



مطالعه عددی اثر چیدمان تولیدکننده‌های ورتکس بر مشخصه‌های آیرودینامیکی خودرو

نیلوفر مرادنوری¹، مرتضی خیاط^{2*}، علیرضا داوری³

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
 2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
 3- دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
 *تهران، صندوق پستی 14515-775، mkhayat@srbiau.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>وسایل نقلیه زمینی در دسته‌بندی اجسام بلوکه‌کننده جریان قرار می‌گیرند. هنگامی که یک وسیله نقلیه رو به جلو حرکت می‌کند حرکت هوا در اطراف آن گرادبان فشار تولید می‌کند که در طول بدنه متغیر است. این مسئله می‌تواند منجر به جدایش و پیدایش ناحیه برخاستگی آشفته در قسمت عقب خودرو گردد. مطالعه حاضر اثرات آیرودینامیکی تولیدکننده‌های ورتکس و تغییر چیدمان آن‌ها را در حالت‌های مختلف 6 و 15 عددی هرکدام با آرایش‌های خطی، مستطیلی و مثلثی بر روی قسمت پشتی یک مدل خودرو به صورت عددی بررسی می‌کند. برای تحلیل تغییرات ضرایب پسا و برای حاصل از آرایش‌های مختلف تولیدکننده‌های ورتکس از روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز و مدل‌های معشوش استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند بهترین حالت برای کاهش نیروی پسا مربوط به حالت 6 تولیدکننده ورتکس با آرایش خطی و مثلثی است که ضریب پسای آیرودینامیکی را نسبت به مدل خودرو بدون تولیدکننده ورتکس به میزان 2% کاهش می‌دهد. بهترین حالت برای بهبود نیروی پایین‌بر به منظور افزایش پایداری خودرو نیز مربوط به چیدمان 15 تولیدکننده ورتکس با آرایش مستطیلی می‌باشد که ضریب برای آیرودینامیکی را در مقایسه با مدل خودرو بدون تولیدکننده ورتکس به میزان 23/1% کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش تعداد تولیدکننده‌های ورتکس از 6 به 15 عدد، ضرایب پسا به صورت کلی افزایش می‌یابند.</p>	<p>مقاله پژوهشی کامل دریافت: 17 بهمن 1399 پذیرش: 30 اردیبهشت 1400 ارائه در سایت: 22 تیر 1400</p> <p>کلیدواژگان لایه مرزی جدایش ضریب پسا ضریب برآ تولیدکننده ورتکس</p>

Numerical study of the effect of vortex generators arrangement on vehicle aerodynamic characteristics

Niloufar Moradnouri, Morteza Khayat*, Alireza Davari

- 1- Department of Aerospace Engineering, Science and Research Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran
 2- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran
 3- Department of Aerospace Engineering, Science and Research Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran
 *P.O.B. 14515-775 Tehran, Iran, mkhayat@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
 Received 5 February 2021
 Accepted 20 May 2021
 Available Online 13 July 2021

Keywords

Boundary layer
 Separation
 Drag coefficient, Lift Coefficient,

ABSTRACT

Land vehicles are among the blunt body objects. When a vehicle moves forward, the movement of air around it produces a pressure gradient that varies along the body. This can lead to separation and appearance of a turbulent wake region in the rear of the vehicle. The present study numerically investigates the aerodynamic effects of vortex generators and their arrangement in different positions of 6 and 15 numbers, each with linear, rectangular and triangular arrangements on the back of a car model. Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and turbulent models

Please cite this article using:

Niloufar Moradnouri, Morteza Khayat, Alireza Davari, Numerical study of the effect of vortex generators arrangement on vehicle aerodynamic characteristics, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 12, No. 2, pp. 38-51, 2021 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Vortex generator

have been used to analyze the changes in drag and lift coefficients obtained from different arrangements of the vortex generators. The results show that the best case for reducing the drag force is related to 6 numbers of vortex generators with linear and triangular arrangement, which reduces the drag coefficient by 2% compared to the car model without vortex generators. In addition, the best case to improve the downforce; in order to increase the stability of the car, is the arrangement of 15 vortex generators with a rectangular alignment, which reduces the lift coefficient by 23.1% compared to the car model without the vortex generator. Also, with increasing the number of vortex generators from 6 to 15, the drag coefficients generally increase.

1- مقدمه

مصرف سوخت بهتر و ایمنی و پایداری بیشتر در خودروها با توسعه طرح آیرودینامیکی مناسب برای مدل خودرو قابل دستیابی است. کاهش نیروی پسا که به طور مستقیم سرعت و مصرف سوخت را تحت تاثیر قرار می‌دهد، همواره مورد توجه محققان بوده است. کنترل جدایش جریان، موثر بر کنترل نیروی پسا می‌باشد. از جمله وسایل غیرفعال¹ برای جلوگیری از جدایش لایه مرزی، تولیدکننده ورتکس² می‌باشد. این وسیله انرژی جنبشی زیادی به لایه مرزی که به علت گرادیان فشار مخالف در معرض جدایش است، منتقل نموده و باعث تاخیر در جدایش جریان شده و نیروی پسا را کاهش می‌دهد. کاهش پسای آیرودینامیکی در وسایل نقلیه به میزان 10% می‌تواند مصرف سوخت را تا 5% کاهش دهد [1]. تا به امروز مطالعات تجربی و عددی بسیاری روی تکنیک‌های فعال، غیرفعال و ترکیبی، برای کاهش نیروی پسا در خودروها انجام شده است. کوچک و همکاران [2] با بررسی اثر دو نوع تولیدکننده ورتکس دارای برآمدگی و مدل بال کوچک دلتاشکل، مشخص نمودند که ارتفاع بهینه تولید کننده ورتکس برابر با ضخامت لایه مرزی می‌باشد. نتایج آنها نشان داد فشار سطحی در پشت خودرو با حضور تولید کننده ورتکس افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تاخیر در جدایش جریان در مقایسه با مدل خودرو استاندارد است و مدل تولید کننده ورتکس بال کوچک دلتاشکل نسبت به مدل دارای برآمدگی برتری دارد. آیدر و همکاران [3] یک مطالعه تجربی روی مدل احمد با قسمت پشتی اصلاح شده به صورت منحنی با تولیدکننده ورتکس دوزنقه‌ای انجام دادند و نتایج نشان‌دهنده کاهش نیروی پسا به میزان 14% برای سرعت‌های باد مختلف بود که به مصرف سوخت کمتر می‌انجامد.

میلان و همکاران [4] با تحلیل تجربی روی مدل احمد با زاویه سطح شیبدار 25° با تغییر زاویه چرخ زنی³ و در نظر گرفتن عدد رینولدز بین 3×10^5 تا 3×10^6 دریافتند که ضریب پسا با افزایش زاویه چرخ‌زنی در عدد رینولدز ثابت به صورت خطی افزایش می‌یابد. گیلیرون و کورتا [5] با انجام یک مطالعه تجربی در تونل باد روی مدل احمد با زاویه سطح شیبدار 35° و با استفاده از محرک‌های پالس‌جت که روی سقف شیشه پشتی نصب شده بود، کاهش پسا به میزان 20% نسبت به مدل مبنا با اعمال فرکانس 500 هرتز برای پالس‌جت‌ها را مشاهده نمودند. در مطالعه اورارد و همکاران [6] یک مدل خودروی واقعی پژو 208 و یک مدل خودرو احمد با قسمت پشتی مربعی شکل در یک تونل باد با سرعت 20 کیلومتر بر ساعت با در نظر گرفتن اثر زمین و چرخ‌ها آزمایش و مقایسه شدند. نتایج نشان داد تاثیر تولیدکننده ورتکس در مدل احمد مطلوب است در حالی که در مدل خودروی واقعی نتایج عکس مشاهده گردید.

