

## مطالعه تجربی جهت اضافه کردن سطوح زبر در قسمت کف خودرو و مقایسه ضرایب آیرودینامیکی

کوروش رایزن<sup>۱</sup>، احمد کشاورزی<sup>۲-۳\*</sup>

\* نویسنده مسئول: keshavarzi@iauaksh.ac.ir

### واژه‌های کلیدی

مطالعه تجربی، المان‌های اضافی، ابعاد بهینه، سطح زبر

تاریخ ارسال	۹۴/۱۱/۱۷
تاریخ بازنگری	۹۵/۰۶/۰۶
تاریخ پذیرش	۹۵/۰۷/۱۹

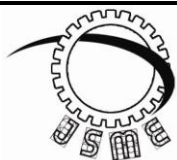
### چکیده

پس از اختراع خودرو، بشر بزودی به رابطه میان مقاومت هوا و حرکت اتومبیل پی برد. به مرور زمان با بهبود عملکرد خودروها از جهات مختلف، بهبود آیرودینامیکی نیز به مسأله‌ای اساسی تبدیل شد. پژوهشگران دریافتند که توجه به آیرودینامیک نه تنها برای دستیابی به سرعت‌های بالاتر، بلکه به منظور کاهش مصرف سوخت و ایجاد پایداری مناسب در خودرو، امری ضروری است. در این مقاله اثر زبری سطح در چند نقطه زیرین خودرو بررسی می‌گردد. روش کار بصورتی است که در دو ناحیه زیر خودرو یعنی بعد از چرخ‌های جلو و بعد از چرخ‌های عقب خودرو که بیش‌ترین احتمال جدایش جریان وجود دارد و جریان در حال ترک بدنه خودرو می‌باشد، صفحات زبر چسبانده شده و اثرات این سطوح زبر بر نیروی پسا و برآ در آزمایشگاه تست تونل باد بررسی می‌گردد. نتایج بدست آمده نشان داد که از سرعت ۱۵ m/s تا ۳۵ m/s نیروی پسا حدود ۶ درصد کاهش یافت.

<sup>۱</sup>- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup>- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

<sup>۳</sup>- استادیار، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران



Journal of  
Solid Mechanics  
in Engineering

## Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



### Experimental Study for Addition Rough Surfaces on a Vehicle Floor Body and Comparison of Aerodynamics Coefficient

Koorosh Rayzan<sup>1</sup>, Keshavarzi Ahmad<sup>2-3,\*</sup>

\* Corresponding Author: keshavarzi @iaukhsh.ac.ir

#### Abstract:

After the invention of the automobile, people soon realized the relationship between air resistance and the movement of cars. Over time, the improved performance of the cars from different directions, aerodynamically improvement also became the fundamental question. The researchers found that attention to aerodynamics not only achieve higher speeds, but also appropriate to reduce fuel consumption and vehicle stability. This article will examine the effect of surface roughness underside of the vehicle at some points. In this method procedure we study on two zones which have maximum probability of separation flow. These zones find on rear of wheels on floor of vehicle that air flow leaves the automobile that rough sheets was attached And the results of these rough sheets compare with case of drag and lift test in wind tunnel. Results show that between speeds 15m/s to 35m/s drag force decreases about 6 percent.

#### Key words:

Experimental Studies,  
Additional Elements,  
Optimum Dimensions,  
Rough Surface.

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2- Assistant Prof., Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

3- Assistant Prof., Young Researchers and Elite Club, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

## ۱- مقدمه

یک دهه مصرف سوخت خودروها به کمتر از نصف دهه پیشین رسیده است و در عین حال کارایی موتورها و بهینه شدن آن‌ها به همراه اصلاحات طراحی بدنه خودرو، انقلاب عظیمی در زمینه ساخت آن‌ها ایجاد کرده و این دو مبحث به صورت همراستا در حال بهبود و گسترش می‌باشد.

## ۱-۱- مروری بر پژوهش‌های گذشته

در زمینه آیرودینامیک خودرو تحقیقات متفاوت و متعددی انجام شده است که بیش‌ترین و معتبرترین آن‌ها در خارج از کشور صورت گرفته است. امروزه در کشورهای پیشرفته شاخه‌های مستقلی مانند آیرودینامیک خودرو و آیرودینامیک پیمایه‌های نزدیک به سطح زمین به وجود آمده است. در زیر به تعدادی از این تحقیقات اشاره می‌گردد:

پتوف<sup>۲</sup> [۱] در سال ۱۹۸۲ با استفاده از دو دیفیوزر با دو نسبت طولی متفاوت، کاهش ضرایب برآ و پسا را بر روی یک مدل خودرو به نحو مطلوبی نشان داد.

هوکو<sup>۳</sup> [۲] با ارجاع به پتوف در مرجع [۱] با استفاده از دو دیفیوزر با دو نسبت طولی متفاوت کاهش ضرایب برآ و پسا را به نحو مطلوبی نشان داد. هوکو برای بهبود و بهینه‌سازی آیرودینامیک خودروها دو روش را پیشنهاد کرد. روش اول با طراحی یک شکل بدنه کم پسا آغاز می‌شود که غالباً یک بدنه بدون چرخ و کمان چرخ می‌باشد. سپس ملاحظات حرکت خودروها، مثلاً اضافه شدن چرخ‌ها و سایر موارد اعمال می‌شود. در روش دوم که به بهینه‌سازی جزء موسوم است، یک بدنه پایه در نظر گرفته می‌شود (مثل بدنه یک خودروی رایج) آنگاه اجزای مختلف با توجه به ملاحظات آیرودینامیکی، اصلاح می‌شود. روش دوم در بسیاری از موارد منجر به تغییر در پلت فرم خودرو نمی‌گردد و به همین دلیل، از نظر صنعتی با صرفه اقتصادی بالایی در تولید انبوه همراه است. تاکید پژوهش حاضر نیز به بررسی و بهبود جریان هوای

