بررسی عددی و تجربی نیروهای آیرودینامیکی وارد بریک مدل پایه خودرو*

محمد حسن جوارشکیان [۱]   رضا شایسته صدفیان [۲]   آیرم آذرخویش [۳]

چکیده در این مقاله جریان در اطراف یک مدل خودروی Notch Back سه بعدی هم به طور عددی و هم به طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته و قسمت‌هایی که اثرات مهمتری در نیروهای پسا و برا دارند، بررسی شده و منحنی های مشخصه آنها رسم گردیده است. تغییرات زاویه شیشهٔ عقب، تغییرات ضخامت صندوق عقب، استفاده از اسپویلر عقب، تغییر فاصله خودرو از زمین، تأثیر حرکت ثابت مدل نسبت به زمین (مدل آزمایشگاهی در تونل باد) و متحرک مدل نسبت به زمین (حرکت واقعی) در نیروهای آیرودینامیکی از جمله مواردی هستند که در این پژوهش بررسی شده‌اند. در شبیه سازی عددی از روش حجم محدود برای شبکه‌های بی سازمان و یک الگوریتم فشار مبنا برای حل معادلات ناویراستوکس استفاده شده و اثر مدل‌های مختلف توربولانس به منظور شبیه‌سازی آشفتگی نیز بررسی گردیده است. در این پژوهش پس از مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و تجربی توزیع فشار، اثر تک تک فاکتورهای اشاره شده به طور تجربی یا عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی آیرودینامیک، تونل‌باد، ضریب پسا، ضریب برا، مدل Notch Back ، حجم محدود، مدل‌های مختلف توربولانس.

Numerical and Experimental Study of Flow Around a Car Model

M.H. Djavareshkian   R. Shayesteh   A. Azar-khish

Abstract *A numerical and experimental study of flow around a car with Notch-Back model is carried out. In this research, the effect of change of frame form in the rear end of the car on Lift and Drag coefficients is investigated and the characteristic curves are obtained. These changes are: 1- rear window inclination 2-rear booth's height 3-rear spoiler 4-trunk height 5- ground and non-ground effects. In the numerical simulation, a pressure-based implicit finite volumes procedure is employed to solve Navier-Stokes equations with different turbulence models on a structure mesh. The pressure coefficient distribution results are compared with experimental data.*

Key Words Aerodynamic, Wind-tunnel, Lift and Drag, Notch Back, Finite Volume, Turbulence Models.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۴/۱/۱۷ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۵/۳/۲۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک

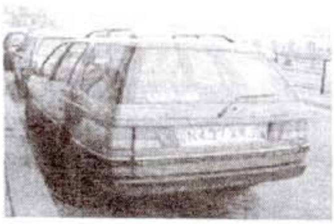
(۲) و (۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک

مقدمه

طراحی بدنه خودرو از نظر آیرودینامیکی و بهبود مستمر آن همواره مورد توجه پژوهشگران و خودروسازان بوده و در این زمینه تحقیقات گستردهای انجام شده است. علت این توجه تاثیر بسزای یک طراحی آیرودینامیکی خوب در بازده و چگونگی عملکرد خودرو میباشد. افزون بر این، موارد زیر نیز مورد توجه پژوهشگران است: ۱- کاهش نیروی مقاومت هوا و در نتیجه کاهش مصرف سوخت ۲- افزایش حداکثر سرعت ۳- هدایت نیروی برآ به سمت پایین و در نتیجه افزایش پایداری خودرو ٤- کاهش سروصدا ٥- بهبود جریان عبوری از سیستم خنککاری خودرو ٦- کنترل اثر نیروهای جانبی(باد جانبی و....) و در نتیجه افزایش پایداری و امنیت خودرو و موارد دیگر.
با توجه به نقش عمده شکل عقب خودرو (صندوق عقب وسپرعقب...) در شکل دنباله جریان خودرو و اهمیت تشکیل این دنباله بر نیروهای برا و پسا سعی بر تمرکز بر روی تاثیر تغییرات عقب بر روی نیروهای برآ و پسا بوده است . تحقیقات اساسی منتشر شده بر روی مدلهای پایه خودروهائی که پشت آنها از نوع Square Back و نوعFast Back شکل (۱) می باشد، در نشریات فنی دیده می شود. از جمله این پژوهشها، میتوان به مقاله Ahmed [1] اشاره نمود. وی مدل سادهای شبیه به یک خودرو از مدلهای فوق در نظر گرفته و با آزمایش مدلهایی با زوایای مختلف شیشه عقب در تونل باد تغییرات ضریب پسای آن را برحسب زاویه شیشه عقب ثبت کردهاست. برخی محققان ازجمله[2,3] مدل یاد شده را به صورت عددی شبیهسازی کردهاند.

از آنجا که نتایج ثبت شده توسط Ahmed محدود میباشد، معیار مقایسه نتایج این کارهای عددی نیز عموماً محدود به تغییرات ضریب پسا بوده است. آزمایشات دقیقی بر روی این مدل توسط [4,5] انجام گرفته است و نتایج تجربی مختلفی مانند توزیع بردارهای سرعت، تنش های رینولدز و غیره توسط دستگاه LDA اندازهگیری و ثبت شده است. اما از آنجا که بیشتر خودروهای امروزی از نوع Notch Back می باشند، شایسته [٦] سعی نمود مدلی از این نوع خودرو را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دهد. به دلیل اینکه مدل پایهای از این نوع که کار تجربی منتشر شده داشته باشد در نشریات فنی پیدا نشده است، جوارشکیان و همکارانش [۷] سعی نمودند بر روی مدل یاد شده مطالعه تجربی به انجام رسانند.

Fast Back



Square Back

Notch Bach

شکل۱ تقسیم بندی خودروها از نقطه نظر شکل قسمت عقب خودرو

هدف این پژوهش، مطالعه تجربی و عددی بر روی یک مدل پایه از این نوع و استخراج منحنی های مشخصه به منظور بهینه سازی قسمت عقب مدل مورد

اشاره می‌باشد. در این شبیه سازی، به منظور استفاده کاربردی از مدل مطالعه شده کوشش شده مدل پایه انتخابی با پژو ۴۰۵ تشابه داشته باشد.

شبیه سازی عددی

معادلات حاکم بر مسئله. معادله‌های حاکم بر جریان مغشوش و تراکم ناپذیر، معادله بقای جرم و معادلات بقای مومنتوم‌اند که به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \qquad (۱)$$

$$\rho\frac{Du_i}{Dt}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)+S_i \qquad (۲)$$

S_i معرف جمله‌های چشمه مومنتم می‌باشد. در معادلات ناویراستوکس عبارت $(-\rho\overline{u_i' u_j'})$ معرف تنش‌های رینولدز است که به کمک یک مدل توربولانس جایگزین می‌شود. از آنجا که در این پژوهش جریان در عقب مدل جدا شده و گردابه‌ها نقش اساسی در شکل جریان و نیروهای آیرودینامیکی دارند، تنها به معادلات مدل توربولانس RSM (Reynolds Stress Model) که در این گونه مسائل بخوبی جواب می‌دهند، اشاره شده است. معادله‌های این مدل در غیاب نیروهای گرانشی به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}(-\rho\overline{u_i' u_j'})+\frac{\partial}{\partial x_k}(-\rho U_k\overline{u_i' u_j'})=\\&-\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\rho\overline{u_i' u_j' u_k'}+\overline{p(\delta_{kj}u_i+\delta_{ik}u_j)}\right]\\&+\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\mu\frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u_i' u_j'})\right]\\&-\rho\left(\overline{u_i' u_k'}\frac{\partial U_j}{\partial x_k}+\overline{u_j' u_k'}\frac{\partial U_i}{\partial x_k}\right)\\&+\overline{p\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)}-2\mu\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}}\end{aligned} \qquad (۳)$$

جمله‌های رابطه بالا به ترتیب عبارتند از: نرخ تغییرات تنش‌های رینولدز، میزان جا به جایی تنش، پخش متلاطم، پخش مولکولی، تولید تنش، جمله فشار- تغییر بعد (Pressure Strain) و پراکندگی تنش‌های رینولدز که از آن میان جملات پخش متلاطم، فشار- تغییر بعد و پراکندگی به صورت زیر مدلسازی می‌شوند.

