



# بررسی عددی اثرات ترکیبی اسپویلر عقب و انحنای سطوح جانبی بر نیروی برآ و پسی وارد بر خودرو سدان

روح الله بهروان<sup>1</sup>، میراعلم مهدی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 16785-136، m.mahdi@srttu.edu

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 آبان 1396

پذیرش: 09 دی 1396

ارائه در سایت: 12 بهمن 1396

کلید واژگان:

آیرودینامیک

پسا

برآ

اسپویلر

بدنه احمد

## چکیده

بررسی و تحلیل آیرودینامیکی خودرو با توجه به پیشرفت سریع صنعت خودروسازی در عصر حاضر، یکی از پارامترهای مهم در طراحی برای حضور در صحنه رقابت‌های این صنعت می‌باشد. نیروهای آیرودینامیکی بزرگترین مانع برای رسیدن به سرعت‌های بالا در هر وسیله نقلیه هستند. از این رو می‌توان آن‌ها را مهم‌ترین فاکتورهای طراحی آیرودینامیکی وسایل نقلیه به حساب آورد. تشکیل گردابه و در نتیجه افت فشار در قسمت عقب خودرو می‌تواند باعث افزایش نیروهای مقاوم آیرودینامیکی شود. این مقاله به بررسی چگونگی کاهش حجم گردابه‌ها در قسمت عقب یک مدل خودرو سدان با ایجاد تغییرات در هندسه آن پرداخته است. برای این منظور ابتدا با شبیه‌سازی سه بعدی جریان تراکم ناپذیر اطراف مدل احمد (که نتایج آزمایشگاهی برای آن موجود است) به روش دینامیک سیالات محاسباتی، مدل آشفتگی و نحوه شبکه‌بندی مناسب انتخاب شده است. سپس مقدار ضرایب آیرودینامیکی مربوط به یک مدل خودرو با اضافه کردن اسپویلر و ایجاد انحناء در سطوح جانبی آن بررسی شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شبکه لایه مرزی در اطراف مدل و تحلیل جریان به صورت ناپایا با استفاده از مدل آشفتگی DES-SSTK- $\omega$ ، حجم گردابه‌ی تشکیل شده در عقب خودرو را نسبت به مدل K- $\omega$ -SST دقیق‌تر شبیه‌سازی می‌کند. همچنین استفاده ترکیبی از اسپویلر و انحنای سطوح جانبی بخاطر کاهش 26.3 درصدی نیروی پسی عقب و کاهش مقدار نیروی برآ تا 5.2 درصد نسبت به مدل خودرو ساده باعث کاهش مصرف سوخت و افزایش پایداری خودرو می‌شود.

## Numerical simulation of the combined effects of the rear spoiler and the curvature of the lateral surfaces on the lift and drag forces on the sedan type vehicle

Rohallah Behravan<sup>1</sup>, Miralam Mahdi<sup>2\*</sup>

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16785-136, Tehran, Iran, m.mahdi@srttu.edu

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 10 November 2017

Accepted 30 December 2017

Available Online 01 February 2018

### Keywords:

Aerodynamics

Drag

Lift

Spoiler

Ahmed body

## ABSTRACT

In recent years, Aerodynamic analysis of automobiles became one of the most important parameters which affect the power of the companies to be present in world markets. Therefore, they can be considered as one of the most important factors in aerodynamic design of vehicles. The formation of the vortex and consequently the pressure drop in the rear of the vehicle can increase the aerodynamic forces. This paper investigates the methods for reduction of the vortices volume in the rear part of a sedan type vehicle by changing in geometry of the vehicles. For this purpose, firstly in order to choosing the appropriate turbulence model and 3D simulation of incompressible flow around the Ahmed model (which its experimental results are available) was simulated using computational fluid dynamics. Then, the values of aerodynamic coefficients of a car model were studied by adding spoiler and creating curvature at its lateral surfaces. The results of this study indicated that the vortex volume formed at the rear of the vehicle can be simulated more precisely by using the Boundary-layer mesh around the model and analyzing the flow using the DES-SSTK- $\omega$  turbulence model Relative to the model K- $\omega$ -SST. Additionally, simultaneously use of the spoiler and the curvature of the lateral surfaces reduce fuel consumption and increase the stability of the vehicle due to a 26.3 % reduction in rear drag coefficient and a 5.2 % reduction in the lift coefficient, with respect to the simple car model.

## 1- مقدمه

گسترش یافته است. طراحی بدنه خودرو از نظر آیرودینامیکی و بهبود مستمر آن نیز همواره مورد توجه پژوهشگران و خودروسازان بوده و در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. علت این توجه تأثیر بسزای یک

آیرودینامیک علمی است که عبور جریان هوا را از اطراف اجسام بررسی می‌کند. روش‌های تحقیق در این علم در سه شاخه تئوری، عددی و تجربی

## Please cite this article using:

R. Behravan, M. Mahdi, Numerical simulation of the combined effects of the rear spoiler and the curvature of the lateral surfaces on the lift and drag forces on the sedan type vehicle, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 02, pp. 305-313, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

گرفته حول بدنه را در زوایای مختلف بررسی کردند.

دویل و همکاران [4] به مطالعه آزمایشگاهی توزیع فشار روی سطوح مدل‌هایی از خودرو پرداختند. آن‌ها از مایع مخصوصی استفاده نمودند که در برابر فشارهای مختلف رنگ‌های مختلفی منعکس می‌کرد. با مالیدن این مایع بر روی سطح موردنظر که از مواد پلیمری خاصی ساخته شده بود، طیف پیوسته‌ای از فشار در نقاط مختلف سطح به دست آمد. این آزمایش که در تونل باد بر روی یک مدل ون شرکت فورد تولید 1995 با مقیاس 4/10 انجام شد، نشان داد که با این روش می‌توان توزیع فشار روی سطح را از فشار 766 Pa تا 2872 Pa مشخص کرد.

در سال 2003 لینهارت و همکاران [5] در یک آزمایش بدنه احمد را با جزئیات بیشتر در دو زاویه انتهایی 25 و 35 درجه در سرعت 40 m/s با دو دستگاه بادسنج ال دی<sup>4</sup> بررسی کردند. آن‌ها با این آزمایش نشان دادند که شکل گردابه و محل الحاق جریان در پشت مدل با زوایای انتهایی مختلف مدل، متفاوت است.

ماتیس رومس و همکاران [6] در سال 2008 در یک بررسی به کمک روش‌های عددی با کنترل جدایش بر روی قسمت عقب مدل احمد در حالت‌های مختلف، کاهش پسا را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با کنترل جریان در قسمت عقب یک خودرو تا 17% نیروی پسا کاهش می‌یابد که این معادل کم شدن مصرف سوخت و کاهش آلایندگی و هزینه‌های حمل و نقل می‌باشد.

میترا و همکاران [7] با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی، اثرات افزودن قطعاتی همچون اسپویلر جلو و عقب را بر روی یک مدل ساده شده از خودرو سدان بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که افزودن اسپویلر عقب در افزایش پایداری آیرودینامیکی خودرو تاثیر مثبت دارد. سوناندا و همکاران [8] در سال 2013 با بررسی عددی نشان دادند قسمت عمده نیروی رو به پایین از اختلاف فشاری که بین سطح بالایی و پایینی اسپویلر اعمال می‌شود به وجود می‌آید.

آقای تسای و همکاران [9] با استفاده از روش‌های عددی، به بررسی پایداری یک خودرو و نویز<sup>5</sup> آیرودینامیکی حاصل شده از اسپویلر عقب پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نصب اسپویلر ضریب برآ را کاهش می‌دهد که باعث می‌شود شرایط بهتری برای رانندگی با سرعت بالا ایجاد شود و ثبات عمودی رانندگی را بهبود بخشد.

