



## بررسی و شبیه‌سازی پدیده آیرودینامیک خودرو در هنگام عبور از خودروی دیگر (مانور سبقت)

کوروش گودرزی<sup>۱\*</sup>، وحید جندقی شاهی<sup>۲</sup>، محمدحسن شجاعی فرد<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم صنعت ایران

۳- استاد گروه مکانیک، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم صنعت ایران

\*یاسوج، صندوق پستی ۷۴۸۳۱-۷۵۹۱۸ kgoudarzi@iust.ac.ir

**چکیده-** مانورهای سبقت و عبور دو خودرو از کنار یکدیگر و همچنین باد مخالف می‌توانند اثر قابل توجهی بر روی مصرف سوخت و پایداری خودروها در جاده داشته باشند. زمانی که دو خودرو از یکدیگر سبقت می‌گیرند و یا از کنار هم عبور می‌کنند، جریان اطراف بدنه هر کدام متقابلاً بر دیگری تأثیر می‌گذارد و می‌تواند سبب ایجاد یک جریان باد ناگهانی شدید گردد. جریان به وجود آمده به‌صورت یک نیروی اضافی بر هر دو خودرو اعمال می‌شود. در این تحقیق با تکیه بر نتایج تجربی گذشته، به بررسی و شبیه‌سازی عددی و درک رفتار آیرودینامیک خودروها در زمان سبقت گرفتن از یکدیگر بر روی یک مدل ساده شده با استفاده از نرم‌افزار *ANSYS CFX* پرداخته می‌شود. مدل‌سازی دو خودرو طوری طراحی گردیده است تا اثر پارامترهایی نظیر فاصله‌های طولی و عرضی آنها از یکدیگر و همچنین تغییر در زاویه باد مخالف بر روی نیروها و ضرایب آیرودینامیکی حاصله از مانور سبقت بررسی شوند. نیروهای آیرودینامیکی به‌صورت توابعی از فواصل یاد شده و زاویه باد مخالف در نظر گرفته شده اند و نیروهای لحظه‌ای، ضرایب پسا و جانبی مربوط به خودروی ثابت و متحرک برحسب پارامترهای ذکر شده به‌صورت منحنی‌های مشخصه‌ای توصیف شده‌اند.

**کلیدواژگان:** مانور سبقت، فاصله طولی و عرضی خودروها نسبت به هم، زاویه باد مخالف، ضرایب پسا و جانبی

## Numerical investigation of aerodynamic phenomena with passing manoeuvres

K. Goudarzi<sup>1\*</sup>, V. Jandaghi Shahi<sup>2</sup>, M. H. Shojaeefard<sup>3</sup>

1- Assistant Professor of Mechanical Eng, Yasouj Univ.

2- M. Sc. Student of Automotive Eng, Iran Univ. of Science and Tech.

3- Professor of Mechanical Eng, Iran Univ. of Science and Tech.

\*P.O.B. 75918-74831 Yasouj, Iran. kgoudarzi@iust.ac.ir

**Abstract-** Passing manoeuvres and crosswind can have significant effects on the stability and fuel consumption of road vehicles. When two vehicles overtake or cross, they mutually influence the flow field around each other, and under certain conditions, can generate sever gust loads that acts as an additional forces on both vehicles. The forces acting on them are a function of the longitudinal and transverse spacings and of the relative velocity between the tow vehicles. In this paper, the models were designed to study the effects of various parameters such as the longitudinal and transverse spacing, the relative velocity and the crosswind on the aerodynamic forces and moments generated on the overtaken and overtaking vehicles using Ansys CFX. The aerodynamic forces have been predicted by a SST model solution of the Navier-Stokes equations for turbulent flow. The numerical predictions for the evaluation of aerodynamic coefficients agree well with the scaled-down air tunnel experimental work.

