



Experimental Investigations of the Effect of Car Windows Down on the Drag Coefficient and Fuel Consumption on a Sedan Car Model

Ferydoon Mohammadi^{1*}

¹Academic Staff, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 10.26.2023

Revised: 03.18.2024

Accepted: 06.02.2024

Keyword:

Drag Coefficient
Car Door Glass
Fuel Consumption
Wind Tunnel
Car Cooler

*Corresponding Author:

Ferydoon Mohammadi

Email: mohammadi-f@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Different types of aerodynamic forces such as drag, lift, and side forces are induced in a car. Reducing drag force is necessary to improve fuel consumption and driving characteristics. The compressor of the car cooler is connected to the car engine through a belt and takes part of the power of the car engine and increases fuel consumption. Some drivers, particularly public transport drivers, turn down car windows to varying degrees instead of turning on the car cooler which increases drag coefficient and fuel consumption. In the present article, to experimentally investigate the effect of low car windows on the drag coefficient and fuel consumption, the drag coefficient of five different modes of a sedan car (1- All windows are closed; 2- All windows are open 3- The windows of the two front doors are open and the windows of the two rear doors are closed 4- Half-open windows of the two front doors and closed windows of the two rear doors 5- All the windows are half open) was measured in a subsonic wind tunnel. Because the drag coefficient is a dimensionless number, to reduce the testing costs, a scaled-down model of the car with a scale of 1:30 was used. By comparing model 2 to model 1, the drag coefficient increased by 43%. By comparing models 3, 4 and 5 to model 1, the drag coefficient increased by 30%.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Aerodynamics was first introduced to increase stability in race cars. Race car engineers realized that air flowing around the vehicle could be used to increase downforce and reduce aerodynamic drag on the car. Thus, the method could be transferred to reduce aerodynamic drag on road vehicles to improve fuel economy. To decrease the amount of drag created by a vehicle, automobile manufacturers began incorporating vehicle body designs that would allow the vehicle to be more streamlined.

The flow of moving air relative to the car body has a direct effect on the stability, driving characteristics, operation, fuel consumption and safety of the car. The aerodynamic force plays an important role in the performance and stability of the car when it takes high speed. Different types of aerodynamic forces such as drag, lift, and side forces are induced on a car.

Hence drag reduction is an essential process in vehicle aerodynamics for improving fuel consumption rate as well as the vehicle driving performance. Due to the increase in demand for automobiles that deliver high performance in addition to safety and economy, there have been constant changes in the design of various parameters of an automobile such as the outer body and its shape.

As mentioned previously, aerodynamic drag is the force that opposes the direction of thrust of a car and is not desirable. Aerodynamic drag force is calculated by Formula (1).

$$F_D = C_D \frac{\rho_{air} V^2}{2} A_f \quad (1)$$

where V is airflow speed (m/s), ρ_{air} is air density (kg/m³), A_f is a cross-section of the vehicle (m²) and C_D is Drag Coefficient.

At higher speeds, the aerodynamic drag influences nearly 50% of fuel consumption. The relation between change in fuel consumption and change in drag coefficient is:

$$\frac{\Delta FC}{FC} = \eta \times \left(\frac{\Delta C_D}{C_D} + \frac{\Delta A_f}{A_f} + 3 \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (2)$$

where FC is fuel consumption, A_f is cross-section of vehicle, η is the property of driving vehicle which is approximately 0.5 to 0.7 for car driving at highway speed and V is the speed of the vehicle.

Methodology
Classification of wind tunnels based on Mach number

Wind tunnels are often denoted by the speed in the test section relative to the speed of sound. The ratio of air speed to the speed of sound is called the Mach number.

Table 1. Classification of wind tunnels based on Mach number.

Type of Wind Tunnel	Mach number in the test section
1 Subsonic	$M < 0.8$
2 Transonic	$0.8 < M < 1.2$
3 Supersonic	$1.2 < M < 5$
4 Hypersonic	$M > 5$

Experimental setup

The aerodynamic study of the car model scale ratio 1:30 was employed using a subsonic suction-type wind tunnel. The open-type subsonic wind tunnel (Figure 1) which is utilized in this work with a test cross-section is approximately 30 cm × 30 cm.

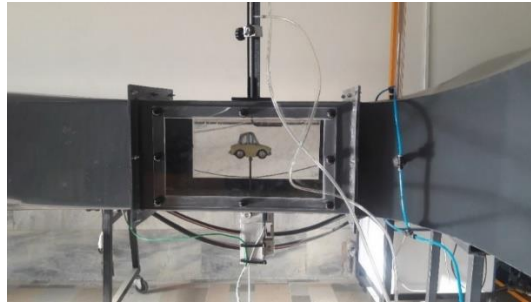


Figure 1. Subsonic wind tunnel.

Airflow speed in the test section and drag coefficient were calculated by formulas (3) and (4), respectively.

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{air}}} \quad (3)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\Delta P \times A_f} \quad (4)$$

where ΔP is the difference between static pressure and stagnation pressure at the test section (pa).