آقای سمیر کامات و همکاران [10] در سال 2014 با هدف بهبود عملکرد آیرودینامیکی خودروهای هاچ بک، فرم‌های مختلفی از اسپویلرها را در عقب مدلی از خودرو نصب کردند و متوجه شدند که با نصب اسپویلر در بیشتر موارد ضریب پسا کاهش قابل توجهی دارد. در همین سال آقایان شرما و رام بنسل [11] با کاربرد همزمان اسپویلر و تولید کننده‌های گردابه روی سقف خودرو ساده به دنبال فهم تأثیر آن‌ها روی نیروهای آیرودینامیکی عقب بودند که 4.35% کاهش را در مقدار ضریب پسا و 18.83% افزایش را در نیروی برای منفی مشاهده کردند.

احمدی و عباس‌علیزاده [12] با بررسی اثرات زاویه و ارتفاع اسپویلر در وضعیت آیرودینامیکی خودرو به یک مقدار بهینه از ارتفاع و زاویه برای اسپویلر عقب خودرو سمند رسیدند که توسط یک کنترل کننده سیستم بستگی به سرعت خودرو می‌بایست تنظیم شود.

در مورد انحنا و تورفتگی سطوح جانبی، مجید ولدخانی و فرهاد طالبی

طراحی آیرودینامیکی خوب در بازده و چگونگی عملکرد خودرو می‌باشد. در واقع هر موفقیتی که در طراحی آیرودینامیک بدنه 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 پارامترهای مهم در طراحی برای حضور در صحنه رقابت‌های این صنعت می‌باشد. آغاز حرکت در جهت بهینه‌سازی بدنه خودروها و کاهش مصرف سوخت آن‌ها، از سال 1975 در پی افزایش جهشی در مصرف سوخت خودروهای تولیدی سال‌های 1960 تا 1970 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 نقطه جدایش در قسمت انتهایی بدنه، نیروی پسا بسیار بالایی به وجود می‌آمد. تاکنون تحقیقات زیادی در جهت تغییر فرم عقب خودروهای سواری انجام شده و خیلی از آن‌ها هم به مرحله تولید رسیده است که نقطه مشترک خیلی از آن‌ها کاهش حداکثری میزان گردابه‌های تشکیل شده در پشت خودرو و کاهش نیروی پسا<sup>1</sup> در این قسمت و حفظ پایداری خودرو در سرعت‌های مختلف می‌باشد. یکی از این ایده‌ها نصب قطعه‌ای بنام اسپویلر در قسمت عقب خودرو است. وظیفه اصلی اسپویلرها کنترل هوای اطراف اتومبیل، خصوصاً عقب آن است. اسپویلر می‌تواند نیروی تولید شده در حرکت را که باعث خروج اتومبیل از مسیر خود می‌شود، خنثی کند. در حقیقت اسپویلر از ایجاد جریان هوای ناموزون در عقب اتومبیل جلوگیری کرده و سبب می‌شود تا اتومبیل در سرعت‌های بالا هم، در وضعیتی پایدار قرار بگیرد. این قطعه با نصب بر روی خودرو می‌تواند تاثیر خوبی بر روی وضعیت آیرودینامیکی خودرو داشته باشد که این تاثیرات به صورت عمده، افزایش نیروی رو به پایین<sup>2</sup> جهت تقویت تعادل و ثبات خودرو و همچنین کاهش نیروی پسا جهت کاهش مصرف سوخت است.

یکی دیگر از ایده‌هایی که می‌تواند بر میزان نیروهای آیرودینامیکی قسمت عقب خودرو موثر باشد، ایجاد انحنا یا تورفتگی روی بدنه جانبی خودرو است. که این کار باعث هدایت جریان هوا از طرفین برای تلاقی در نقطه‌ای نزدیکتر به عقب خودرو می‌شود تا حداقل امکان از منطقه کم فشار پشتی بکاهد.

برای اولین بار زاویه انحناى بحرانی قسمت عقب خودرو توسط جانسن و هوکو [1] در سال 1975 تعیین شد. در این زاویه‌ی بحرانی، ضریب پسا به مقدار بیشینه می‌رسد. در سال 1975 پروفیسور آلبرتو مورلی [2] طرحی برای یک بدنه ایده‌آل آیرودینامیک و قابل ساخت ارائه داد که ویژگی‌های اصلی این طرح تلاش در جهت دستیابی به نیروی بالا برنده<sup>3</sup> در حد صفر و نیروی پسا بسیار پایین بود، که در نتیجه این دو ویژگی، پایداری خودرو و همچنین کنترل بر توزیع نیروهای محوری افزایش می‌یافت.

سید احمد [3] در سال 1984 مدل دقیق و مرجعی ارائه نمود که تحلیلی در آیرودینامیک خودرو ایجاد کرد و موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران قرار گرفت. احمد و همکاران در پی ابداع یک بدنه، نوعی جریان عبوری از بدنه خودروها را بررسی کردند. بدنه احمد بیشتر با این هدف طراحی شد تا اثرات قسمت عقب خودروها بر روی نیروی پسا و ساختار جریان مطالعه شود. در بدنه احمد زاویه قسمت انتهایی بدنه متغیر بوده و آن‌ها جریان شکل

<sup>1</sup> Drag force

<sup>2</sup> Down force

<sup>3</sup> Lift force

<sup>4</sup> LDA

<sup>5</sup> Noise

مدل DES-SST همچنین فرمول زیر را برای حفاظت از لایه مرزی از محدودکننده دارد (آپشن تأخیری):

$$F_{DES} = \max\left(\frac{L_t}{C_{DES}\Delta_{max}}, 1\right) \quad (6)$$

در ازای  $F_{SST} = 0, F_1, F_2$  در این جا  $F_1$  و  $F_2$  عملگرهای ترکیبی از مدل SST بوده و به طور تناوبی عملگر محافظ DDES یا عملگر IDDES را می توان انتخاب نمود که DDES مسیر کوتاه تری است. باید توجه داشت که در اجرای DDES و IDDES مقدار  $f_d$  به صورت رابطه (8) می باشد. برای این که ناحیه RANS سریع به ناحیه LES نرسد تا منجر به تولید جواب های غیر فیزیکی شود، تابع  $f_d$  به عنوان مقیاس طولی به شکل زیر اضافه می شود.

$$\tilde{d} = d - f_d \max(0, d - C_{DES}\Delta) \quad (7)$$

$$f_d = 1 - \tanh([a r_d]^3) \quad (8)$$

$$r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\sqrt{U_{ij}U_{ij}}} \frac{1}{k^2 d^2} \quad (9)$$

در رابطه (9)،  $\nu_t$  لزجت گردابه ای سینماتیک،  $\nu$  لزجت مولکولی،  $U_{ij}$  گرادیان سرعت،  $k$  ثابت کارمن و  $d$  فاصله تا دیوار است. تابع تانژانت هایپربولیک در  $f_d$  طوری تنظیم شده است که نقطه شروع حالت LES درست بیرون لایه مرزی قرار می گیرد. در این تابع مقدار ضریب  $a$  از 8 تا 10 متغیر بوده و این تابع مقدار  $f_d = 0$  درون لایه مرزی آشفته و رشد تدریجی به سمت  $f_d = 1$  در لبه لایه مرزی را نتیجه می دهد. همچنین این تابع، تعویض به حالت LES را تا خارج لایه مرزی آشفته به تأخیر می اندازد، چون در روش جدید قصد بر آن است که ناحیه RANS سریع به ناحیه LES نرسد، لذا روش اصلاح شده، شبیه سازی تأخیری گردابه های جدا شده نام گرفته است.