در مطالعه سلواراجو و پاراماسیوم [7] رفتار آیرودینامیکی یک مدل خودرو شاسی‌بلند⁴ که تولیدکننده‌های ورتکس در موقعیت‌های مختلف خطی نسبت به لبه پشتی سقف، روی آن نصب شده بودند بررسی گردید. نتایج نشان داد در سرعت باد پایین‌تر، تولید کننده ورتکس کمترین تاثیر را روی پسای آیرودینامیکی خودرو داشته و در سرعت باد بالاتر مقدار نیروی پسا به طرز قابل توجهی کاهش یافته است. در مطالعه بادیمن و همکاران [8] مرور مختصری بر حضور ورتکس‌های سه‌بعدی و اثرات آنها بر عملکرد آیرودینامیکی وسایل نقلیه زمینی ارائه گردید. تصویرسازی کیفی تولیدکننده‌های ورتکس ساده به روش سیم دود⁵ روی یک صفحه تخت هم در این مقاله بیان شده است. در مطالعه پال و همکاران [9] تکنیک‌های کنترل جریان

³ Yaw angle⁴ Sport Utility Vehicle (SUV)⁵ Smoke wire¹ Passive² Vortex generator

تواند تا 1/73% به کمک تولیدکننده ورتکس، 3/05% توسط اسپویلر بال پشتی و 2/47% با استفاده از قطعات دیفیوزر پشتی در زیر بدنه کاهش یابد و با همه موارد ذکر شده تا 3/8% کاهش می‌یابد. در مطالعه سیواراج و همکاران [15] تحلیل‌های تجربی در تونل باد و تحلیل عددی با نرم‌افزار محاسباتی استاندارد برای مدل خودرو با و بدون تولیدکننده ورتکس صورت پذیرفت. نتایج تجربی و عددی هرکدام به نوبه خود نشان دادند که ضریب پسای خودرو توسط تولیدکننده‌های ورتکس کاهش می‌یابد. در مطالعه رحمان و تیاگراجان [16] هدف معرفی ایده‌ای برای به دست آوردن حداکثر بازدهی برای یک تولیدکننده ورتکس بود که اثر آن با حالت بدون تولیدکننده ورتکس مقایسه گردید. نتایج نشان داد که تولیدکننده ورتکسی که به صورت واگرا نسبت به میدان جریان قرار گرفته است موثرترین روش برای کاهش پسا در خودروها می‌باشد.

در مطالعه سابیاه و همکاران [17] شکل‌های مختلف تولیدکننده ورتکس در نظر گرفته شد و به کمک دینامیک سیالات محاسباتی بررسی گردید. نتایج نشان داد که کاهش قابل ملاحظه‌ای در ضریب پسا با استفاده از تولیدکننده‌های ورتکس مشاهده می‌شود. در مطالعه شیوام و همکاران [18] یک هندسه خودرو ساده ناچ‌بک⁵ استفاده گردید که همان مدل احمد اصلاح شده می‌باشد و تولیدکننده‌های ورتکس روی سطح خارجی جایی که جدایش جریان رخ می‌دهد قرار گرفتند. نتایج نشان داد ارتفاع بهینه تولیدکننده ورتکس برابر با ضخامت لایه مرزی است.

در مطالعه عددی ویسواناتان [19] عملکرد آیرودینامیکی چند تولیدکننده ورتکس که روی مدل احمد با زاویه سطح شیبدار 35° و زوایای انحراف مختلف نصب شده بودند، با استفاده از مدل‌های بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز ارزیابی شد. نتایج نشان داد تولیدکننده‌های ورتکس سیلندر شکل و ذوزنقه‌ای قادرند نیروی پسا را به ترتیب به میزان 8/5% و 7/7% کاهش دهند. شانکار و دوارادجان [20] خصوصیات آیرودینامیکی یک خودروی سدان معمولی که با سه عدد تولیدکننده ورتکس دلتاشکل تجهیز شده بود را مورد بررسی تجربی قرار دادند. نتایج نشان داد در حالت‌هایی که مدل خودرو با تولیدکننده‌های ورتکسی با لبه حمله رو به انتهای خودرو و رو به صفحه میانی خودرو تجهیز شده است، ماکزیمم کاهش ضرایب پسا و برآ به ترتیب 4/53% و 2/55% می‌باشد.

مانند تولیدکننده‌های ورتکس پره‌ای شکل¹ و اسپویلر پشتی² روی قسمت صندوق عقب که برای کاهش پسای خودروی سواری به کار می‌رود توصیف گردید. همچنین از مدل مغشوش $k - \omega SST$ برای پیش بینی ورتکس‌های ناحیه برخاستگی³ در هندسه خودرو استفاده شد. نتایج نشان داد با استفاده همزمان از تولیدکننده ورتکس و اسپویلر، ضریب پسا به طور موثری کاهش می‌یابد. در مطالعه بیل و همکاران [10] تحلیل تست‌های تجربی پیرامون رفتار بعضی از تولیدکننده‌های ورتکس برای خودروهای سنگین انجام گردید. دو نوع تولیدکننده ورتکس بررسی شدند که با استفاده از آن‌ها در تست‌های مجازی توسط ابزار دینامیک سیالات محاسباتی، کاهش چشمگیری در ضریب پسا مشاهده شد.

ویزر و همکاران [11] یک مطالعه تجربی روی یک مدل خودرو ترکیب طرح هندسی بی‌ام و سری 3 و آئودی A4 با مقیاس 1:4 انجام دادند و تولیدکننده‌های ورتکس برای تحلیل اثرشان روی پسای آیرودینامیکی در موقعیت‌های مختلف روی سقف خودرو متصل شدند. نتایج نشان داد در کل، تولیدکننده‌های ورتکس سطح فشار را روی چراغ پشتی و صندوق خودرو افزایش می‌دهند و این افزایش فشار منجر به رشد نیروی پایین-بر⁴ حدود 33% می‌شود. در مطالعه آنیش و همکاران [12] برای کاهش برآ و پسا، بعضی اجزا شامل دیفیوزر، تولیدکننده ورتکس، اسپویلر، کاور تایلر و مجراهای هوا اضافه شدند. نتایج نشان داد که با اضافه کردن همه تجهیزات مقدار ضریب پسا 11/5% و مقدار ضریب برآ 47/2% کاهش می‌یابد. در مطالعه یاداو و همکاران [13] اثر وسایل آیرودینامیکی دلتاشکل که به عنوان تولیدکننده ورتکس شناخته شده و روی سقف خودرو هاچ‌بک برای به تاخیر انداختن جدایش جریان نصب می‌شوند، به صورت عددی بررسی گردید. نتایج نشان داد پسای آیرودینامیکی با نصب تولیدکننده ورتکس روی خودروهای هاچ‌بک کاهش می‌یابد اما حداقل مقدار را دارد، بنابراین تولیدکننده‌های ورتکس خیلی در خودروهای هاچ‌بک موثر نیستند.

صالح و علی [14] در یک مطالعه عددی به بررسی کاهش نیروی پسا توسط بعضی اصلاحات خارجی کنترل جریان عبوری مثل تولیدکننده ورتکس، قطعات دیفیوزر پشتی در زیر بدنه و اسپویلر بال پشتی پرداختند. نتایج نشان داد که نیروی پسا می‌-

¹ Vane-type

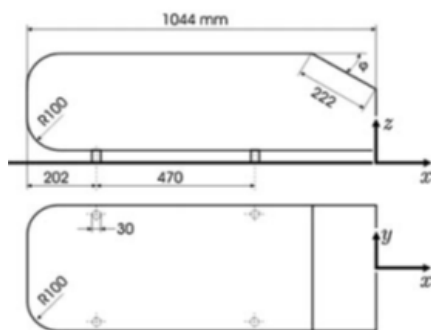
² Rear spoiler

³ Wake region

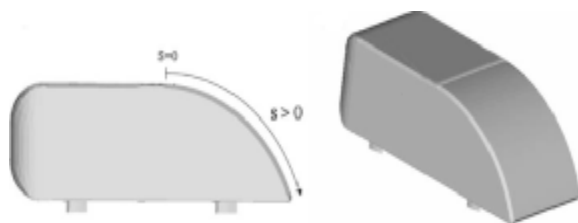
⁴ Downforce

⁵ Notchback

خط منحنی S معرفی می‌گردد تا موقعیت تولیدکننده‌های ورتکس روی دیواره گرد به خوبی مشخص شود. مبدا این خط، $S = 0$ روی قسمت ابتدایی دیواره گرد قرار گرفته است و به سمت انتهای مدل با علامت مثبت در نظر گرفته می‌شود. ارتفاع مدل $0/288$ متر، عرض آن $0/389$ متر، طول آن $1/044$ متر و ارتفاع جانمایی چرخ‌ها $0/05$ متر می‌باشد.