پس از اختراع خودرو، بشر بزودی به رابطه میان مقاومت هوا و حرکت اتومبیل پی برد. به مرور زمان با بهبود عملکرد خودروها از جهات مختلف، بهبود آیرودینامیکی نیز به مسأله‌ای اساسی تبدیل شد. پژوهشگران دریافتند که توجه به آیرودینامیک نه تنها برای دستیابی به سرعت‌های بالاتر، بلکه به منظور کاهش مصرف سوخت و ایجاد پایداری مناسب در خودرو، امری ضروری است. البته نباید از این نکته غافل شد که طراحان هواپیما و کشتی از منابع الهام بهتری برخوردار بودند، زیرا نسخه‌های اصلی آنچه که می‌خواستند طراحی کنند یعنی ماهی‌ها و پرندگان را در طبیعت می‌یافتند و برای اتومبیل چنین نسخه طبیعی وجود نداشت. بنابراین طراحان اتومبیل سعی کردند که از شکل‌های مورد استفاده در طراحی هواپیماها و کشتی‌ها استفاده کنند. به زودی مشخص شد که این روش نادرستی است و تنها هنگامی که پژوهشگران و طراحان، این الگوهای گمراه‌کننده را کنار گذاشتند، آیرودینامیک به دانشی سودمند در طراحی اتومبیل تبدیل شد.

دلیل دیگر شکست‌های اولیه پیاپی آیرودینامیک در طراحی اتومبیل این بود که اتومبیل‌های اولیه بسیار کند حرکت می‌کردند و برای جاده‌های بد و ناهموار آن زمان، طراحی یک اتومبیل با بدنه بادشکن بسیار مضحک به نظر می‌رسید. در واقع حفاظت از سرنشینان اتومبیل در مقابل باد، گل و لای و باران با استفاده از طرح‌های سنتی کالسکه‌های آسیبی به خوبی محقق می‌شد. بعدها نیز وجود این دیدگاه که بدنه‌های خط جریانی<sup>۱</sup>، برای اهدافی خاص مناسبند، بهره‌گیری از دانش آیرودینامیک را در جهت اقتصادی‌تر شدن اتومبیل‌ها به تعویق انداخت.

تلاش‌های محققین در زمینه بهبود آیرودینامیک خودرو باعث شده که آرامش سرنشینان و ایمنی آن‌ها به همراه موارد بهینه‌سازی مصرف سوخت خودرو به جایی برسد که در طول

<sup>2</sup> Potthoff

<sup>3</sup> Hucho

<sup>1</sup> -Streamlined.

بررسی نمودند. مدل‌های توربولانسی در این پژوهش توسط نرم افزار Cosmos بررسی شد.

کوپر<sup>۳</sup> [۸] در سال ۲۰۰۰ در یک بررسی تجربی و با استفاده از یک دیفیوزر در مقابل اثر زمین و تغییر فاصله دیفیوزر تا سطح زمین، رسیدن به ماکزیمم نیروی رو به پایین را برای دیفیوزرهای با اشکال مختلف بررسی نمود.

دویل<sup>۴</sup> و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۱ به مطالعه تجربی 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 مورد نظر که از مواد پلیمری خاصی ساخته می‌شود، طیف پیوسته‌ای از فشار در نقاط مختلف سطح بدست می‌آید. اولین بار کاوندی در سال ۱۹۹۰ از این روش استفاده نمود.

لانگنکر<sup>۵</sup> و بدیه [۱۰] در سال ۲۰۰۱. یک خودروی مسابقه‌ای SAE را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آزمون‌های جاده و همچنین، قطعات افزوده شده برای بهبود نیروهای برآ منفی و پسا مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفتند.

کاپادیا<sup>۶</sup> و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۳ در یک تحقیق عددی پیرامون مدل پهن پیکر احمد رفتار گردابه‌های ناشی از جدایش جریان را شبیه‌سازی کرد.

ماهون<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۴ به بررسی تجربی نیروی برآ منفی و همچنین پسا روی یک مدل Bluff Body مجهز به دیفیوزر پرداختند و به وسیله آشکارسازی‌های جریان، گردابه‌های تشکیل شده را بررسی نمودند.

روی خودرو از طریق کاهش برآ و بدون تغییر در پلت فرم خودرو می‌باشد. در ایران فعالیت‌های اندکی در این زمینه صورت گرفته است که بخش اعظم آن نیز مطالعات عددی و محاسباتی می‌باشد.

کریمیان و محجوب در سال ۱۳۷۸ [۳] جریان حول خودرو پیکان را با استفاده از یک نرم افزار دینامیک سیالات عددی، به صورت دو بعدی مدلسازی نمودند. در این پژوهش، آن‌ها از یک مدل توربولانسی رایج استفاده نمودند.

احمد و همکاران [۴] در سال ۱۹۸۴ با استفاده از تحلیل جریان حول یک جسم پهن پیکر به نتایج خوبی در زمینه نقاط برخورد و نقاط جدایش جریان در هندسه و زوایای مختلف مدل دست یافتند که قابل تعمیم به خودروها می‌باشد و بعدها تحقیقات عددی و تجربی بسیاری با استفاده از این مدل که به احمد بلاف بادی<sup>۱</sup> معروف شد، صورت پذیرفت.

فرانک و همکاران [۵] در زمینه شبیه‌سازی عددی احمد بلاف بادی با زوایای ۰ تا ۴۰ درجه تحقیقات متعددی انجام دادند.

کوگاتی<sup>۲</sup> [۶] در سال ۱۹۸۶، به مطالعه تجربی گردابه‌های پشت خودرو پرداخت و از وسیله‌ای به نام Seven-Hole Probe استفاده نمود. این وسیله دارای سطحی دایره‌ای شامل هفت حسگر که یکی در وسط و عمود بر جریان و مابقی با زاویه ۳۰ درجه نسبت به جریان بوده و بردار سرعت و مقدار فشار را در نقاط مختلف اندازه‌گیری می‌کند.

غازی و همکاران [۷] در سال ۱۳۷۸، جریان حول یک مدل جیب شرکت پارس خودرو را به صورت دو بعدی و با استفاده از روش‌های عددی توسط نرم افزارهای تجاری

<sup>3</sup> Cooper

<sup>4</sup> Duell

<sup>5</sup> Longnecker

<sup>6</sup> kapadia

<sup>7</sup> Mahon

<sup>1</sup> Ahmed bluff body

<sup>2</sup> Cogotti

قرار دادند و نشان داد که با کنترل جریان در قسمت عقب یک خودرو تا ۱۷٪ نیروی پسا کاهش می‌یابد که این معادل کم شدن مصرف سوخت و به تبع آن کاهش آلاینده‌گی و هزینه‌های حمل و نقل می‌باشد.