### 3- اعتبارسنجی نتایج

برای شبیه سازی عددی جریان اطراف یک مدل، ابتدا لازم است اعتبارسنجی انجام شده و مدل آشفتگی و شرایط مرزی مناسب انتخاب شود. در این مقاله از مدل احمد همانند "شکل 1" برای اعتبارسنجی استفاده شده است. زاویه برشی که در این مقاله در نظر گرفته شده 25 درجه ( $\Phi = 25^\circ$ ) و سطح مقطع  $A=0.112 \text{ m}^2$  می باشد. برای میدان جریان اطراف مدل، مکعبی ایجاد شده تا بتوان محدوده جریان را مشخص کرد، اگر  $L$  طول خودرو باشد، طول مکعب  $9L$  بوده که  $3L$  آن در جلو خودرو و  $5L$  آن در پشت خودرو و عرض و ارتفاع مکعب نیز  $2L$  است. به دلیل تقارن در هندسه و جریان تنها نیمی از هندسه مدل سازی شده است. شبکه بندی انجام شده بر روی مدل به صورت پیوندی انتخاب شده است. در این نوع شبکه بندی ناحیه کنار بدنه به صورت لایه مرزی انجام شده و داخل میدان جریان که از بدنه فاصله دارد بی سازمان شبکه بندی شده است. فاصله اولین سلول تا بدنه  $0.005 \text{ mm}$  لحاظ شده تا شرط  $\gamma^+ < 1$  در شبیه سازی برقرار شود. تعداد لایه های مرزی 15 می باشد که با نرخ 1.2 رشد پیدا کرده اند. برای حل معادلات حاکم بر جریان از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل<sup>2</sup> استفاده شده است. برای مجزاسازی فضایی روش مرتبه دوم بالادست استفاده شده است. جریان حول خودرو تراکم ناپذیر، لزج، مغشوش و کاملاً سه بعدی در نظر گرفته شده است. سیال انتخابی هوا بوده که خواص فیزیکی آن شامل چگالی  $1.22 \text{ kg/m}^3$  و سرعت سیال  $40 \text{ m/s}$  و لزجت  $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$  می باشد.

شرایط مرزی شامل سرعت ورودی ( $40 \text{ m/s}$ ) با شدت اغتشاش (3%)،

[13] در مقاله ای با عنوان ایده ای جهت بهبود آیرودینامیک خودرو و تحلیل آن با نرم افزار انسیس فلونت<sup>1</sup>، با اعمال تغییراتی بر روی فرم درها و گلگیر عقب اتومبیل سعی کردند ضریب پسا را کاهش دهند. که به نتیجه قابل توجه کاهش ضریب پسا 33% مدل اصلی نسبت به مدل ساده شده آن رسیدند ولی ضریب برآی منفی 21% کاهش داشت.

این مقاله به بررسی جریان هایی با رینولدز  $2.73 \times 10^6$  و چگونگی کاهش گردابه ها در قسمت عقب یک مدل خودرو می پردازد. تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گرفته است که بیشترین آن ها در مورد تأثیر زوایای انحناى بحرانی عقب، نصب قطعانی چون اسپویلر، اسپلیتر جلو و عقب و دیفیوزرها و تولیدکننده های گردابه روی سقف خودرو بر نیروهای آیرودینامیکی عقب می باشد اما کمتر به بحث نقش تغییر فرم سطوح جانبی یعنی ایجاد انحنا و تورفتگی در این سطوح بر نیروهای آیرودینامیکی خودرو پرداخته اند. در این مقاله به تأثیر کاربرد همزمان اسپویلر عقب و انحنا و تورفتگی سطوح جانبی خودرو بر میزان تولید نیروهای آیرودینامیکی عقب خودرو پرداخته شده است.

### 2- معادلات حاکم

به جز روش شبیه سازی مستقیم عددی، به طور کلی دو دسته روش LES و RANS برای شبیه سازی جریان آشفته وجود دارند که تفاوت آن ها در نوع میانگین گیری از معادله ناویر استوکس است. در دسته روش های LES از میانگین گیری مکانی با استفاده از فیلتر و در دسته روش های RANS از میانگین گیری زمانی استفاده می شود.

روش DES یک روش ترکیبی LES-RANS است که به طور خودکار در نزدیکی مرز تبدیل به روش RANS شده و در نواحی دورتر شبیه مدل LES یک معادله ای عمل می کند. معادله پیوستگی و ناویر استوکس میانگین گیری شده در حالتی که سیال تراکم ناپذیر باشد، به صورت زیر است [12]:

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

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

در روابط فوق  $u_i$  بیانگر سرعت،  $P$  فشار،  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال و  $\nu_T$  لزجت توربولانسی می باشد.

به منظور تأکید بر جدا کردن عملگرهای RANS و LES بین جریان های پیوسته و جدایشی، اولین بار مدل های RANS که فاصله عمودی از دیواره ( $d_w$ ) را در خود جای می دهند، برای فرمول بندی DES و به عنوان طول مقیاس در نظر گرفته شدند.

ترم پراکندگی در معادله انرژی جنبشی جریان آشفته ( $K$ ) در این مدل به صورت زیر می باشد:

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega F_{DES} \quad (3)$$

در این حالت  $F_{DES}$  از این رابطه به دست می آید:

$$F_{DES} = \max\left(\frac{L_t}{C_{DES}\Delta_{max}}, 1\right) \quad (4)$$

در این جا که  $C_{DES}$  ثابت کالیبراسیون بوده و مقدار آن 0.61 می باشد و  $\Delta_{max}$  بیشترین مقدار محدوده ( $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ ) می باشد. مقیاس طول آشفتگی پارامتری است که این روش را نسبت به روش RANS مشخص می کند.

$$L_t = \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega} \quad (5)$$

<sup>1</sup> Simple

<sup>2</sup> Ansys fluent

جدول 3 مقادیر ضریب پسا ( $cd$ ) در قسمت‌های مختلف مدل احمد به روش DES با شیب  $\Phi = 25^0$

مدل آشفتگی	لزوج	جلو	عقب	شیب	مجموع	خطا
کا امگا-اس اس تی	0.045	0.026	0.129	0.094	0.294	1.3
کا اپسیلون-استاندارد	0.048	0.024	0.121	0.097	0.290	2.6
اسپالارت	0.049	0.022	0.074	0.137	0.282	5.3
تجربی [3]	0.057	0.019	0.077	0.145	0.298	-

همان‌طورکه از جداول بالا مشخص است، در روش RANS مجموع مقادیر ضریب پسا در مدل آشفتگی K- $\omega$ -SST و در روش شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده DES، این مقدار در مدل DES-SST-K- $\omega$  به مجموع مقادیر ضریب پسا در روش تجربی نزدیکتر می‌باشند. بررسی دقیق‌تر نتایج موجود در جداول 2 و 3 نشان می‌دهد که مقادیر مجموع ضرایب پسا در روش شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده DES، نسبت به این مقادیر در روش RANS به نتایج تجربی نزدیکتر است و استفاده از روش DES بخاطر داشتن نتایج دقیق‌تر، بهتر است.

"شکل 2 و 3" توزیع سرعت در پشت مدل احمد را نشان می‌دهد. مقایسه توزیع سرعت دو مدل آشفتگی نشان‌دهنده اختلاف بین گردابه جریان تشکیل شده در پشت مدل است. "شکل 4" پروفیل سرعت را در قسمت انتهایی مدل احمد برای مدل آشفتگی K- $\omega$ -SST در روش RANS و روش DES SST-K- $\omega$  نشان می‌دهد. در قسمت زیر خودرو بین بدنه و زمین، پروفیل سرعت برای هر سه حالت بر روی هم منطبق می‌باشد. قسمت دور از بدنه که اثرات بدنه کم است اختلاف بین نتایج نیز کم می‌باشد. در ناحیه‌ای که قسمت افقی و عمودی خودرو با یک شیب به هم متصل می‌شوند به دلیل گرادپان فشار بالا و احتمال جدایش لایه مرزی اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی نمایان می‌شود. با دور شدن از انتهای خودرو دوباره اختلاف کاهش می‌یابد. بنابراین بیشترین تأثیر انتخاب مدل آشفتگی مناسب در پیش‌بینی درست جدایش لایه مرزی و اندازه گردابه انتهای خودرو می‌باشد که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مقدار نیروی پسای خودرو دارد.