شکل 1 نمای جانبی و بالایی مدل احمد با زاویه سطح شیبدار 30° [3]



شکل 2 نمایی از مدل اصلاح‌شده احمد به منظور چیدمان تولیدکننده ورتکس در تحقیق حاضر [3]

تولیدکننده ورتکس استفاده‌شده در این مطالعه در شکل 3 نشان داده شده است. مختصات این هندسه پیچیده به روش اندازه‌برداری بدون تماس به کمک دستگاه‌های اپتیک و لیزر به صورت ابرنقاط به دست آمده‌اند و سپس به کمک نرم‌افزار کتیا، قطعه به صورت سه‌بعدی مدل شده است.

به منظور بررسی اثرات چیدمان و موقعیت این تولیدکننده‌های ورتکس در قسمت عقب خودرو بر مشخصه‌های آیرودینامیکی خودرو، یک بار هندسه خودرو (شکل 2) بدون تولیدکننده ورتکس در نظر گرفته شده و در موارد بعدی به تعداد 6 و 15 عدد تولیدکننده ورتکس، هر یک با چیدمان‌های خطی، مستطیلی و مثلثی در قسمت عقب مدل خودرو قرار گرفته‌اند. نحوه قرار گرفتن تولیدکننده‌های ورتکس در چیدمان‌های مختلف در شکل 4 نشان داده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود در مطالعات پیشین کمتر به اثر چیدمان تولیدکننده‌های ورتکس به خصوص چیدمان‌های غیرخطی (مثل مستطیلی و مثلثی) بر مشخصه‌های آیرودینامیکی خودرو پرداخته شده است و تحقیق حاضر سعی بر آن دارد تا با تغییر چیدمان تولیدکننده‌های ورتکس در قسمت عقب خودرو، اثر آن را بر ضرایب آیرودینامیکی خودرو به صورت عددی شبیه‌سازی و تحلیل نماید.

در مطالعه حاضر با توجه به پیچیدگی هندسه قطعه تولیدکننده ورتکس، مدل‌سازی آن با استفاده از ابرنقاط حاصل از مهندسی معکوس قطعه با روش اندازه‌برداری بدون تماس (اپتیک)، در نرم افزار کتیا¹ انجام پذیرفته است. سپس شبیه‌سازی جریان اطراف مدل خودرو با چیدمان‌های مختلف تولیدکننده ورتکس که شامل 6 و 15 عدد تولیدکننده ورتکس هر کدام با آرایش‌های خطی، مستطیلی و مثلثی بر روی قسمت پشتی خودرو می‌باشد، با استفاده از نرم‌افزار فلونت² انجام شده است. سرعت هوا 40 متر بر ثانیه و جریان بصورت پایا، تراکم-ناپذیر و مغشوش در نظر گرفته شده است.

2- شبیه‌سازی عددی

2-1- هندسه خودرو و تولیدکننده ورتکس

تعیین یک هندسه سه‌بعدی ساده برای مطالعه ساختار ناحیه برخاستگی و نیروهای آیرودینامیکی اهمیت زیادی دارد. یکی از جسم‌های بلوکه‌کننده جریان شناخته‌شده در زمینه آیرودینامیک خودرو، مدل احمد است که در قسمت جلو دارای لبه‌های گرد بوده و در قسمت پشتی با زوایای سطح شیبدار مختلف، قطعات تخت و لبه‌های تیز تعریف شده است [3]. شکل 1 شماتیکی از این مدل را نشان می‌دهد.

در تحقیق حاضر به منظور تحلیل جدایش جریان سه‌بعدی با یک خط جدایش آزاد، از مدل اصلاح‌شده احمد مطابق مرجع [3] استفاده شده است که در آن، قسمت عقب مدل اصلی که در شکل 1 نشان داده شده اصلاح گردیده است به طوری که لبه‌های تیز و صفحه‌های تخت در قسمت پشتی با یک دیواره گرد با شعاع ثابت $0/45$ متر جایگزین شده‌اند ولی قسمت جلویی هیچ تغییری نکرده است. با وجود این سطح شیبدار، خط جدایش دیگر توسط هندسه تعیین نمی‌شود. شکل 2 نمایی از مدل اصلاح‌شده احمد را نشان می‌دهد. یک مختصات مشتت بر

¹ Catia

² Fluent

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

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right] \quad (2)$$

که در آن تنش رینولدز از رابطه (3) محاسبه می‌شود.

$$-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

برای مدل‌سازی لزجت آشفتگی μ_t از مدل‌های مختلف جریان مغشوش استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر از روش‌های $k - \omega SST$ و $k - \varepsilon$ (Realizable) برای مدل‌سازی جریان مغشوش استفاده گردیده و نتایج دو روش با هم مقایسه شده‌اند. در مدل $k - \varepsilon$ (Realizable)، معادلات لزجت آشفتگی، انرژی جنبشی مغشوش و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی مغشوش به ترتیب طبق روابط (4) الی (6) می‌باشند.

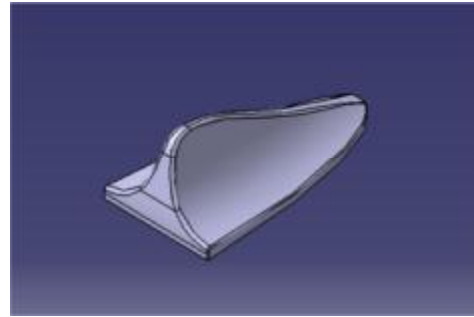
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (5)$$

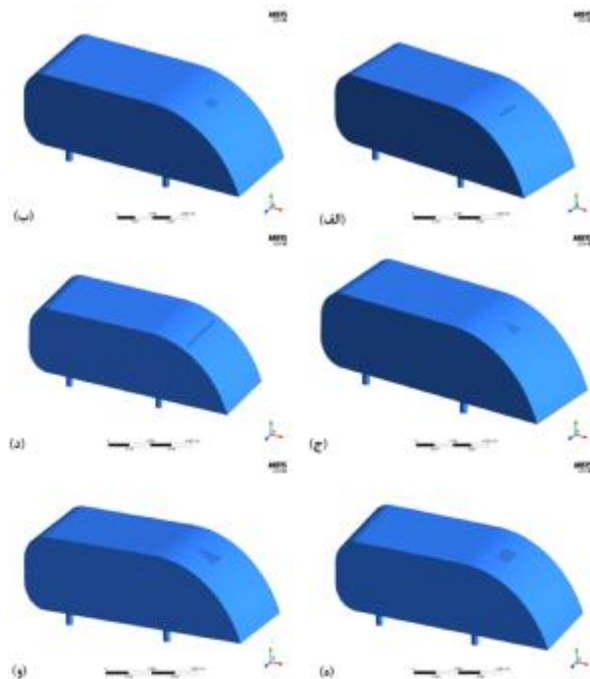
$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \\ & + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (C_{3\varepsilon} G_b) + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

که در رابطه (4)، C_μ تابعی از نرخ‌های دوران و کرنش متوسط و سرعت زاویه‌ای سیستم‌های دورانی میدان آشفتگی k و ε می‌باشد. در معادلات فوق $C_{1\varepsilon} = 1/44$ ، $C_{2\varepsilon} = 1/9$ ، $\sigma_\varepsilon = 1/2$ ، $\sigma_k = 1/0$ می‌باشند.