جان فرانسیس<sup>۳</sup> و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۸ در یک مطالعه تجربی با استفاده از نصب قطعاتی (مثل Flap) بر روی احمد بلاف بادی ۴ درصد کاهش برآ و پسا را مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار دادند.

محمد حسن شجاعی فرد، کورش گودرزی و رسول خوش‌نیت [۱۹]، در سال ۱۳۸۷ اثر رینگ و تایر را بر نیروهای آیرودینامیکی چرخ به صورت سه بعدی با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری و یک مدل توربولانسی رایج مورد بررسی قرار دادند. تاثیر چرخ‌ها بر روی ضرایب آیرودینامیکی خورو قابل ملاحظه و بسیار زیاد است. همچنین به دلیل نامتقارن بودن چرخ، نیرو و ممان منحرف کننده بر روی چرخ وجود می‌آید و با توجه به این که معمولاً فرمان دهی خودرو از طریق دو چرخ جلو صورت می‌گیرد چرخ‌ها در فرمان پذیری خودرو نیز بسیار موثر خواهند بود. در این مقاله با استفاده از روش عددی حجم کنترل، به مدل‌سازی جریان پیرامون یک چرخ و ضرایب آیرودینامیکی آن پرداخته شده است. جهت مدل‌سازی جریان مغشوش از مدل توربولانسی SST استفاده شده است. چرخ مورد مطالعه در این مقاله دارای تایر R17.5 45/240 که از بزرگترین سایزهای قابل انتخاب تایرهای رادیال برای خودروهای شخصی معمولی می‌باشد، است. همچنین رینگ آلومینیومی آن از ساده ترین هندسه‌های ممکن انتخاب شده است و ساده‌سازی‌هایی هم بر روی آن انجام گرفته است که نمی‌تواند تغییر زیادی در خواص آیرودینامیکی ایجاد کند. این تحلیل در حالت پایدار برای چندین زاویه حمله مختلف انجام

بهشتی و کریمیان [۱۳] در سال ۱۳۸۳، بررسی عددی جریان حول خودروی پراید را مد نظر قرار دادند، در این پروژه سعی شده است تا با استفاده از روش‌های عددی، جریان سیال بر روی بدنه خودروی پراید به صورت دو بعدی و سپس به صورت سه بعدی حل شود. برای انجام این کار با استفاده از نرم‌افزار fluent، معادلات حاکم بر جریان سیال به همراه مدل استاندارد با استفاده از شرایط مرزی مناسب حل گردیده‌اند. با مطالعه نتایج حاصل از این تحقیق و مشاهده خطوط جریان، گردابه‌های ایجاد شده در اطراف اتومبیل و توزیع فشار، می‌توان منطقه‌هایی را که باعث افزایش پسا می‌گردند، مشخص کرده و با توجه به آن‌ها، روش‌هایی را برای کاهش پسا ارائه نمود و پیشنهاداتی از جمله اصلاح شکل جلویی خودرو و سپر جلوی خودرو برای کاهش پسا ارائه نمودند.

توکلی و مانی [۱۴]، در سال ۱۳۸۳ یک مدل از وانت مزدا را در تونل بود مورد بررسی قرار دادند و پیشنهاداتی برای بهبود آیرودینامیک آن ارائه کردند، در تحقیق آن‌ها از مدل با مقیاس ۱/۱۰ استفاده شده بود و به کمک روابط تصحیح انسداد، نتایج حاصل را اصلاح نمودند.

شجاعی فرد و همکاران [۱۵]، در سال ۱۳۸۵ تاثیر کاور بار خودرو نیشان پیکاپ بر روی ضریب درگ را بررسی کردند.

استراچان<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۷، در یک بررسی تجربی، جریان حول احمد بادی را در مقابل اثر زمین متحرک مورد آزمون قرار دادند، همچنین ساختار گردابه‌ها و نیروی برآ و پسا را بررسی نمودند.

رومس<sup>۲</sup> و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۸ در یک بررسی توسط متدهای عددی با کنترل جدایش بر روی قسمت عقب احمد بادی در حالت‌های مختلف، کاهش پسا را مورد بررسی

<sup>3</sup> Jean-Fracios

<sup>4</sup> Ahmed Bluff Body

<sup>1</sup> Strachan

<sup>2</sup> Roumeas

شده تا تاثیر تایر و رینگ بر روی نیروهای لیفت، درگ و نیروی انحرافی بدست آید.

## ۲-۲- بازچسب

گاهی اوقات، ممکن است که جریان جدا شده دوباره به بدنه بچسبد. در این حالت گفته می‌شود که جریان بازچسب شده است.

## ۳- نیروهای آیرودینامیکی

نیروی پسا، برآ، نیروها و گشتاورهای جانبی را می‌توان مهمترین عامل بحث‌های تحلیلی در زمینه آیرودینامیک دانست. در زیر بصورت مختصر به این عوامل پرداخته می‌شود.

### ۱-۳- نیروی پسا

مهمترین عامل آیرودینامیکی که در طراحی اتومبیل‌های معمولی باید مورد توجه قرار گیرد، نیروی پسا است. قسمتی از نیروی مقاوم کل در برابر حرکت یک اتومبیل، ناشی از مقاومت چرخشی تایرها و بقیه آن به علت پسای آیرودینامیکی است.

معمولاً برای مقایسه پسای تولیدی توسط شکل‌های بدنه مختلف - بدون توجه به ابعاد و سرعت حرکت آن‌ها در هوا- از ضریب بی‌بعدی به نام ضریب پسا (CD) استفاده می‌کنند که عمدتاً به شکل بدنه بستگی دارد. علاوه بر این ضریب، نیروی پسا به مساحت جلویی<sup>۳</sup> اتومبیل، چگالی هوا و مجذور سرعت اتومبیل نسبت به هوا نیز بستگی دارد. مساحت جلویی، برابر مساحت تصویر اتومبیل بر صفحه‌ای قائم بر محور طولی اتومبیل و در جلوی آن می‌باشد. در اتومبیل‌های امروزی مساحت جلویی در حدود  $1/80$  حاصل ضرب ارتفاع و عرض اتومبیل می‌باشد.