جمله پخش متلاطم(D_{ij}^T)، با مدل ساده شدهٔ دیفیوژن- گرادیان که توسط دیلی و هارلو ارائه گردیده، مدل شده است[8] :

$$D_{ij}^T=\frac{\partial}{\partial x_l}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial\overline{u_i u_j}}{\partial x_l}\right) \qquad (٤)$$

دررابطهٔ بالا $\sigma_k = ۰/۸۲$ بوده و μ_t معرف ویسکوزیتهٔ متلاطم است که از رابطهٔ زیر محاسبه می شود:

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۵)$$

برای مدل کردن جملهٔ فشار- تغییر بعد از مدل خطی ارائه شده توسط گیبسون و لاندر [9] استفاده شده و جمله پخش متلاطم با استفاده از مدل (Kolmogrov)[10] مدلسازی شده است که به صورت زیر می‌باشد:

$$\varepsilon_{ij}=\frac{2}{3}\delta_{ij}\rho\varepsilon \qquad (٦)$$

در این رابطه داریم:

$$\varepsilon=\nu\overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} \qquad (۷)$$

از آنجا که یک جریان مغشوش در فواصل بسیار نزدیک به سطح دیواره به صورت جریان آرام در می‌آید، معادلات توربولانس در این نواحی حل نمی‌شوند، بلکه معمولاً با استفاده از یک سری توابع به نام تابع دیواره توزیع سرعت تخمین زده می‌شود. در اینجا به منظور افزایش دقت در پیشبینی جدایش جریان بر روی سطح، از تابعی معروف به "Non Equilibrium W.F." [11] استفاده کرده‌ایم که بر خلاف تابع دیواره

استاندارد، توزیع سرعت محاسبه شده توسط آن به مقدار گرادیان فشار بر روی سطح نیز حساس است و از این رو، پیش بینی‌های دقیق‌تری دارد. معادله این تابع به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{\tilde{U} C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w/\rho} = \frac{1}{\kappa}\ln\left(E\frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu}\right) \qquad (۸)$$

که در آن:

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2}\frac{dp}{dx}\left[\frac{y_v}{\rho\kappa k^{1/2}}\ln\left(\frac{y}{y_v}\right) + \frac{y - y_v}{\rho\kappa k^{1/2}} + \frac{y_v^2}{\mu}\right]$$

(۹)

در این روابط y_v ضخامت زیر لایه لزج است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$y_v \equiv \frac{\mu y_v^*}{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}} \quad \text{و} \quad y_v^* = 11.225 \qquad (۱۰)$$

$\kappa = 0.41$ ثابت فون‌کارمن، $E = 9.81$ یک ثابت تجربی، $C_\mu = 0.09$ و U بیانگر سرعت متوسط می‌باشد. همچنین به منظور حل معادله انرژی توربولانس، در سلول‌های مجاور سطح از فرضیات زیر استفاده می‌شود:

$$k = \begin{cases} (\frac{y}{y_v})^2 k_p, y < y_v \\ k_p, y > y_v \end{cases} \qquad \varepsilon = \begin{cases} \frac{2\nu k}{y^2}, y < y_v \\ \frac{k^{3/2}}{C_l y}, y > y_v \end{cases}$$

$$\tau_t = \begin{cases} 0, y < y_v \\ \tau_w, y > y_v \end{cases} \qquad (۱۱)$$

در این روابط k_p مقدار انرژی توربولانس در نقطه P است و $C_l = \kappa C_\mu^{-3/4}$، شکل (۲). مقدار تولید متوسط انرژی توربولانس و متوسط پراکندگی آن برای یک شبکه مکعبی به صورت زیر تقریب زده می‌شوند[12] :

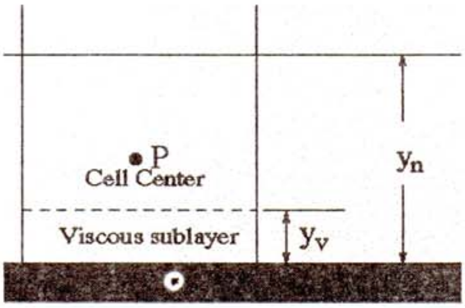
$$\overline{G_k} = \frac{1}{y_n}\int_0^{y_n} \tau_t \frac{\partial U}{\partial y} dy \equiv \frac{1}{\kappa y_n}\frac{\tau_w^2}{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}\ln\left(\frac{y_n}{y_v}\right)$$

(۱۲)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{y_n}\int_0^{y_n} \varepsilon dy \equiv \frac{1}{y_n}\left[\frac{2\nu}{y_v} + \frac{k_p^{1/2}}{C_l}\ln\left(\frac{y_n}{y_v}\right)\right] k_p$$

(۱۳)

در این روابط $y_n = 2y_p$ است، (شکل ۲).



شکل ۲ نشانه‌های به کار رفته در رابطه تابع دیواره

روش حل معادلات. در این شبیه سازی به منظور گسسته‌سازی جمله های جا به جایی در معادلات میان‌یابی فشار، مومنتوم، معادلات توربولانس و تنش‌های رینولدز از روش درون یابی یا برون یابی (اسکیم) بالادست مرتبه دوم (Second Order Upwind) استفاده شده است. در این روش جمله جا به جایی در هر سلول از مقدار موجود در سلول بالادست و ضریبی از گرادیان آن به دست می‌آید. معادلات حاکم به صورت جداگانه (Segregated) و ارتباط بین فشار و سرعت توسط الگوریتم فشار مبنای SIMPLE بر قرار شده است. به منظور دستیابی به همگرایی مسئله، نخست از روش درون‌یابی یا برون‌یابی مرتبه اول بالا دست برای گسسته‌سازی استفاده شده، سپس روش درون یابی یا برون‌یابی مرتبه دوم برای بهبود نتایج به کار گرفته شده است.

شرایط مرزی مسئله. محدوده محاسباتی برای شبیه‌سازی این مدل به صورت یک مکعب مستطیل

است که درشکل(۳) مشاهده می‌شود. همان گونه کـه از شکل پیداست تنها نیمی از بدنه مدل سازی شده اسـت چرا که نسبت به صفحه طولی متقارن می‌باشد و از ایـن رو، مرزها عبارتند از:

۱- مرز ورودی با شرط سرعت ثابت در نظر گرفته شده است. در این مـرز متغیرهـای توربـولانس بـه صـورت شدت توربـولانس (I) کـه مقـدار آن در تونـل بـاد بـه کیفیت فن و سایر تجهیـزات تونـل بسـتگی دارد برابـر ۰/۰۱ و طول مشخصه (l) برابر طول مدل وارد شده‌اند. این مقادیر با آزمون تجربی این مدل در تونل باد مطـابق می‌باشد. همچنین به دلیل استفاده از مدل RSM باید در مرز ورودی مقدار تنش‌های رینولدز نیز مشخص گردد. این مقادیر از روابط زیر جایگزین می‌شوند:

$$\overline{u_i'^2} = \frac{2}{3}k \quad \text{و} \quad \overline{u_i'u_j'} = 0 \qquad (۱٤)$$

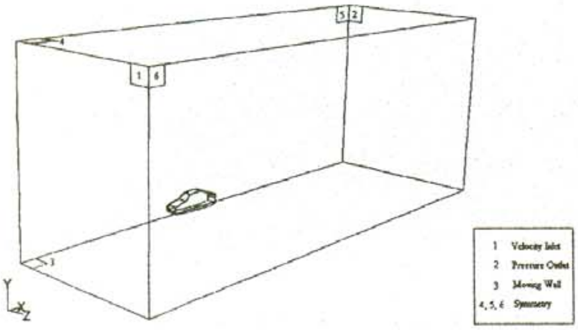
در این رابطه k و ε به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$k = 1.5(Iu_{avg})^2 \qquad \varepsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{l} \qquad (۱۵)$$

۲- مرز خروجی با شرط فشار ثابت در نظر گرفته شـده است. فشار در این مرز برابر با فشار جو می باشد.

۳- در سطح زیرین مکعب مستطیل یـک دیـواره ثابـت داریم.

٤- سه سطح باقی مانده عبارتنـد از: سـطح بـالایی و دو سطح جانبی مکعب مستطیل که به صورت شرط مـرزی تقارن (Symmetry) در نظر گرفته شده‌انـد. در انتخـاب ابعاد مکعب مستطیل یاد شده، مرزهـا را آنقـدر از مـدل دور کرده‌ایم تا اثر محل آنها بر جواب از بین برود. اگـر طول مدل را L فرض کنیم، این فواصل بـه ترتیـب، 3L در جلــو، 4L در عقــب، 2L در پهلــو و 3L در بــالا می‌باشند.



شکل۳ محدوده محاسباتی و شرایط مرزی مسئله

اصول حاکم بر آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از مـدل خـودروی پـژو ٤۰۵ بـه عنوان مدل پایه استفاده گردید. دلیل این انتخـاب تولیـد خودرو یاد شده در داخل کشور مـی باشـد تـا بتـوان از نتایج این تحقیق استفاده کاربردی هم نمـود. بـه همـین جهت از مدل ساده شده بدنه پژو بدون جزئیاتی از قبیل آینه‌ها، آنتن و چرخ ها و.... اسـتفاده گردیـد. توجـه بـه ضریب اندازه(Block age) به عنـوان یـک پـارامتر مهـم اولین نکته اساسی برای ساخت مدل مـی باشـد. مقـدار پیشنهادی برای مدل بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ می‌باشد تـا بتـوان از اثرات جریان سـیال روی دیـواره‌هـای جـانبی مقطـع آزمایش بر سطح مدل چشمپوشی نمود؛ به عبارت دیگر حرکت سیال روی دیواره هـا فـوق بـر مـدل بـی اثـری باشد. در این تحقیق مقدار انتخابی برای این ضریب، بـا توجـه بـه شـرایط آزمایشـگاهی و تونـل بـاد، ۰/۰۸ می باشد که بـر طبـق آن ضـریب مقیـاس مـدل ۱/۱٦ انتخاب شده است[13,14, ۱۵].

