمات کلیدی: آپرودینامیک؛ پسا؛ اگزوز؛ گردابه؛ خودروی آنودی.

## Study of the Effect of Exhaust Gases from the Audi A4 Avant on Drag Coefficient

M. Kheirkhah<sup>1</sup>, E. Roohi<sup>2\*</sup>, M. Pasandidehfard<sup>3</sup><sup>1</sup> MSc., Aerospace Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran<sup>2</sup> Assoc. Prof., Aerospace Eng., Embry Riddle Aeronautical University, FL, USA<sup>3</sup> Prof., Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

## Abstract

This study examines the effect of exhaust gases on the wake region of the Audi A4 Avant, including vortices and separated flows from its surface. The rear configuration of this vehicle resembles the standard DrivAer Estateback model, modeled by the Aerodynamics Institute at the Technical University of Munich. Given the type of problem and steady-state flow analysis, the SST  $k - \omega$  turbulence model was chosen for computational fluid dynamics simulation. To validate the solution method, numerical results from the flow simulation with a Reynolds number of  $4.87 \times 10^6$  around the standard model were compared with experimental wind tunnel results from the Technical University of Munich. After validation, the initial findings indicated that at this Reynolds number, the drag coefficient of the Audi with exhaust was 1.15% lower than that of the vehicle without exhaust. Further analyses included examining the impact of increased vehicle speed, the angle of the exhaust pipe opening, and the presence of a single-sided exhaust on the drag coefficient.

Keywords: Aerodynamic; Drag; Exhaust; Vortex; Audi vehicle.

## ۱- مقدمه

سرعت گازهای خروجی از اگزوز بر سرعت خودرو، تغییرات ضریب پسا را بر این نسبت بی‌بعد ترسیم کرد و به این نتیجه رسید که در نسبت سرعت ۰/۶، بیشترین کاهش پسا برابر ۳/۵- اتفاق می‌افتد. موس نایف و همکاران [۴] محل‌هایی را برای خروجی‌های اگزوز در ارتفاعات مختلف بیرون سپر و صندوق عقب خودروی DriveAer Fastback Model، در نظر گرفتند. آن‌ها ضریب پسا و برآ را در این ارتفاع‌ها بدست آوردند و مکان‌هایی را مشخص کردند که باید از قراردادن خروجی‌ها اجتناب شوند. رنان [۵] از طریق مدل‌سازی واکنش سوختن در موتور خودرو، دبی جرمی خروجی از اگزوز را محاسبه کرد و با در نظر گرفتن شرط مرزی نرخ جرم ورودی برای اگزوز، آن را شبیه‌سازی کرد؛ همچنین تغییرات ضریب پسا را در موقعیت‌های مختلف اگزوز بررسی کرد.

این پژوهش به بررسی آیرودینامیکی جریان در عدد رینولدز  $10^6 \times 4/87$  اطراف بدنه‌ی یک خودرو همراه با اثر گازهای خروجی از اگزوز و نحوه‌ی تغییر گردابه‌های پشت آن می‌پردازد. تجمع این گردابه‌ها باعث ایجاد فشار منفی در پشت خودرو می‌شود که با کنترل مؤلفه‌های مؤثر مانند: هندسه و تعداد دهانه‌های خروجی و زاویه‌ی آن‌ها نسبت به افق، می‌توان تا حد زیادی این گردابه‌ها را از بین برد و ضریب پسا را تغییر داد.

## ۲- معادلات دیفرانسیل حاکم

در مسائل آیرودینامیکی تراکم‌ناپذیر غیردائم، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت (ممنتوم)، دو معادله‌ی اساسی برای تحلیل جریان هستند که به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \rightarrow \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + v_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۱) و (۲)،  $v$  بیانگر لزجت سینماتیکی و  $v_t$  لزجت سینماتیکی آشفتگی جریان است. در این روابط، تعداد مجهول‌ها بیشتر از تعداد معادلات است. از این رو باتوجه به تعداد معادلات لازم و ماهیت مسئله حاضر، از یکی از مدل‌های

طراحی بدنه‌ی خودرو از نظر آیرودینامیکی و بهبود مستمر آن نیز همواره مورد توجه پژوهشگران و خودروسازان بوده و در این زمینه، تحقیقات گسترده‌ای انجام شده‌است. علت این توجه، تأثیر بسزای یک طراحی آیرودینامیکی خوب، در بازده و چگونگی عملکرد خودرو است. در واقع هر موفقیتی که در طراحی آیرودینامیک بدنه‌ی خودروها صورت گیرد را می‌توان به عنوان کمکی در جهت کاهش مصرف سوخت آن خودرو، در طول مدت استفاده از آن به حساب آورد. بررسی و تحلیل آیرودینامیکی خودرو با توجه به پیشرفت سریع صنعت خودروسازی، در عصر حاضر، یکی از مؤلفه‌های مهم در طراحی برای حضور در صحنه‌ی رقابت‌های این صنعت است. آغاز حرکت در جهت بهینه‌سازی بدنه‌ی خودروها و کاهش مصرف سوخت آن‌ها، از سال ۱۹۷۵ در پی افزایش جهشی در مصرف سوخت خودروهای تولیدی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ بود. در خودروهای این نسل، ناگهان مصرف بنزین افزایش چشم‌گیری نشان داد که علت آن ساخت خودروهایی با سطح جلوی عمودی وسیع و قسمت عقبی بریده شده بود. در این خودروها به علت وجود نقطه‌ی جدایش در قسمت انتهایی بدنه، نیروی پسای بسیار بالایی به وجود می‌آمد. تاکنون تحقیقات زیادی در جهت تغییر فرم عقب خودروهای سواری انجام شده و خیلی از آن‌ها هم به مرحله‌ی تولید رسیده است که نقطه‌ی مشترک خیلی از آن‌ها، کاهش حداکثری میزان گردابه‌های تشکیل شده در پشت خودرو، کاهش نیروی پسا در این قسمت و حفظ پایداری خودرو در سرعت‌های مختلف است [۱]. تاکنون دانشمندان بر این باور بودند که خروجی لوله‌ی اگزوز خودروها باید به صورت افقی و به سمت پایین طراحی شود، اما با تحقیقات انجام شده در این زمینه بر این باور شدند که نرخ و جهت خروج گازهای دم‌س موتور می‌تواند بر کاهش ضریب پسا و در نتیجه، افزایش سرعت خودرو مؤثر باشد. حسن و همکاران [۲] سرعت‌های خروجی مختلف از اگزوز را در یک خودروی نمونه شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که انتشار گازها از اگزوز می‌تواند در مقدار ضریب پسا مؤثر باشد. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کاهش ضریب پسا در سرعت‌های خروجی پایین، بیشتر است. هانگ [۳] با تغییر ویژگی‌های هندسی و موقعیت خروجی‌های اگزوز، اثر انتشار گازها در کاهش اندازه‌ی گردابه‌ها و ضریب پسا را بررسی کرد. علاوه بر این او با تقسیم

حاکم بر مدل مورد نظر است که مقادیر ثابت  $C$  باتوجه به نتایج تجربی [۸] بدست آمده است.

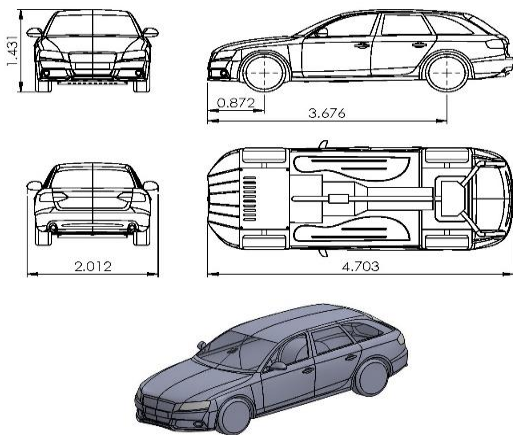
$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + C_{1\omega} \frac{\omega}{k} P_k + C_{2\omega} \omega^2 \quad (۶)$$

### ۳- شبیه سازی عددی

از بخش ۲ مشاهده شد، به منظور مطالعه ای آیرودینامیکی رفتار جریان هوا اطراف مدل مورد نظر، باید چهار معادله ای دیفرانسیل حل شود. با توجه به پیچیدگی معادلات و شرایط حل مسئله، حل تحلیلی ممکن نیست؛ بنابراین برای تحلیل از روش شبیه سازی عددی در نرم افزار Ansys Fluent نسخه ی ۲۰۱۹ استفاده شد. مراحل شبیه سازی با ذکر جزئیات در ادامه بیان شده است.

#### ۳-۱- هندسه ی مدل محاسباتی

هندسه ی موردنظر یک خودرو از گروه خودروسازی آئودی است که به لحاظ پیکربندی عقب، منطبق با مدل استاندارد Audi A4 Avant DrivAer Estateback است. مدل این خودرو در محیط نرم افزار Solidworks ۲۰۲۰ طراحی شده است. در شکل ۱ بدنه ی خودروی آئودی در نماهای مختلف، قابل مشاهده است.