در مدل $k - \omega SST$ ، لزجت آشفتگی، انرژی جنبشی مغشوش و نرخ اضمحلال آشفتگی ویژه به ترتیب از روابط (7) الی (9) محاسبه می‌شوند.



شکل 3 نمای سه‌بعدی تولیدکننده ورتکس استفاده‌شده در تحقیق حاضر



شکل 4 نحوه قرار گرفتن تولیدکننده‌های ورتکس در چیدمان‌های مختلف الف) 6 تایی خطی ب) 6 تایی مستطیلی ج) 6 تایی مثلثی د) 15 تایی خطی ه) 15 تایی مستطیلی و) 15 تایی مثلثی

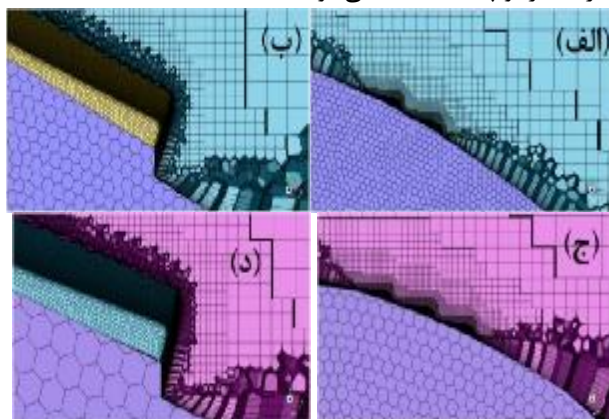
2-2- فرضیات، معادلات حاکم و روش حل

در این شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، جریان آشفته، پایا و تراکم-ناپذیر فرض شده است. معادلات ناویراستوکس که با روش میانگین‌گیری رینولدز، متوسط‌گیری زمانی شده‌اند، حل می‌شوند. در این روش تنش‌های رینولدز که به صورت مجهول در معادلات هستند با استفاده از یک مدل آشفتگی مدل‌سازی می‌شوند. روابط (1) و (2) به ترتیب معادلات پیوستگی و معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری‌شده را برای جریان دائم تراکم‌ناپذیر نشان می‌دهند.

4-2- شبکه‌بندی و بررسی استقلال از شبکه

شبکه‌بندی تمامی مدل‌های هندسی در مطالعه حاضر به کمک نرم‌افزار فلوننت‌مشینگ و با ایجاد سلول‌های چندوجهی - هسته شش‌وجهی صورت می‌گیرد که روی سطوح از المان‌های چندوجهی و در قسمت‌های میانی از المان‌های شش‌وجهی استفاده می‌نماید. به منظور بررسی بهتر جریان در نزدیکی دیواره‌ها و مشاهده رشد لایه مرزی، شبکه منظم با تراکم بیشتر در این نواحی ایجاد شده است. مدل خودرو با چیدمان‌های مختلف تولیدکننده‌های ورتکس که شامل آرایش‌های 6 و 15 عددی تولیدکننده ورتکس هرکدام با چیدمان خطی، مستطیلی و مثلثی است و همچنین مدل خودرو بدون تولیدکننده ورتکس مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل 5 نمای داخلی شبکه اعمال - شده در مدل خودرو شامل 6 و 15 تولیدکننده ورتکس با چیدمان مستطیلی را روی سطح خودرو و سطح تولیدکننده ورتکس، به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.

جدول 1 مشخصات شبکه‌های محاسباتی را که برای بررسی استقلال از شبکه مدل خودرو شامل 6 و 15 تولیدکننده ورتکس با چیدمان مستطیلی و خودرو بدون تولیدکننده ورتکس، به کمک دو مدل مغشوش $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ به کار رفته‌اند، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد شبکه در نزدیکی سطح خودرو و تولیدکننده ورتکس، تغییر محسوسی در ضرایب برآ و پسا مشاهده نمی‌شود.



شکل 5 نمای داخلی شبکه اعمال شده در مدل خودرو شامل 6 و 15 تولیدکننده ورتکس با چیدمان مستطیلی (الف) 6 تایی روی سطح خودرو (ب) 6 تایی روی سطح تولیدکننده ورتکس (ج) 15 تایی روی سطح خودرو (د) 15 تایی روی سطح تولیدکننده ورتکس

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega}\right]} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \\ + D_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (9)$$

که در رابطه (7)، F_2 از رابطه (10) محاسبه می‌شود.

$$F_2 = \tanh \left(\left(\max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right] \right)^2 \right); \quad (10)$$

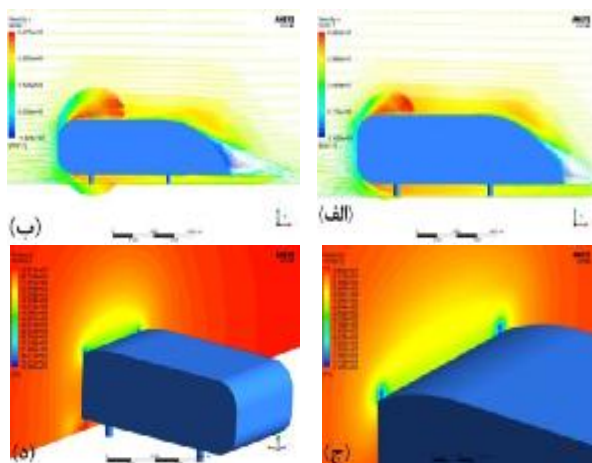
معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته - سازی می‌شوند و سپس بر روی شبکه‌بندی ایجاد شده به کمک نرم‌افزار فلوننت حل می‌شوند. برای حل توام سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. در این الگوریتم ابتدا میدان فشار حدس زده می‌شود و سپس معادلات گسسته مومنتم حل می‌شوند و میدان سرعت در مرحله اول تکرار به دست می‌آید.

3-2- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

برای تحلیل جریان در اطراف خودرو و تولیدکننده‌های ورتکس، دامنه محاسباتی به صورت یک مستطیل در اطراف خودرو در نظر گرفته شده است که فاصله یک وجه آن از جلوی خودرو دو برابر طول خودرو (2/01 متر) و وجه دیگر از قسمت عقب خودرو پنج برابر طول خودرو (5/22 متر) می‌باشد. چرخ‌ها روی سطح این مستطیل قرار گرفته‌اند و فاصله وجه بالایی از سقف خودرو نیز 2 متر می‌باشد. برای اعمال شرایط مرزی در قسمت سطح جلویی این مستطیل، سرعت ورودی 40 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین سطح پشتی با شرط مرزی فشار خروجی¹ با فشار صفر پاسکال، سطوح جانبی و سطح بالایی با شرط مرزی تقارن² و سطح پایینی به عنوان دیواره با شرط عدم لغزش تعیین می‌شوند. سطوح مدل خودرو و تولیدکننده‌های ورتکس نیز به صورت دیواره در نظر گرفته می‌شوند.

¹ Pressure outlet

² Symmetry



شکل 6 بردارهای سرعت و کانتورهای فشار مدل خودرو بدون تولیدکننده ورتکس (الف) بردار سرعت مدل $k - \varepsilon$ (ب) بردار سرعت مدل $k - \omega$ (ج) کانتور فشار مدل $k - \varepsilon$ (د) کانتور فشار مدل $k - \omega$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک ناحیه کم‌فشار در قسمت پشت خودرو وجود دارد. این مسأله به طراح اجازه می‌دهد که یک تولیدکننده ورتکس در این قسمت قرار دهد تا با تزریق انرژی به لایه مرزی، گرادیان فشار مخالف را کاهش داده و جلوی جدایش جریان گرفته شود. جدول 2 ضرایب پسا و برای خودرو بدون تولیدکننده ورتکس را برای دو مدل مغشوش نشان می‌دهد.