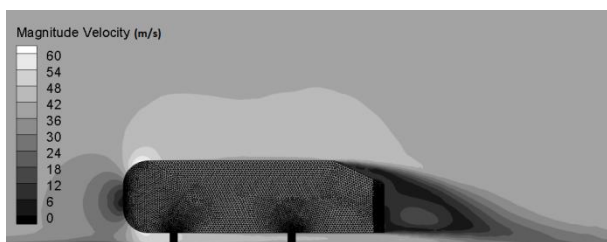


Fig. 2 distribution of velocity with K- $\omega$ -SST model

شکل 2 توزیع سرعت با مدل K- $\omega$ -SST

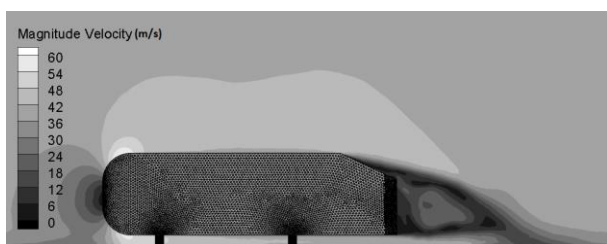


Fig. 3 distribution of velocity with DES-SST-K- $\omega$  model

شکل 3 توزیع سرعت با مدل DES-SST-K- $\omega$

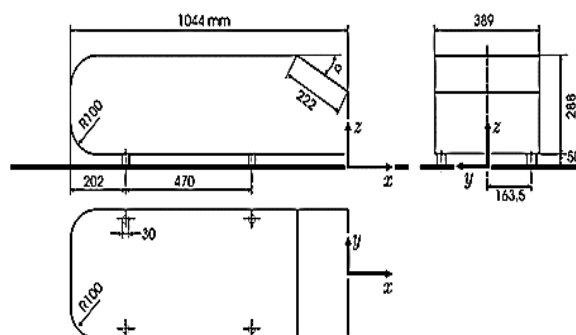


Fig.1 Ahmed body

شکل 1 بدنه احمد [3]

فشار خروجی (0)، بدنه احمد و زمین به صورت دیواره با شرط عدم لغزش و صفحه میانی را شرط مرزی تقارن<sup>1</sup> لحاظ شده است برای شبیه‌سازی نرم‌افزار انسیس فلونت نت نسخه 15 انتخاب شده است.

جهت نشان دادن استقلال نتایج حل از اندازه شبکه، نتایج حل در مدل سه بعدی احمد برای سه شبکه درشت، متوسط و ریز ارزیابی شد که مقدار ضریب پسا برای این سه شبکه در یک مدل آشفتگی مثل DES-SST-K- $\omega$  با 2000 تکرار و با گام زمانی 0.0095 به صورت جدول 1 به دست آمد و مشاهده شد که در مدل سه بعدی با افزایش تعداد نقاط شبکه تا نزدیک دو برابر، میزان خطا در حدود 2 تا 5 درصد می‌باشد که عملاً تغییر محسوسی در نتایج حاصل نمی‌گردد.

در نهایت به دلیل نزدیک‌تر بودن ضریب پسای به دست آمده در شبیه‌سازی با شبکه بندی ریز نسبت به ضریب پسای تجربی، از این نوع شبکه بندی برای به دست آوردن نتایج مراحل بعد استفاده شد.

در مرحله بعد مقادیر ضریب پسا در قسمت‌های مختلف مدل احمد یکبار به کمک مدل‌های مختلف آشفتگی در روش RANS بصورت پایا و بار دیگر به کمک مدل‌های مختلف آشفتگی در روش شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده DES<sup>2</sup> بصورت ناپایا، محاسبه و در دو جدول 2 و 3 درج شده و با هم و همچنین با مقادیر بدست آمده در روش تجربی [3] مقایسه شدند.

جدول 1 - بررسی استقلال از شبکه

مدل آشفتگی	نوع شبکه	تعداد شبکه	ضریب پسا	خطا (درصد)	ضریب پسای تجربی
دی ای اس- درشت	درشت	877300	0.279	6.3	
اس اس تی- متوسط	متوسط	1077600	0.285	4.3	0.298
کا امگا- ریز	ریز	1560000	0.294	1.3	

جدول 2 مقادیر ضریب پسا ( $cd$ ) در قسمت‌های مختلف مدل احمد به روش RANS با شیب  $\Phi = 25^0$

مدل آشفتگی	لزوج	جلو	عقب	شیب	مجموع	خطا
کا امگا-اس اس تی	0.045	0.025	0.098	0.110	0.278	6.7
کا اپسیلون-استاندارد	0.041	0.023	0.079	0.130	0.273	8.3
اسپالارت	0.051	0.024	0.096	0.152	0.323	8.3
تجربی [3]	0.057	0.019	0.077	0.145	0.298	-

<sup>2</sup> Symmetry

<sup>3</sup> Detached Eddy Simulation

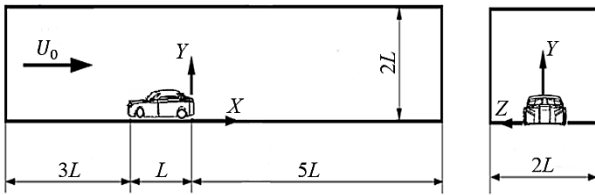


Fig. 6 Draw a domain around the model to detect the flow range

شکل 6 رسم مکعب اطراف مدل برای تشخیص محدوده جریان

با توجه به پیچیدگی هندسه موجود از شبکه پیوندی برای شبکه بندی میدان حل استفاده شده است. در این نوع شبکه بندی ناحیه کنار بدنه از شبکه لایه مرزی و ناحیه دور از بدنه به صورت بی-سازمان شبکه بندی شده است. فاصله اولین سلول تا بدنه  $0.005\text{mm}$  لحاظ شده تا شرط  $y^+ < 1$  در شبیه سازی برقرار شود. تعداد لایه های مرزی 10 می باشد که با نرخ 1.2 رشد پیدا کرده اند. مشابه حالت قبل برای حل معادلات حاکم بر جریان از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل<sup>1</sup> استفاده شده است. برای مجزاسازی فضایی روش مرتبه دوم بالادست استفاده شده است. جریان حول خودرو تراکم ناپذیر، لزج، مغشوش و کاملاً سه بعدی در نظر گرفته شده است. سیال انتخالی هوا بوده که خواص فیزیکی آن شامل چگالی  $1.22\text{ kg/m}^3$  و سرعت سیال  $40\text{ m/s}$  و لزجت  $1.7894\text{ kg/ms } e^{-5}$  می باشد.

شرایط مرزی شامل سرعت ورودی ( $40\text{m/s}$ )، فشار خروجی (0)، بدنه احمید و شرایط مرزی سطوح جانبی و سطح بالای دامنه (دور از مرز) و شدت اغتشاش (3%) است.

"شکل 7" نمونه ای از شبکه پیوندی ایجاد شده در اطراف مدل را نشان می دهد. برای بررسی تأثیر اسپویلر روی این مدل خودرو، مدلی از اسپویلر با مشخصات "شکل 8" در نرم افزار سالیدورک طراحی شده و روی مدل ساده خودرو نصب شده است. "شکل 9" شبکه ایجاد شده در اطراف مدل همراه با اسپویلر را نشان می دهد.