The blockage ratio of the wind tunnel is defined as the ratio of the frontal area of the model to the wind tunnel inlet test section area and it should not exceed 7.5%. The blockage ratio is calculated as 4.5% for this case since it is within the specified limit so the model can be suitably tested in this test section configuration.

The compressor of the car cooler is connected to the car engine through a belt which takes part of the power of the car engine and increases fuel consumption. Some drivers, especially public transport drivers, bring down the car windows instead of turning on the car cooler. In this article, the rate of increase in the drag coefficient in five different models of the sedan car (1- All windows are closed; 2- All windows are open; 3- The windows of the

two front doors are open and the windows of the two rear doors are closed; 4- Half-open windows of the two front doors and closed windows of the two rear doors; 5- All the windows are half open) was investigated in the subsonic wind tunnel.

Models 1 to 5 were installed respectively in the wind tunnel test section. In the wind tunnel, wind flow was created with different speeds in the test section using a fan, and for each model and at each speed, the difference of pressure in Pitot Tube and drag force were noted.

Results and discussion

Figure 2 shows the change of drag coefficient in five car models. For five models, the drag coefficient was calculated at two different speeds and their difference is insignificant, this shows the accuracy of the wind tunnel and the test.

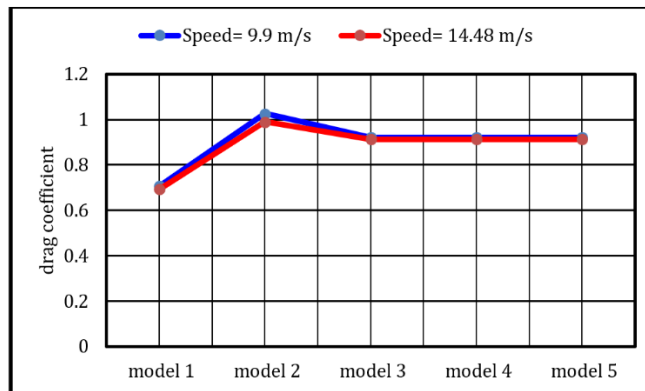


Figure 2. Drag coefficient in five car models.

By comparing model 2 to model 1, the drag coefficient has increased by 43% and the fuel consumption at high speeds increases between 21 and 30%. The drag coefficient is the same in models 3, 4 and 5. By comparing models 3, 4 and 5 to model 1, the drag coefficient has increased by 30% and the fuel consumption at high speeds increases between 15 and 21%.

Conclusion

The drag coefficient is one of the characteristics of any moving object (such as a car) in the air, and by determining it, the drag force can be calculated. The car does not have a regular geometric shape, so the only way to measure the drag coefficient of the car is to use a subsonic wind tunnel. The drag coefficient is a dimensionless number, so in order to reduce the test costs, the reduced model of the car can be used in the wind tunnel to measure the drag coefficient. According to figure 2, car windows down, increase fuel consumption and drag coefficient.

Acknowledgement

I am grateful to the respected officials of the fluid mechanics laboratory of Kurdistan Technical and Vocational University who helped me in conducting the experiments.



بررسی تجربی تأثیر پایین بودن شیشه‌های خودرو بر ضریب پسا و مصرف سوخت در مدل خودرو سدان

فریدون محمدی^{*۱}

۱- هیأت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳

کلید واژگان:

ضریب پسا
شیشه درب خودرو
مصرف سوخت
تونل باد
کولر خودرو

نیروهای آیرودینامیکی مختلفی مثل نیرو پسا، برا و جانبی به خودرو اعمال می‌شود. کاهش نیرو پسا برای بهبود مصرف سوخت و کیفیت رانندگی ضروری است. کمپرسور کولر خودرو از طریق تسمه به موتور خودرو متصل است و بخشی از قدرت موتور خودرو را می‌گیرد و باعث افزایش مصرف سوخت می‌شود. بعضی از راننده‌ها به‌خصوص راننده‌های وسایل نقلیه عمومی به‌جای روشن کردن کولر خودرو تعدادی از شیشه‌های خودرو را به میزان متغیر، پایین می‌دهند که همین امر باعث افزایش ضریب پسا و مصرف سوخت می‌شود. در این مقاله برای بررسی تجربی اثر پایین بودن شیشه‌های خودرو بر ضریب پسا و مصرف سوخت، ضریب پسا پنج حالت مختلف خودرو سدان (۱- بسته بودن همه شیشه‌ها ۲- باز بودن همه شیشه‌ها ۳- باز بودن شیشه‌های دو درب جلو و بسته بودن شیشه‌های دو درب عقب ۴- نیمه‌باز بودن شیشه‌های دو درب جلو و بسته بودن شیشه‌های دو درب عقب ۵- نیمه‌باز بودن همه شیشه‌ها) در تونل باد مادون صوت اندازه‌گیری می‌شود. چون ضریب پسا یک عدد بدون بعد بود؛ برای کاهش هزینه‌های آزمایش از مدل کوچک‌شده خودرو با مقیاس ۱:۳۰ استفاده شد. مقدار ضریب پسا در حالت ۲ نسبت به حالت یک، ۴۳ درصد و در حالت‌های ۳، ۴ و ۵ نسبت به حالت یک، ۳۰ درصد رشد داشته است.