شرایط انجام آزمایش. در این تحقیـق بـا توجـه بـه امکانات آزمایشگاهی موجود، تغییـرات ضـرایب بـرآ و پسـا در چهـار سـرعت مختلـف ۱۲m/s، ۱٦m/s، ۲۰m/s و ۲٤m/s و برای سه ارتفاع مختلف صندوق عقب و سه زاویه مختلـف شیشـه عقـب بررسـی شـده است. برای زاویـه شیشـه عقـب، تغییـرات از ۵ درجـه

است که درشکل(۳) مشاهده می‌شود. همان گونه کـه از شکل پیداست تنها نیمی از بدنه مدل سازی شده اسـت چرا که نسبت به صفحه طولی متقارن می‌باشد و از ایـن رو، مرزها عبارتند از:

۱- مرز ورودی با شرط سرعت ثابت در نظر گرفته شده است. در این مـرز متغیرهـای توربـولانس بـه صـورت شدت توربـولانس (I) کـه مقـدار آن در تونـل بـاد بـه کیفیت فن و سایر تجهیـزات تونـل بسـتگی دارد برابـر ۰/۰۱ و طول مشخصه (l) برابر طول مدل وارد شده‌اند. این مقادیر با آزمون تجربی این مدل در تونل باد مطـابق می‌باشد. همچنین به دلیل استفاده از مدل RSM باید در مرز ورودی مقدار تنش‌های رینولدز نیز مشخص گردد. این مقادیر از روابط زیر جایگزین می‌شوند:

$$\overline{u_i'^2} = \frac{2}{3}k \text{ و } \overline{u_i'u_j'} = 0 \qquad (۱۴)$$

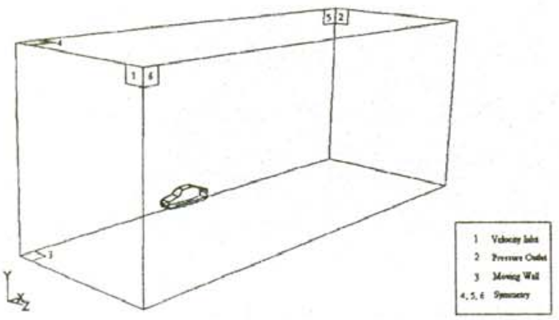
در این رابطه k و ε به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$k = 1.5(Iu_{avg})^2 \qquad \varepsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{l} \qquad (۱۵)$$

۲- مرز خروجی با شرط فشار ثابت در نظر گرفته شـده است. فشار در این مرز برابر با فشار جو می باشد.

۳- در سطح زیرین مکعب مستطیل یـک دیـواره ثابـت داریم.

٤- سه سطح باقی مانده عبارتنـد از: سـطح بـالایی و دو سطح جانبی مکعب مستطیل که به صورت شرط مـرزی تقارن (Symmetry) در نظر گرفته شده‌انـد. در انتخـاب ابعاد مکعب مستطیل یاد شده، مرزهـا را آنقـدر از مـدل دور کرده‌ایم تا اثر محل آنها بر جواب از بین برود. اگـر طول مدل را L فرض کنیم، این فواصل بـه ترتیـب، 3L در جلـو، 4L در عقـب، 2L در پهلـو و 3L در بـالا می‌باشند.



شکل۳ محدوده محاسباتی و شرایط مرزی مسئله

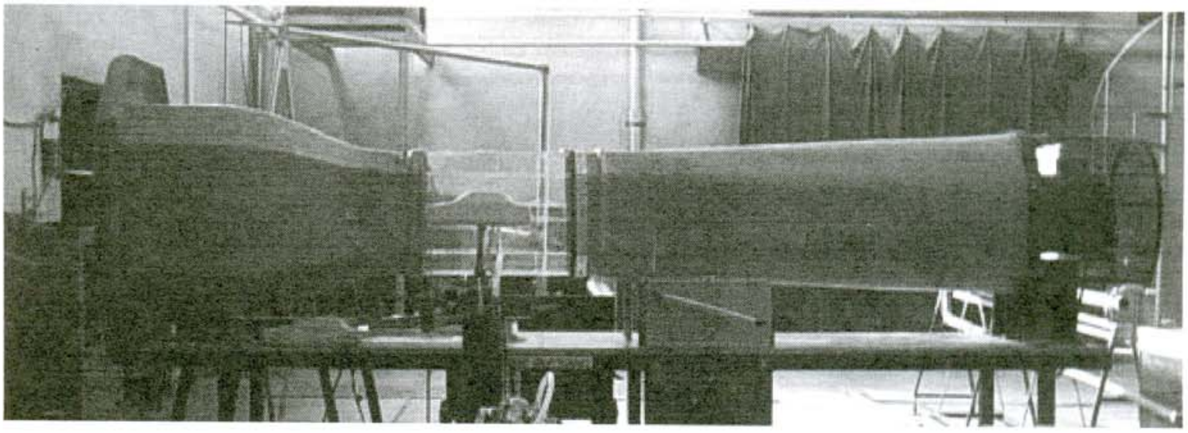
اصول حاکم بر آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از مـدل خـودروی پـژو ٤۰۵ بـه عنوان مدل پایه استفاده گردید. دلیل این انتخـاب تولیـد خودرو یاد شده در داخل کشور مـی باشـد تـا بتـوان از نتایج این تحقیق استفاده کاربردی هم نمـود. بـه همـین جهت از مدل ساده شده بدنه پژو بدون جزئیاتی از قبیل آینه‌ها، آنتن و چرخ ها و.... اسـتفاده گردیـد. توجـه بـه ضریب اندازه(Block age) به عنـوان یـک پـارامتر مهـم اولین نکته اساسی برای ساخت مدل مـی باشـد. مقـدار پیشنهادی برای مدل بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ می‌باشد تـا بتـوان از اثرات جریان سـیال روی دیـواره‌هـای جـانبی مقطـع آزمایش بر سطح مدل چشمپوشی نمود؛ به عبارت دیگر حرکت سیال روی دیواره هـا فـوق بـر مـدل بـی اثـری باشد. در این تحقیق مقدار انتخابی برای این ضریب، بـا توجـه بـه شـرایط آزمایشـگاهی و تونـل بـاد، ۰/۰۸ می باشد که بـر طبـق آن ضـریب مقیـاس مـدل ۱/۱٦ انتخاب شده است[۱۵ ,14,13].

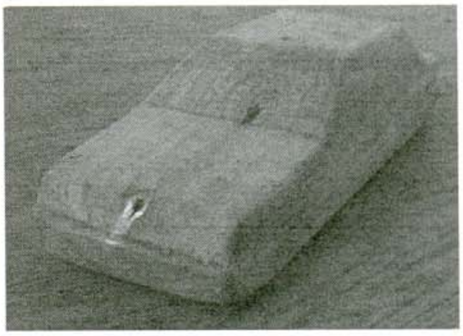
شرایط انجام آزمایش. در این تحقیـق بـا توجـه بـه امکانات آزمایشگاهی موجود، تغییـرات ضـرایب بـرآ و پسـا در چهـار سـرعت مختلـف ۱۲m/s، ۱٦m/s، ۲۰ m/s و ۲٤ m/s و برای سه ارتفاع مختلف صندوق عقب و سه زاویه مختلـف شیشـه عقـب بررسـی شـده است. برای زاویـه شیشـه عقـب، تغییـرات از ۵ درجـه

مثبت (Angle +5) تا ۵ درجه منفی (Angle -5) نسبت به شرایط فعلی پژو ٤۰۵ (Angle 0) بررسی شده است. ارتفاع صندوق عقب از ۳ میلیمتر کمتر(Rear H -3) تا ۳ میلیمتر بیشتر (Rear H+3) از شرایط فعلی خودروی یاد شده (Rear H 0) مورد مطالعه قرار گرفته است. برای درک تأثیر زمین بر روی جریان در اطراف خودرو تمامی این آزمایشات در دو حالت بدون تاثیر زمین (non Ground Effect)، یعنی مدل در وسط مقطع آزمایش که از دیواره‌های جانبی اثری نمی‌پذیرند، و دیگری با تاثیر زمین(Ground Effect)، یعنی با ارتفاع کم از سطح مقطع کف آزمایش که این مقطع نقش زمین را دارد و می تواند بر نتایج روی مدل اثر بگذارد، انجام گردیده است. افزون بر این، با بهره گیری از لوله پیزومتر چگونگی توزیع فشار بر روی بدنه خودرو در حالت بهینه نیز برای درک رفتار فیزیکی جریان به دست آمده است.