## ۲- بدنه‌های خط جریانی<sup>۱</sup> و جریان چسبیده<sup>۲</sup>

اصطلاح «بدنه خط جریانی»، به صورت غیرعلمی به بدنه‌ای گفته می‌شود که دارای سطوح منحنی باشد. در تعریف علمی‌تر، بدنه خط جریانی بدنه‌ای است که جریان هوای گذرنده از اطراف آن از شکل کانتورهای بدنه پیروی کند. در این حالت به جریان، «جریان چسبیده» می‌گوییم. اگرچه این تعریف برای بدنه‌های خط جریانی، یک تعریف پذیرفته شده جهانی نیست، اما برای بررسی‌های کنونی ما ساده و قابل استفاده است.

### ۱-۲- خطوط جریان

در هنگام حرکت خودرو، خطوط جریان هوا، پروفیل بدنه را دنبال می‌کنند، اما هرگونه تغییر شکل ناگهانی مثل زوایای تیز باعث می‌شود تا خطوط جریان از بدنه خودرو منحرف شوند. فضای بین خطوط جریانی که پروفیل بدنه را دنبال می‌کنند و خطوط جریان در ارتفاعی بالاتر از پروفیل بدنه که تحت تاثیر شکل بدنه قرار نمی‌گیرند را می‌توان همانند یک ونتوری در نظر گرفت. هوایی که به خودرو نزدیک می‌شود، دارای فشار جو است و با سرعتی برابر با سرعت خودرو حرکت می‌کند. با نزدیک شدن این هوا به خودرو، شتاب آن افزایش می‌یابد (قانون پیوستگی). در روی سقف خودرو، سطح مقطع ونتوری به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد که نتیجه آن افزایش سرعت هوا به مقدار حداکثر خود و کاهش فشار تا مقدار حداقل خود است. پس از عبور جریان هوا از این قسمت، سرعت هوا دوباره کاهش می‌یابد تا این که مجدداً سرعت آن برابر سرعت خودرو و فشار آن به فشار جو برسد.

<sup>1</sup> - Streamlined Bodies.

<sup>2</sup> - attached flow.

<sup>3</sup> - Frontal area.

نیز مد نظر قرار گیرد که برای فراهم نمودن این شرایط، آزمایشگاه بسیار پیشرفته‌ای نیاز است که متاسفانه تعداد این آزمایشگاه‌ها در دنیا انگشت شمار می‌باشد.

#### ۴- بررسی تجربی آیرودینامیک یک مدل خودرو

برای انجام آزمون‌ها از مدل خودرو مشابه نمونه تجاری رنجروور آیونیک می‌باشد، استفاده شده است. مدل از جنس پلاستیک مقاوم و سبک با مقیاس ۱/۱۶ ساخته شده است که با انجام تغییراتی در کف مدل، امکان نصب چرخ‌ها به صورت ثابت و همچنین میله تعادل در قسمت جانبی مدل برای اتصال به دستگاه بالانس فراهم شده است.

#### ۴-۱- بررسی اثرات سطوح زبر در کف خودرو

در این مرحله می‌خواهیم اثر زبری سطح را در چند نقطه زیرین خودرو بررسی نماییم. آقای ماسارو<sup>۴</sup> و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۰۴ تحقیقات گسترده‌ای انجام دادند و قسمت‌هایی به بالای سقف خودرو اضافه نمودند که باعث ایجاد گردابه‌هایی می‌شوند و این گردابه‌ها به کمک آیرودینامیک خودرو می‌آیند و باعث کاهش ناحیه کم فشار انتهایی خودرو شده که نتیجه آن کاهش نیروی پسا می‌باشد. در سال ۲۰۰۶ نیتش<sup>۵</sup> و براون در سطح بالای خودرو در نقطه انتهایی ترک جریان از جسم پهن پیکر احمد تحقیقاتی کردند و موفق به کنترل جدایش در ناحیه آشفته شدند [۲۱].

در این تحقیق مطابق شکل (۱) در دوناچه زیر خودرو که بیشترین احتمال تشکیل جدایش وجود دارد، یعنی بعد از چرخ جلو و بعد از چرخ عقب خودرو که جریان در حال ترک بدنه خودرو می‌باشد، صفحات زبری با زبری P60 چسبانده و اثرات این سطوح را با حالت صاف در سرعت‌های ۵ تا ۳۵ متر بر ثانیه مقایسه کرده، نتایج نادری بدست می‌آید.

از رابطه (۱) نتیجه می‌شود که مقدار نیروی پسا، علاوه بر ضریب پسا، به مساحت جلویی اتومبیل نیز بستگی دارد. بنابراین، کم بودن ضریب پسای یک اتومبیل، ضامن کم بودن نیروی پسای آن نیست.

$$\text{رابطه (۱): } D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D$$

#### ۳-۲- نیروی برآ

پژوهش بر روی آیرودینامیک اتومبیل‌ها در ابتدا تنها بر روی مسأله کاهش پسا متمرکز بود، اما به زودی مشخص شد که نیروی برآ نیز در عملکرد اتومبیل‌ها مؤثر است. نیروی برآ با اثرات القایی، بر روی میزان نیروی پسا اثر می‌گذارد. از آن مهمتر، با کاهش برآ و یا حتی تولید نیروی برآی منفی (نیروی رو به پایین)، می‌توان بهبودهای قابل توجهی در پایداری و چسبندگی اتومبیل ایجاد کرد. بهبود چسبندگی به این روش - به ویژه در اتومبیل‌های مسابقه‌ای - بسیار حائز اهمیت است.