*نویسنده مسئول: فریدون محمدی

پست الکترونیکی:

mohammadi-f@tvu.ac.ir



مقدمه

آیرودینامیک اولین بار برای افزایش پایداری خودروهای مسابقه مطرح شد. مهندسان خودروهای مسابقه پی بردند که با کنترل جریان هوای اطراف خودرو می‌توان نیروی روبه‌پایین^۱ را افزایش و نیروی پسا^۲ را کاهش داد؛ همین امر باعث کاهش مصرف سوخت می‌شود. سازندگان خودرو برای کاهش نیرو و پسا تغییراتی در طراحی بدنه خودروها ایجاد کردند [۱].

جریان هوا روی بدنه خودرو اثر مستقیم روی پایداری، کیفیت رانندگی، عملکرد، مصرف سوخت و ایمنی خودرو دارد. در سرعت‌های زیاد خودرو نیروی آیرودینامیک نقش مهمی در عملکرد و پایداری خودرو ایفا می‌کند. نیروهای آیرودینامیکی مختلفی مثل نیرو پسا، برا^۳ و جانبی^۴ به خودرو اعمال می‌شود. کاهش نیروی پسا برای بهبود مصرف سوخت و کیفیت رانندگی، ضروری است. چون تقاضا برای خودروهایی با عملکرد و ایمنی بالا همراه با مصرف سوخت پایین زیاد شده است در نتیجه تغییراتی در پارامترهای مختلف طراحی خودرو از جمله بدنه ایجاد شده است [۲]. هدف اصلی طراحان بدنه خودرو کاهش ضریب پسا بوده و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. برای محاسبه ضریب پسا از روش‌های عددی و تجربی استفاده می‌شود. حسن^۵ و همکاران با استفاده از روش عددی ضریب پسا خودروهای مسابقه را بررسی کردند و ضریب پسا با تغییر قسمت پایین عقب خودرو به مقدار ۲۲/۱۳ درصد و با نصب دفیوزر در قسمت پایین عقب خودرو به مقدار ۹/۵ درصد کاهش می‌یابد [۳]. کریشنان^۶ و همکاران با استفاده از تونل باد، اثر پولیش کاری و وجود بار روی سقف خودرو بر ضریب پسا را بررسی کردند. پولیش کاری و قراردادن بار روی سقف خودرو به ترتیب باعث کاهش و افزایش ضریب پسا می‌شوند [۴]. گائو^۷ با استفاده از تونل باد و روش عددی اثر زاویه کاپوت، شیشه جلو و شیشه عقب خودرو بر ضریب پسا را بررسی کرد [۵]. رایزن و همکاران با استفاده از تونل باد اثر زبری سطح در چند نقطه زیرین خودرو بر ضریب پسا و مصرف سوخت را در تونل باد بررسی کردند و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که از سرعت 15 m/s تا 35 m/s نیروی پسا حدود ۶ درصد کاهش یافت [۶]. گانپینار^۸ و همکاران با ایجاد تغییرات در طرح سپر جلو، قسمت بالای سپر جلو، کاپوت، شیشه جلو، سقف، شیشه عقب، صندوق عقب و شیشه عقب خودرو ۱۰۰۰ طرح مختلف دوبعدی ایجاد کردند و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، ضریب پسا آن‌ها را محاسبه کردند [۷]. ضریب پسا این طرح‌ها بین ۰/۱۸ تا ۰/۵۵ متغیر است. با استفاده از شبکه عصبی و داده‌های ضریب پسا مدل ریاضی برای تخمین ضریب پسا، طرح‌های جدید بدنه خودرو تعیین می‌گردد [۷]. رحمتی‌نژاد و همکاران عملکرد حرارتی موتور و مصرف سوخت را کاهش داد [۸]. اولورونتوبا^۹ و همکاران با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی^{۱۰} در دو حالت بازبودن و بسته‌بودن شیشه‌های مینی‌بوس، ضریب پسا^{۱۱} و ضریب برا^{۱۲} را محاسبه کردند. در حالت بازبودن شیشه‌ها هر

¹ Down Force

² Drag Force

³ Lift Force

⁴ Side Force

⁵ Hassan

⁶ Krishnan

⁷ Gao

⁸ Gunpinar

⁹ Oloruntoba

¹⁰ Computational Fluid Dynamics (CFD)

¹¹ Drag Coefficient

¹² Lift Coefficient

دو ضریب افزایش می‌یابد [۹]. در این مقاله تأثیرات بازبودن شیشه‌های پنج حالت مختلف مدل خودرو سدان بر ضریب درگ و مصرف سوخت در تونل باد مادون صوت بررسی می‌گردد.