برای بررسی تأثیر انحناى سطوح جانبی روی مقدار ضرایب آیرودینامیکی، روی سطوح جانبی خودرو همانند "شکل 10" انحناء ایجاد شده است. ایده مورد نظر به این صورت است که با ایجاد انحناهایی بر روی سطح درها و گلگیر عقب، عرض خودرو از  $1.99\text{ m}$  در قسمت پایین چرخ جلو

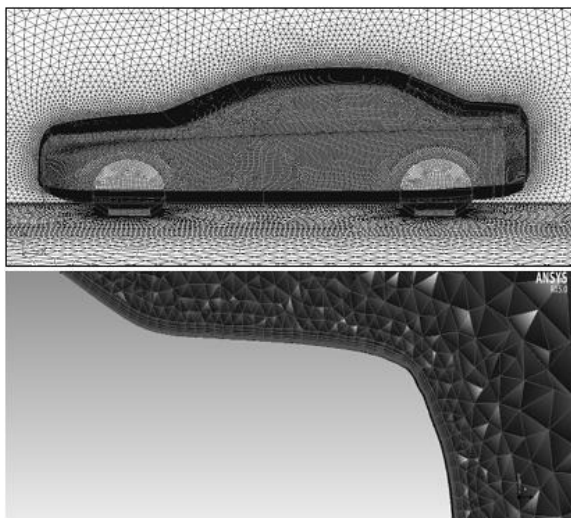


Fig.7 Mesh with dense layers

شکل 7 شبکه بندی با لایه های متراکم

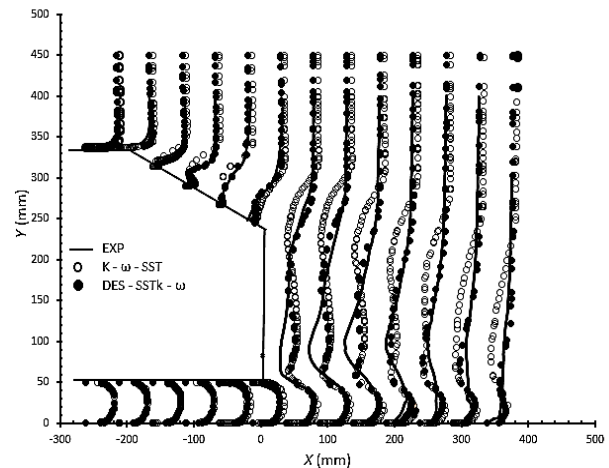


Fig.4 Comparison of the numerical and experimental velocity of the rear section of Ahmed model with slope  $\Phi = 25^\circ$

شکل 4 مقایسه پروفایل سرعت عددی و تجربی عقب مدل احمید با شیب  $\Phi = 25^\circ$

#### 4- بررسی نتایج

برای بررسی عددی تأثیر اسپویلر و انحناى خودرو بر روی ضرایب آیرودینامیکی، مطابق "شکل 5" مدلی از یک خودرو با ابعاد مشخص با استفاده از نرم افزار مدل سازی سالیدورک مدل شده است. در این مدل سازی تنها فرم کلی بدنه در نظر گرفته شده و از جزئیاتی که باعث پیچیدگی مدل می شود صرف نظر شده است. به طور مثال سطح زیربند صاف در نظر گرفته شده است، از چرخش چرخ ها صرف نظر شده و اثرات آیرودینامیکی آینه های بغل، فضای خالی بین لاستیک و گلگیر، جلو پنجره که مقداری هوا را به اطراف موتور می رساند و برف پاک کن نادیده گرفته شده است. برای میدان جریان اطراف مدل همانند "شکل 6"، مکعبی ایجاد شده تا بتوان محدوده جریان را مشخص کرد، اگر  $L = 4.797$  متر طول خودرو باشد، طول مکعب  $9L$  بوده که  $3L$  آن در جلو خودرو و  $5L$  آن در پشت خودرو است و عرض و ارتفاع مکعب نیز  $2L$  است. به دلیل تقارن در هندسه و جریان تنها نیمی از هندسه مدل سازی شده است.

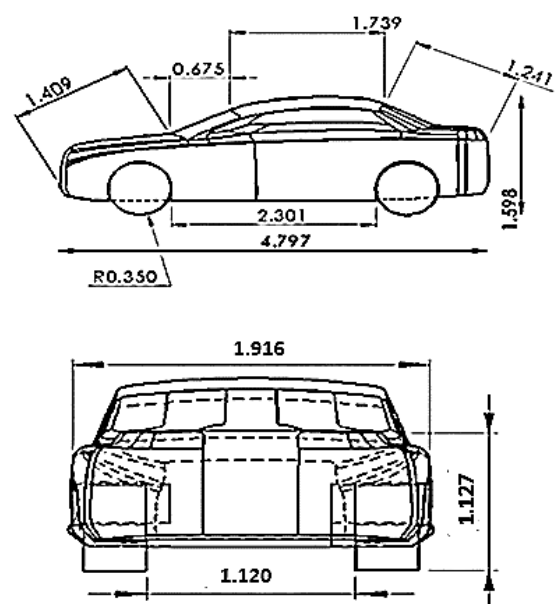


Fig. 5 Vehicle geometry (meter)

شکل 5 ابعاد هندسی خودرو (متر)

<sup>1</sup> Simple

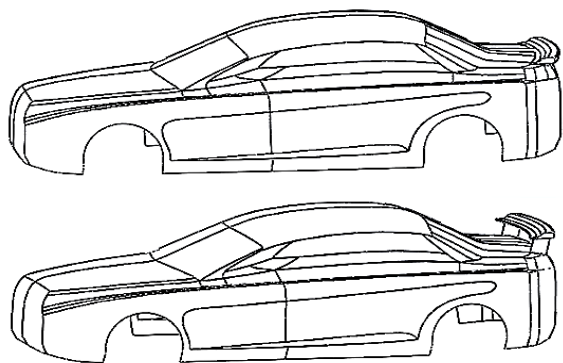


Fig. 11 The use of both the spoiler and the curvature of the lateral surfaces

شکل 11 استفاده توأمان از اسپویلر و انحناى سطوح جانبی

علامت منفی ضریب برآ بخاطر جهت آن است که روبه زمین می‌باشد. هر چه ضریب برآ به طرف زمین بیشتر باشد پایداری خودرو در سرعت های بالا بیشتر است.

با افزایش ارتفاع اسپویلر مقدار ضریب پسا و برآی منفی کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش ارتفاع اسپویلر تا مقدار 15 cm برای کاهش ضریب پسا مناسب است ولی از نظر پایداری مناسب نیست. افزایش ارتفاع اسپویلر تا 15 cm در این مدل خودرو ضریب پسا را 5.6 درصد کاهش می‌دهد. همچنین باعث افزایش مقدار ضریب برآ به مقدار 4.5 درصد می‌شود.

در ادامه مقدار ضریب پسا و برآی خودرو در حالتی که انحناى جانبی در آن ایجاد شده و همچنین در حالت استفاده همزمان از اسپویلر و انحناى سطوح جانبی، محاسبه شده است. "شکل 12" مقدار ضریب پسا را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد.

در این شکل مشخص است که ایجاد انحناى جانبی نسبت به نصب اسپویلر تأثیر بیشتری بر کاهش ضریب پسا دارد. همچنین استفاده توأمان از

جدول 4 مقایسه ضرایب آیرودینامیکی خودرو بدون اسپویلر و با اسپویلر در ارتفاع‌های مختلف

Table 4 Comparison of aerodynamic coefficients of a vehicle without spoiler and with a spoiler at different heights

ارتفاع (cm)	$c_d$	$c_l$	
-	0.254	-0.267	بدون اسپویلر
0	0.232	-0.284	با اسپویلر
5	0.228	-0.280	
10	0.223	-0.276	
15	0.219	-0.271	

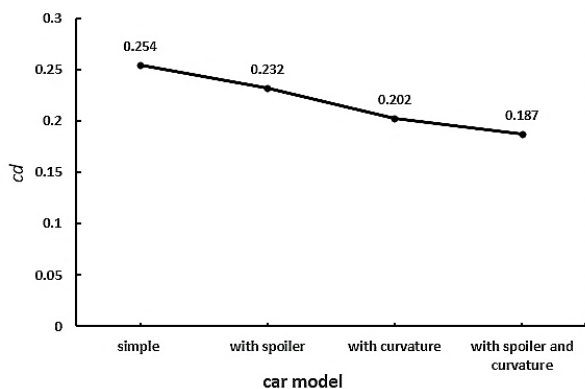


Fig.12 The general comparison of the drag coefficients

شکل 12 مقایسه کلی ضرایب پسا

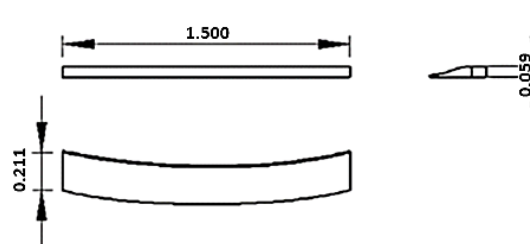


Fig. 8 Spoiler geometry (meter)