ضریب نیروی برآی آیرودینامیکی، مقیاسی از اختلاف فشار ایجاد شده در سطوح بالایی و پایینی بدنه خودروی در حال حرکت است. در این حال، بسته به شکل بدنه خودرو، هم برآی رو به بالا (برآی مثبت) و هم برآی رو به پایین (برآی منفی) می‌تواند ایجاد شود. به دلیل کاهش چسبندگی تایرها به زمین برآی روبه بالا یک پارامتر غیر مطلوب محسوب می‌شود نیروی برآ از رابطه (۲) بدست می‌آید و  $C_l$  ضریب برآ نامیده می‌شود.

$$\text{رابطه (۲): } L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_l$$

#### ۳-۳- نیروی جانبی و گشتاورهای وارد بر خودرو

تاکنون، نیروهای پسا و برآی وارد بر اتومبیل بررسی گردید. اما هنگامی که باد جانبی وجود دارد، باید نیروی جانبی (S) و سه گشتاور پیچ<sup>۱</sup> (M)، رول<sup>۲</sup> (R) و یاو<sup>۳</sup> (Y)

<sup>۲</sup> - Rolling Moment.

<sup>۳</sup> - Yawing Moment.

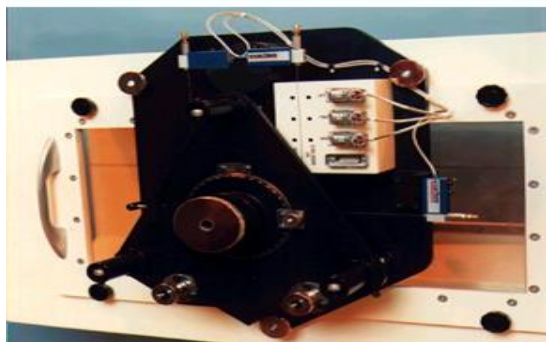
<sup>۴</sup> Masaru Koike

<sup>۵</sup> Nitsche W. & Brunn A.

<sup>۱</sup> - Pitching Moment.



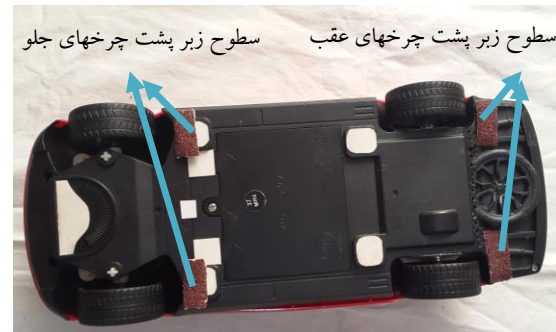
شکل (۲) تونل باد PLINT TE44/C



شکل (۳) نمایشگرهای اندازه گیری نیروها

شکل (۴) نحوه اتصال میله تعادل به مرکز ثقل مدل را نشان می دهد. این میله به دستگاه بالانس متصل شده و دستگاه بالانس مولفه های نیرو و گشتاور را اندازه گیری می نماید. شکل (۵) نمایی از مدل بدون کمان چرخ در اتاقک آزمون را نشان می دهد. صفحه زیرین جهت شبیه سازی اثرات زمین در فاصله ای مساوی با زمانی که مدل همراه با کمان چرخ مونتاژ می گردد قرار دارد.

نتایج را در جداول بصورت دو به دو مقایسه کرده و بهبود ضرایب موثر آیرودینامیکی مشاهده می شود. البته با چندین تست متفاوت عرض بهینه برای سطح زیر ناحیه پشت چرخ جلو ۲۰ میلی متر و عرض بهینه برای سطح زیر ناحیه پشت چرخ عقب ۲۵ میلی متر بدست می آید.



شکل (۱) مدل خودرو با سطوح زیر پشت چرخهای جلو و پشت چرخهای عقب

پس از تحقیقات انجام شده در مورد تونل بادهایی که در داخل کشور موجود می باشد با توجه به ملاحظات فنی و شرایط آزمون، تونل باد PLINT TE44/C از نوع مانومتری مورب برای انجام آزمونها در نظر گرفته شد که در شکل (۲) نشان داده شده است. نوع تونل زیر صوت، سرعت پایین و مدار بسته می باشد و مقطع آزمون آن دارای ابعاد  $46 \times 46$  سانتی متر است. دستگاه بالانس مورد استفاده در این تونل باد از نوع سه مولفه ای است که به یک نمایشگر دیجیتالی برای نمایش نیروها مجهز است. این دستگاه دارای سه استرین گیج (Strain Gage) از آلیاژ آلومینیوم می باشد که هر کدام جداگانه به پردازشگر متصل می گردند. قابلیت تنظیم مدل در زوایای حمله مختلف از صفر تا  $360^\circ$  درجه و همچنین محاسبه نیروهای برآ و پسا و ممان پیچشی از امکانات این دستگاه است. شکل (۳) دستگاه بالانس را نمایش می دهد.



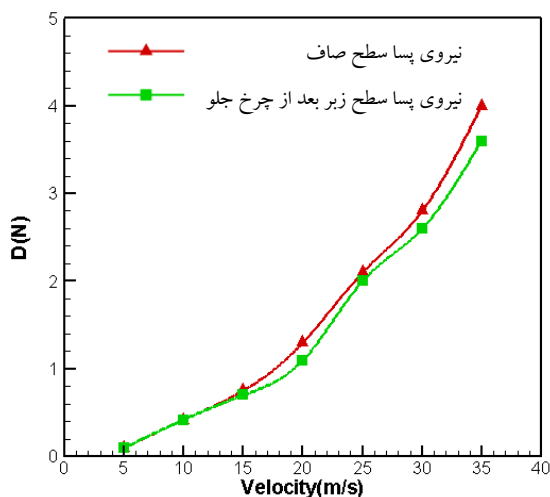
شکل (۶) تا شکل (۱۵) مقایسه نیروی پسا و برآ و ضریب پسا و ضریب برآ، برای سطح زبر بعد از چرخ جلو و عقب و حالتی که سطح صاف است را بیان می‌کند. در پایان هر سری از آزمایش‌ها میزان انحراف معیار داده‌های بدست آمده از تکرار تست‌ها در شرایط یکسان برای سرعت‌های مختلف آمده است. برای هر سرعت ۴ بار نیروی پسا اندازه‌گیری شده است که نتایج از تکرار پذیری خوبی برخوردار هستند و انحراف معیار نتایج کمتر از ۱ درصد است. نتایج تکرارپذیری و قطعیت نتایج جهت حصول اطمینان از نتایج آزمایش ترسیم گردیده است که مقدار قابل قبولی جهت حصول اطمینان از صحت نتایج آزمایش‌ها می‌باشد. در ادامه نتایج آزمایش‌ها آمده است.