نحوه آزمایش. در این آزمایش از تونل باد تحقیقاتی، شکل (٤- الف)، ساخت شرکت مارک‌آرمفلید انگلستان استفاده شده است. این تونل از نوع مدار باز با مقطع مربع شکل در قسمت آزمایش، به طول ضلع ۳۰ سانتیمتر، می‌باشد که حداکثر سرعت قابل دست‌یابی آن ۲۵ متربر ثانیه می باشد. شکل های (٤- ب و ج) دو مدل آزمایشگاهی، بدون سوراخ و با تعدادی سوراخ، برای گیج های



الف ـ تونل باد



ب ـ مدل آزمایشگاهی

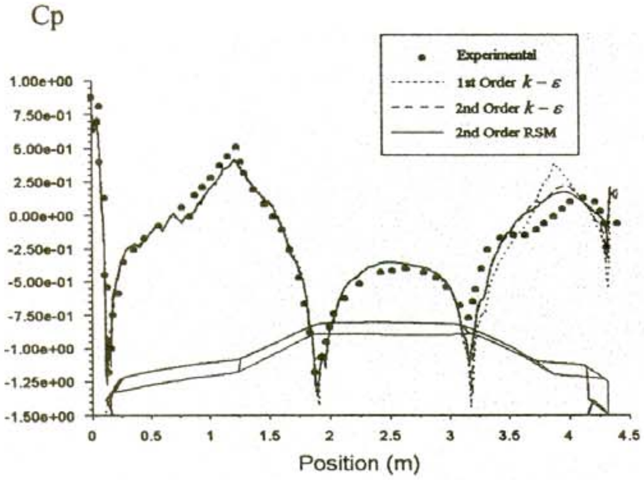
ج ـ مدل آزمایشگاهی با تعدادی سوراخ برای گیج فشار

شکل ۴ تونل باد مدار باز و مدل استفاده شده

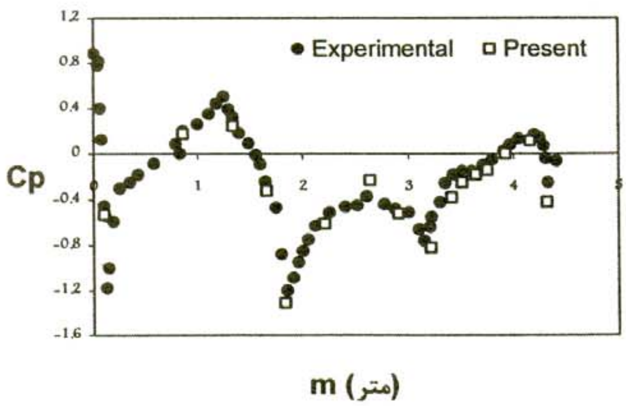
فشار را نشان می دهند. مدل ها بر روی یک میله فلزی نازک به قطر ۹ میلیمتر سوار شده‌اند وتوسط این میله به دستگاه بالانس آیرودینامیکی مرتبط می شود. برای دستیابی به ضرایب برآ و پسا، نخست نیروهای آیرودینامیکی برای میله نگه دارنده توسط دستگاه بالانس، محاسبه شده و سپس از نیروهای اندازه گیری شده برای مدل و میله نگه دارنده کسر شده‌اند. افزون بر این، ضرایب توسط روابط ریاضی نیز محاسبه گردیده‌اند.

نتایج

در شبیه سازی عددی به منظور ایجاد شبکه هایی با کیفیت مناسب و رسیدن به دقت همگرائی بالاتر، از یک شبکه بندی بی سازمان از نوع چهار وجهی استفاده گردیده است. نخست شبکه با تعداد المان های حجمی ٦٥٠ هزار عدد شروع و در حالت مستقل از شبکه این تعداد به ۹۰۰ هزار سلول افزایش یافته است. شکل (۵) مقایسه توزیع ضریب فشار روی سطح خودرو که توسط روش‌های عددی و تجربی استخراج گردیده با نتایج تجربی منتشر شده [١٦] را نشان می‌دهد. در شکل (۵-الف) تاثیر مدل‌های توربولانس $k-\varepsilon$ استاندارد و RSM بر نتایج عددی قابل مشاهده می‌باشد. همان طور که دیده می‌شود هر دو مدل در بیشتر نقاط بدنه تطابق خوبی را نشان می‌دهند. در قسمت عقب خودرو نتایج هر دو مدل از مقادیر تجربی فاصله گرفته است ولی مدل RSM جواب‌های نزدیکتری داده است. ضریب فشار محاسبه شده در زیر خودرو توسط مدل‌های مختلف در شکل (٦) دیده می‌شود. همان طور که ملاحظه می شود مدل‌های مختلف به جز در قسمت انتهایی بدنه تاثیر ندارند. ضریب پسای محاسبه شده توسط دو مدل توربولانس و همچنین روش‌های درون یابی یا برون‌یابی مرتبه اول و دوم برای گسسته‌سازی در جدول(۱) مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود کمترین اختلاف نتایج با نتیجه تجربی به مدل RSM مربوط می‌شود. نتایج این آزمایش در شرایط آزمایشگاهی دمای ۲۲ درجه سانتیگراد و فشار ٦٨٤ میلیمتر جیوه استخراج گردیده است. این مقایسه تطابق خوبی را نشان می دهد و روند تحقیق را تایید می‌نماید.

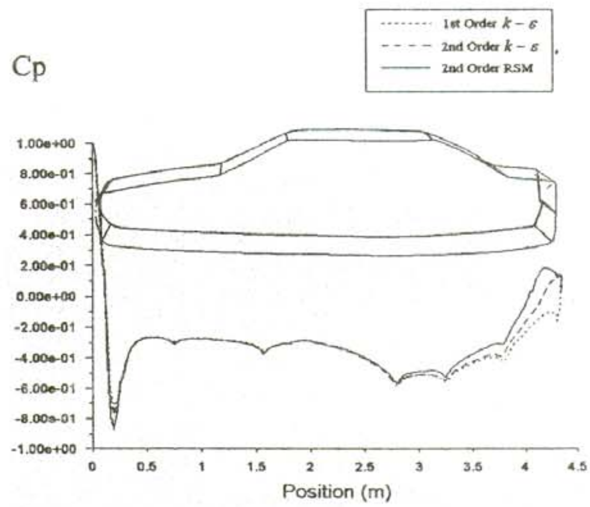


الف- مقایسه ضریب فشار محاسبه شده توسط مدل‌های توربولانس با نتایج تجربی منتشر شده



ب- مقایسه ضریب فشار تجربی کار حاضر با نتایج تجربی منتشر شده

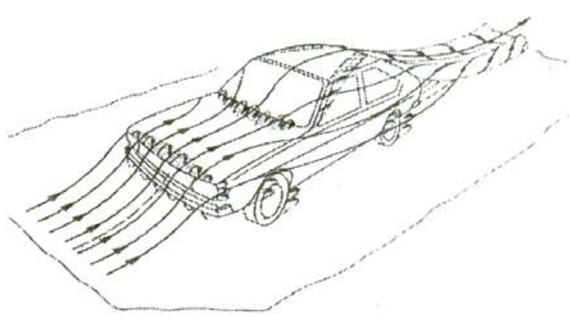
شکل ۵ مقایسه ضریب فشار محاسبه شده در روی بدنه توسط مدل‌های توربولانس با نتایج تجربی



شکل ٦ مقایسه ضریب فشار محاسبه شده در زیر بدنه توسط مدل های مختلف توربولانس

جدول۱ مقایسه ضرایب پسای محاسبه شده توسط مدل های توربولانس و مقدار تجربی

	First order k-e	Second order k-e	Second order RSM	Experimental
Cd	0.278	0.212	0.209	0.2054