شکل 8 ابعاد هندسی اسپویلر (متر)

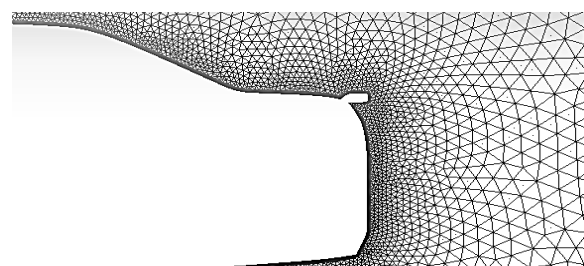


Fig. 9 Car mesh with spoiler

شکل 9 شبکه‌بندی خودرو با اسپویلر

نزدیک رکاب به 1.96 m در قسمت وسط و سپس به عرض 1.93 m در قسمت چرخ عقب خودرو برسد. در ارتفاع بالاتر این عرض بیشتر است و نهایتاً به مقدار 1.97 m به انتهای چرخ عقب می‌رسد. در این طرح هدف این است که از بغل اتومبیل (از قسمت درب جلو تا گلگیر عقب) هوا را جاروب کرده و به قسمت انتهای اتومبیل که دارای فشار نسبی منفی است، هدایت کنیم تا قدری فشار افزایش یابد که اختلاف فشار جلو و عقب کاهش یابد. از آنجایی که کاهش بیشتر ضریب پسا هم از لحاظ کاهش مصرف سوخت خودرو، صرفه اقتصادی دارد و هم در افزایش شتاب و سرعت خودرو موثر می‌باشد، سوالی که مطرح می‌باشد این است که آیا استفاده همزمان از اسپویلر و انحناى سطوح جانبی می‌تواند باعث کاهش بیشتر ضریب پسا شود یا این که به علت تلاقی جریان‌های هوای هدایت شده امکان دارد نتیجه عکس بدهد؟ برای پی بردن به این موضوع روی خودروی که قبلاً در سطوح جانبی آن انحناى ایجاد شده، اسپویلر نصب شد و پس از شبکه‌بندی در نرم‌افزار گمبیت، با کمک نرم‌افزار انسیس فلونت 15 تحلیل‌ها انجام شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

ابتدا تأثیر نصب اسپویلر بر روی آیرودینامیک خودرو بررسی شده و برای این منظور اسپویلر در ارتفاع‌های مختلف بر روی صندوق عقب خودرو نصب شده و پس از مدل‌سازی و شبکه‌بندی تحلیل شده است. جدول 4 مقادیر ضرایب آیرودینامیکی خودرو را برای حالت بدون اسپویلر و با اسپویلر در چند ارتفاع مختلف نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با اضافه کردن اسپویلر مقدار ضریب پسا کاهش یافته ولی ضریب برآی منفی افزایش می‌یابد.

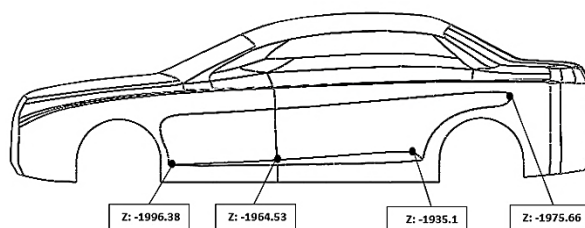


Fig. 10 Curvature of the lateral surfaces

شکل 10 انحنا و تورفتگی روی سطوح جانبی بدنه خودرو

سیال از روی قسمت عقب خودرو است. مقدار ضریب  $cp$  حدوداً 0.70 شده که نشانه مقداری افزایش فشار در این نقطه است. این مقدار افزایش فشار نسبت به حالتی که بتهایی از اسپویلر استفاده می‌شود ( $cp = -0.68$ ) کمتر و نسبت به حالتی که به‌تنهایی از انحناى سطوح جانبی استفاده می‌شود ( $cp = -0.75$ ) بیشتر است. فشار در محدوده 3500 mm تا 4800 mm که در واقع همان مکانی است که اسپویلر نصب شده است، به‌علت عبور جریان سیال از روی اسپویلر و ایجاد اغتشاش به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. افت فشاری که در محدوده 4500 mm تا 5000 mm در مدل خودرو ساده به‌علت تشکیل گردابه و ایجاد خلأ در قسمت عقب خودرو وجود داشت، در این حالت پس از نصب اسپویلر کمی جلوتر و بالاتر رفته است که این نشانه افزایش فشار و کاهش مقدار گردابه و خلأ ناشی از آن می‌باشد که نتیجه آن کم شدن نیروی مکشی به خودرو در قسمت عقب و افزایش سرعت خودرو و همچنین کاهش مصرف سوخت است.

برای بررسی بیشتر میزان تأثیر توان نصب اسپویلر و ایجاد انحنا و تورفتگی در سطوح جانبی بدنه، نمودار تغییرات ضریب فشار در عرض خودرو و در ارتفاع  $y = 200$  mm پشت صندوق عقب در "شکل 15" آمده است. در این شکل افت فشار در وسط دیاگرام مدل ساده خودرو کاملاً مشهود است و با نصب اسپویلر و ایجاد انحنا در سطوح جانبی میانگین ضرایب فشار در عرض خودرو بخصوص در محدوده وسط نسبت به مدل ساده افزایش یافته است.

منحنی تغییرات ضریب فشار مدل‌های مختلف مورد بررسی، در ارتفاع  $y = 200$  mm پشت صندوق عقب، در "شکل 16" آمده است. ملاحظه می‌شود که میانگین افزایش فشار در عرض، در مدل خودرو با اسپویلر و انحناى سطوح جانبی نسبت به مدل‌های دیگر بیشتر است.

توزیع سرعت سیال در صفحه‌ی میانی خودرو مربوط به مدل‌های مختلف در "شکل‌های 17 تا 20" آمده است. محدوده کم سرعت بر روی صندوق عقب و پشت مدل ساده خود (شکل 17) کاملاً مشخص است که علت آن جدایش ناگهانی سیال و همچنین تشکیل گردابه در این محدوده است. خلأ ایجاد شده باعث ایجاد نیروی کششی یا پسا شده و باعث کاهش سرعت خودرو در حرکت به سمت جلو و نیز افزایش مصرف سوخت می‌شود. همچنین اختلاف فشار بین سطح زیرین و بالای خودرو باعث افزایش نیروی بالابرنده یا برآ بخصوص در سرعت بالا می‌شود که تعادل خودرو را بهم زده و

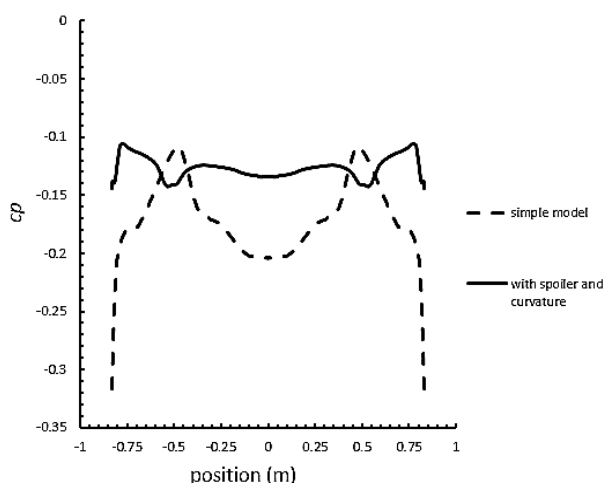


Fig. 15 Comparison of the pressure coefficients variations in the width vehicle on the trunk

شکل 15 مقایسه ضرایب فشار در عرض خودرو روی صندوق عقب

اسپویلر و انحناى سطوح جانبی مقدار ضریب پساى آیرودینامیکی عقب خودرو را به میزان 26.3% کاهش می‌دهد که این مقدار کاهش ضریب پسا نسبت به حالت‌های بدون اسپویلر و انحناى جانبی و همچنین نسبت به حالت‌هایی که از آن‌ها به‌طور جداگانه استفاده می‌شود، بیشتر است و بدین علت از نظر اقتصادی بخاطر کاهش مصرف سوخت مقرون به‌صرفه است.