شکل ۱- بدنه ی خودرو Audi A4 Avant با دو خروجی اگزوز و ابعاد آن به متر

آشفته گی دو معادله ای RANS<sup>۱</sup> را که عبارتند از،  $k - \omega$  و  $k - \epsilon$  بهره می گیریم تا تعداد معادلات با مجهول ها برابر شود. در این روش از معادله ی ناویر-استوکس میانگین گیری زمانی شده و جریان آشفته به کمک مدل سازی محاسبه می شود؛ همچنین در این روش، سرعت  $u_i$  دارای دو بخش نوسانی  $u'_i$  و میانگین  $\bar{u}_i$  است:

$$u_i = u'_i + \bar{u}_i \quad (۳)$$

مدل  $k - \omega$  یکی از مدل های آشفته گی دو معادله ای است که از دو معادله ی انتقالی برای انرژی جنبشی آشفته گی ( $k$ ) و اتلاف مخصوص ( $\omega$ ) با هدف محاسبه ی لزجت مغشوش و دیگر مجهول ها استفاده می شود [۶]. از کاربردهای این مدل می توان برای لحاظ کردن اثرات رینولدز پایین، تراکم پذیری، پیش بینی جریان دور از دیواره و زیرلایه ی لزج اشاره کرد. برای بیان معادله ی انتقالی انرژی جنبشی، ابتدا باید انرژی جنبشی مربوط به آشفته گی که از نصف مجموع مجذورهای سرعت در سه جهت است، مطابق رابطه ی (۴) تعریف شود.

$$k = \frac{1}{2} (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) \quad (۴)$$

حال می توان معادله ی انتقالی انرژی جنبشی مربوط به آشفته گی جریان را طبق رابطه ی (۵) بیان کرد:

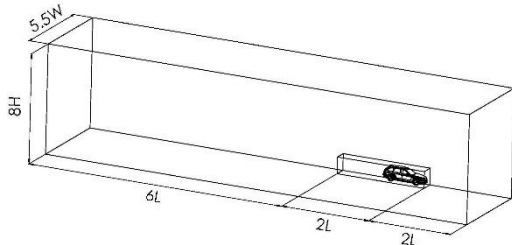
$$\frac{Dk}{Dt} = - \frac{d}{dx_m} \left( u'_m \left( \frac{p'}{\rho} + k \right) - v u'_i \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_m} + \frac{\partial u'_m}{\partial x_i} \right) \right) - v \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_m} + \frac{\partial u'_m}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u'_i}{\partial x_m} \quad (۵)$$

در این پژوهش از نسخه SST مدل آشفته گی  $k - \omega$  برای بدست آوردن لزجت آشفته گی استفاده می کنیم. این مدل توسط منتر [۷] به منظور آمیختن روش  $k - \omega$  (که در نواحی نزدیک دیواره خوب عمل می کند) با روش  $k - \epsilon$  (که در نواحی دور از دیواره خوب عمل می کند) ارائه شده است؛ یعنی این مدل به طور هم زمان می تواند از توانایی مدل  $k - \omega$  برای احتساب نواحی رینولدز پایین و توانایی مدل  $k - \epsilon$  برای احتساب نواحی رینولدز بالا بهره گیرد [۶]. رابطه (۶)، معادله ی

<sup>۲</sup> Blueprint

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

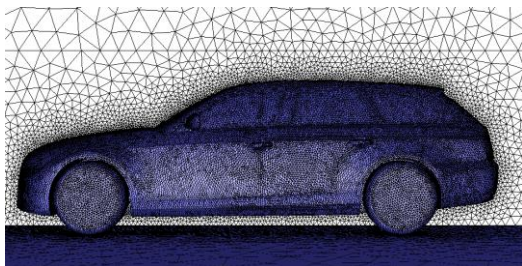
بخش دامنه است؛ زیرا گردابه‌ها، جدایش جریان و همچنین گازهای خروجی از آگزوز در این ناحیه واقع شده‌اند که شبیه سازی آنها باید از دقت بیشتری برخوردار باشد.



شکل ۳- ابعاد دامنه‌ی محاسباتی

### ۳-۳- شبکه‌بندی دامنه‌ی محاسباتی

مطابق شکل ۴، شبکه‌بندی دامنه‌ی حل در محیط نرم‌افزار Ansys Meshing انجام شد. با توجه به اینکه بدنه، دارای پیچیدگی‌های هندسی فراوانی است، از شبکه‌بندی مثلثی نامنظم استفاده شد. علاوه بر این، به علت وجود زیرلایه‌ی لزج در لایه مرزی اطراف بدنه و مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST باید یک شبکه‌بندی خاص با شرط  $y^+ \leq 1$  در این محدوده، ایجاد شود [۱]. با در نظر گرفتن مقدار  $y^+ = 1$  و عدد رینولدز  $1.06 \times 10^6$ ، فاصله‌ی اولین سلول تا دیواره  $0.254/1000$  میلی‌متر بدست آمد؛ همچنین تعداد لایه‌های مرزی ۱۰ عدد با نرخ رشد  $1/2$  تعیین شد.

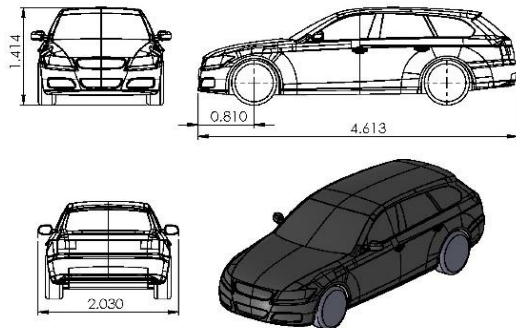


شکل ۴- شبکه‌بندی دامنه‌ی حل در اطراف بدنه

### ۳-۴- شرایط مرزی و تنظیمات حل

هوا در مسائل تحلیل آیرودینامیکی خودروها، تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا هنگامی که نسبت سرعت هوا به سرعت صوت (عدد ماخ) کمتر از  $0.3$  باشد، تغییرات چگالی ناچیز و کمتر از ۵ درصد خواهد بود [۱۲]؛ بنابراین مقدار چگالی و لزجت دینامیکی هوا ثابت و مطابق با پیش‌فرض

مدل DrivAer که یک مدل خودروی عمومی است، در مؤسسه آیرودینامیک و مکانیک سیالات دانشگاه فنی مونیخ برای تسهیل تحقیقات آیرودینامیکی وسایل نقلیه‌ی مسافری توسعه یافت [۹]. پیکربندی Estateback که یکی از انواع مدل است، در گذشته محققان پیشین همچون هوچو [۱۰] آن را با نام پشت مربعی نام‌گذاری می‌کردند. آن‌ها بر این باور بودند که به دلیل تغییر ناگهانی جهت جریان از بخش انتهایی فوقانی آن، گردابه‌های بزرگی ایجاد خواهد کرد که فشار منفی ناشی از این برگشت جریان، باعث افزایش ضریب پسا خواهد شد.



شکل ۲- بدنه‌ی مدل Estateback و ابعاد آن به متر

### ۳-۲- دامنه‌ی محاسباتی

معادلات حاکم با توجه به شرایط مسئله باید در محدوده‌ی مشخصی حل شود که دامنه‌ی محاسباتی نام دارد. مرزهای این دامنه باید در فاصله‌ی از بدنه‌ی مدل محاسباتی باشد که با افزایش آن، تغییری در نتایج رخ ندهد. این دامنه با توجه به تحقیقات پیشین [۱۱] به صورت نسبتی از طول (L)، عرض (W) و ارتفاع (H) مدل انتخاب شد. به این ترتیب که مرز ورودی جریان به فاصله  $2L$  از سپر جلو، مرز خروجی به فاصله  $7L$  از سپر عقب، ارتفاع و عرض دامنه نیز به ترتیب  $8H$  و  $11W$  در نظر گرفته شد؛ همچنین به منظور محاسبه‌ی دقیق تر گردابه‌ها و اثر پیشران گازهای خروجی از آگزوز، یک زیردامنه‌ی دیگر در اطراف مدل محاسباتی لحاظ شد. وجود این زیردامنه باعث افزایش تراکم شبکه‌ها در اطراف مدل محاسباتی خواهد شد. به این صورت که مرز جلوی جریان و فوقانی آن به ترتیب  $30$  سانتی‌متر از سپر جلو و سقف خودرو و نیز مرز عقب آن مطابق شکل ۳ به فاصله  $L$  از سپر عقب ایجاد شد. دلیل ایجاد این فاصله از سپر عقب، اهمیت این

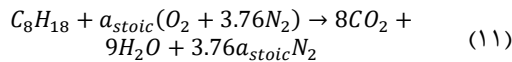
برای هر وسیله نقلیه ناشناخته است، تخمین‌هایی برای مؤلفه‌های مختلف مانند نرخ مصرف سوخت، نسبت جرم هوا به سوخت و دبی جرمی اگزوز استفاده می‌شود. این تخمین‌ها امکان محاسبه‌ی واقعی نرخ جریان اگزوز را فراهم می‌کند [۱۳]. لازم به ذکر است که لوله اگزوز هوا را با سرعت ثابتی منتشر نمی‌کند، بنابراین فرض‌های خاصی برای شبیه‌سازی شرایط واقعی تا حد امکان ضروری است. در ابتدا، دبی سوخت مصرف‌شده ( $\Delta_f [L/s]$ ) براساس سرعت خودرو ( $U_\infty [m/s]$ ) و سوخت مصرفی موتور ( $\chi_f [km/L]$ ) محاسبه می‌شود. این برآورد به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$\Delta_f = \frac{U_\infty}{1000\chi_f} \quad (9)$$

با توجه به چگالی سوخت ( $\rho_f [kg/m^3]$ ) می‌توان دبی جرمی سوخت مصرف‌شده در موتور را محاسبه کرد.

$$\dot{m}_f = \Delta_f \cdot \rho_f = \frac{\rho_f U_\infty}{1000\chi_f} \quad (10)$$

براساس واکنش سوختن بنزین (ایزوکتان) به صورت استوکیومتری، می‌توان نسبت سوخت به هوای تئوری ( $\phi_{eq}$ ) را بدست آورد [۱۴ و ۱۵].