نیرو پسا

نیرو پسا در خلاف جهت حرکت طولی خودرو اعمال می‌شود و نیروی مطلوبی نیست. نیروی پسا روی خودرو یا هر جسم دیگری بسیار پیچیده است، ضروری است تا مدل‌های نیمه تجربی برای نمایاندن این تأثیرات تدوین شود. بنابراین برای همسان کردن مدل‌ها، نیروی پسای آیرودینامیک با فرمول (۱) بیان می‌شود.

$$F_D = C_D \frac{\rho_{air} V^2}{2} A_f \quad (1)$$

V : سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)

ρ_{air} : چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب)

A_f : مساحت خودرو از نمای روبرو (متر مربع)

C_D : ضریب نیرو پسا

چگالی هوا متغیری است که به دما، فشار و رطوبت وابسته است. در شرایط استاندارد (۱۵ درجه سانتی‌گراد و $101.325/1013$ کیلوپاسکال) چگالی هوا 1.225 کیلوگرم بر مترمکعب بود و در شرایط دیگر در سیستم متریک چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر مترمکعب با معادله (۲) محاسبه می‌شود [۱۰].

$$\rho_{air} = 1.225 \left(\frac{P_r}{101.325} \right) \left(\frac{288.16}{273.16 + T_r} \right) \quad (2)$$

P_r : فشار هوا برحسب کیلو پاسکال

T_r : دما هوا برحسب درجه سانتی‌گراد

با توجه به رابطه مستقیم نیروی پسا با مجذور سرعت، با تغییر کم سرعت خودرو نیروی پسا به مقدار زیادی افزایش می‌یابد و موتور خودرو باید قدرت بیشتری برای غلبه بر آن تولید کند. علاوه بر این رابطه بین نیروی پسا و سرعت خودرو نشان می‌دهد که آیرودینامیک خودرو در سرعت‌های پایین، اهمیت چندانی ندارد. نیروهای آیرودینامیکی (برای مثال نیروی پسا) تأثیر منفی بر مصرف سوخت دارند. حدود 30 الی 50 درصد انرژی سوخت به دلیل نیرو آیرودینامیک از بین می‌رود. هنگامی که خودرو با سرعت بالا (حدود 100 کیلومتر بر ساعت) حرکت می‌کند نیروی پسا به 80 درصد ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. در سرعت‌های زیاد به علت نیروی پسا میزان مصرف سوخت 50 درصد افزایش می‌یابد. رابطه بین میزان مصرف سوخت و تغییرات ضریب نیرو پسا طبق فرمول (۳) محاسبه می‌شود [۱۱].

$$\frac{\Delta FC}{FC} = \eta \times \left(\frac{\Delta C_D}{C_D} + \frac{\Delta A_f}{A_f} + 3 \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (3)$$

FC : مصرف سوخت

A_f : مساحت خودرو از نمای روبرو

η : ضریب شرایط رانندگی (برای رانندگی در سرعت‌های زیاد بین 0.5 الی 0.7 می‌باشد).

دسته‌بندی تونل‌های باد بر اساس عدد ماخ

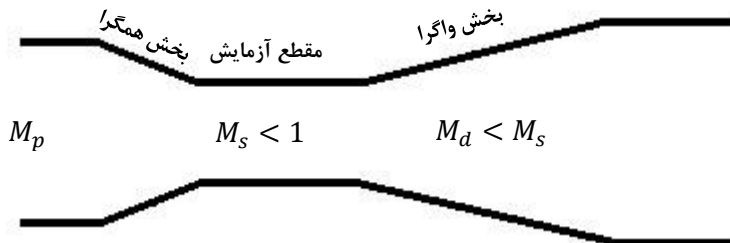
تونل‌های باد اغلب بر اساس سرعت جریان هوا در مقطع آزمایش نسبت به سرعت صوت به چهار دسته تقسیم می‌شوند. نسبت سرعت هوا به سرعت صوت عدد ماخ نامیده می‌شود (جدول ۱).

جدول ۱. دسته‌بندی تونل‌های باد بر اساس عدد ماخ [۱۳].

ردیف	نوع تونل باد	عدد ماخ در مقطع آزمایش
۱	مادون صوت ^۱	$M < 0.8$
۲	گذر صوت ^۲	$0.8 < M < 1.2$
۳	مافوق صوت ^۳	$1.2 < M < 5$
۴	ابر صوت ^۴	$M > 5$

تونل باد مادون صوت

در جریان‌های مادون صوت، چگالی هوا تقریباً ثابت می‌ماند و کاهش سطح مقطع باعث افزایش سرعت جریان و کاهش فشار می‌شود. به‌طور مشابه، افزایش سطح مقطع باعث کاهش سرعت جریان و افزایش فشار می‌شود. ما بیشترین سرعت ممکن در مقطع آزمایش را می‌خواهیم. در تونل باد مادون صوت، مقطع آزمایش کمترین سطح مقطع تونل باد را دارد و بعد از بخش همگرا^۵ و قبل از بخش واگرا^۶ قرار می‌گیرد (شکل ۱).



شکل ۱. تونل باد مادون صوت.