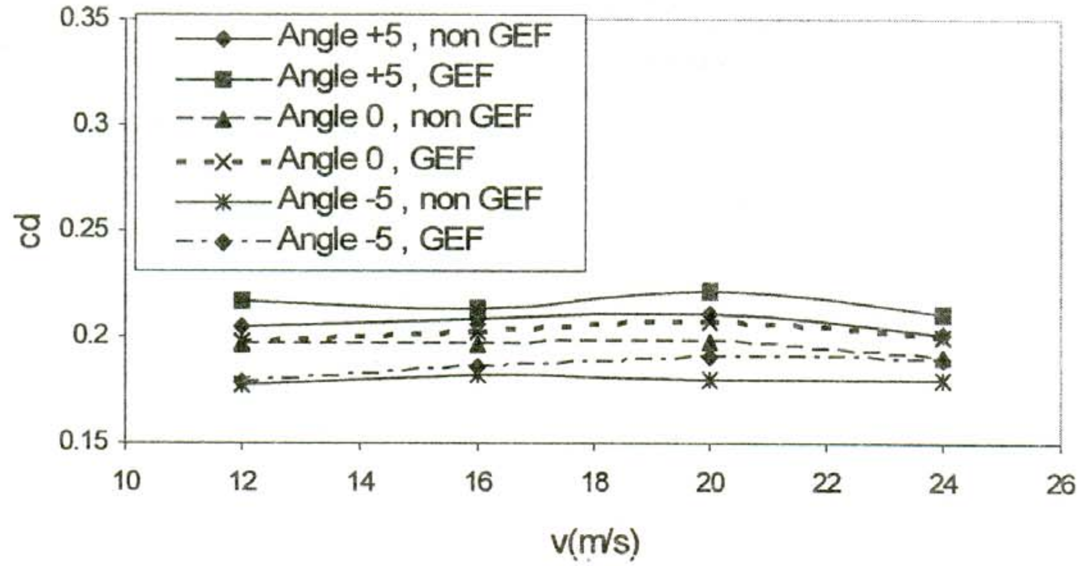


شکل ۷ خطوط جریان در اطراف بدنه یک خودرو

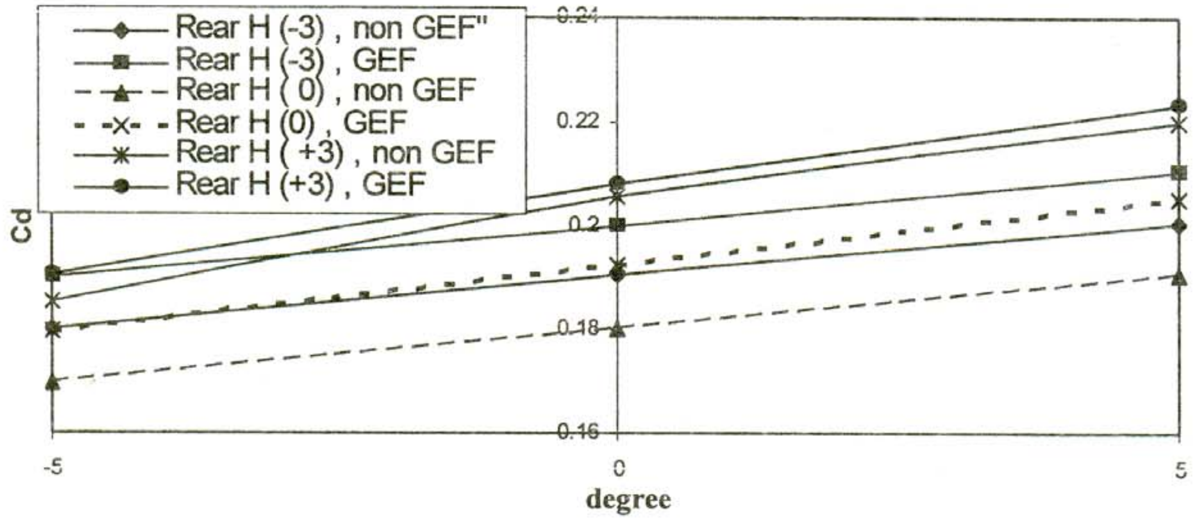
با توجه به اینکه هر بار شبیه سازی عددی برای یک شبکه سه بعدی با مدل مناسب توربولانس بیش از ده ساعت طول می کشد و از طرف دیگر زمان پیدا نمودن شبکه مستقل برای هر تغییرات به زمان فوق افزوده می شود و نیز از آنجا که هدف این تحقیق بررسی اثر تغییرات داده شده روی مدل و نتیجه این تغییرات روی ضرایب آیرودینامیکی می باشد، در شکل های (۸-۱۰)، نتایج ارائه شده صرفاً تجربی بوده و در شکل های (۱۱-۱٤) نتایج تولید شده با شبیه سازی‌های عددی در حالت دو بعدی به دست آمده است.

شکل (۸) توزیع ضریب پسا با سرعت را برای حالت های بدون اثر زمین و با اثر زمین و در حالاتی که شیشه عقب نسبت به محل اتصال آن به صندوق عقب از ۵ درجه مثبت (جهت عقربه های ساعت) تا ۵ درجه منفی تغییر کرده است، نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با کاهش زاویه شیشه عقب ضریب پسا کاهش می یابد که البته برای کاهش آن دلیل فیزیکی وجود دارد.

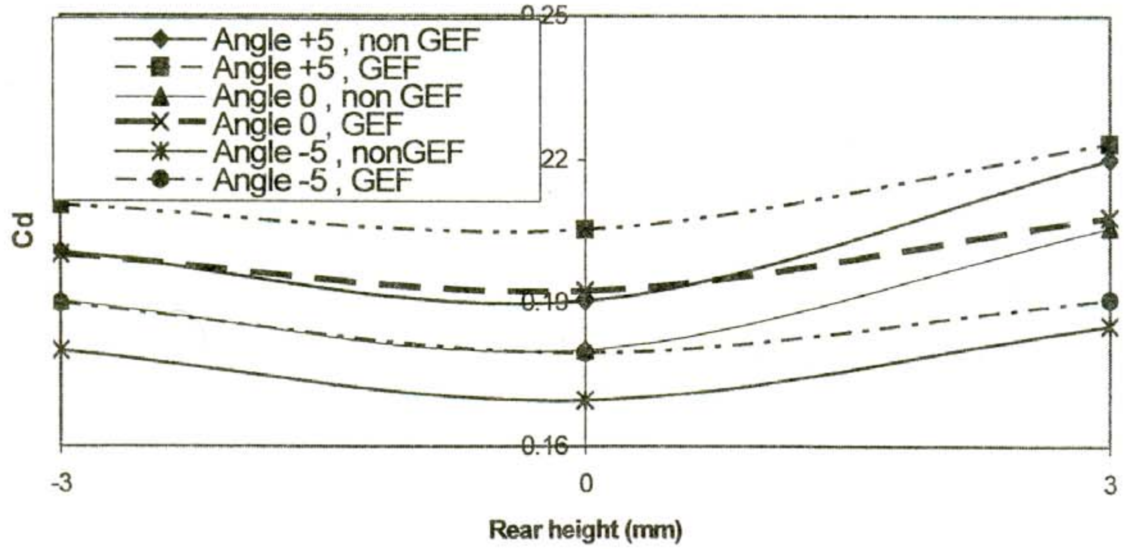
همان طور که در شکل (۷) ملاحظه می شود دو نوع گردابه تشکیل می‌شود: یکی گردابه دو بعدی که محور آن بر خطوط جریان عمود می‌باشد و بیشتر در محل تقاطع شیشه جلو و درب موتور ، تقاطع شیشه عقب و صندوق عقب در لبه جلوی سقف و ... تشکیل می‌شود و دیگری یک گردابه مخروطی سه بعدی که در مورد آن محور جدایش با خطوط جریان موازی می‌باشد. بخش عمده این نوع گردابه در محل ستون شیشه عقب می‌باشد. از مشخصه‌های این جدایش گسترش زیاد آن در گردابه عقب خودرو می‌باشد. حال با کاهش زاویه شیشه عقب یعنی افزایش شیب شیشه، محل جدایش جریان از شیشه عقب به سمت پایین‌تر منتقل شده و جدایش دو بعدی کوچکتری در این قسمت تشکیل می‌گردد که در نتیجه آن منطقه پرفشار در این قسمت کاهش می‌یابد و این باعث کاهش ضریب پسا می‌شود. بنابراین کاهش زاویه شیشه عقب در کاهش ضریب پسا مؤثر می باشد. همچنین این نمودار نشان می دهد افزایش سرعت تغییرات قابل ملاحظه ای در ضریب پسا در هر حالت ندارد. این نکته در مباحث آیرودینامیک در رژیم سیال غیر قابل تراکم نیز مشاهده می شود.



شکل ۸ تغییرات ضریب پسا بر حسب سرعت در ارتفاع صندوق عقب ۳ میلیمتر کمتر از حالت پایه



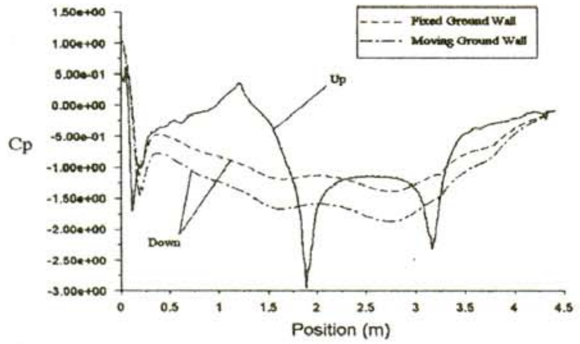
شکل ۹ تغییرات ضریب پسا برحسب تغییر زاویه شیشه عقب در سرعت ۲٤ متر بر ثانیه



شکل ۱۰ تغییرات ضریب پسا بر حسب ارتفاع صندوق عقب در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه

شکل (۹) تغییرات ضریب پسا بر حسب زاویه شیشه عقب در سرعت ۲٤ متر بر ثانیه را برای ارتفاع‌های مختلف صندوق عقب و درحالت های بدون اثر زمین و با اثر زمین نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص می‌باشد با افزایش زاویه شیشه عقب مقدار ضریب پساً افزایش می‌یابد. همچنین، کاهش ارتفاع صندوق عقب می‌تواند نقش مهمی در کاهش ضریب پسا داشته باشد.

شکل (۱۰) تغییرات ضریب پساً بر حسب تغییرات ارتفاع صندوق عقب درسرعت ۲٤ متر بر ثانیه، برای زوایای مختلف شیشه عقب با در نظر گرفتن اثر زمین و بدون در نظر گرفتن آن، را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش ارتفاع صندوق عقب ضریب پسا افزایش می یابد، دلیل این افزایش را هم می توان این طور تحلیل نمود که با افزایش ارتفاع صندق عقب، گردابه دو بعدی قوی در قسمت عقب خودرو، در محل سپر عقب تا لبه درب صندوق عقب، تشکیل می‌شود که علت آن افزایش مساحت این منطقه می‌باشد. در واقع با افزایش ارتفاع صندوق عقب مدل بدنه خودرو از مدل Notch Back به حالت Square Back نزدیک می‌شود. همچنین، این تغییر باعث می‌شود که گردابه‌های سه بعدی بر روی ستون های عقب نیز از حالت ساعتگرد به حالت پاد ساعتگرد تغییر ماهیت دهند و این دو عامل باعث افزایش شدید ضریب پساً خواهد شد. همچنین، این شکل نشان می دهد که با کاهش ارتفاع از حالت پایه ضریب پساً اندکی افزایش می یابد. دلیل این افزایش نیز توجیه فیزیکی دارد، به عبارت دیگر با کاهش ارتفاع صندوق عقب طول شیشه عقب و طول ستون های عقب خودرو افزایش پیدا می‌کند. این تغییر شکل همچنین باعث می‌شود که مساحت لبه پشتی خودرو کاهش پیدا کند. افزون بر این، تغییر شکل یاد شده فرم بدنه را از حالت Notch Back به حالت Fast Back نزدیک می‌کند. در این حالت گردابه لبه پشتی کوچکتر شده و اثر آن کاهش می‌یابد، اما در عوض مساحت گردابه بر روی شیشه عقب افزایش پیدا کرده و اثر آن نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین قدرت گردابه‌های سه بعدی نیز افزایش پیدا می‌کند. تعامل این تغییرات باعث افزایش جزئی در مقدار ضریب پساً می‌شود.