در واکنش بالا، با سوختن اکتان، ضریب استوکیومتری ( $a_{stoic}$ ) برابر ۱۲/۵ خواهد شد؛ در نتیجه نسبت جرمی سوخت به هوا با توجه به ضرایب مولی، ۰/۰۶۶۴۳ می‌شود. لازم به ذکر است که وسایل نقلیه با موتور احتراق داخلی مجهز به حسگر نسبت هوا به سوخت هستند که مدام با هوای ورودی و سرعت آن سازگار می‌شوند؛ در نتیجه تعیین یک مقدار ثابت برای نسبت سوخت به هوا یک فرض محسوب می‌شود. در پیروی از رویکردی مشابه با رنان [۵] در جدول ۱، نسبت هم‌ارزی مطابق رابطه (۱۲) بیشتر از ۱ در نظر گرفته شد. مقدار بیش از ۱ نشان‌دهنده‌ی موتوری است که در آن اکسیژن هوای ورودی به‌طور کامل می‌سوزد و نسبت به حالت استوکیومتری سوخت زیاد و هوا کم است. که منجر به ایجاد حداکثر توان خروجی موتور می‌شود [۴]. در پایان اینکه در بخش تنظیمات

نرم‌افزار فلونتت به‌ترتیب برابر  $1/225 \text{ Kg/m}^3$  و  $N.s/m^2$  و  $0.00017894$  در نظر گرفته شد؛ بنابراین با توجه به رابطه‌ی (۷)، سرعت هوای ورودی  $15/126$  متر بر ثانیه محاسبه شد؛ همچنین با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار Solidworks، مقدار دقیق مساحت خودروی آئودی مقابل جریان برابر  $2/185975$  مترمربع بدست آمد. به‌دلیل تقارن، نصف دامنه در فلونتت برای حل، تعریف شده‌است؛ بنابراین نصف مساحت مقابل جریان باید در بخش مقادیر مرجع تنظیم شود.

$$Re = \frac{\rho U_\infty L_\infty}{\mu} \quad (7)$$

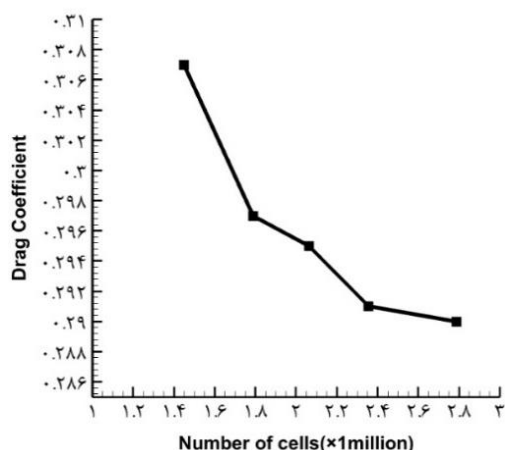
حل عددی به‌صورت فشارمینا و در حالت پایا صورت پذیرفت. برای گسسته‌سازی معادلات از روش مرتبه‌ی دو و برای همبسته‌کردن سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLEC استفاده شد؛ همچنین برای تخمین مقدار مشتق، روش Green-Gauss Cell-Based انتخاب شد، زیرا در شبکه‌ی بی‌سازمان چهاروجهی از دقت بالایی برخوردار است [۶].

شرایط مرزی شامل سرعت ورودی ( $15/126 \text{ m/s}$ ) برای دهانه‌ی ورودی، فشار خروجی نسبی ( $0 \text{ pa}$ ) برای دهانه‌ی خروجی، شرط مرزی تقارن برای صفحه‌ی گذرنده از میانه‌ی خودرو، سطح جانبی و سطح فوقانی دامنه‌ی محاسباتی (به دلیل صفر بودن شار گرادیان همه‌ی کمیت‌ها مانند سرعت) است. علاوه بر این‌ها، شرط مرزی دیواره‌ی ثابت برای سطح بدنه‌ی خودرو با شرط عدم لغزش، شرط دیواره‌ی متحرک برای جاده؛ به‌طوری که مقدار و جهت سرعت آن برابر با مقدار و جهت جریان آزاد هوا است. شرط مرزی دیوار دوار نیز برای چرخ‌ها که با فرض غلتش ناب و بر اساس ابعاد موجود چرخ‌ها (شعاع چرخ ۳۳ سانتی‌متر)، اندازه سرعت دورانی ( $\dot{\theta}$ ) مطابق رابطه (۸) برابر  $45/836$  رادیان بر ثانیه محاسبه می‌شود.

$$U_\infty = R\dot{\theta} \quad (8)$$

شرط مرزی دبی جرمی خروجی برای سطح دهانه‌ی خروجی اگزوز در نظر گرفته شد؛ اما چون اطلاعاتی از سرعت و دمای خروجی از دمش موتور وجود نداشت، از مدل محاسباتی تحقیقات رنان [۵] استفاده شد. برای ارزیابی تأثیر اگزوز بر روی آیرودینامیک خودرو، تعیین میزان گاز خروجی از اگزوز بسیار مهم است. با این حال، از آنجایی که مقدار دقیق آن

رینولدز  $4/87 \times 10^6$  مقایسه شود. با حل و رسیدن مقدار باقی‌مانده‌ی هر معادله به یک حالت پایدار نوسانی، از نتایج نوسانی پایدار نمودار ضریب پسا، میانگین گرفته شد. مطابق با جدول ۲، مقدار این ضریب پسا به ضریب پسای تجربی حاصل از تونل باد دانشکده‌ی فنی مونیخ [۹]، بسیار نزدیک است.



شکل ۵- نمودار ضریب پسا در تعداد شبکه‌های مختلف

جدول ۲- مقایسه‌ی ضریب پسای تجربی و عددی بدنه‌ی

Estate back	
روش عددی	روش تجربی
۰/۲۹۱	۰/۲۹۲
-۰/۳۴۲ %	-

شکل ۶ توزیع ضریب فشار استاتیکی روی سطح بالایی بدنه‌ی Estateback را در امتداد خط مرکزی آن نشان می‌دهد. ضریب فشار مطابق با رابطه‌ی (۱۳) تعریف می‌شود [۱۶].

$$C_{P,S} = \frac{P_s - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (13)$$

که در آن  $P_s$  فشار استاتیکی روی سطح خودرو و  $P_\infty$  فشار دوردست و برابر با فشار اتمسفر است. در شکل ۶ اختلاف ضریب فشار ابتدا و انتهای بدنه، مشخص است. این اختلاف ضریب فشار مطابق رابطه‌ی (۱۳)، بیانگر اختلاف فشار و وجود نیروی مقاوم درخلاف جهت حرکت است. همچنین با توجه به این نمودار، ضریب فشار منفی در پنجره‌ی جلو و نیز محل ابتدا و انتهای سقف کاملاً مورد تأیید است؛ زیرا، با تغییر ناگهانی

شرایط مرزی از اثر دمای اگزوز و گازهای خروجی از آن صرف‌نظر شده‌است.