"شکل 13" نیز مقادیر ضرایب برآ و همچنین تغییرات آن را در مقایسه با دیگر مدل‌ها نشان می‌دهد. ضریب برآ منفی به مقدار 5.2% افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش اگرچه جهت پایداری خودرو به‌خصوص در سرعت‌های بالا مناسب است ولی نسبت به حالتی که تنها از اسپویلر استفاده شود (6.3 درصد) کمتر بوده ولی با این حال پایداری خودرو همچنان در سرعت‌های بالا نسبت به حالت ساده بیشتر است.

برای تعیین تغییرات ضرایب فشار استاتیکی سیال روی خودرو، خطی در راستای جریان سیال و در طول خودرو ترسیم شد و تغییرات فشار روی نقاط این خط به‌صورت منحنی تغییرات ضرایب فشار برحسب موقعیت سیال مشخص گردید. "شکل 14" نمودارهای تغییرات ضرایب فشار مربوط به مدل ساده خودرو و مدل با اسپویلر و انحناى سطوح جانبی را بر روی سطح بالایی خودرو و قسمت عقب آن با هم مقایسه می‌کند.

مقدار کمینه فشار استاتیکی برای مدل با اسپویلر و انحناى سطوح جانبی تقریباً در موقعیت 3300mm ایجاد شده که در واقع همان نقطه جدایش

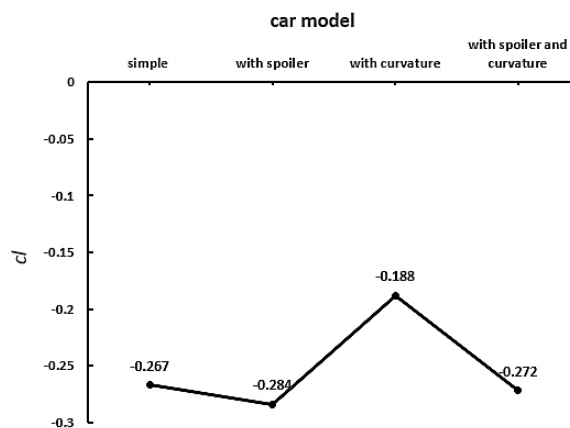


Fig. 13 The general comparison of the lift coefficients

شکل 13 مقایسه کلی ضرایب برآ

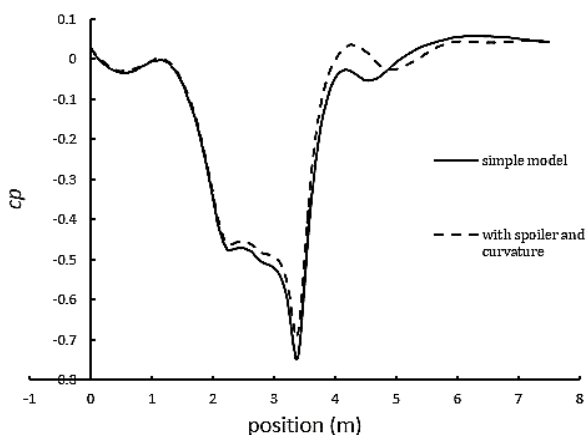


Fig. 14 Comparison of the pressure coefficients variations in the length vehicle

شکل 14 مقایسه تغییرات ضرایب فشار در طول خودرو



Fig. 20 distribution of velocity on the model with spoiler and Curvature of lateral surfaces

شکل 20 توزیع سرعت سیال در مدل با اسپویلر و انحنا سطوح جانبی

سطوح جانبی است که یکی باعث اغتشاش در جریان و دیگری هدایت جریان در مسیر مشخص می شود که نهایتاً منجر به افزایش فشار هوا در این محدوده و نیز جلو افتادن نقطه تلاقی جریان سیال از طرفین می گردد. خطوط جریان مدل های مختلف در "شکل های 21 تا 24" آورده شده است. در انتهای مدل ساده به دلیل جدایش ناگهانی سیال و تلاقی خطوط جریان در نقطه ای دورتر نسبت به عقب خودرو، محدوده گردابه ای ایجاد شده که نتیجه آن کاهش فشار پشت و ایجاد خلأ بوده و تأثیر بسزایی در کم شدن کشش خودرو دارد (شکل 21).

با نصب اسپویلر و هدایت مقداری از جریان هوا از بالا به پشت و نزدیک صندوق عقب خودرو، اغتشاشی ایجاد شده و محدوده گردابه ای، شکل نامنظمی پیدا کرده و به گردابه های کوچکتری تقسیم شده که تأثیر آن ها نسبت به حالت مدل ساده خودرو کمتر است (شکل 22).

با ایجاد انحنا و تورفتگی در سطوح جانبی مدل ساده و بدون اسپویلر و هدایت جریان سیال طرفین خودرو به عقب و سمت بالای گلگیرها، جریان هوایی وارد محدوده گردابه ای شکل شده و اغتشاش ایجاد می کند که همین امر از مقدار خلأ پشتی می کاهد و عقب خودرو متأثر از نیروی پسی کمتر خواهد بود (شکل 23).

مطابق "شکل 24" هنگام استفاده همزمان از اسپویلر و انحنا سطوح جانبی، محدوده گردابه ای و کم فشار پشتی به دلیل نفوذ سیال هدایت شده از طرفین و روی اسپویلر، به مقدار زیادی کم شده که نتیجه آن کاهش قابل توجه نیروی پسا نسبت به حالت های قبل بوده و نتیجه بهتری می دهد.

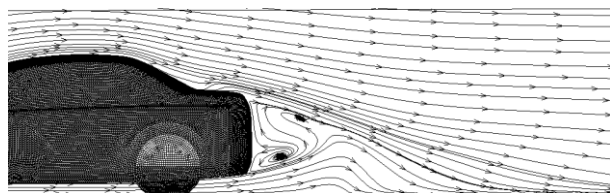


Fig. 21 Stream line on the simple model

شکل 21 خط جریان مدل ساده

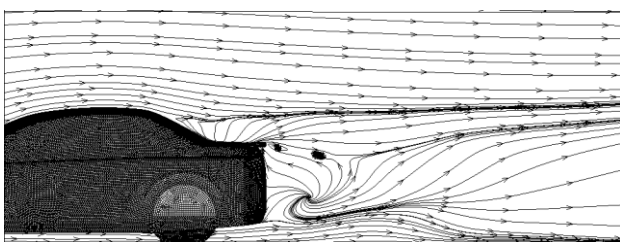


Fig. 22 Stream line on the model with spoiler

شکل 22 خط جریان مدل با اسپویلر

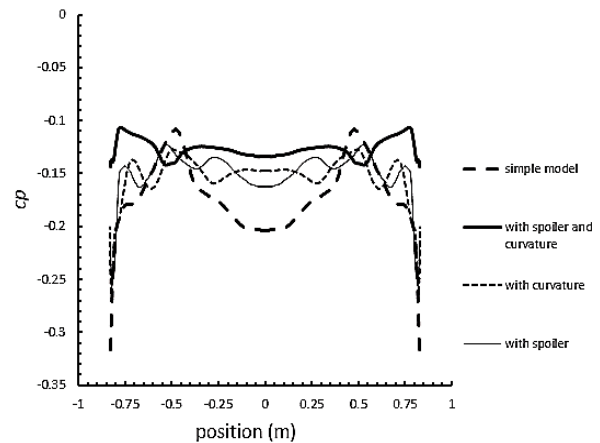


Fig. 16 Comparison of the pressure coefficients variations in the width vehicle on the trunk between all models