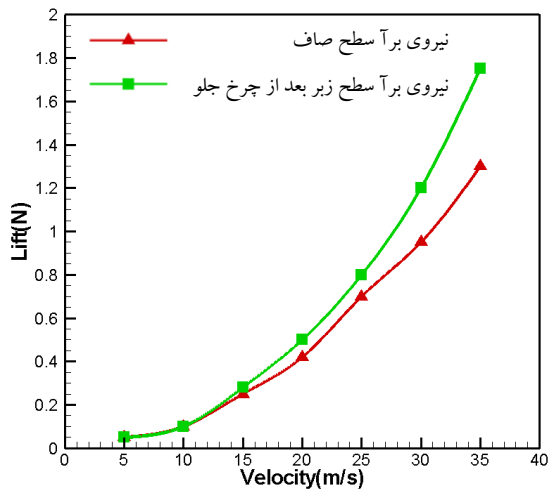
شکل (۴) نحوه اتصال میله تعادل به مرکز ثقل مدل



شکل (۵) مدل پایه بدون چرخ در اتاقک آزمون



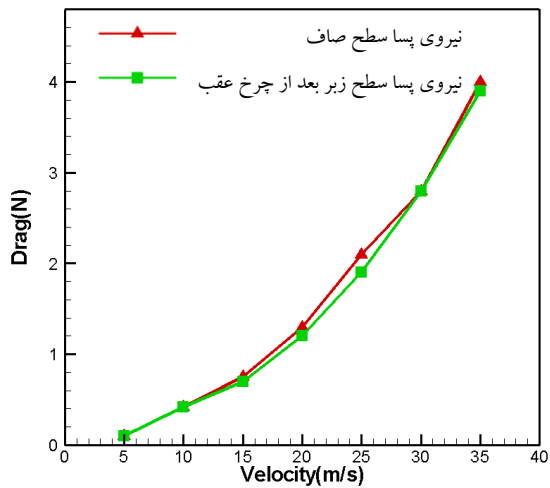
شکل (۶) مقایسه پسی سطح زبر و صاف بعد از چرخ‌های جلو



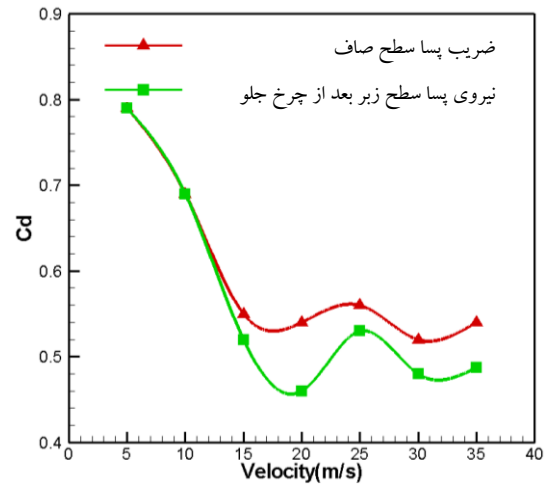
شکل (۷) مقایسه برآی سطح زبر و صاف بعد از چرخ‌های جلو

هوای توسط یک فن با حداکثر توان ۱۵ کیلو وات در سیستم به حرکت در می‌آید و سرعت جریان در هر لحظه توسط یک پیتوت تیوب که قبل از مدل در ابتدای اتاقک آزمون قرار دارد، اندازه‌گیری می‌شود.

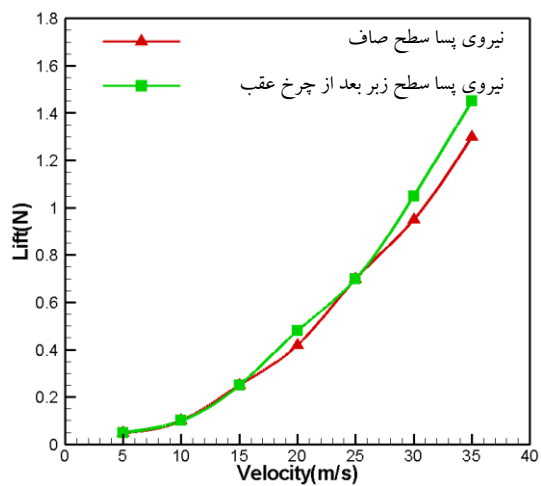
پس از انجام آزمایشات در تونل باد و چسباندن سطوح زیر در ناحیه پشت چرخ‌های جلو و پشت چرخ‌های عقب مدل، نتایج منحصر به فردی حاصل می‌شود و نتایج با حالت بدون سطوح زبر مقایسه شده و در نمودارها نمایش داده می‌شود. این کاهش ضریب پسا و نیروی پسا را می‌توان به این امر منسوب کرد که سطوح زبر مانع از گسترش رژیم آشفتگی جریان حاصل از حرکت چرخ‌ها به ناحیه زیر خودرو شده و این امر جریان عبوری از کف خودرو را کمتر دچار اغتشاش می‌کند. در نتیجه نیروی پسا و ضریب پسا کاهش یافته ولی به نیروی برآ و ضریب آن زیاد می‌شود که این ازدیاد برآ را با تغییرات اندکی در شکل خودرو با اضافه کردن المان‌هایی چون اسپویلر می‌توان کاهش داد.