جدول ۱- مؤلفه‌هایی برای محاسبه‌ی دبی جرمی خروجی از اگزوز خودرو [۴]

مقادیر	علائم	مؤلفه
ایزو اوکتان	$(C_8H_{18})$	سوخت
۷۴۰	$\rho_f [kg/m^3]$	چگالی سوخت
۱۲/۳	$\chi_f [km/L]$	سوخت مصرفی
۱۵/۱۲۶	$U_\infty [m/s]$	سرعت خودرو
۱/۰۵	r	نسبت هم‌ارزی

بنابراین طبق فرضیات رنان، با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) دبی جرمی خروجی از اگزوز،  $0/1529$  کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شد؛ اما در صورت در نظر گرفتن دو لوله‌ی اگزوز این دبی جرمی برای هر دهانه، نصف خواهد شد.

$$\dot{m}_r = (1 + r\phi_{eq}) \frac{\rho_f U_\infty}{1000 \chi_f} \quad (12)$$

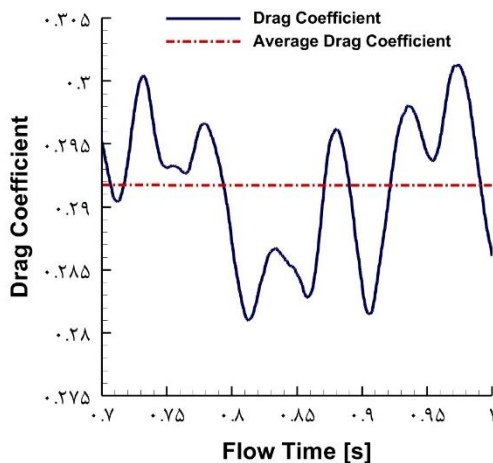
#### ۴- استقلال از تعداد شبکه

در پژوهش‌های عددی، تعداد و اندازه‌ی سلول‌های شبکه‌ی دامنه‌ی محاسباتی در درستی و صحت نتایج، تأثیر بسزایی دارد؛ به طوری که، اگر سلول‌ها به اندازه‌ی کافی کوچک نباشند، حل دقت کافی نخواهد داشت. از طرف دیگر ریزش بیش از حد، سبب افزایش هزینه‌ی محاسباتی خواهد شد. از این رو با کاهش تدریجی اندازه‌ی سلول‌ها و افزایش تعداد آن‌ها، مطابق شکل ۵ میزان تغییرات ضریب پسا از تعداد  $2/354$  میلیون به بعد، به کمتر از  $0/4\%$  می‌رسد؛ بنابراین با انتخاب تعداد شبکه‌ها در حدود تعداد ذکرشده در اطراف مدل Estateback، می‌توان نتایج را مستقل از تعداد شبکه دانست و به بیشترین دقت و کمترین هزینه‌ی محاسباتی رسید.

#### ۵- اعتبارسنجی

برای شبیه‌سازی عددی جریان اطراف خودرو Audi A4 Avant، علاوه بر رسیدن به نتیجه‌ی استقلال از تعداد شبکه، لازم است این شبیه‌سازی حول بدنه‌ی خودرو Estateback، برای همان مدل آشفتگی و شرایط مرزی، اعتبارسنجی انجام شود و سپس با نتایج تجربی هفت و همکاران [۹] در عدد

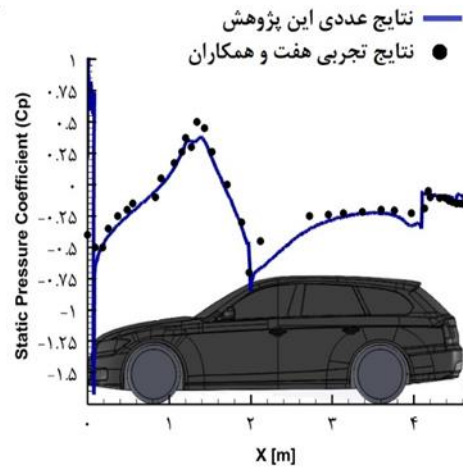
اطلاعات مربوط به بسامد غالب نوسان‌های آشفتگی جریان ( $f$ ) در اطراف مدل DrivAer (معمولاً از ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز) اغلب از مطالعات تجربی و شبیه‌سازی‌های محاسباتی شامل آزمایش‌های تونل باد و تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی به دست می‌آید [۱۸]؛ بنابراین با فرض این که در جریان اطراف مدل، ناپایداری زیادی وجود داشته باشد؛ بسامد نوسان‌ها ۱۰۰ هرتز تعیین شد تا اکثر نوسان‌ها را پوشش دهد که در نتیجه طبق رابطه‌ی (۱۴)، گام زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه محاسبه می‌شود؛ همچنین برای مطالعه‌ی رفتار جریان اطراف خودرو برای مدت زمان ۱ ثانیه، ۲۰۰۰ گام زمانی برای شبیه‌سازی لازم است. با همان مدل آشفتگی و شرایطی که برای تحلیل پایا، فرض شده بود؛ نتیجه‌ی تحلیل، به صورت نمودار تغییرات ضریب پسا در طول زمان در شکل ۷، قابل مشاهده است.



شکل ۷- تغییرات ضریب پسای مدل استاندارد در طول زمان در بازه ۰/۷ تا ۱ ثانیه در عدد رینولدز  $4/87 \times 10^6$

در نمودار شکل ۷، تنها بخشی از تغییرات ضریب پسا در طول زمان، نمایش داده شده که در این محدوده به حالت پایا رسیده است؛ زیرا پس از برازش کردن خطی بر این منحنی که بیانگر میانگین تغییرات ضریب پسا در طول زمان است، شیب این خط با تقریب خوبی، برابر صفر شد. عرض از مبدأ این خط نیز که بیانگر مقدار ضریب پسای متوسط از لحظه‌ی ۰/۷ تا ۱ ثانیه است، ۰/۲۹۲ محاسبه شد. این مقدار نسبت به ضریب پسای تجربی و تحلیل عددی پایا در جدول ۲، تقریباً تفاوتی ندارد و صحت تحلیل پایای مدل را در بخش‌های قبل تأیید

جهت جریان در این نواحی، جریان از سطح جدا می‌شود و منجر به کاهش فشار شده است. در ادامه‌ی اعتبارسنجی روش حل نیز مطابق شکل ۶، داده‌های تجربی حاصل از پژوهش‌های هفت و همکاران [۹] (با نقاط مشکی) برای مقایسه با نتایج عددی (منحنی آبی رنگ) این پژوهش انتخاب شده است. با وجود مشاهده‌ی تطابق در بیشتر نقاط، در بعضی نقاط نتایج تجربی با عددی تفاوت اندک دارد که به احتمال زیاد دلیل آن، خطاهای روش عددی است؛ زیرا، روش‌های عددی، خود، روش‌های تقریبی هستند که برای ساده‌سازی، در حل معادلات دیفرانسیل فرض می‌شوند.

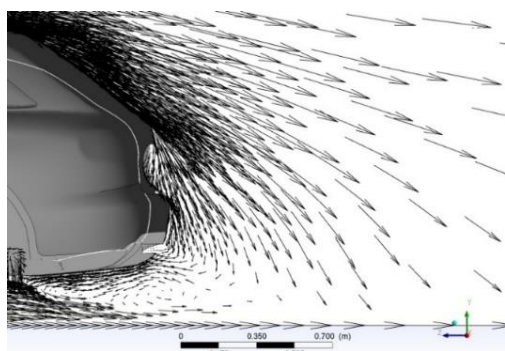


شکل ۶- نمودار توزیع ضریب فشار استاتیکی بالای بدنه استاندارد و مقایسه با نتایج تجربی تونل باد دانشکده‌ی فنی مونیخ [۹] در عدد رینولدز  $4/87 \times 10^6$

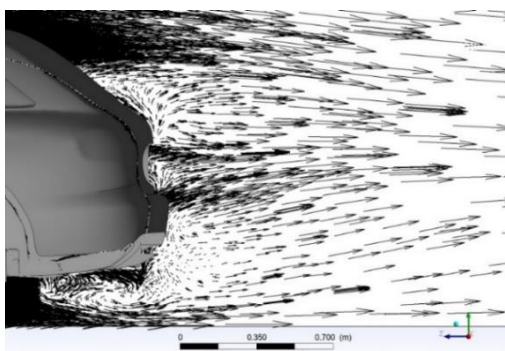
در انتهای اعتبارسنجی، با توجه به تحلیل این مسئله به صورت پایا، فرض بسیار حساسی است؛ لازم است این مدل برای یک حالت، در شرایط ناپایا شبیه‌سازی شده و میزان ناپایایی و بسامدهای غالب روی ضریب پسا بررسی و با مقدار شرایط استاتیکی مقایسه شود. به همین منظور، برای ثبت دقیق نوسان‌ها با بسامد مشخص  $f$ ، گام زمانی ( $\Delta t$ ) باید به قدری کوچک باشد که حداقل ۱۰ تا ۲۰ نقطه‌ی داده برای هر دوره‌ی زمانی نوسان‌ها ثبت شود که طبق رابطه (۱۴)، می‌توان گام زمانی را محاسبه کرد [۱۷].

$$\frac{1}{20.f} \geq \Delta t \quad (14)$$

۶-۱- تأثیر وجود اگزوز در آیرودینامیک خودروی نمونه شکل ۹ و ۱۰ توزیع جریان و گردابه‌های بوجود آمده در پشت خودرو Audi A4 Avant را در عدد رینولدز  $10^6 \times 4/87$  بدون در نظر گرفتن اثر گازهای خروجی از اگزوز در صفحه‌های  $x=0$  و  $x = -0/6$  (صفحه‌ی عبوری از قطر دهانه‌ی اگزوز) نشان می‌دهد.