جدول 2 ضرایب پسا و برای خودرو بدون تولیدکننده ورتکس

نوع چیدمان و مدل مغشوش	ضریب پسا C_D	ضریب برآ C_L
خودرو بدون تولیدکننده ورتکس، $k - \varepsilon$	0/347	0/398
خودرو بدون تولیدکننده ورتکس، $k - \omega$	0/354	0/416

3-2- مدل خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس

در این حالت جریان اطراف خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس در سه نوع چیدمان خطی، مستطیلی و مثلثی با دو مدل مغشوش $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ شبیه‌سازی شده است. شکل‌های 7، 8 و 9 به ترتیب بردارهای سرعت و کانتورهای فشار را برای دو مدل مغشوش فوق برای چیدمان‌های خطی، مستطیلی و مثلثی نشان می‌دهند.

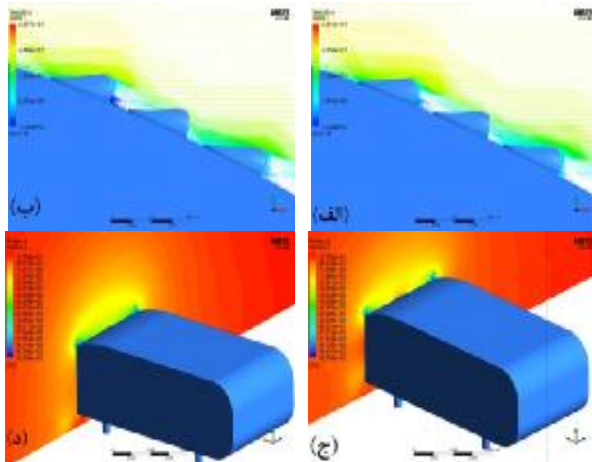
جدول 1 استقلال از شبکه نتایج برای مدل خودرو با 6 و 15 تولیدکننده ورتکس با چیدمان مستطیلی و خودرو بدون تولیدکننده ورتکس

نوع چیدمان	مدل مغشوش	تعداد سلول‌ها	ضریب پسا C_D	ضریب برآ C_L
خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس با چیدمان مستطیلی	$k - \varepsilon$	4782551	0/340981	0/327064
		5071406	0/340981	0/327064
	$k - \omega$	4782551	0/348038	0/387238
		5071406	0/348037	0/387238
خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس با چیدمان مستطیلی	$k - \varepsilon$	8366144	0/343118	0/305964
		8699061	0/343118	0/305964
	$k - \omega$	8366144	0/350325	0/358054
		8850665	0/350324	0/358053
خودرو بدون تولیدکننده ورتکس	$k - \varepsilon$	1861129	0/347252	0/398270
		2069984	0/347252	0/398270
	$k - \omega$	1678568	0/354311	0/416342
		2069984	0/354310	0/416342

3- نتایج و ارزیابی

3-1- مدل خودرو بدون تولیدکننده ورتکس

در این حالت جریان اطراف خودرو با دو مدل مغشوش $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ شبیه‌سازی شده است. شکل 6 بردارهای سرعت و کانتورهای فشار را برای دو مدل مغشوش فوق نشان می‌دهد.



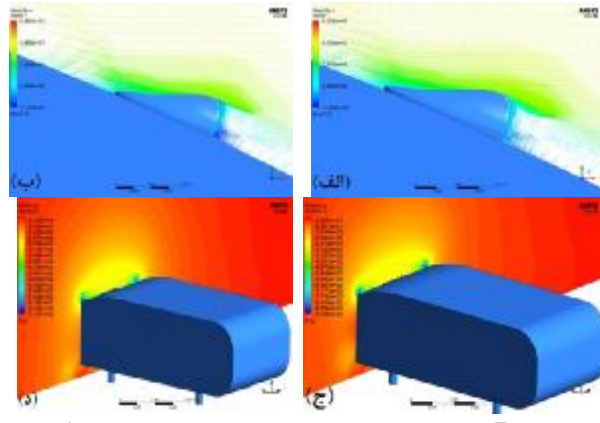
شکل 6 بردارهای سرعت و کانتورهای فشار مدل خودرو با $k - \varepsilon$ تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلثی الف) بردار سرعت مدل $k - \varepsilon$ ب) بردار سرعت مدل $k - \omega$ ج) کانتور فشار مدل $k - \varepsilon$ د) کانتور فشار مدل $k - \omega$

براساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی خودرو با $k - \varepsilon$ تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی با استفاده از مدل مغشوش $k - \varepsilon$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 17/3% و 1/7% کاهش یافته‌اند. همچنین در مدل مغشوش $k - \omega$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 6/7% و 2% کاهش یافته‌اند. مقادیر این ضرایب در جدول 3 نشان داده شده است.

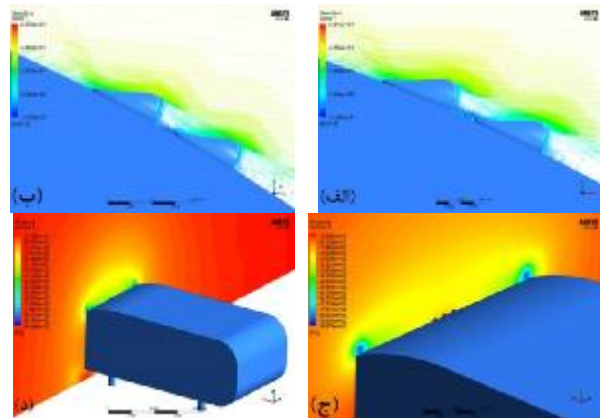
جدول 3 ضرایب پسا و برآی خودرو با $k - \varepsilon$ تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی

نوع چیدمان و مدل مغشوش	ضریب پسا C_D	ضریب برآ C_L
خودرو با $k - \varepsilon$ تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی،	0/341	0/329
خودرو با $k - \omega$ تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی،	0/347	0/388

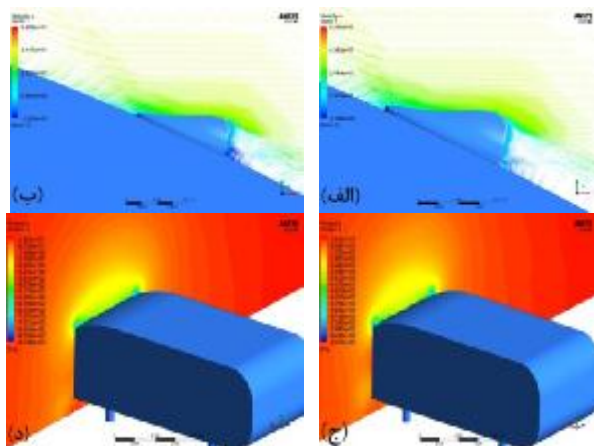
در شبیه‌سازی خودرو با $k - \varepsilon$ تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی با استفاده از مدل مغشوش $k - \varepsilon$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 17/8% و 1/7% کاهش یافته‌اند. همچنین در مدل مغشوش $k - \omega$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 7% و 1/7% کاهش یافته‌اند. مقادیر این ضرایب در جدول 4 نشان داده شده است.