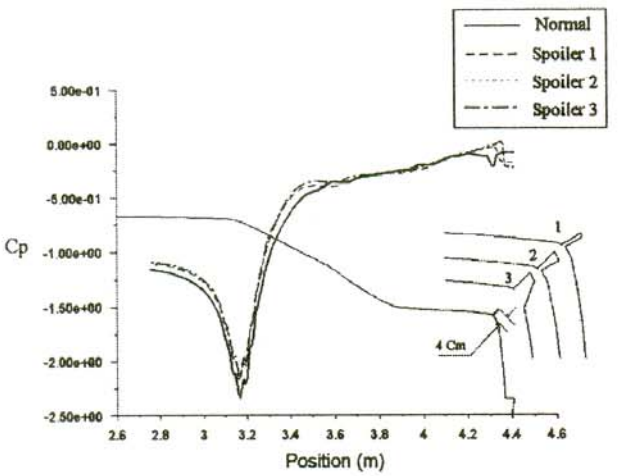
شکل۱۱ مقایسه ضریب فشار در رو و زیر بدنه برای زمین ثابت و زمین متحرک

جدول ۲ مقایسه ضرایب برا و پسا برای زمین ثابت وزمین متحرک

	Fixed Ground	Moving Ground
Cd	0.175	0.166
Cl	-0.577	-1.88

از جمله بررسی ها توسط شبیه سازی عددی دو بعدی، بررسی تغییرات مقایسه زمین ثابت و زمین متحرک می باشد. چون تونل باد نتایج با زمین ثابت را بررسی می نماید در صورت متحرک گرفتن زمین (با سرعت جریان ورودی) یک آزمایش جاده ای مدل سازی خواهد شد. در اینجا با مقایسه این دو شرط مرزی به بررسی تأثیر آن بر نتایج حاصل پرداخته‌ایم. در شکل (۱۱) مقایسه بین نمودارهای ضریب فشار در بالا و زیر بدنه ($k-\varepsilon$ استاندارد) دیده می‌شود. در جدول (۲) ضرایب آیرودینامیکی دو مدل مقایسه شده‌اند.

همان گونه که مشاهده می‌شود در صورت متحرک بودن سطح زمین (شرایط واقعی حرکت خودرو بر روی زمین) سرعت جریان در زیر خودرو افزایش یافته و این باعث کاهش فشار در این ناحیه می‌شود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب برا به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است؛ ولی فشار بر روی بدنه تغییر چندانی نکرده و ضریب پسا تنها اندکی کاهش یافته است که علت آن نیز اغتشاش بیشتر در گردابه پشت خودرو با زمین ثابت است. از جمله بررسی‌های دو بعدی عددی دیگر، مربوط به استفاده از اسپویلر عقب می باشد. استفاده از یک اسپویلر عقب می‌تواند باعث کاهش ضریب برا و در بعضی مواقع ضریب پسای خودرو شود. برای بررسی تأثیر یک اسپویلر بر فشار روی بدنه و ضرایب آیرودینامیکی خودرو، در این قسمت سه شکل مختلف به عنوان اسپویلر در عقب بدنه مدل قرار داده شده و توزیع فشار و ضرایب آیرودینامیکی آن‌ها محاسبه گردیده است. اثر این سه اسپویلر بر روی توزیع فشار بدنه در شکل (۱۲) دیده می‌شود. همچنین در جدول (۳) مقدار ضرایب آیرودینامیکی برای آنها مقایسه گشته است. از آنجا که نحوه قرار گرفتن خودرو نسبت به سطح زمین نیز بر روی ضرایب برا و پسای آن تاثیر قابل ملاحظه [۱۷] می‌گذارد و بررسی دقیق آن به شکل زیر خودرو از لحاظ پستی و بلندی و میزان ناصافی نیز بستگی دارد، در این تحقیق با فرض صاف بودن سطح زیر خودرو، ارتفاع خودرو از زمین با شبیه سازی عددی دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی این مطلب در مورد خودروی مدل شده، ارتفاع آن را در چند مرحله تغییر داده و ضرایب برا و پسای آن محاسبه شده است. در محاسبات مشخص گردید که در این مورد شرط مرزی مورد استفاده برای زمین (ثابت و یا متحرک) تأثیر زیادی بر نتایج خواهد گذاشت، لذا این بررسی با استفاده از هر دو شرط فوق انجام شده است.

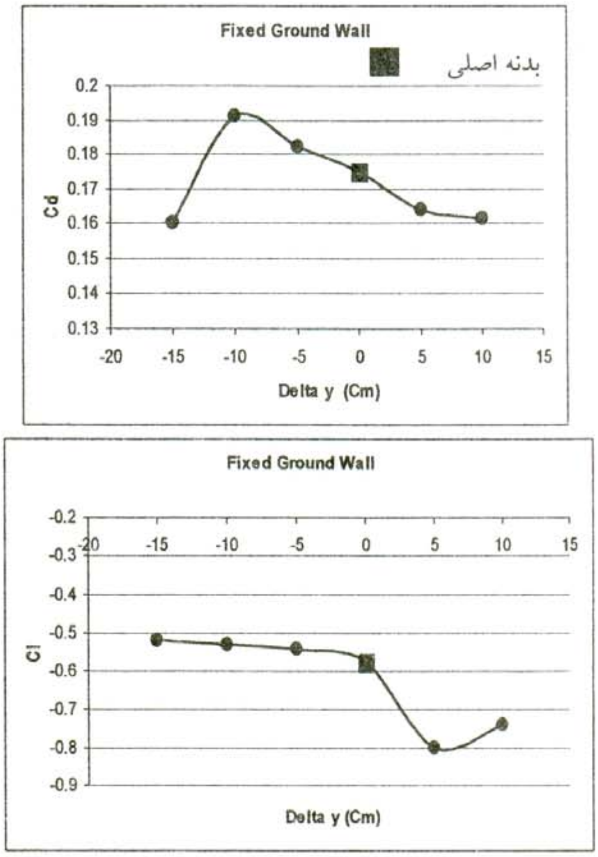


شکل ۱۲ تأثیر سه اسپویلر مختلف بر توزیع فشار روی بدنه

جدول ۳ مقایسه ضرایب برا و پسا برای سه اسپویلر عقب

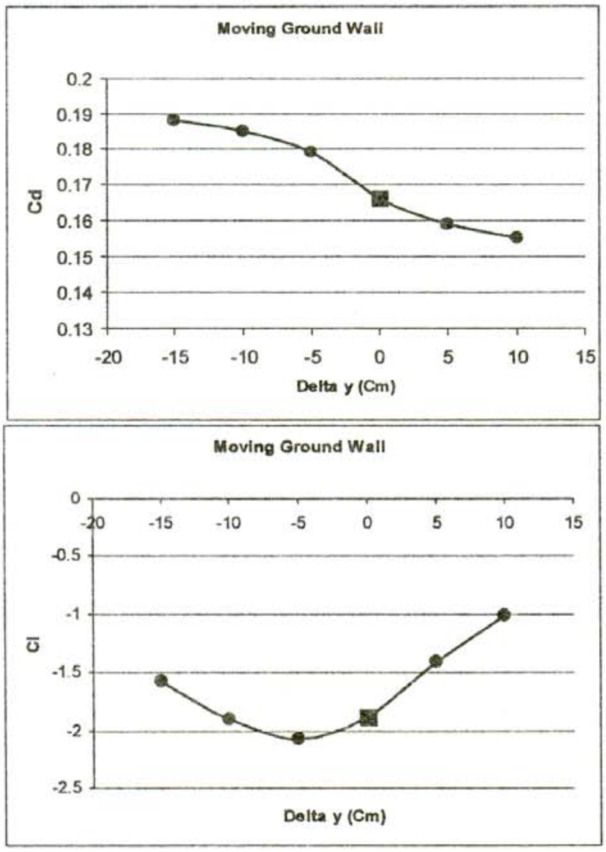
	بدون اسپویلر	اسپویلر۱	اسپویلر۲	اسپویلر۳
Cd	0.175	0.209	0.216	0.2
Cl	-0.577	-1.209	-1.456	-2.506

شکل (۱۳) نتایج مربوط به تغییرات ارتفاع با مدل‌سازی زمین ثابت را نشان می دهد. از آنجا که سطح زیر بدنه کاملاً صاف است، هنگامی که فاصله خودرو از سطح زمین کم می‌شود به علت تأثیرات وجود زمین، فشار در پشت بدنه خودرو کاهش می‌یابد. همچنین، با نزدیک شدن جسم به سطح زمین، هوا بین جسم و زمین محبوس می‌شود و در نتیجه نسبت قطر به طول مؤثر افزایش می‌یابد و به این ترتیب، ضریب پسا افزایش می‌یابد. اما با نزدیک شدن جسم به سطح زمین، سرعت جریان گذرانده از زیر آن کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار نیروی پسای زیر جسم که غالب آن پسای اصطکاکی است و در مجموع مقدار بسیار کمی می‌باشد، کاهش می‌یابد، اما این کاهش در برابر افزایش نیروی پسا در دو اثر یاد شده در بالا ناچیز است.