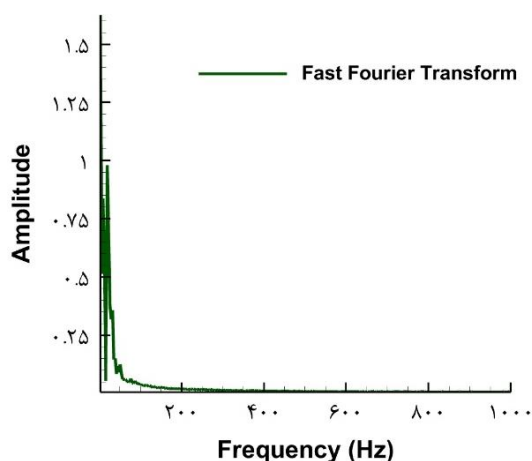
شکل ۹- توزیع جریان بدون اثر اگزوز در صفحه‌ی عبوری از میانه‌ی خودروی آئودی ( $x=0$ )



شکل ۱۰- توزیع جریان بدون اثر اگزوز در صفحه‌ی عبوری از قطر دهانه‌ی اگزوز خودروی آئودی ( $x=-0/6$ )

در شکل ۹، در بالا و پایین سپر خودرو، برگشت جریان اتفاق افتاده است. در شکل ۱۰ نیز دو گردابه‌ی نسبتاً بزرگ در بالا و پایین و یک گردابه‌ی کوچکتر در بین آن دو، به وجود آمده است. با توجه به آن که کف خودرو، دارای انحناهای متفاوت است، سرعت جریان هوا تحت تأثیر نیروی لزجی آن کاهش پیدا می‌کند. به طوری که قبل از رسیدن به سپر و ایجاد

می‌کند. علاوه بر این برای تعیین بسامدهای غالب روی ضریب پسا، از ابزار تبدیل فوریه‌ی سریع<sup>۱</sup> [۱۹] نرم‌افزار TecPlot استفاده شد. نتیجه‌ی تبدیل فوریه از حوزه‌ی زمان به بسامد، شکل ۸، به صورت نمودار تغییرات دامنه‌ی نوسان‌ها برحسب تغییرات بسامد شد. مطابق این نمودار، نوسان‌هایی که دارای دامنه‌ی بزرگتری هستند در محدوده‌ی بسامدهای زیر ۱۰۰ هرتز رخ داده‌اند که گویای بسامدهای غالب مسئله هستند. از طرفی طبق تحقیقات گذشته [۲۰] این بسامدها به نوسان‌های مرتبط با ساختارهای بزرگ-مقیاس، مانند گردابه‌های بزرگ و نوسان‌های ایجادشده در پشت خودرو یا در اطراف نقاط استوانه‌ای (مانند آینه‌های جانبی) مربوط می‌شود که برای یک هندسه‌ی سه‌بعدی مانند خودرو، در محدوده‌ی طبیعی خود قرار دارد.



شکل ۸- نمودار تغییرات دامنه‌ی نوسان‌ها برحسب بسامد

## ۶- نتایج

در این بخش، نتایج تحلیل‌های عددی بیان شده است. همان طور که در نمودار توزیع ضریب فشار در شکل ۶ مشاهده شد، در انتهای بدنه‌ی استاندارد، افت فشار زیادی به وجود آمده است. دلیل اصلی این افت فشار، جدایش جریان بود که در پشت بدنه‌ی خودرو، منطقه‌ی دنباله را تشکیل می‌داد. مهم‌ترین ویژگی‌های این منطقه شامل کمتر یا صفر بودن فشار و تشکیل شدن گردابه است که در ادامه‌ی این موضوعات برای خودروی آئودی با تجهیزات کف و اگزوز بررسی خواهد شد.

<sup>۱</sup> Fast Fourier Transform



### ۶-۲- تأثیر وجود آگزوز در سرعت‌های مختلف

در بخش قبل مشاهده شد که وجود آگزوز در خودروها، منجر به کاهش ضریب پسا می‌شود. در این بخش نیز بررسی می‌شود که در سرعت‌های مختلف یا به عبارتی در عددهای رینولدز متفاوت، رفتار آیرودینامیکی آن‌ها چگونه خواهد بود. برای پاسخ به این سوال به مدل محاسباتی رنان [۵] دوباره رجوع شد. با فرض ثابت بودن سوخت مصرفی موتور به ازای طی کردن یک فاصله مشخص برای خودرو ( $X_f$ )، دبی جرمی گازهای خروجی از آگزوز تنها تابعی از سرعت خودرو خواهد بود و می‌توان رابطه (۱۵) را به صورت زیر نوشت:

$$\dot{m}_r = 0.001011U_{\infty} [kg/s] \quad (15)$$

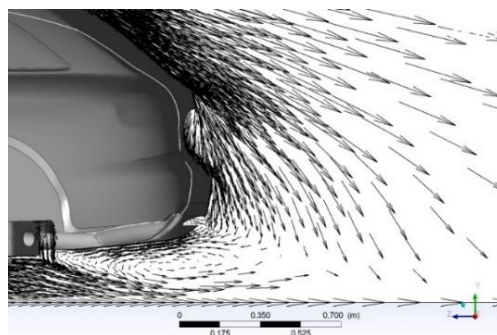
به این منظور، سه سرعت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر بر ثانیه برای خودروی نمونه انتخاب شد. پس از محاسبه‌ی فاصله‌ی اولین سلول تا دیواره، برای هر کدام و انجام شبیه‌سازی مجدد، نتایج ضرایب پسا در جدول ۳ قرار داده شد.

جدول ۳ - ضریب پسا خودروی نمونه دارای یک آگزوز در طرفین در اعداد رینولدز مختلف

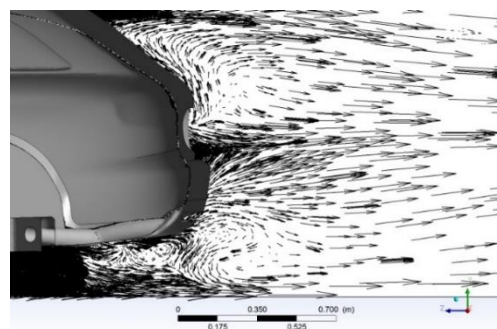
درصد اختلاف با ضریب پسا خودرو در سرعت ۱۵/۱۲۶	ضریب پسا خودروی نمونه‌ی دارای آگزوز	دبی جرمی گازهای خروجی از هر دو آگزوز (gr/s)	سرعت جریان هوای آزاد (m/s)
-	۰/۳۴۴	۱۵/۲۹۲	۱۵/۱۲۶
+۰/۸۷٪	۰/۳۴۷	۲۰/۲۲۰	۲۰
+۲/۹۰٪	۰/۳۵۴	۳۰/۳۳۰	۳۰
+۴/۳۶٪	۰/۳۵۹	۴۰/۴۴۰	۴۰

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۳، افزایش سرعت خودرو که با افزایش دبی گازهای خروجی از آگزوز همراه است، سبب افزایش ضریب پسا شده‌است. اگرچه که در نتایج تجربی هفت و همکاران [۹] و نتایج عددی بیک [۱۶]، با افزایش عدد رینولدز، ضریب پسا خودرو با پیکربندی Estateback کاهش پیدا کرده بود؛ اما وجود این شکل آگزوز برای بهبود آیرودینامیک خودرو در سرعت‌های بالا مفید نیست؛ زیرا مقدار ضریب پسا در خودروی نمونه‌ی بدون آگزوز، برابر ۰/۳۴۸ شد.

جدایش بر روی آن، تحت تأثیر یک گردابه‌ی بزرگ مقابل سپر، خود دچار برگشت جریان شده و در زیر خودرو، دو گردابه با جهت چرخش مخالف تشکیل داده است. ضریب پسا در این حالت برابر ۰/۳۴۸ شد.



شکل ۱۱- توزیع جریان و گردابه‌ها با اثر آگزوز در صفحه‌ی عبوری از میانه‌ی خودروی آنودی ( $x=0$ )



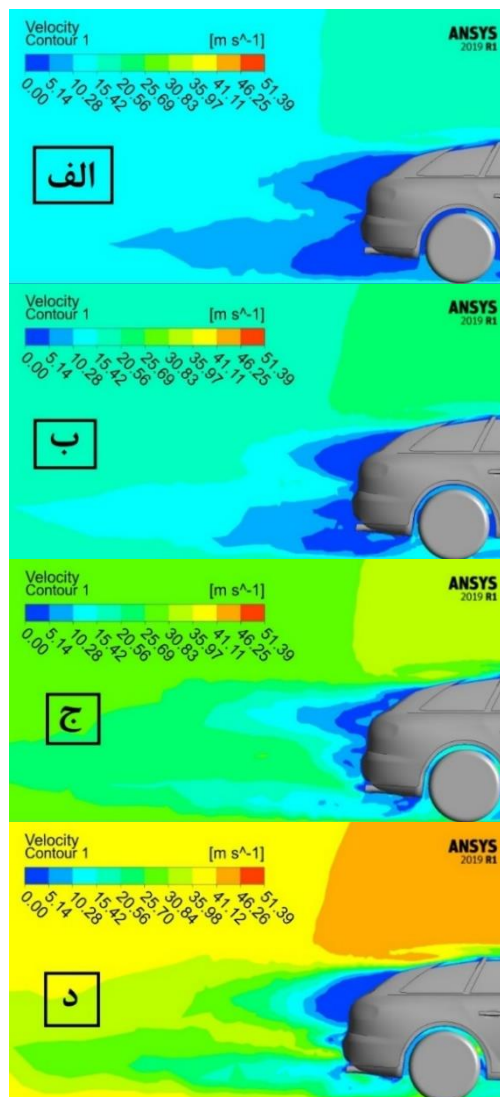
شکل ۱۲- توزیع جریان و گردابه‌ها با اثر آگزوز در صفحه‌ی عبوری از قطر دهانه‌ی آگزوز خودروی آنودی ( $x=0.16$ )