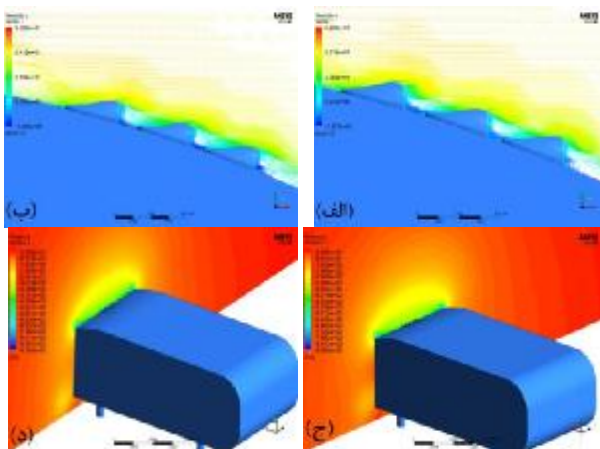
شکل 7 بردارهای سرعت و کانتورهای فشار مدل خودرو با $k - \varepsilon$ تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی الف) بردار سرعت مدل $k - \varepsilon$ ب) بردار سرعت مدل $k - \omega$ ج) کانتور فشار مدل $k - \varepsilon$ د) کانتور فشار مدل $k - \omega$



شکل 8 بردارهای سرعت و کانتورهای فشار مدل خودرو با $k - \varepsilon$ تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی الف) بردار سرعت مدل $k - \varepsilon$ ب) بردار سرعت مدل $k - \omega$ ج) کانتور فشار مدل $k - \varepsilon$ د) کانتور فشار مدل $k - \omega$



شکل 10 بردارهای سرعت و کانتورهای فشار مدل خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی (الف) بردار سرعت مدل $k - \epsilon$ (ب) بردار سرعت مدل $k - \omega$ (ج) کانتور فشار مدل $k - \epsilon$ (د) کانتور فشار مدل $k - \omega$



شکل 11 بردارهای سرعت و کانتورهای فشار مدل خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی (الف) بردار سرعت مدل $k - \epsilon$ (ب) بردار سرعت مدل $k - \omega$ (ج) کانتور فشار مدل $k - \epsilon$ (د) کانتور فشار مدل $k - \omega$

جدول 4 ضرایب پسا و برای خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی

نوع چیدمان و مدل مغشوش	ضریب پسا C_D	ضریب برآ C_L
خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی، $k - \epsilon$	0/341	0/327
خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی، $k - \omega$	0/348	0/387

در شبیه‌سازی خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلی با استفاده از مدل مغشوش $k - \epsilon$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 8/19% و 17/1% کاهش یافته‌اند. همچنین در مدل مغشوش $k - \omega$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 1/9% و 2% کاهش یافته‌اند. مقادیر این ضرایب در جدول 5 نشان داده شده است.

جدول 5 ضرایب پسا و برای خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلی

نوع چیدمان و مدل مغشوش	ضریب پسا C_D	ضریب برآ C_L
خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلی، $k - \epsilon$	0/341	0/319
خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلی، $k - \omega$	0/347	0/378

3-3- مدل خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس

در این حالت جریان اطراف خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در سه نوع چیدمان خطی، مستطیلی و مثلی با دو مدل مغشوش $k - \epsilon$ و $k - \omega$ شبیه‌سازی شده است. شکل‌های 10، 11 و 12 به ترتیب بردارهای سرعت و کانتورهای فشار را برای دو مدل مغشوش فوق برای چیدمان‌های خطی، مستطیلی و مثلی نشان می‌دهند.

جدول 7 ضرایب پسا و برآی خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی

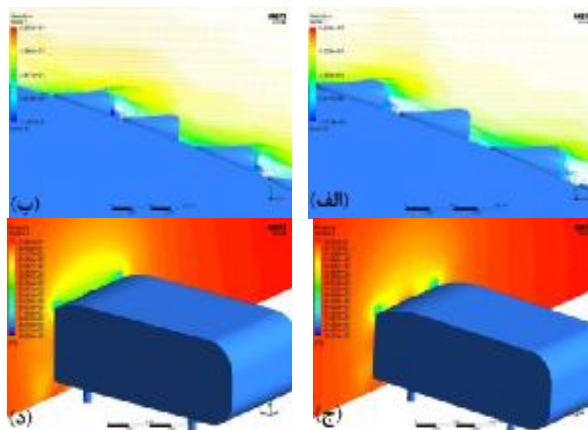
نوع چیدمان و مدل مغشوش	ضریب پسا C_D	ضریب برآ C_L
خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی، $k - \varepsilon$	0/343	0/306
خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی، $k - \omega$	0/350	0/358

در شبیه‌سازی خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلی با استفاده از مدل مغشوش $k - \varepsilon$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 18/6% و 0/2% کاهش یافته‌اند. همچنین در مدل مغشوش $k - \omega$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 2/4% و 0/6% افزایش یافته‌اند. مقادیر این ضرایب در جدول 8 نشان داده شده است.

جدول 8 ضرایب پسا و برآی خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلی

نوع چیدمان و مدل مغشوش	ضریب پسا C_D	ضریب برآ C_L
خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلی، $k - \varepsilon$	0/346	0/324
خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلی، $k - \omega$	0/356	0/406

مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی خودرو با 6 و 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان‌های مختلف با مدل خودرو بدون تولیدکننده ورتکس، تحت عنوان درصد بهبود ضرایب برآ و پسا، برای دو مدل مغشوش $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ به ترتیب در شکل‌های 13 و 14 نشان داده شده است.



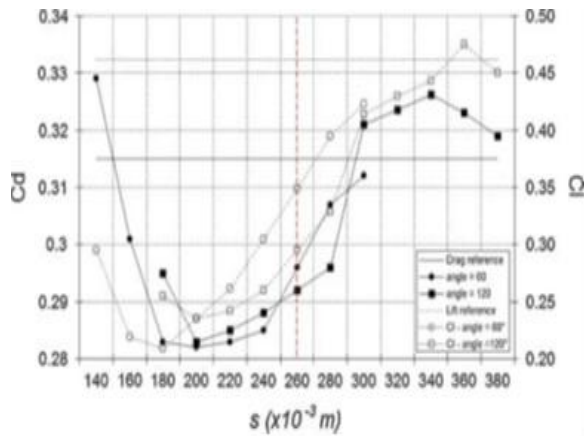
شکل 12 بردارهای سرعت و کانتورهای فشار مدل خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مثلی (الف) بردار سرعت مدل $k - \varepsilon$ (ب) بردار سرعت مدل $k - \omega$ (ج) کانتور فشار مدل $k - \varepsilon$ (د) کانتور فشار مدل $k - \omega$

براساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی با استفاده از مدل مغشوش $k - \varepsilon$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 13/6% کاهش و 0/3% افزایش یافته‌اند. همچنین در مدل مغشوش $k - \omega$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 1/9% و 1/4% افزایش یافته‌اند. مقادیر این ضرایب در جدول 6 نشان داده شده است.

جدول 6 ضرایب پسا و برآی خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی

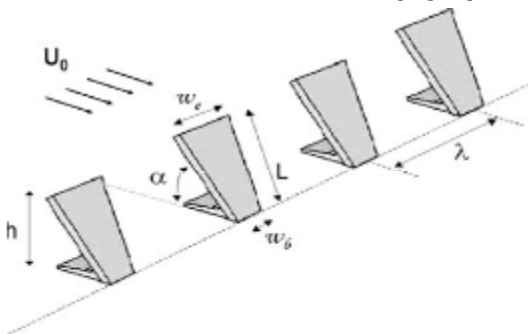
نوع چیدمان و مدل مغشوش	ضریب پسا C_D	ضریب برآ C_L
خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی، $k - \varepsilon$	0/348	0/344
خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان خطی، $k - \omega$	0/359	0/408

در شبیه‌سازی خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس در چیدمان مستطیلی با استفاده از مدل مغشوش $k - \varepsilon$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 23/1% و 1/1% کاهش یافته‌اند. همچنین در مدل مغشوش $k - \omega$ ، ضرایب برآ و پسا نسبت به حالت بدون تولیدکننده ورتکس به ترتیب 13/9% و 1/1% کاهش یافته‌اند. مقادیر این ضرایب در جدول 7 نشان داده شده است.