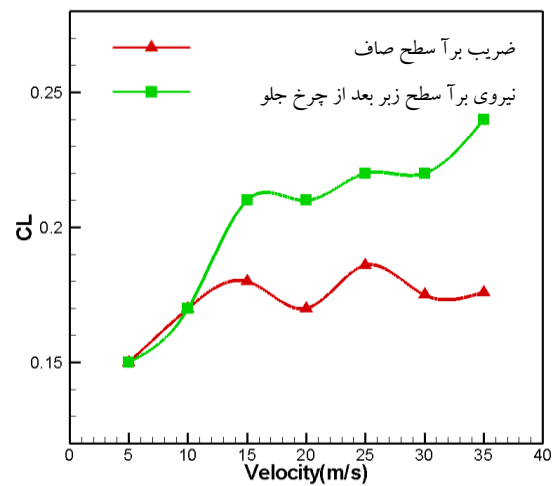
شکل (۱۱) مقایسه نیروی پسا سطح زیر و صاف بعد از چرخ های عقب



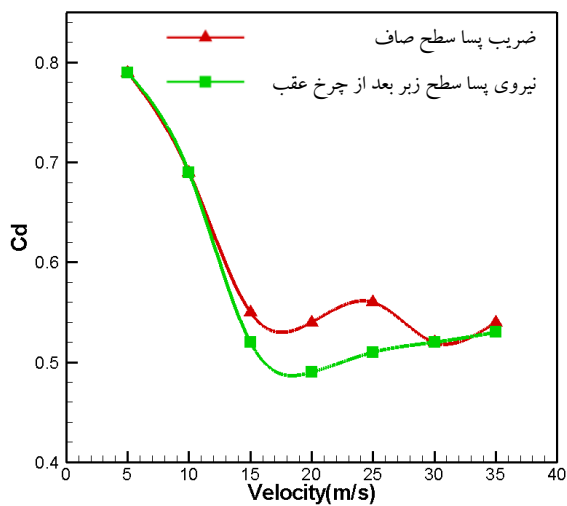
شکل (۸) مقایسه ضریب پسا سطح زیر و صاف بعد از چرخ های جلو



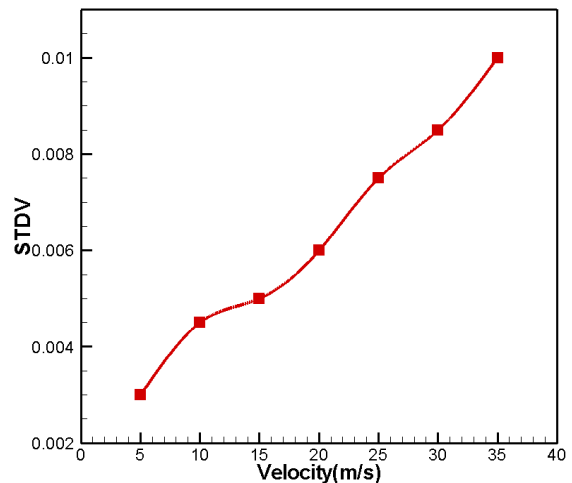
شکل (۱۲) مقایسه نیروی برآ سطح زیر و صاف بعد از چرخ های عقب



شکل (۹) مقایسه ضریب برآ سطح زیر و صاف بعد از چرخ های جلو



شکل (۱۳) مقایسه ضریب پسا سطح زیر و صاف بعد از چرخ های عقب



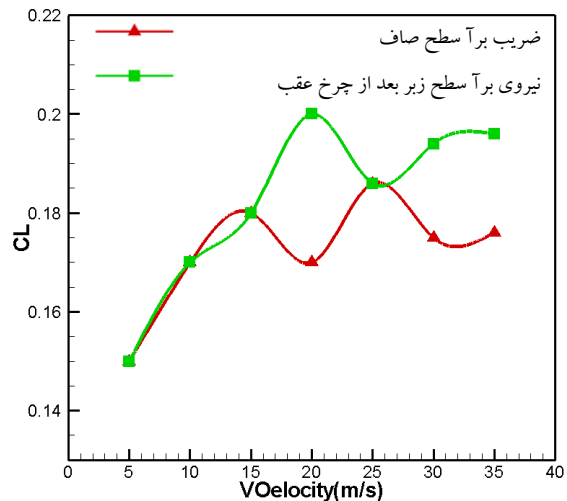
شکل (۱۰) واریانس ۴ بار آزمایش سرعت های مختلف سطح زیر چرخ جلو

بودن این موضوع و اثبات تاثیرات این طرح در کاهش نیروی مقاوم بر بدنه خودرو، در آینده شاهد استفاده از این مطلب در ساخت خودروها خواهیم بود و با تغییرات جزیی به کاهش ۶ درصدی نیروی پسا رسیدیم.

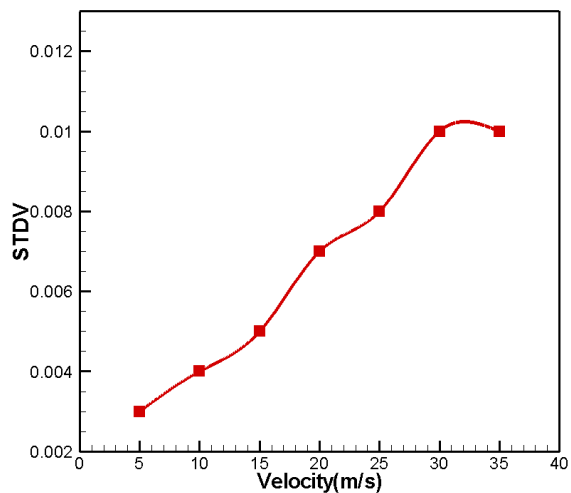
### ۵- نتایج

در این تحقیق که بر اساس مشاهدات تجربی و تست تونل باد و مقایسه مدل مینا با مدلی که تغییرات اساسی در آن انجام گردید، نتایج منحصر بفرد و با ارزشی در اصلاح طراحی آیرودینامیک خودرو بدست آمد و با مقایسه نتایج و نمودارها مشاهده گردید که به تغییرات جزیی در روش ساخت این پیمایه‌ها می‌توان نیروی پسا را حدود ۶ درصد کاهش داد و توجه به این امر تاثیرات اساسی در علم ساخت خودرو خواهد گذاشت. با گسترش این بحث در آینده نه چندان دور شاهد این خواهیم بود که توجه به موارد حتی کوچک می‌تواند نتایج با ارزشی در زمینه کاهش سوخت پیمایه‌ها داشته باشد. این امر به کاهش آلودگی محیط زیست و مصرف بهینه سرمایه‌های خدادادی خواهد انجامید.