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ توزیع جریان و گردابه‌های تشکیل شده در پشت خودروی آنودی، در عدد رینولدز  $4.17 \times 10^6$ ، با وجود شبیه‌سازی اثر گازهای خروجی از آگزوز به صورت پایا را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۱۰ و ۱۲ به منظور بررسی وجود آگزوز، اثر ورود گازهای خروجی به منطقه‌ی میانی کاملاً مشهود است. به نحوی که گردابه‌ی را از بین برده است که در شکل ۱۰ مقابل سپر وجود داشت و محدوده‌ی گردابه‌های بالا و پایین را کمی کوچک‌تر کرده است. همین تغییرات، ضریب پسا را تا ۰/۳۴۴ کاهش داده است.

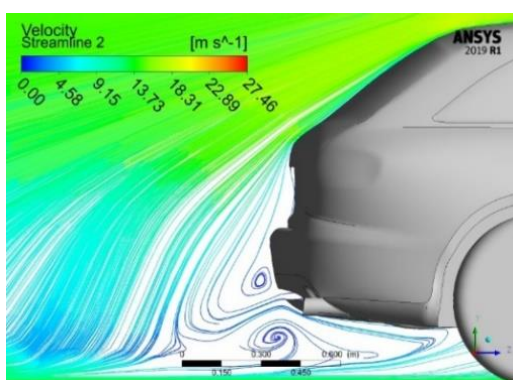
این سرعت‌ها، فشار جلوی خودرو، بالاتر از فشار در سرعت‌های کمتر است، در نتیجه، اختلاف فشار بیشتری بر خودرو متحمل می‌گردد. به همین دلیل در صورت وجود اگزوز با افزایش سرعت، نیروی آیرودینامیکی قوی‌تری بر بدنه وارد می‌شود و ضریب پسا بزرگتر خواهد شد.

### ۳-۶- اثر زاویه‌ی دهانه‌ی لوله‌ی اگزوز

زاویه‌ی دهانه‌ی خروجی اگزوز، معمولاً به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که دهانه‌ی انتهایی به‌صورت کاملاً افقی یا افقی رو به پایین باشد؛ زیرا جهت انتشار گازهای خروجی می‌تواند تأثیر محسوسی در کاهش پسا داشته باشد؛ همچنین از لحاظ بهبود شرایط آیرودینامیکی، انتخاب شکل مقطع خروجی بهتر است به‌صورت دایره‌ای باشد [۲۱]. قبل از مطالعه‌ی تغییرات مؤلفه‌ی زاویه‌ی انتشار گازها نسبت به صفحه‌ی موازی با زمین، لازم است محل ایجاد ناحیه‌ی ویک، در مدل خودروی بدون اثر گازهای خروجی از اگزوز، مشخص شود؛ زیرا پیش‌تر بیان شد، خروج گازها در به عقب انداختن ناحیه‌ی دنباله، در این ناحیه می‌تواند تأثیرگذار باشد. برای این منظور از نمودار توزیع خط جریان در سرعت ۱۵/۱۲۶ متر بر ثانیه استفاده شد. مطابق با شکل ۱۴، دو گردابه‌ی بزرگ در عقب خودرو و در محدوده‌ی خروجی اگزوز تشکیل شده‌است که گردابه‌ی بالایی و پایینی به‌ترتیب به‌دلیل جدایش جریان از سقف و کف خودرو هستند. در ادامه‌ی اثر زاویه‌دار شدن انتشار گازهای خروجی، در تغییر وضعیت فعلی، بررسی خواهد شد.



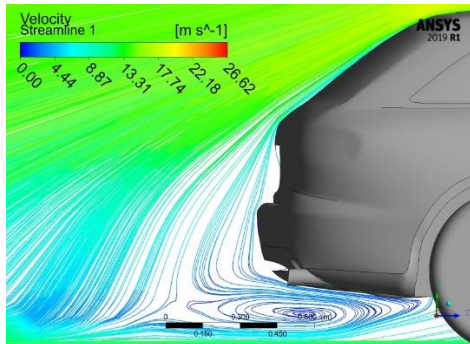
شکل ۱۳- توزیع سرعت در صفحه‌ی عبوری از قطر دهانه‌ی عبوری از اگزوز در سرعت جریان (الف) (سرعت خودرو) (الف) عبوری از اگزوز در سرعت جریان (ب) ۲۰ m/s، (ج) ۳۰ m/s و (د) ۴۰ m/s



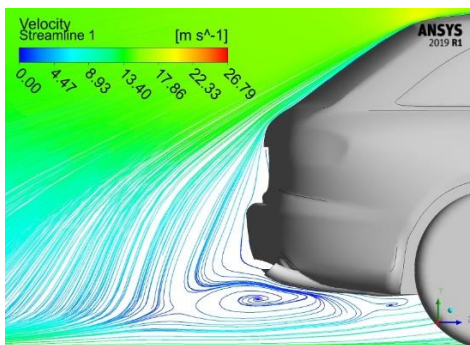
شکل ۱۴- نمودار خطوط جریان در اطراف بدنه با سرعت ۱۵/۱۲۶ متر بر ثانیه بدون در نظر گرفتن گازهای خروجی از اگزوز در صفحه‌ی میانی

بررسی توزیع سرعت در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت به تدریج، گردابه‌ی میانی کاملاً از بین رفته است. و حتی گردابه‌ی نسبتاً بزرگ زیر بدنه، از سرعت ۳۰ متر بر ثانیه به بعد که در شکل ۱۳-ج وجود دارد؛ توسط تزریق گازهای دارای انرژی جنبشی بیشتر، تضعیف شده‌است. اما به مرور در سرعت‌های بالاتر مطابق شکل ۱۳-ج و ۱۳-د، گردابه بالایی در لبه‌ی انتهایی سقف، تقویت شده و با تلف کردن انرژی باعث کاهش فشار در این منطقه شده‌است. از طرفی چون در

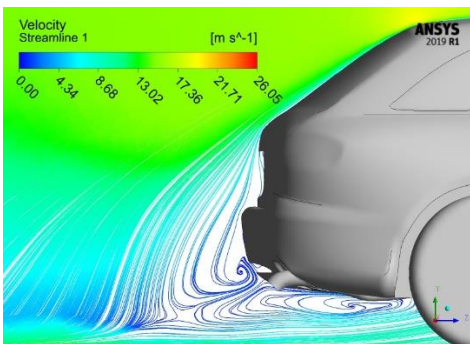
خودرو قرار دارد؛ اما، در زاویه (-۴۵) درجه، جریان متلاطم، به دلیل تغییر زاویه‌ی خروج گازها به سمت پایین، فرصت ورود به پشت خودرو و تشکیل گردابه‌ای دیگر را در آنجا داشته است. همین موضوع سبب افزایش یافتن % ۲/۳۶ درصدی ضریب پسا در زاویه (-۴۵) نسبت به زاویه‌ی (+۴۵) شده است.



شکل ۱۶- نمودار خطوط جریان در اطراف بدنه با سرعت ۱۵/۱۲۶ متر بر ثانیه در زاویه‌ی صفر خروجی آگزوز

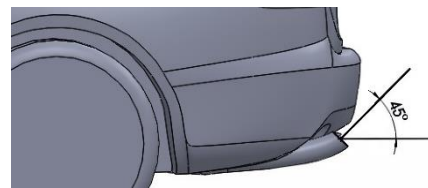


شکل ۱۷- نمودار خطوط جریان در اطراف بدنه با سرعت ۱۵/۱۲۶ متر بر ثانیه در زاویه‌ی (+۴۵) خروجی آگزوز



شکل ۱۸- نمودار خطوط جریان در اطراف بدنه با سرعت ۱۵/۱۲۶ متر بر ثانیه در زاویه (-۴۵) درجه خروجی آگزوز

بنابراین با همان شرایط مرزی بخش‌های قبل و در سرعت ۱۵/۱۲۶ متر بر ثانیه، در گام‌های ۱۵ درجه‌ای، اثر زاویه‌دار شدن دهانه‌ی گازهای خروجی از آگزوز، بین زاویه‌ی -۴۵ تا +۴۵ در محیط نرم‌افزار فلونت نت شبیه‌سازی شد. در شکل ۱۵، نشان داده شده است که لوله‌ی آگزوز خودروی آنودی، ۴۵ درجه به طرف بالا خم شده است که نمونه‌ای از مدل‌های مورد تحلیل در این بخش است.