تونل باد مادون صوت

در جریان‌های مافوق صوت به دلیل تراکم‌پذیری، چگالی هوا در تونل باد تغییر می‌کند و کاهش سطح مقطع باعث کاهش سرعت جریان و افزایش فشار می‌شود. به‌طور مشابه، افزایش مساحت باعث افزایش سرعت و کاهش فشار می‌شود. ما بیشترین سرعت ممکن در مقطع آزمایش را می‌خواهیم. در تونل باد مافوق صوت، جریان را متراکم می‌کنیم تا در گلوگاه عدد ماخ برابر با یک شود سپس در بخش واگرا سرعت و عدد ماخ به شدت افزایش می‌یابد. در تونل باد مافوق صوت، مقطع آزمایش در انتهای بخش واگرا قرار می‌گیرد (شکل ۲) [۱۳].

¹ Subsonic

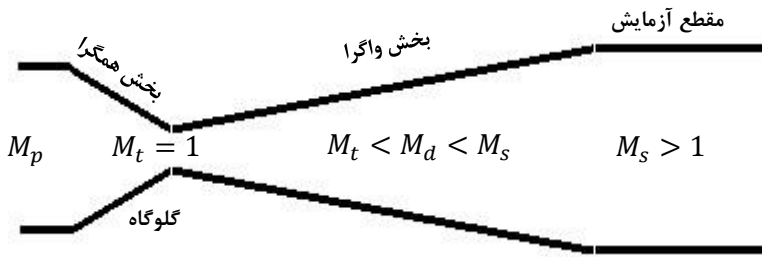
² Transonic

³ Supersonic

⁴ Hypersonic

⁵ Contraction Section

⁶ Diffuser Section



شکل ۲. تونل باد مافوق صوت.

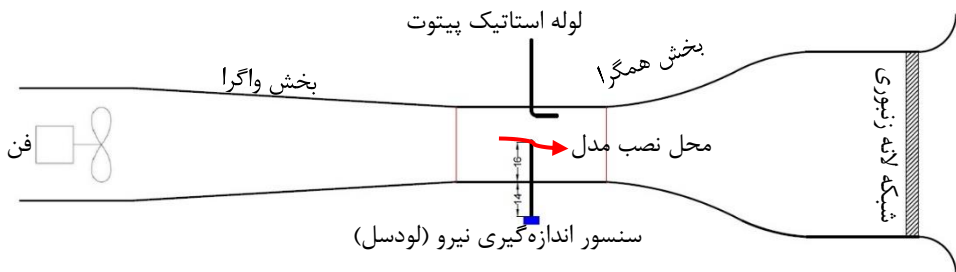
M_d : عدد ماخ در بخش واگرا
 M_t : عدد ماخ گلوگاه

M_p : عدد ماخ در ورودی تونل باد
 M_s : عدد ماخ در مقطع آزمایش

شرایط آزمایشگاهی

اجزای تونل باد (شکل ۳):

- ۱- فن: وظیفه تولید جریان هوا را بر عهده دارد.
- ۲- شبکه لانه زنبوری^۱: این شبکه برای آرام کردن و جلوگیری از ایجاد اغتشاش هوای ورودی به کار می‌رود. هوا در این مرحله با عبور از شبکه لانه زنبوری موازی دیواره‌های تونل جهت می‌گیرد و وارد بخش بعد می‌شود.
- ۳- بخش همگرا^۲: سطح مقطع عبور هوا را کم می‌کند و همین امر باعث افزایش سرعت هوا نسبت به ورودی می‌شود.
- ۴- بخش واگرا: با افزایش سطح مقطع عبور هوا، سرعت هوا کاهش یافته و از تونل باد خارج می‌شود.
- ۵- مقطع آزمایش: مدل‌های مورد آزمایش و لوله استاتیک پیتو در این قسمت قرار می‌گیرند.
- ۶- لوله استاتیک پیتوت: این ابزار اختلاف فشار استاتیک و فشار رکود را بر حسب پاسکال (ΔP) در مقطع آزمایش تعیین می‌کند (شکل ۴).
- ۷- سنسور اندازه‌گیری نیرو (لودسل)

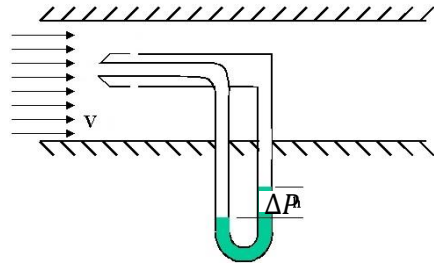


شکل ۳. اجزای تونل باد مادون صوت آزمایشگاه.

¹ Honeycomb
² Nozzel



(ب)



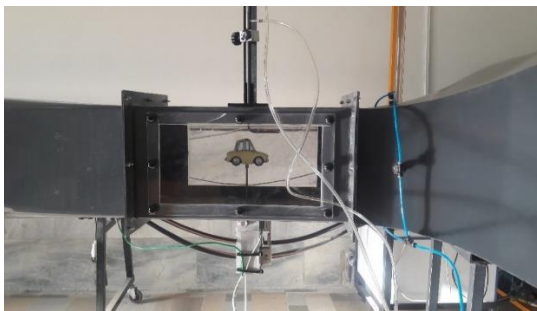
(الف)

شکل ۴. (الف) لوله استاتیک پیتوت (ب) نشان‌دهنده اختلاف فشار لوله استاتیک پیتوت.