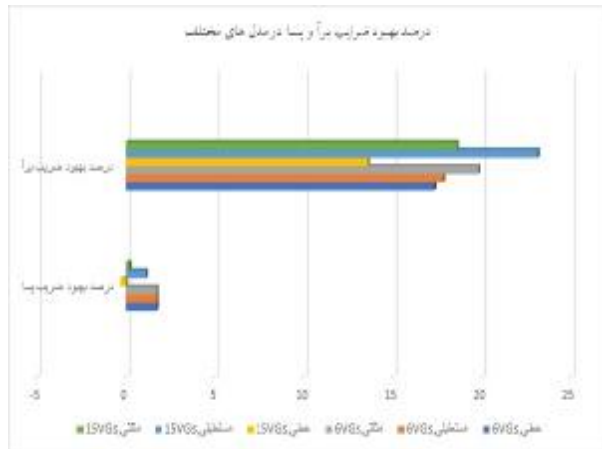
شکل 15 ضرایب برآ و پسا برحسب فاصله s [3]

به منظور صحت‌سنجی روش حل در مطالعه حاضر، ابتدا تعداد 17 تولیدکننده ورتکس دوزنقه‌ای با هندسه نشان‌داده‌شده در شکل 16 مدل شدند (در اینجا از حالت $\alpha = 60^\circ$ استفاده شده است). این تولیدکننده‌های ورتکس در فواصل $s = 0/14$ m و $s = 0/2$ m که پارامتر s در شکل 2 نشان داده شده است، قرار گرفته‌اند و سرعت جریان ورودی در شبیه‌سازی عددی، 20 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

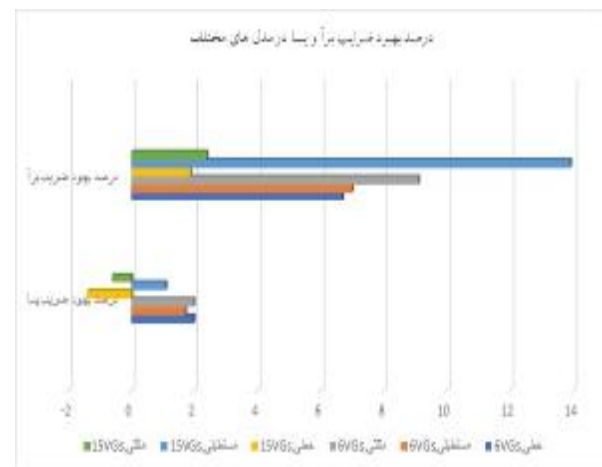


شکل 16 تولیدکننده ورتکس دوزنقه‌ای [3]

شکل 17 نمای داخلی شبکه ایجادشده در مدل خودرو شامل 17 تولیدکننده ورتکس دوزنقه‌ای با چیدمان خطی در فواصل $s = 0/14$ m و $s = 0/2$ m را روی سطح خودرو و سطح تولیدکننده ورتکس نشان می‌دهد.



شکل 13 درصد بهبود ضرایب برآ و پسا برای مدل‌های مختلف چیدمان تولیدکننده‌های ورتکس با استفاده از مدل مغشوش $k - \epsilon$



شکل 14 درصد بهبود ضرایب برآ و پسا برای مدل‌های مختلف چیدمان تولیدکننده‌های ورتکس با استفاده از مدل مغشوش $k - \omega$

4-3- صحت‌سنجی نتایج

جهت صحت‌سنجی روش حل تحقیق حاضر، از مطالعه تجربی آیدر و همکاران [3] استفاده شده است که در آن 17 تولیدکننده ورتکس دوزنقه‌ای به صورت خطی در موقعیت‌های مختلف در قسمت عقب خودروی اصلاح‌شده احمد قرار می‌گیرند و ضرایب برآ و پسا در حالت‌های مختلف در سرعت ورودی 20 متر بر ثانیه به صورت تجربی با تست‌های تونل باد به دست می‌آیند. ضرایب برآ و پسای حاصل از این آزمایش‌های تجربی در شکل 15 قابل مشاهده می‌باشند. در این شکل خطوط کامل ضریب پسا و خطوط نقطه چین ضریب برآ را نشان می‌دهند.

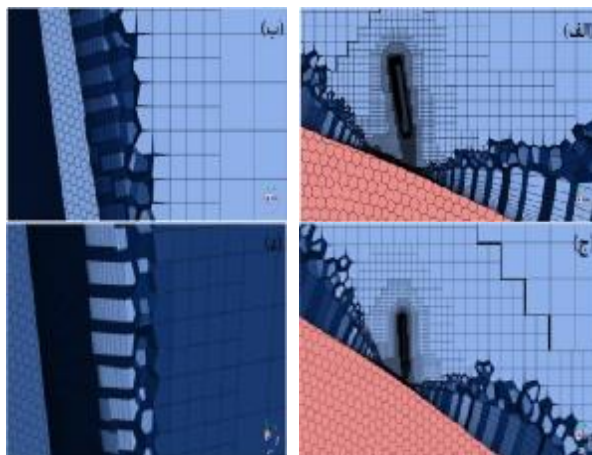
جدول 9 ضرایب برآ و پسای حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و کار تجربی [3]

مشخصات مدل	مدل مغشوش عددی - داده تجربی	ضریب پسای C_D	ضریب برآ C_L
خودرو با 17 تولیدکننده ورتکس دوزنقه-ای در $s = 0/14$ m	$k - \varepsilon$	0/337	0/232
	$k - \omega$	0/342	0/243
	تجربی [3]	0/329	0/299
خودرو با 17 تولیدکننده ورتکس دوزنقه-ای در $s = 0/2$ m	$k - \varepsilon$	0/338	0/283
	$k - \omega$	0/343	0/302
	تجربی [3]	0/284	0/288

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی انجام‌شده در حالت‌های مختلف مشخص می‌گردد، اعمال تولیدکننده‌های ورتکس روی قسمت عقب خودرو در شرایط استفاده از مدل مغشوش $k - \varepsilon$ ، در حالت بهینه، ضریب پسای را 1/7% نسبت به حالت خودرو بدون تولیدکننده ورتکس کاهش می‌دهد که مربوط به مدل خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس با چیدمان‌های خطی، مستطیلی و مثلثی است که در هر سه حالت ضریب پسای 0/341 می‌باشد. به این ترتیب می‌توان گفت مدل خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس با چیدمان‌های خطی، مستطیلی و مثلثی بهترین مدل برای کاهش اتلافات خودرو و صرفه‌جویی در مصرف سوخت است. همچنین مدل مغشوش $k - \varepsilon$ نشان می‌دهد که ضریب برآ در بهترین حالت با اعمال تولیدکننده‌های ورتکس در قسمت عقب خودرو 23/1% نسبت به حالت خودرو بدون تولیدکننده ورتکس کاهش می‌یابد که مربوط به مدل خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس با چیدمان مستطیلی می‌باشد که در این حالت ضریب برآ مقداری برابر با 0/306 دارد که افت ضریب برآ منجر به افزایش نیروی پایین‌بر و در نتیجه بهبود پایداری خودرو می‌گردد.

در شرایط استفاده از مدل مغشوش $k - \omega$ ، استفاده از تولیدکننده‌های ورتکس برای بهبود ضرایب آیرودینامیکی در حالت بهینه، ضریب پسای را نسبت به حالت خودرو بدون تولیدکننده ورتکس 2% کاهش می‌دهد که مربوط به مدل



شکل 17 نمای داخلی شبکه ایجادشده در مدل خودرو شامل 17 تولیدکننده ورتکس دوزنقه‌ای با چیدمان خطی الف) موقعیت $s = 0/14$ m روی سطح $s = 0/14$ m خودرو ب) موقعیت $s = 0/14$ m روی سطح تولیدکننده ورتکس ج) موقعیت $s = 0/2$ m روی سطح خودرو د) موقعیت $s = 0/2$ m روی سطح تولیدکننده ورتکس

ضرایب برآ و پسای به‌دست‌آمده برای این مدل‌ها توسط شبیه‌سازی‌های عددی با دو مدل مغشوش $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ و داده‌های تجربی مرجع [3] در جدول 9 ارائه و مقایسه شده‌اند.