نتیجه ای که از این تحقیق بدست آمد، توجه به سطوح زیر در نواحی انتهایی کف خودرو و بعد از چرخ‌ها می‌باشد. ناحیه مغشوش ناشی از حرکت چرخ‌ها، پایین دست جریان را کمتر تحت تاثیر قرار دهد. این امر باعث کم شدن نیروی پسا و ضریب پسا گردید و افزایش سرعت جریان در ناحیه زیر خودرو را به همراه دارد. در نهایت عامل جدایش جریان در سطح زیرین خودرو به تاخیر افتاده و زیر خودرو رژیم آشفته و مغشوش محدود می‌شود. در نتیجه نیروی پسا کاسته شده، انرژی کم‌تری صرف حرکت خواهد شد. توجه مضاعف به این امر که هرچه ناحیه مغشوش و کم فشار بعد از خودرو ضخیم تر باشد نیروی پسا نیز بیشتر می‌شود و با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، با اضافه نمودن سطوح زیر در ناحیه بعد از چرخ‌های جلو و عقب، مساحت این ناحیه کم فشار کاسته شده و نیروی کمتری صرف حرکت پیمایه خواهد شد.



شکل (۱۴) مقایسه ضریب برآ سطح زیر و صاف بعد از چرخ‌های عقب



شکل (۱۵) واریانس ۴ بار آزمایش سرعت‌های مختلف برای سطح زیر چرخ عقب

با توجه به آزمایش‌ها و نمودارهای بالا این نتیجه حاصل می‌شود که با چسباندن سطوح زیر با عرض‌های متفاوت در پشت چرخ‌های خودرو با روش تست آزمایشگاهی، ابعاد پیمایه عرض این سطوح بصورت ۲۰ میلی‌متر برای پشت چرخ‌های جلو و ۲۵ میلی‌متر برای پشت چرخ‌های عقب می‌باشد. در این متد، این زبری‌ها به عنوان یک سد جلوی گسترش ناحیه مغشوش حاصل از جدایش جریان عمل کرده و مانع گسترش اغتشاش در ناحیه آرام می‌شوند و در نهایت منجر به کاهش نیروی پسا می‌شود. این راهکار باعث بوجود آمدن ناحیه با فشار بالاتر در عقب خودرو شده و در نتیجه از حجم ناحیه کم فشار انتهایی خودرو می‌کاهد. با کاهش ناحیه کم فشار دنباله دار انتهایی خودرو، کاهش نیروی پسا و ضریب پسا در این مدل مشاهده می‌شود که با توجه به جدید

## مراجع:

- [۱۳] کریمیان و بهشتی، تحلیل روش‌های مختلف جهت بهبود آیرودینامیک خودرو، کنفرانس دینامیک شماره، سال ۱۳۸۳.
- [۱۴] توکلی م.ع، مانی م، بررسی تجربی آیرودینامیک خودروی وانت مزدا B2000، نهمین کنفرانس دینامیک شماره ۵، اسفند ۱۳۸۳.
- [۱۵] شجاعی فرد م.ح، گودرزی ک، کشاورزی ا، تاثیر کاور بار خودرو نیسان پیکاپ بر روی ضریب درگ، کنفرانس مهندسی مکانیک، تهران، ۳۰ آذر ۱۳۸۵.
- [16] Strachan R. K., Knowles K., Lawson N. J., *The Vortex Structure Behind An Ahmed Reference Model In The Presence Of A Moving Ground Plane*, Exp Fluids, 2007, 42:659-669.
- [17] Roumeas M., Gilli'eron P. and Kourta A., *Drag Reduction By Flow Separation Control On A Car After Body*, International Journal For Numerical Methods In Fluid Int. J. Numer. Meth. Fluids (2008) Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/fld.1930.
- [18] Beaudoin J.F., Aider J.E., *Drag And Lift Reduction Of A 3D Bluff Body Using Flaps*, Exp Fluids (2008) 44:491-501.
- [۱۹] شجاعی فرد م.ح، گودرزی ک، خوش نیت ر، بررسی اثر رینگ و تایر بر روی نیروهای آیرودینامیکی چرخ، شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک. دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر، ۱۳۸۷.
- [20] KOIKE M., NAGAYOSHI T., HAMAMOTO N., *Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators*, Technical Paper, Mitsubishi Motor Technical Review 2004 No.16.
- [21] Brunn A., Nitsche W., *Active control of Turbulent Separated Flows Over Slanted Surfaces*, International Journal of Heat and Fluid Flow 27 (2006) 748-755.
- [1] Barnard R.H., *Road Vehicle Aerodynamic Design*, 2nd Edition, Mechaero Publishing, 2001.
- [2] Hucho W.H., *Aerodynamics of Road Vehicles*, 4th Edition, SAE, Society of Automotive Engineers Inc Warrendale, Pa, 1998.
- [۳] کریمیان م.ح، محبوب ش، شبیه‌سازی دوبعدی جریان حول خودرو پیکان، هفتمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، فروردین ۱۳۷۸.
- [4] Ahmed S.R., Ramm R., and Faltin G., *Some salient features of the time averaged ground vehicle wake*, SAE, technical Paper Series 840300, Detroit, 1984.
- [5] Franck G., Nigro N., Storti M.A. and Jorge D., *Numerical Simulation Of The Flow Around The Ahmed Vehicle Model*,
- [6] Cogotti A., *Car-Wake Imaging Using a Seven-Hole Probe*, SAE Int. Congress and Exposition Detroit, Michigan, PP 43-58 , 1986.
- [۷] غازی س، کد کامپیوتری جهت بهینه‌سازی آیرودینامیکی خودرو شرکت پارس خودرو، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوا فضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات ۱۳۷۸.
- [8] Cooper, K.R., Syms, J., and Sovran, G., *Selecting Automotive Diffusers to Maximize Underbody Downforce*, SAE Paper 2000-01-0354. 2000.
- [9] Duell E., Everstine D., Mehta R., Perry M., *Pressure-Sensitive Paint Technology Applied to Low - Speed Automotive Testeng*, SAE, Paper no. 2001-01-0626.
- [10] Longnecker , *Aerodynamic Evaluation On Formula SAE Vehicle*, SAE, paper no. 2001- 01-1270.
- [11] Sagar Kapadia, Subrata Roy, Ken Wurtzler "Detached Eddy Simulation Over a Reference Ahmed Car Model" AIAA-2003-0857.
- [12] S. Mahon , X. Zhang and C. Gage "The Evolution of Edge Vortices Underneath a Diffuser Equipped Bluff Body" School of Engineering Sciences, University of Southampton, SO17 1BJ, UK.