آیرودینامیک مدل خودرو با مقیاس ۱:۳۰ در تونل باد بررسی می‌شود. طول، عرض و ارتفاع مدل به ترتیب ۱۳۲، ۵۸ و ۷۰ میلی‌متر است (شکل ۵ الف). با توجه به حداکثر سرعت خودرو در جاده از تونل باد مادون صوت استفاده می‌شود. تونل باد مادون صوت نوع باز (شکل ۵ ب) در آزمایش دارای سطح مقطع آزمایش ۳۰ cm * ۳۰ cm است. نیروی آیرودینامیک پسا توسط لودسل^۱ اندازه‌گیری می‌شود. فاصله لودسل تا کف مقطع آزمایش ۱۴۰ میلی‌متر است. با استفاده از فرمول (۴) سرعت جریان هوا در مقطع آزمایش و از فرمول (۵) ضریب پسا محاسبه می‌شود [۱۴].

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{air}}} \quad (۴)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\Delta P \times A_f} \quad (۵)$$



(ب)



(الف)

شکل ۵. (الف) مدل خودرو (ب) تونل باد مادون صوت آزمایشگاه.

^۱ Load Cell

ضریب انسداد تونل باد^۱ طبق فرمول (۶) محاسبه می‌شود. ضریب انسداد تونل باد باید کمتر از ۷/۵ درصد باشد که در این آزمایش مقدار آن ۴/۵ درصد محاسبه شده و در محدوده تعیین شده می‌باشد. بنابراین مدل خودرو می‌تواند در این تونل باد، دقیق بررسی شود [۱۵].

$$(۶) \quad \text{ضریب انسداد تونل باد} = \frac{\text{مساحت سطح مقطع عرضی مدل خودرو}}{\text{مساحت سطح مقطع آزمایش تونل باد}} \times 100$$

کمپرسور کولر خودرو یک پمپ است که وظیفه انتقال مبرد را برعهده دارد و به نوعی قلب مجموعه نامیده می‌شود. کمپرسور کولر خودرو از طریق تسمه به موتور خودرو متصل است و بخشی از قدرت موتور خودرو را می‌گیرد و باعث افزایش مصرف سوخت تا حدود ۱۰ درصد می‌شود [۱۶]. بعضی از راننده‌ها، به‌خصوص راننده‌های وسایل نقلیه عمومی، به‌جای روشن کردن کولر، شیشه‌های خودرو را پایین می‌دهند. در این مقاله میزان افزایش ضریب پسا در حالت پایین بودن شیشه‌ها نسبت به حالت بالا بودن شیشه‌ها در تونل باد مادون صوت بررسی می‌شود. برای محاسبه ضریب پسا پنج حالت مختلف مدل خودرو سدان استفاده می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲. مشخصات حالت‌های مختلف مدل خودرو.

نام مدل	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵
شیشه‌های دو در جلو	کاملاً بسته	کاملاً باز	نیمه‌باز	کاملاً باز	نیمه‌باز
شیشه‌های دو در عقب	کاملاً بسته	کاملاً باز	نیمه‌باز	کاملاً بسته	کاملاً بسته

کالیبراسیون تونل باد توسط جسم کره‌ای شکل از جنس پلی‌تترافلورو اتیلن (با نام تجاری تفلون) به قطر ۸۰ میلی‌متر و ضریب پسا ۰/۴۷ انجام می‌شود.

ضریب پسا عدد بدون بعد است. مقدار آن مستقل از خصوصیات جریان و وابسته به مشخصات هندسی و فیزیکی جسم می‌باشد. به‌منظور اعتبارسنجی و صحت‌سنجی، ضریب پسا برای هر حالت مدل خودرو در دو سرعت مختلف در تونل باد آزمایش می‌شود. حالت‌های ۱ الی ۵ به‌ترتیب در مقطع آزمایش تونل باد نصب می‌شوند. در تونل باد به‌وسیله فن جریان باد با سرعت‌های مختلف در مقطع آزمایش ایجاد می‌کنیم و برای هر حالت و در هر سرعت اختلاف فشار لوله استاتیک پیتوت و نیرو پسا را در جدول ۳ یادداشت می‌کنیم. با توجه به فرمول (۲) چگالی هوا ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. با استفاده از فرمول‌های (۴) و (۵) به‌ترتیب سرعت جریان هوا در مقطع آزمایش تونل باد و ضریب پسا را محاسبه و در جدول ۳ یادداشت می‌کنیم.