شکل ۱۵- خودرو آنودی به همراه آگزوز با زاویه +۴۵ درجه

جدول ۴- ضریب پسای خودروی نمونه‌ی دارای آگزوز در

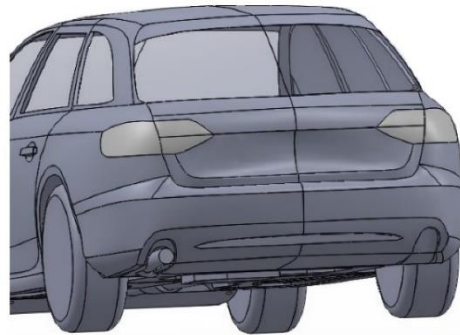
زاویه‌های مختلف

زاویه‌ی آگزوز (بر حسب درجه)	ضریب پسای خودروی نمونه‌ی دارای آگزوز	درصد اختلاف با ضریب پسای خودرو در زاویه‌ی صفر
+۴۵	۰/۳۳۹	-۱/۴۵ %
+۳۰	۰/۳۳۹	-۱/۴۵ %
+۱۵	۰/۳۴۷	+۰/۸۷ %
۰	۰/۳۴۴	-
-۱۵	۰/۳۴۳	- ۰/۲۹ %
-۳۰	۰/۳۴۱	-۰/۸۷ %
-۴۵	۰/۳۴۷	-۰/۸۷ %

با مقایسه شکل ۱۴ و ۱۶، تفاوت خودرو با آگزوز و بدون آگزوز در نمودارهای خط جریان مشخص می‌شود؛ بطوری‌که خروج گازها از آگزوز، دو گردابه را به یک گردابه تبدیل کرده و آن را به زیر خودرو منتقل کرده است. در این صورت فشار ناحیه‌ی دنباله واقع در پشت خودرو افزایش خواهد یافت که منجر به کاهش ضریب پسا نیز شده است. اگرچه زاویه‌دار شدن لوله‌ی آگزوز نیز، تأثیر زیادی بر ضریب پسا نداشت، اما در زوایای مثبت (لوله‌ی آگزوز به سمت بالا)، کاهش یافتن ضریب پسا، بیشتر بود. این نکته در نمودارهای خط جریان شکل‌های ۱۷ و ۱۸ قابل توجیه است. به بیانی واضح‌تر، بطور مثال در زاویه‌ی (+۴۵) درجه به سمت بالا، ناحیه‌ی دنباله هنوز در زیر

## ۴-۶- خودرو با یک اگزوز در یک طرف

تا به حال برای خروج گازهای حاصل از احتراق موتور، از دو لوله و دو دهانه در طرفین خودرو برای مدل‌سازی استفاده شد. در این بخش قرار است، مطابق شکل ۱۹ یک لوله و یک دهانه برای خروج گازها در نظر گرفته شود و اثر آن در تغییرات ضریب پسا، مشابه بخش‌های قبل بررسی شود. تفاوت این شبیه‌سازی با بخش‌های قبلی، حل معادلات در کل دامنه، بجای نیم‌دامنه است؛ زیرا خروج گازها، مانند شکل ۱۹ تنها از یک طرف خودرو انجام می‌شود که نمی‌توان شرط مرزی تقارن را در آن اعمال کرد.

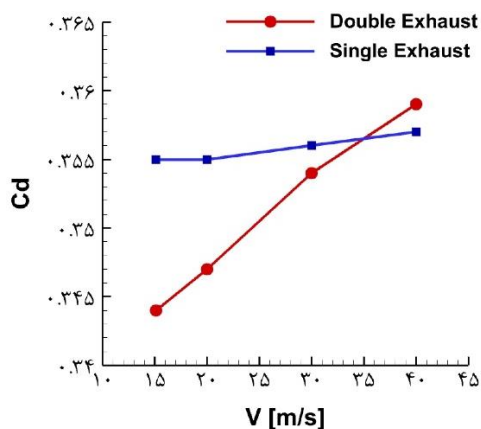


شکل ۱۹- خودروی آنودی با اگزوز تکی یک طرفه

## جدول ۵- ضریب پسا خودروی نمونه‌ی دارای یک

## اگزوز در جریان هوا با اعداد رینولدز مختلف

سرعت جریان (m/s)	دبی جرمی گازهای خروجی از یک اگزوز (gr/s)	ضریب پسا خودرو نمونه دارای اگزوز یک‌طرفه	درصد اختلاف با حالت اگزوز دوطرفه
۱۵/۱۲۶	۱۵/۲۹۲	۰/۳۵۵	+۳/۱۹ %
۲۰	۲۰/۲۲۰	۰/۳۵۵	+۲/۳۰ %
۳۰	۳۰/۳۲۰	۰/۳۵۶	+۰/۵۶ %
۴۰	۴۰/۴۴۰	۰/۳۵۷	-۰/۵۶ %



شکل ۲۰- نمودار مقایسه‌ی اختلاف ضریب پسا کل خودرو با وجود اگزوز دوطرفه و یک‌طرفه

با وجود این که در تحقیقات گذشته از جمله نتایج بیک و همکاران [۱۶]، افزایش سرعت در این مدل از خودروهای بدون اگزوز منجر به کاهش ضریب پسا شده بود، اما در این تحقیق، اضافه کردن اگزوز و شبیه‌سازی گازهای خروجی از آن، در هر دو حالت یک‌طرفه و دوطرفه، ضریب پسا را افزایش داده‌است. برای بیان واضح‌تر، از نمودارهای خط جریان خودروی آنودی با اگزوز تکی استفاده شد. در شکل‌های ۲۱-الف تا ۲۱-د به تدریج با افزایش سرعت، جریان خروجی از اگزوز، تحت تأثیر بیشتر آشفتگی‌های جریان در ناحیه‌ی دنباله قرار گرفته‌اند؛ زیرا حجم آشفتگی‌های جریان خروجی از اگزوز، در اثر ترکیب با گردابه‌های پشت خودرو بیشتر شده‌است. یادآوری می‌شود که بزرگ‌تر شدن ناحیه‌ی دنباله نیز با مصرف انرژی همراه خواهد بود که نتیجه‌ی آن کاهش فشار در پشت خودرو و افزایش ضریب پسا کل است.

ضرایب پسا حاصل از شبیه‌سازی این مدل، در ۴ سرعت مختلف در جدول ۵ قرار داده شده‌است. مطابق جدول ۵، تغییرات ضریب پسا کل، با افزایش سرعت خودرو و به تبع آن، افزایش دبی جرمی خروجی از اگزوز، برای خودرو با اگزوز تک، تقریباً ناچیز است. در شکل ۲۰ نیز می‌توان تفاوت وجود اگزوز تکی با دوتایی را در شرایط آیرودینامیکی خودرو، احساس کرد. در اگزوز دوتایی با افزایش سرعت، ضریب پسا، افزایش پیدا کرده بود؛ در صورتی که در خودرو با اگزوز تکی، تغییر مؤلفه‌ی سرعت در ضریب پسا اثر چندانی ندارد. نکته‌ی دیگری که از این نمودار برداشت می‌شود، کاهش یافتن اختلاف ضریب پسا، بین حالات اگزوز دوطرفه و یک‌طرفه، با افزایش سرعت است. این روند کاهش اختلاف، تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در سرعتی بین ۳۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه، اختلاف ضریب پسا آیرودینامیکی به صفر می‌رسد و از این مقدار بالاتر مطابق نمودار شکل ۲۰، اگزوز تکی در یک طرف خودرو، مناسب‌تر از اگزوز دوطرفه است.