شکل 16 مقایسه ضرایب فشار همه مدل ها روی صندوق عقب و در عرض خودرو

کنترل آن را برای راننده مشکل می نماید. مقایسه توزیع سرعت در حالت های مختلف نشان می دهد که در موقع استفاده توأمان اسپویلر و انحنا یا تورفتگی سطوح جانبی (شکل 20)، نسبت به مدل های دیگر، محدوده خلأ پشت خودرو کمتر و پرفشارتر شده است. علت آن تأثیر همزمان اسپویلر و انحنا



Fig. 17 distribution of velocity on the simple model

شکل 17 توزیع سرعت سیال در مدل ساده



Fig. 18 distribution of velocity on the model with spoiler

شکل 18 توزیع سرعت سیال در مدل با اسپویلر

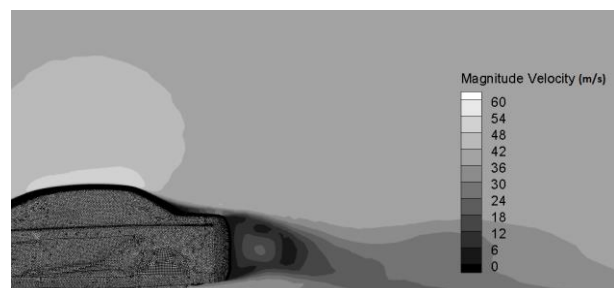


Fig. 19 distribution of velocity on the model with Curvature of lateral surfaces

شکل 19 توزیع سرعت سیال در مدل با انحنا سطوح جانبی



مقدار 4.5 درصد می‌شود. بنابراین افزایش ارتفاع اسپویلر تا مقدار 15cm برای کاهش ضریب پسا مناسب است ولی از نظر پایداری مناسب نیست. ایجاد انحنا سطوح جانبی نسبت به نصب اسپویلر مقدار ضریب پسا را بیشتر کاهش می‌دهد. ولی باعث افزایش ضریب برآ می‌شود.

2- با استفاده همزمان از اسپویلر و انحناى سطوح جانبی نسبت به خودرو ساده، مقدار ضریب پسای آیرودینامیکی عقب خودرو به میزان 26.3% کاهش و ضریب برآی منفی نیز به مقدار 5.2% افزایش می‌یابد.

### 6- مراجع

- [1] L. Janssen, W. Hucho, Aerodynamische Formoptimierung von VW Golf und VW Scirocco, *Volkswagen Golf 1 ATZ*, Vol. 77, No. 11, pp. 309-313, 1975. (in German)
- [2] A. Morelli, L. Fioravanti, A. Cogotti, The body shape of minimum drag, *Automotive Engineering Congress and Exposition*, Vol. 12, No. 760186, PP. 1-12, 1976
- [3] S. R. Ahmed, G. Ramm, G. Faltn, Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake, *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, Vol. 1, No. 840300, 1984.
- [4] D. Edward, E. Douglas, M. Rbindra, P. Mark, Pressure-Sensitive paint technology applied to low – speed automotive testeng, *SAE transactions Journal of Passenger Cars*, Vol. 1, No 0626, 2001
- [5] H. Lienhart, S. Becker, Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (Ahmed Model), *SAE World Congress*, Detroit, Michigan, March 3-6, 2003
- [6] R. Mathieu, G. Patrick, K. Azeddine, Drag reduction by flow separation control on a car after body, *International Journal For Numerical Methods in Fluids*, Vol. 60, No. 11, pp. 1222-1240, 2009
- [7] D. Mitra, Effect of relative wind on notch back car with add-on parts, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 472-476, 2010
- [8] A. Sunanda, M. S. Nayak, Analysis of NACA 2412 for automobile rear spoiler using composite material, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 230-238, 2013
- [9] C. Tsai, L. Fu, C. Tai, Y. Huang, J. Leong, Computational aero-acoustic analysis of a passenger car with a rear spoiler, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, No. 9, pp. 3661-3673, 2009
- [10] P. Dileep Menon, G. Samir Kamat, S. Yagnavalkya Mukkamala, S. Prakash Kulkarni, To improve the aerodynamic performance of a model hatchback car with the addition of a rear roof spoiler, *16<sup>th</sup> Annual CFD Symposium*, Bangalore, India, August 11-12, 2014
- [11] R. B. Sharma, R. Bansal, Aerodynamic drag reduction of a passenger car using spoiler with VGs, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 1, No. 2248, pp. 256–263, 2014
- [12] H. Ahmadi, M. Abbasalizadeh, Investigating the effects of angle and height of the spoiler on the aerodynamic condition of the vehicle, *Proceedings of The National Mechanical Engineering Conference*, Ahvaz, Iran, December 17-18, 2014. (in Persian فارسی)
- [13] M. Valadkhani, F. Talebi, An idea to improve the aerodynamics of the car and analyze it with ansys fluent software, *Proceedings of The National Mechanical Engineering Conference*, Ahvaz, Iran, December 17-18, 2014. (in Persian فارسی)
- [14] C. Mustafa, CFD study on aerodynamic effects of a rear wing/spoiler on a passenger vehicle, *Msc Thesis, Santa Clara University, USA*, 2012

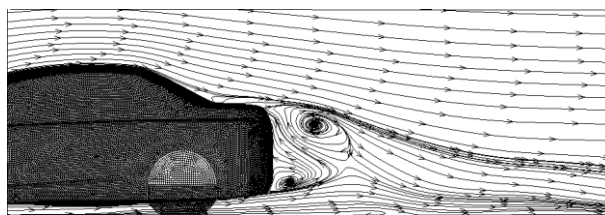


Fig. 23 Stream line on the model with Curvature of lateral surfaces

شکل 23 خط جریان مدل با انحناى سطوح جانبی

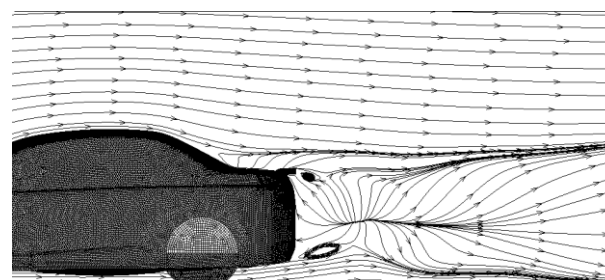


Fig. 24 Stream line on the model with spoiler and Curvature of lateral surfaces

شکل 24 خط جریان مدل با اسپویلر و انحناى سطوح جانبی

### 5- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، جریان با رینولدز  $2.73 \times 10^6$  اطراف یک مدل خودرو سدان شبیه‌سازی شد. بررسی مدل‌های مختلف آشفتگی نشان داد که استفاده از مدل DES SSTK- $\omega$  ناحیه گردابه پشت خودرو را بهتر شبیه‌سازی کرده و مقدار ضریب پسا را دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند. بررسی مدل‌های مختلف خودرو نتایج قابل توجهی از ضرایب آیرودینامیکی بدست آمد که در ادامه خلاصه‌ای از این نتایج آورده شده است:

1- با مقایسه ضرایب آیرودینامیکی بدست آمده برای دو حالت خودرو با اسپویلر و بدون اسپویلر به این نکته می‌توان پی برد که نصب این مدل از اسپویلر، مقدار ضریب پسای آیرودینامیکی عقب را به میزان 8.6 درصد کاهش، ولی ضریب برآی منفی را به مقدار 6.3 درصد افزایش می‌دهد، که پایداری خودرو بخصوص در سرعت‌های بالا بیشتر می‌شود. با افزایش ارتفاع اسپویلر مقدار ضریب پسا و برآی منفی کاهش می‌یابد. افزایش ارتفاع اسپویلر تا 15 cm در این مدل خودرو ضریب پسا را تا 6.5 درصد نسبت به حالت اسپویلر بدون ارتفاع کاهش می‌دهد. همچنین باعث افزایش مقدار ضریب برآ به