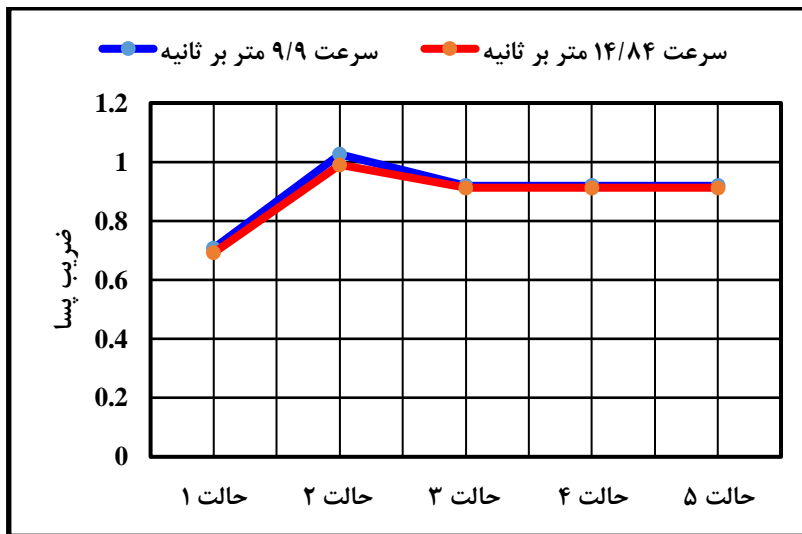
جدول ۳. نتایج آزمایش حالت‌های ۱ الی ۵.

نام حالت	اختلاف فشار لوله استاتیک پیتوت (ΔP)	سرعت جریان هوا در مقطع آزمایش تونل باد (V)	نیرو پسا (F_D)	ضریب پسا (C_D)	میانگین ضریب پسا برای هر حالت
حالت ۱	۶۰	۹.۸۹۷	۰.۱۷۱۶۷۵	۰.۷۰	۰.۷
	۱۳۵	۱۴.۸۴۶	۰.۳۷۷۶۸۵	۰.۶۹	
حالت ۲	۶۰	۹.۸۹۷	۰.۲۴۸۹۲۸۷۵	۱.۰۲	۱

¹ Blockage Ratio of Wind Tunnel

نام حالت	اختلاف فشار لوله استاتیک پیتوت (ΔP)	سرعت جریان هوا در مقطع آزمایش تونل باد (V)	نیرو پسا (F_D)	ضریب پسا (C_D)	میانگین ضریب پسا برای هر حالت
حالت ۳	۱۳۵	۱۴.۸۴۶	۰.۵۴۰۷۷۶۲۵	۰.۹۹	۰.۹۱
	۶۰	۹.۸۹۷	۰.۲۲۳۱۷۷۵	۰.۹۱	
حالت ۴	۱۳۵	۱۴.۸۴۶	۰.۴۹۷۸۵۷۵	۰.۹۱	۰.۹۱
	۶۰	۹.۸۹۷	۰.۲۲۳۱۷۷۵	۰.۹۱	
حالت ۵	۱۳۵	۱۴.۸۴۶	۰.۴۹۷۸۵۷۵	۰.۹۱	۰.۹۱
	۶۰	۹.۸۹۷	۰.۲۲۳۱۷۷۵	۰.۹۱	

شکل ۶ نمودار تغییرات ضریب پسا پنج حالت مختلف مدل خودرو در سرعت‌های ۱۴/۸۴ و ۹/۹ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳ و نمودار شکل ۶ نتایج زیر حاصل می‌شود.



شکل ۶. تغییرات ضریب پسا در پنج حالت مختلف مدل خودرو.

- برای هر پنج حالت مختلف مدل خودرو، اختلاف ضریب پسا در سرعت‌های ۱۴/۸۴ و ۹/۹ متر بر ثانیه کم و حداکثر اختلاف مربوط به حالت ۲ بوده و مقدار آن ۲/۹۴ درصد است. همین امر دقت دستگاه تونل باد و آزمایش را نشان می‌دهد.
- ضریب پسا در حالت ۲ نسبت به حالت ۱ به مقدار ۴۳ درصد رشد دارد و همچنین با توجه به فرمول (۳) مصرف سوخت نسبت به حالت ۱ در سرعت‌های زیاد بین ۲۱ الی ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.
- در حالت‌های ۳، ۴ و ۵ سطح مسیر ورود هوا و مقدار هوای وارد شده به داخل اتاق مدل خودرو تقریباً یکسان است و در نتیجه میزان افزایش نیرو پسا و ضریب پسا در حالت‌های ۳، ۴ و ۵ نسبت به حالت یک برابر است. ضریب پسا در حالت‌های ۳، ۴ و ۵ یکسان می‌باشد و نسبت به حالت ۱ به مقدار ۳۰ درصد رشد دارد و

همچنین با توجه به فرمول (۳) مصرف سوخت نسبت به حالت ۱ در سرعت‌های زیاد بین ۱۵ الی ۲۱ درصد افزایش می‌یابد.

هنگام طراحی بدنه خودرو و محاسبه نیروهای آیرودینامیکی، شیشه‌های خودرو بسته هستند. مقدار و غلظت هوای داخل اتاق خودرو نسبت به بیرون کمتر است. وقتی شیشه‌ها را پایین می‌کشید هوای بیرون به داخل اتاق خودرو می‌آید. این هوا به شیشه عقب و بخش‌های مختلف داخل اتاق خودرو نیرو وارد می‌کند و باعث افزایش نیرو و ضریب پسا می‌شود در نتیجه در این مقاله افزایش ضریب پسا در حالت‌های ۲ الی ۵ نسبت به حالت ۱ منطقی می‌باشد [۱۶].