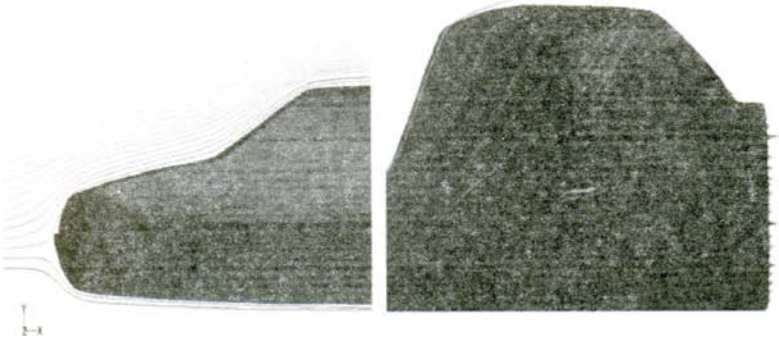
شکل۱۳ تغییرات ضرایب برا و پسا با تغییر ارتفاع کف خودرو، نسبت به بدنه اصلی (زمین ثابت)

برای توجیه نحوه تغییرات ضریب برا، نخست خودرو را در فاصله زیادی از زمین در نظر می‌گیریم. با کاهش فاصله آن نسبت به زمین، سطح منحنی زیر خودرو باعث ایجاد یک پخش‌کن (Diffuser) در زیر خودرو شده و منجر به افزایش سرعت و کاهش فشار در سطح زیر بدنه می‌شود. با نزدیکتر شدن خودرو به سطح زمین جریان به سختی از زیر خودرو عبور کرده و این باعث کاهش سرعت و افزایش فشار در زیر آن می‌شود. نتایج مربوط به مدل سازی با زمین متحرک در شکل (۱٤) مشاهده می شود. در این حالت در تمام نقاط با کاهش ارتفاع خودرو ضریب پسا افزایش می‌یابد. منحنی نیروی برا رفتار نسبتاً مشابهی با حالت قبل (زمین ثابت) دارد، هر چند که نقطه کمینه آن جا به جا شده و ضرایب برا به علت سرعت بیشتر جریان در زیر خودرو، مقادیر کمتری دارند. جدول (٤) مقایسه ضرایب پسای محاسبه شده توسط مدل توربولانس $k-\varepsilon$ استاندارد با فرض متحرک بودن زمین در یک شبیه سازی عددی سه بعدی را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می شود بیش از ۸٦ ٪ ضریب پسا، ناشی از پسای فشاری است.

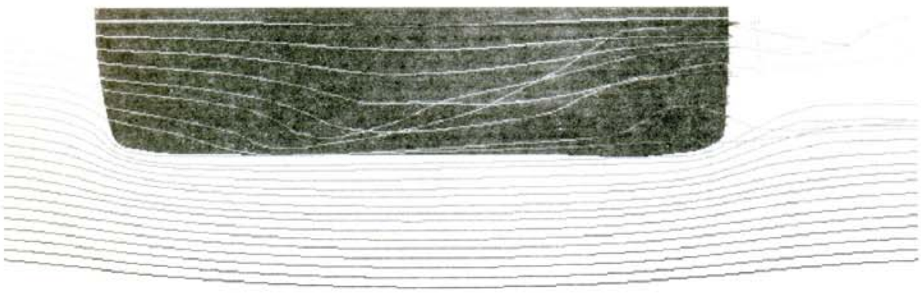


شکل ۱٤ تغییرات ضرایب برا و پسا با تغییر ارتفاع کف خودرو، نسبت به بدنه اصلی (زمین متحرک)

شکل (۱۵) نتایج عددی مسیر جریان در اطراف بدنه با استفاده از مدل توربولانس RSM را نشان می دهد. جریان هوا پس از رسیدن به جلوی خودرو بر روی آن حرکت کرده و در نقاط جلوی بدنه، محل اتصال کاپوت و شیشه جلو و بالای شیشه، جدایش جریانی دیده نمی‌شود ولی در دوطرف شیشه جلو جدایش های سه‌بعدی خفیفی وجود دارد که باعث به وجود آمدن گردابه‌ای در کنار بدنه می‌شود. این جریان به علت



شکل ۱-۱۵ جریان در جلوی بدنه و جدایش‌های کنار شیشه جلو

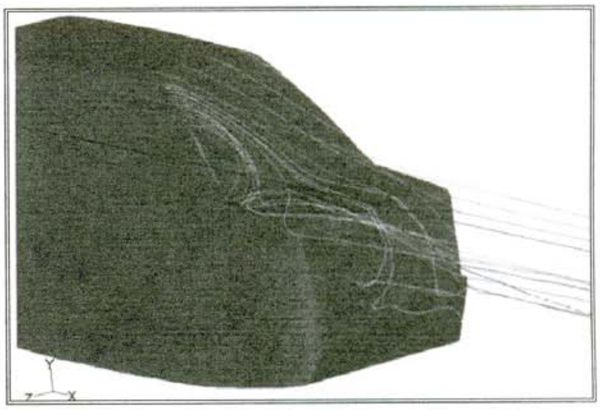


الف - مسیرجریان روی نیمی از بدنه

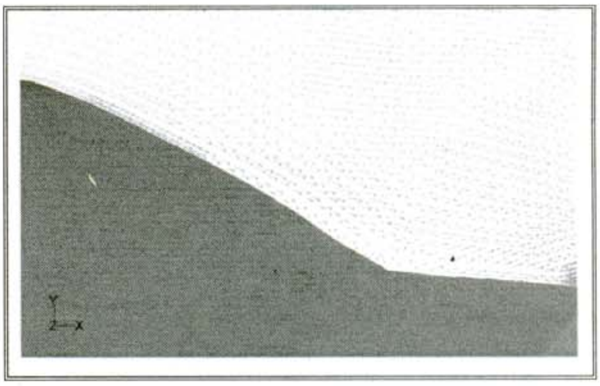
ب- مسیرجریان در کنار بدنه

شکل ۲-۱۵ مسیرخطوط جریان در روی بدنه و کنار آن

شیب شیشه جلو به سمت بالا و سقف خودرو کشیده می‌شود، شکل (۱-۱۵).همچنین به علت انحنای دیواره جانبی بدنه، جریان رسیده به جلوی خودرو در یک مسیر منحنی بدنه را دور زده و به سمت عقب بدنه کشیده می‌شود، شکل(۲-۱۵). با رسیدن جریان به عقب خودرو هردو نوع جدایش‌های دوبعدی و سه‌بعدی مشاهده می‌شود. در کناره‌های شیشه عقب، جدایش‌های سه‌بعدی باعث به وجود آمدن گردابه‌های مخروطی شکل می‌شوند و جریان روی شیشه عقب و دنباله خودرو را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این گردابه‌ها در