طبق این جدول می‌توان نتیجه گرفت مدل $k - \varepsilon$ در مدل خودرو با 17 تولیدکننده ورتکس دوزنقه‌ای با چیدمان خطی در $s = 0/14$ m برای به دست آوردن ضریب پسای و در مدل خودرو با 17 تولیدکننده ورتکس دوزنقه‌ای با چیدمان خطی در $s = 0/2$ m برای به دست آوردن ضرایب برآ و پسای عملکرد بهتری داشته است. به همین ترتیب مدل $k - \omega$ در مدل خودرو با 17 تولیدکننده ورتکس دوزنقه‌ای با چیدمان خطی در $s = 0/14$ m برای به دست آوردن ضریب برآ عملکرد بهتری داشته است. به طور کلی درصد اختلاف بین نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهند که داده‌ها تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

عدد پیرانتل متناسب با k و ε	σ_ε	خودرو با 6 تولیدکننده ورتکس با چیدمان‌های خطی و مثلثی
عدد پیرانتل متناسب با k و ε	σ_k	است که در این دو حالت ضریب پسا 0/347 می‌باشد. ضریب برآ
ثابت مدل مغشوش	C_1	نیز در این شرایط در بهترین حالت 13/9% نسبت به حالت
ثابت مدل مغشوش	C_2	خودرو بدون تولیدکننده ورتکس کاهش می‌یابد که مربوط به
ثابت مدل مغشوش	$C_{1\varepsilon}$	مدل خودرو با 15 تولیدکننده ورتکس با چیدمان مستطیلی بوده
ثابت مدل مغشوش	$C_{3\varepsilon}$	و ضریب برآ در این مدل 0/358 است.
نرخ اضمحلال آشفتگی ویژه	ω	با توجه به ضرایب برآ و پسای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی
ضریب تصحیح عدد رینولدز پایین	α^*	عددی، مشاهده می‌گردد که با استفاده از هر دو مدل مغشوش
تابع ترکیب وزنی	F_2	$k - \omega$ و $k - \varepsilon$ ، با افزایش تعداد تولیدکننده‌های ورتکس از 6
اثرات تراکم‌پذیری	a_1	به 15 عدد، ضریب پسا افزایش می‌یابد. به همین صورت ضریب
انتشار موثر k	Γ_k	برآ نیز در شرایط استفاده از مدل $k - \omega$ ، با افزایش تعداد
انتشار موثر ω	Γ_ω	تولیدکننده‌های ورتکس به جز در حالت چیدمان مستطیلی
ترم اتلاف k	Y_k	افزایش پیدا می‌کند. بنابراین افزایش تعداد تولیدکننده‌های
ترم اتلاف ω	Y_ω	ورتنکس باعث کاهش ضریب پسا و بهبود راندمان آیرودینامیکی
ترم تولید ω	G_ω	خودرو نمی‌گردد.
اصلاحیه انتشار متقابل	D_ω	

5- فهرست علائم

\bar{u}	سرعت متوسط جریان
x	موقعیت مکانی
y	موقعیت مکانی
ρ	چگالی
\bar{f}_i	نیروهای خارجی
\bar{p}	فشار متوسط گیری شده
δ	تانسور واحد
μ	لزجت دینامیکی
ν	لزجت سینماتیکی
\bar{u}_i	سرعت نوسانی متوسط جریان
μ_t	لزجت آشفتگی
C_μ	ضریب ثابت متناسب با k و ε
k	انرژی جنبشی مغشوش
ε	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی مغشوش
G_k	ترم تولید انرژی ناشی از گرادیان سرعت متوسط جریان
G_b	ترم تولید انرژی ناشی از بویانسی
Y_M	ترم تولید انرژی ناشی از اثرات تراکم‌پذیری جریان
S_k	ترم چشمه
S_ω	ترم چشمه

6- مراجع

- [1] M. Bellman, R. Agarwal, J. Naber and L. Chusak, Reducing energy consumption of ground vehicles by active flow control, *ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability*, 43949 (2010) 785-793, Arizona, USA.
- [2] M. Koike, T. Nagayoshi and N. Hamamoto, Research on aerodynamic drag reduction by vortex generators, *Mitsubishi Motors Technical Review*, 16 (2004) 11-16.
- [3] Jean-Luc Aider, Jean-François Beaudoin and José Eduardo Wesfreid, Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators. *Experiments in Fluids*, 48 (5) (2010) 771-789.
- [4] F. J. Bello Millá, T. M. lelä, L. Paras, C. Del Pino and C. Ferré Experimental study on Ahmed's body drag coefficient for different yaw angles, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 157 (2016) 140-144.
- [5] P. Gillieron and A. Kourta, Aerodynamic drag control by pulsed jets on simplified car geometry, *Experiments in Fluids*, 54 (2) (2013) 1-
- [6] A. Evrard, O. Cadot, C. Sicot, V. Herbert, D. Ricot and R. Vigneron, Comparative effects of vortex generators on Ahmed's squareback and minivan car models, *Journal of Automobile Engineering*, 231 (9) (2017) 1287-1293.
- [7] P. N. Selvaraju and K. M. Parammasivam, Empirical and numerical analysis of aerodynamic drag on a typical SUV car model at different locations of vortex generator, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12 (5) (2019) 1487-1496.
- [8] A. C. Budiman, A. Hapid, S. Kaleb, S. Sudirja and S. H. Winoto, A brief review on ground vehicles aerodynamics due to the presence of stream wise vortices, *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, (2019) 1-5, Tangerang Indonesia.
- [9] A. R. Paul, A. Jain and F. Alam, Drag reduction of a passenger car using flow control techniques, *International Journal of Automotive Technology*, 20 (2) (2019) 397-410.
- [10] R. Miralbes Buil, J. A. Pena Baquedano and D. Ranz Angulo, Experimental full scale tests on vortex generators for heavy vehicles drag reduction, *DYNA engineering magazine*, 93 (1) (2018) 96-101.
- [11] D. Wieser, C. N. Nayeri and C. O. Paschereit, Experiments with vortex generators applied to a notchback car model, *53rd AIAA*

- Aerospace Sciences Meeting*, (2015), Kissimmee, Florida.
- [12] A. Anish, P. G. Suthen and M. K. Viju, Modeling and analysis of a car for reducing aerodynamic forces, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 47 (1) (2017) 1-17.
- [13] Aanchal Yadav, Pooja Rawal and R. K. Mishra, Modeling and simulation of aerodynamic performance of vortex generators for hatchback type cars, *Vibroengineering PROCEDIA*, 21 (2018) 131-136.
- [14] Z. M. Saleh and A. H. Ali, Numerical investigation of drag reduction techniques in a car model, *IOP conference series: Materials Science and Engineering, 3rd International Conference on Engineering Sciences*, 671 (1) (2020), Kerbala, Iraq.
- [15] G. Sivaraj, D. Lakshmanan and R. Veeramanikandan, The computational analysis of sedan car with vortex generator, *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 11 (4) (2015) 1531-1537.
- [16] F. Rahman and I. Thiagarajan, The effect of orientation of vortex generators on aerodynamic drag reduction in cars, *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 4 (7) (2015) 13-20.
- [17] G. Subbiah, A. S. Allaudeen, H. Janarthanam, P. Mani, S. Gnanamani, K.S. Raja and T. A. Raja, Computational investigation and design optimization of vortex generator for a sport utility vehicle using CFD, *AIP Conference Proceedings* 2311 (1) (2020) 090001, Chennai, India.
- [18] S. S. Shivam, A. Guleria and Y. Mukkamala, Aerodynamic drag reduction of a notchback car geometry by delaying flow separation using vortex generators, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4 (08) (2015) 521-524.
- [19] H. Viswanathan, Aerodynamic performance of several passive vortex generator configurations on an Ahmed body subjected to yaw angles, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43 (131) (2021) 1-23.
- [20] G. Shankar and G. Devaradjane, Experimental and computational analysis on aerodynamic behavior of a car model with vortex generators at different yaw angles, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11 (1) (2018) 285-295.