### ۷- جمع‌بندی

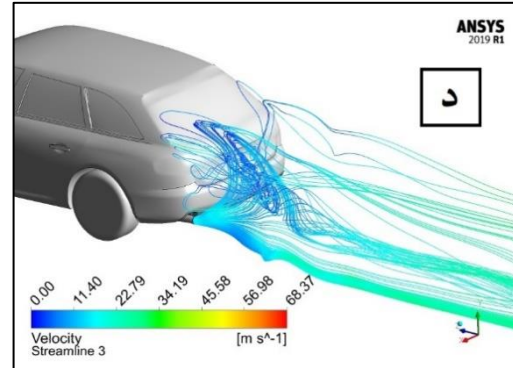
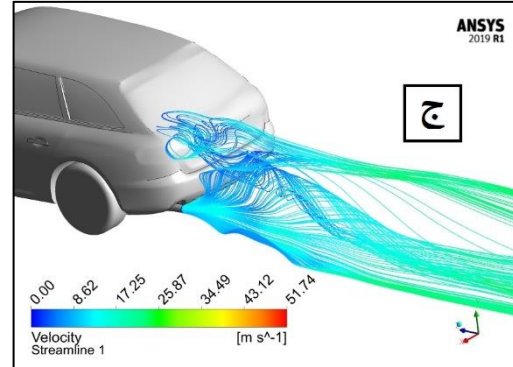
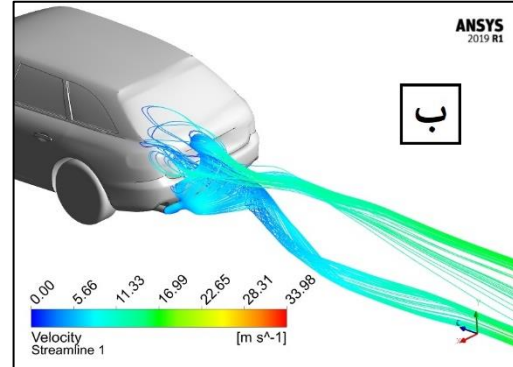
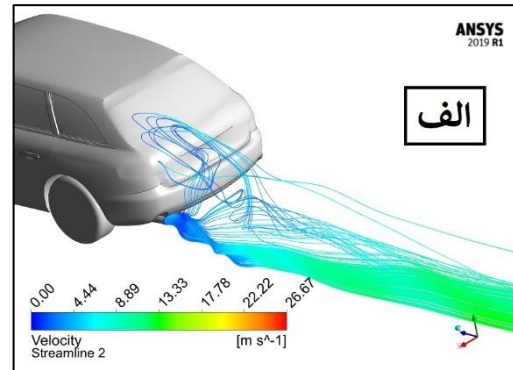
در این مقاله با روش دینامیک سیالات محاسباتی جریان با عدد رینولدز  $10^6 \times 4/87$ ، اطراف یک مدل سه بعدی از خودرو آئودی دارای مشخصات کف و لوله‌اگزوز مدل‌سازی شد. که به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، خودروی مدل استاندارد (DrivAer Estateback) که از لحاظ پیکربندی، مشابه خودروی آئودی نمونه است، با همان مدل آشفتگی و شرایط مرزی نیز شبیه‌سازی شد. پس از مقایسه‌ی نتایج عددی بدست آمده با داده‌های تجربی موجود، این نتیجه‌گیری شد که با ایجاد تعداد  $2/354$  میلیون شبکه، اطراف بدنه‌ی استاندارد، بیشترین دقت و کمترین هزینه برای شبیه‌سازی این مدل و خودروی نمونه حاصل می‌شود. در قدم بعد، برای مدل‌سازی اثر اگزوز، از معادله‌ی واکنش سوختن ایزواکتان در موتور و دبی هوای مورد نیاز برای سوختن استفاده شد که در نتیجه، دبی جرمی گازهای خروجی از اگزوز تابعی از سرعت خودرو بدست آمد. در ادامه‌ی تحلیل‌های عددی صورت گرفته، موارد مهم از نتایج بدست آمده بیان شده‌است:

۱- در عدد رینولدز  $10^6 \times 4/87$  (معادل سرعت  $m/s$   $15/126$ )، با وجود اثر گازهای خروجی از اگزوز، ضریب پسا  $1/15$  درصد کاهش داشته است.

۲- گازهای خروجی از اگزوز برخی از گردابه‌های کوچک را در نزدیکی خروجی لوله، تضعیف می‌کنند؛ اما در مجموع باعث حجیم‌تر شدن منطقه‌ی دنباله می‌شوند.

۳- در سرعت‌های بالا (حدوداً بالاتر از  $20$  متر بر ثانیه)، برخلاف سرعت‌های پایین‌تر، وجود اگزوز برای بهبود وضعیت آیرودینامیکی مفید نیست، به‌طوری که افزایش سرعت خودرو منجر به افزایش ضریب پسا می‌شود؛ زیرا رشد قابل توجه ناحیه‌ی دو تکه موجود از گردابه‌ها و جریان‌های برگشتی در نمودارهای توزیع سرعت، نشان‌دهنده‌ی افزایش اختلاف فشار در جلو و عقب خودرو و در پی آن افزایش نیروی پسا خواهد بود.

۴- زوایه‌دار کردن لوله‌ی اگزوز به بالا یا پایین تفاوت زیادی در ضریب پسا با حالت افقی ایجاد نکرد؛ اما در زوایای مثبت (در جهت بالا) منجر به عقب‌افتادن گردابه‌ی حاصل از جدایش جریان سقف و ادغام آن با گردابه‌ی حاصل از جدایش جریان از کف خودرو شد. اگرچه گردابه‌ی ترکیبی بزرگتر شد، اما در محلی زیر اگزوزها گیر افتاد که در کاهش فشار پشت خودرو



شکل ۲۱- نمودار ورود خط جریان خروجی از اگزوز به ناحیه‌ی دنباله در سرعت الف)  $15/126$  ب)  $20$  ج)  $30$  د)  $40$  متر بر ثانیه

- [9] Heft A I, Indinger T, Adams N A (2012) Introduction of a new realistic generic car model for aerodynamic investigations. SAE Technical Paper (2012-01-0168).
- [10] Hucho W, Sovran G (1993) Aerodynamics of road vehicles. Annual review of fluid mechanics 25(1): 485-537.
- [11] Heft A I, Indinger T, Adams N A (2012) Experimental and numerical investigation of the DrivAer model. in Fluids Engineering Division Summer Meeting, American Society of Mechanical Engineers 44755: 41-51.
- [۱۲] روحی ا (۱۳۹۸) دینامیک گازها. انتشارات دانشگاه فردوسی، مشهد چاپ اول: شماره ۷۲۹، ۱۵-۳۱.
- [13] Zaareer M (2022) Aerodynamics and aeroacoustics optimization of vehicle's side mirror base and exhaust pipe.
- [14] Caton J, Heywood J (1981) An experimental and analytical study of heat transfer in an engine exhaust port. Int. J. Heat Mass Trans. 24(4): 581-595.
- [15] Bauer W D, Wenisch J, and Heywood J B (1998) Averaged and time-resolved heat transfer of steady and pulsating entry flow in intake manifold of a spark-ignition engine. Int. J. Heat Fluid Flow 19(1): 1-9.
- [16] Baek S W, Lee S W (2020) Aerodynamic drag reduction on a realistic vehicle using continuous blowing. Microsystem technologies, 26(1): 11-23.
- [17] Blazek J (2015) Computational fluid dynamics: principles and applications. Butterworth-Heinemann.
- [18] Zhang C, Bounds C P, Foster L, Uddin M (2019) Turbulence modeling effects on the CFD predictions of flow over a detailed full-scale sedan vehicle. Fluids, 4(3): 148.
- [19] Kim H H, Rakibuzzaman M, Kim K, Suh S H (2019) Flow and fast fourier transform analyses for tip clearance effect in an operating Kaplan turbine. Energies, 12(2): 264.
- [20] Katz J (2016) Automotive aerodynamics. John Wiley & Sons.
- [21] Pavia G, Passmore M, Sardu C (2018). Evolution of the bi-stable wake of a square-back automotive shape. Experiments in Fluids, 59(1): 20.

تأثیر کمتری گذاشت و ضریب پسا را نسبت به حالت افقی اندکی کاهش داد.

۵- برخلاف آگزوز دوتایی (دو طرفه) که وجود آن، در سرعت‌های پایین مانند ۱۵/۱۲۶ متر بر ثانیه، منجر به کاهش حدود ۱ درصدی ضریب پسا شده بود، آگزوز تکی (یک طرفه) در این سرعت، ضریب پسا را ۳/۱۹٪ افزایش داد. اما در سرعت‌های بالاتر (جاده‌ای) نرخ افزایش ضریب پسا در آگزوزهای دوتایی بیشتر از تکی شد تا جایی که حتی در سرعت ۴۰ متر بر ثانیه در حرکت، ضریب پسای خودرو با آگزوز دوطرفه بیشتر از یک طرفه شد.

## مراجع

- [۱] بهروان ر، میراعلم م (۱۳۹۷) بررسی عددی اثرات ترکیبی اسپویلر عقب و انحنای سطوح جانبی بر نیروی برآ و پسای وارد بر خودروی سدان. ماهنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس (۲) ۱۸: ۳۱۳-۳۰۵.
- [2] Hassan S R, Islam T, Ali M, Islam M Q (2014) Numerical study on aerodynamic drag reduction of racing cars. Procedia Engineering 90: 308-313.
- [3] Huang H (2019) a new drag reduction method based on exhaust emission trailing vortex control. Int. J. Mechatron. Appl. Mech. (6): 17-28.
- [4] Zaareer M, Mourad A, Darabseh T, Khan S, Elgendi M (2023) Impact of a vehicle exhaust pipe position on the lift and drag coefficients: 2D and 3d simulations. Int. J. Thermofluids 18: 100321.
- [5] Soares R F (2015) Drag of road cars: cost-effective CFD setup. proposal of an aerodynamic concept and case studies.
- [۶] دهقانی سانجی م (۱۳۹۳) شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Fluent 6.3. انتشارات ناقوس، تهران. چاپ چهارم: ۹۷-۳۲۵.
- [7] Menter F (1993) Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. 23rd edn. fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference, 2906.
- [8] Varney M, Passmore M, Gaylard A (2017) The effect of passive base ventilation on the aerodynamic drag of a generic SUV vehicle, SAE Int. J. Passeng 10: 345-357.