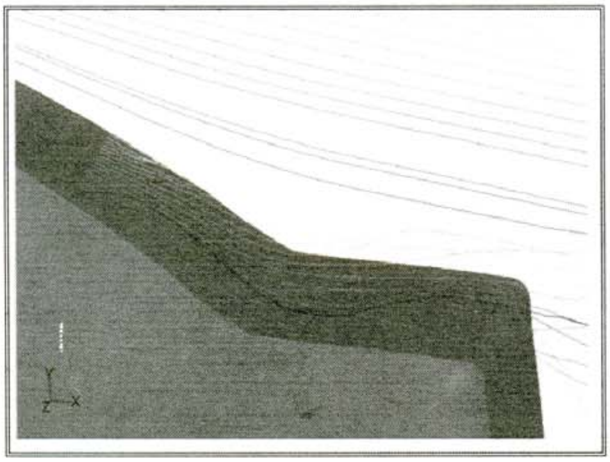


شکل ۳-۱۵ جدایش‌های سه‌بعدی در کنار شیشه عقب خودرو

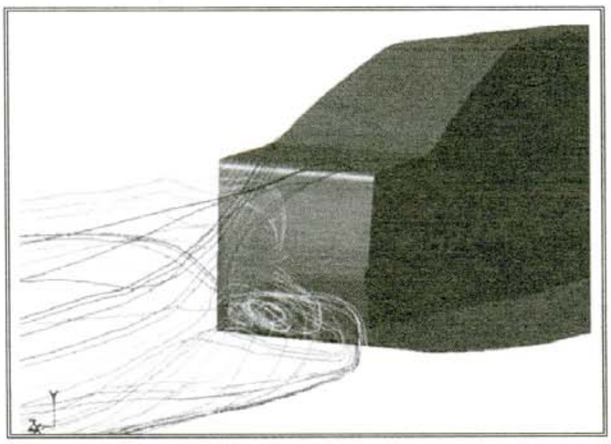


شکل ٤-۱۵ بردارهای سرعت در صفحه تقارن بدنه و جدایش جریان روی شیشه عقب

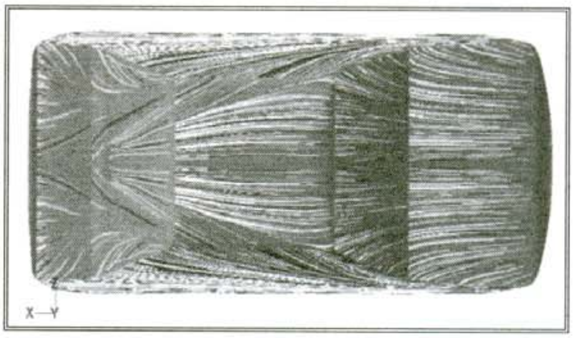
شکل (۳-۱۵) دیده می‌شوند. در روی شیشه عقب و نیمه پایین آن نیز جدایش جریان خفیفی مشاهده می‌شود که در محل اتصال شیشه به صندوق عقب مقداری آشفتگی ایجاد می‌کند. بردارهای سرعت روی صفحه میانی خودرو در شکل (٤-۱۵) و مسیر حرکت جریان در شکل (۵-۱۵) این جدایش را نشان می‌دهند. با رسیدن جریان به انتهای صندوق عقب یک جدایش کلی در این ناحیه اتفاق افتاده و گردابه پشت خودرو را شکل می‌دهد. وجود این جدایش به تنهایی شکلی دوبعدی خواهد داشت ولی به علت برخورد با جریان و گردابه‌های جانبی دنباله جریان شکل پیچیده‌ای به خود می‌گیرد، (شکل ٦-۱۵). شکل‌های (۷-۱۵) و (۸-۱۵) خطوط اصطکاکی روی بدنه را نشان می دهند.



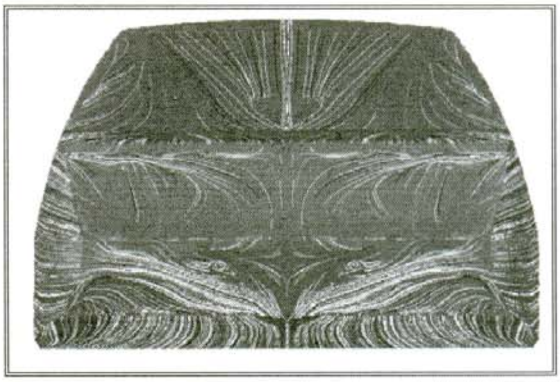
شکل ۵-۱۵ جدایش جریان روی شیشه عقب (نیمی از بدنه نشان داده شده است)



شکل ٦-۱۵ جدایش جریان در انتهای صندوق عقب و گردابه پشت خودرو (برای نیمی از بدنه)



شکل ۷-۱۵ نمایش خطوط اصطکاکی روی بدنه از نمای بالا



شکل ۸-۱۵ نمایش خطوط اصطکاکی روی بدنه از نمای عقب

نتیجه گیری

در این مقاله جریان در اطراف یک مدل خودروی Notch Back هم به طور تجربی و هم به طور عددی مورد مطالعه قرار گرفته و قسمتهایی که تغییرات مهمتری در نیروهای پسا و برا دارند، بررسی شده و منحنی های مشخصه آنها محاسبه و رسم گردیده است. نکات نتیجه گرفته شده در این تحقیق عبارتند از: ۱- مدل های توربولانس استفاده شده در نواحی بدون جدایش روی بدنه خودرو جواب‌های خوبی ارائه می‌دهند ولی در قسمت عقب و محل جدایش از دقت آنها کاسته می‌شود. از میان مدل های مورد استفاده مدل RSM در این نواحی جواب‌های نزدیکتری به نتایج تجربی دارد. ۲- با توجه به اینکه در مدل شبیه سازی شده سهم پسای فشاری بسیار بیشتر از سهم پسای اصطکاکی می‌باشد (بیش از ۸۶٪ مطابق جدول شماره۴) و از طرفی پسای فشاری ناشی از اختلاف فشار بین نقاط مختلف بدنه خودرو می‌باشد، این اختلاف فشار ناشی از وجود نقاط پرفشار و کم فشار جریان هوا بوده و از این رو، برای دستیابی به یک بدنه با آیرودینامیک مناسب توجه به نقاط سکون، نقاط جدایش و محل تشکیل گردابه‌ها و نوع گردابه‌ها بسیار مهم می‌باشد. در مدل بدنه مورد مطالعه شده سه نقطه سکون مشاهده گردید؛ یکی در جلوی دماغه خودرو، یکی در محل اتصال شیشه جلو به در موتور و دیگری در قسمت عقب بالای سپر عقب تشکیل می‌شود و از این رو، می‌توان با مطالعه بیشتر در این نقاط، پسا را کاهش داد. ۳- ضرایب برا و پسا در رژیم آزمایش شده مستقل از سرعت می باشد لذا نتایج در محدوده حرکت خودروی واقعی معقول می باشند. ٤- با کاهش شیب شیشه عقب ضریب پسا کاهش می‌یابد. ۵- با افزایش ارتفاع صندوق عقب از حالت پایه مقدار ضریب پسا افزایش زیادی پیدا می‌کند. ٦- با کاهش ارتفاع صندوق عقب از حالت پایه مقدار ضریب پسا اندکی افزایش پیدا می‌کند. ۷- نوع شرط مرزی مورد استفاده برای سطح زمین (ثابت یا متحرک) تاثیر اندکی بر محاسبه ضریب پسا و تاثیر زیادی بر ضریب برا خواهد داشت. ۹- استفاده از سه اسپویلر مختلف در عقب مدل باعث کاهش زیادی در ضریب برا و افزایش نسبتاً کمی در ضریب پسا می‌شود. مؤثرترین این اسپویلرها که آزمایش شده، ضریب برا را حدود ۳۳۰ درصد کاهش داده و ۱۹ درصد بر ضریب پسا افزوده است. ۸- محاسبات نشان می دهد که با در نظر گرفتن یک زمین متحرک، افزایش فاصله خودرو از زمین باعث کاهش ضریب پسای آن می شود ولی در صورت ساکن بودن زمین کاهش زیاد در ارتفاع خودرو نیز باعث پایین آمدن ضریب پسا خواهد شد. نمودار ضریب برا در هر دو شرط مرزی دارای یک نقطه کمینه می باشد.

جدول ٤ مقایسه ضریب پسای فشاری و اصطکاکی

	Friction Drag	Pressure Drag
Cd	0.028	0.182

مراجع

1. Ahmed, S.R., Ramm, R. and Faltin, G., "Some salient features of the timeaveraged ground vehicle wake," SAE technical Paper Series 840300, Detroit (1984).
2. Gillieron, P. and Chometon F., "Modelling of Stationary Three-Dimensional Separated Air Flows around an Ahmed Reference Model", Third International Workshop on Vortex, ESAIM Proceedings, Vol 7, (1999).
3. Hanaoka, Yuji. and Kiyohira Aoki, "Vehicle Aerodynamic Development using PAMFLOW", (1995)
4. Gillieron, P. and Spohn, A., "Flow Separations Generated by a Simplified Geometry of an Automotive Vehicle"., (2002).
5. Lienhart, H. and Stoocks, C., Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model), DGLR Fach Symp. der AG STAB, Stuttgart University, 15-17 Nov, (2000).

۶. شایسته، رضا، بررسی عددی شکل دنباله جریان در اطراف یک مدل پایه خودرو در زوایای مختلف پشت، پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تبریز، (۱۳۸۱).

۷. جوارشکیان، محمدحسن ، زهساز، محمد و آذرخویش، آیرم ، بهینه سازی تجربی نیروهای آیرودینامیکی وارده بریک مدل خودرو، نهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه شیراز ـ گروه مهندسی مکانیک، اسفند (۱۳۸۳).

8. Daly, B.J. and Harlow, F.H., "Transport Equations in Turbulence, Physics and Fluid", Vol. 13, pp.26-34, (1970).
9. Gibson, M.M., and Launder, B.E., "Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer"., J. Fluid Mech, Vol. 86, pp. 491-511, (1978).
10. Kolmogrov, A.N., "Local Structure of Turbulence in incompressible Viscous Fluid for very large Reynolds Number"., Doklady AN. SSSR, Vol 30, pp 299-303, (1941).
11. Fluent User's Manual, Chapter 9, Turbulence Models, (1998).
12. Fluent User's Manual, Chapter 17, Using The Solver, (1998).
13. Morelli, A., "General Layout Characteristics and Performance of a new Wind Tunnel for Aerodynamics"., SAE Paper No. 710214, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., (1971).
14. Wolf-Heinrich Hucho., Aerodynamics of Road Vehicles, 4th Edition, SAE, Society of Automotive Engineers Inc Warrendale, Pa,(1998).

۱۵. الهامی، محمد رضا، طراحی و تحلیل سکوی بالانس ۶ مؤلفه تونل باد خودرو، مقاله دوازدهمین کنفرانس سالانه و هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک ـ دانشگاه تربیت مدرس، اردیبهشت (۱۳۸۳).

16. Basara, B. 2000, Computation of the Automotive Flows, Using the Second moment Closure. European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering, ,2000 ECCOMAS RATE DEPENDENT, Barcelona,11-14 September (2000).
17. Buchheim, R. and Deutenbach, K.R., "Necessity and premises for Reducting the Aerodynamic Drag of future Passenger Cars"., SAE Paper No. 810185., (1981).