نتیجه‌گیری

ضریب پسا از مشخصه‌های هر جسم متحرک (مثل خودرو) در هوا است و با تعیین آن می‌توان نیرو پسا را محاسبه کرد. خودرو شکل هندسی مشخصی ندارد بنابراین تنها روش اندازه‌گیری ضریب پسای خودرو استفاده از تونل باد مادون صوت است. ضریب پسا یک عدد بدون بعد است بنابراین برای کاهش هزینه‌های آزمایش می‌توان از مدل کوچک‌شده خودرو در تونل باد به‌منظور اندازه‌گیری ضریب پسا استفاده شود. با مقایسه حالت ۲ نسبت به حالت ۱، ضریب پسا به مقدار ۴۳ درصد رشد دارد و مصرف سوخت در سرعت‌های زیاد بین ۲۱ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. ضریب پسا در حالت‌های ۳، ۴ و ۵ یکسان است. با مقایسه حالت‌های ۳، ۴ و ۵ نسبت به حالت ۱، ضریب پسا به مقدار ۳۰ درصد رشد دارد و مصرف سوخت در سرعت‌های زیاد بین ۱۵ الی ۲۱ درصد افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

از مسئولین محترم آزمایشگاه مکانیک سیالات دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان کردستان که در انجام آزمایش‌ها ما را یاری رسانده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

References

- [1] Birwa, S. K., Rathi, N., & Gupta, R. (2013). Aerodynamic analysis of Audi A4 Sedan using CFD. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 94(2), 105-111. <https://doi.org/10.1007/s40032-013-0065-1>
- [2] Selvaraju, P. N., & Parammasivam, K. M. (2019). 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), 1487-1496. <https://doi.org/10.29252/jafm.12.05.29674>
- [3] Hassan, S. M. R., Islam, T., Ali, M., & Islam, M. Q. (2014). Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars. *Procedia Engineering*, 90, 308-313. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.854>
- [4] Krishnan, S., Ma, M., & Kesari, V. (2016). Investigating The Drag Coefficient Of Scaled Model Car By Using Wind Tunnel. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5(4), 16-19. https://www.academia.edu/115740284/Investigating_the_Drag_Coefficient_of_Scaled_Model_Car_by_Using_Wind_Tunnel
- [5] Gao, C. (2023). Effect of front windshield angle on drag coefficient of electric vehicles. *Theoretical and Natural Science*, 12(1), 101-107. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/12/20230442>
- [6] Rayzan, K., & Keshavarzi, A. (2016). Experimental Study for Addition Rough Surfaces on a Vehicle Floor Body and Comparison of Aerodynamics Coefficient. *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, 9(3), 467-478. <http://sanad.iau.ir/en/Article/1091990>

- [7] Gunpinar, E., Coskun, U. C., Ozsipahi, M., & Gunpinar, S. (2019). A Generative Design and Drag Coefficient Prediction System for Sedan Car Side Silhouettes based on Computational Fluid Dynamics. *Computer-Aided Design*, 111(11), 65-79. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.02.003>
- [8] Rahmatinejad, B., Rahimi Asiabaraki, H., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Investigation of the effect of AL2O3 nanofluid in M13NI engine cooling system. *The Journal of Engine Research*, 70(1), 47-65. <https://doi.org/10.22034/er.2023.1975318.0>
- [9] Oloruntoba, O., Alonge, O., Joseph, O., & Abiola, O. (2023). Aerodynamic Study of Minibus in Open and Closed Window Scenarios. *Eternal Scientific Publications Journal of Engineering & Technology Advancements*, 3(3), 15-22. <https://doi.org/10.56472/25832646/JETA-V3I7P103>
- [10] Gillespie, T. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International. <https://books.google.com/books?id=ztdOzgEACAAJ>
- [11] Sivaraj, G., Parammasivam, K. M., & Suganya, G. (2018). Reduction of aerodynamic drag force for reducing fuel consumption in road vehicle using basebleed. *Journal of Applied fluid mechanics*, 11(6), 1489-1495. <https://doi.org/10.29252/jafm.11.06.29115>
- [12] Hall, N. (2021, May 13). *Types of Wind Tunnels*. NASA. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntype.html>
- [13] Hall, N. (2021, May 13). *Wind Tunnel Design*. NASA. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunnoz.html>
- [14] Fox, R. W., McDonald, A. T., & Mitchell, J. W. (2020). *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics* (10 ed.). Wiley. <https://books.google.com/books?id=v4T3DwAAQBAJ>
- [15] Ponnusamy, N. S., & Kanjikkovil, M. P. (2016). Numerical and experimental investigations of drag force on scaled car model. *Thermal Science*, 20(4), 1153-1158. <https://doi.org/10.2298/TSCI16S4153P>
- [16] Aravind Swamy, D., Abhikesh Chandra, K., Thanu Sree, M., & Hazari, N. (2020). Improving Fuel Consumption While using Air Conditioning in Vehicles. *International Journal of Science and Research*, 9(9), 873-878. <https://doi.org/10.21275/SR20827151028>