**Keywords:** Passing Manoeuvres, Longitudinal and Transverse Spacing, Aerodynamic Forces

## ۱- مقدمه

امروزه طراحی آیرودینامیک خودروهای مدرن به‌منظور کاهش ضریب پسا، حساسیت آنها به مانورهای سبقت و عبور و در نهایت کمینه کردن اثر جریان باد مخالف است. این حساسیت ها به خصوصیات خودرو (جرم، ممان اینرسی، مجموعه تعلیق، تایلر و...)، شکل آیرودینامیکی و مشخصه‌های فرمان آنها وابسته است [۱]. زمانی که دو خودرو در فاصله‌ای نزدیک به هم از کنار یکدیگر عبور می‌کنند و یا سبقت می‌گیرند، جریان اطراف بدنه آنها بر روی دیگری اثر می‌گذارد و سبب ایجاد نیروی ناگهانی شدیدی می‌شود. این نیروها به‌عنوان یک نیروی اضافی، بر هر دو خودرو اعمال می‌شود و اثر متقابل دارند. شناخت و بررسی نیروهای آیرودینامیکی حاصله از مانور سبقت و عبور به لحاظ بالا بردن میزان کنترل و پایداری خودروها بر روی جاده و کاهش مصرف سوخت آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تحقیقات زیادی در ارتباط با مسائل آیرودینامیک خودرو توسط محققان انجام شده است. افراد زیادی آزمایشات تجربی و عددی فراوانی را بر روی مدل یک‌دهم خودروهای تجاری نظیر وانت بارها، اتوبوس‌ها و تریلرها انجام داده‌اند. اثر پارامترهایی نظیر شکل کلی بدنه، تغییرات در قسمت‌هایی خاص از آنها و فاصله کف خودرو تا زمین بر روی ضرایب آیرودینامیکی توسط آقایان عبدالعظیم<sup>۱</sup>، هفلی<sup>۲</sup>، یاشیدا<sup>۳</sup> و همکارانش، بین سال‌های ۱۹۷۳ تا ۱۹۷۷ مورد بررسی قرار گرفته است [۲، ۳، ۴].

در این بین تعداد اندکی از پژوهشگران به انجام آزمایشات دینامیکی پرداختند. آنها در بررسی های خود، یکی از خودروها را ثابت و دیگری را در حال حرکت (با سرعت نسبی متفاوت) در نظر می‌گرفتند. یاماموتو<sup>۴</sup> و ناکاگاوا<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۷ آزمایشات تجربی خود را بر روی مدل یک‌دهم در شرایط دینامیکی انجام دادند. آنها

پیشنهاد کردند در نرخ‌های سرعت نسبی<sup>۶</sup> کمتر از ۰/۲۵، اثرات دینامیکی قابل اغماض است و می‌توان مدل را به صورت استاتیکی فرض نمود [۶]. رابطه ۱ معرف نرخ سرعت نسبی است. این پارامتر بدون بعد به‌عنوان رابط میان شرایط واقعی و آزمایش عمل می‌کند.

$$k = \frac{V_r}{V} \bigg|_{Wind\ tunnel} = \frac{V_r}{V} \bigg|_{Road} \quad (1)$$

در این رابطه  $V_r$  سرعت دو خودرو نسبت به هم و  $V$  سرعت جریان باد مخالف است [۱]. تلینیس<sup>۷</sup> و همکاران تحلیل‌های خود را بر روی دو مدل مجزا در بازه بزرگتری از نرخ سرعت نسبی انجام دادند و نشان دادند که اثرات دینامیکی تا  $k \leq 0.4$  ناچیز است [۵]. محاسبات دینامیکی انجام شده توسط اوکومورا<sup>۸</sup> و کوری یاما<sup>۹</sup> در شرایط ناپایدار مشخص نمود اثرات دینامیکی در نرخ‌های بالای سرعت، بسیار چشمگیر و با اهمیت هستند. به طوری که در نرخ سرعت  $k = 0.5$  بیشینه مقدار گشتاور یا<sup>۱۰</sup> خودرو در هنگام عبور از خودروی دیگر نزدیک به دو برابر شرایط شبه پایدار است [۶].

در سال‌های اخیر آقایان نوگر<sup>۱۱</sup> و گیلیورون<sup>۱۲</sup> شرایط پایدار، شبه پایدار و آزمایش‌های دینامیکی را گسترش دادند و مانور سبقت خودرو را با بکارگیری مدل پایه احمد<sup>۱۳</sup> و با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر فواصل طولی و عرضی، نرخ سرعت نسبی و زاویه باد مخالف شاخصه‌مند کردند و در آخر آنها اثر موارد مذکور را بر روی ضرایب آیرودینامیکی به‌صورت تجربی اندازه گیری نمودند [۷، ۸].

مقاله کنونی با تکیه بر نتایج تجربی گذشته به‌منظور صحت گذاری بر نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری، به بررسی و درک رفتار آیرودینامیک خودروها در هنگام مانور سبقت بر روی یک مدل

6. Velocity ratio

7. Telionis

8. Okumura

9. Kuriyama

10. Yaw Moment

11. Noger

12. Gillieron

13. Ahmed

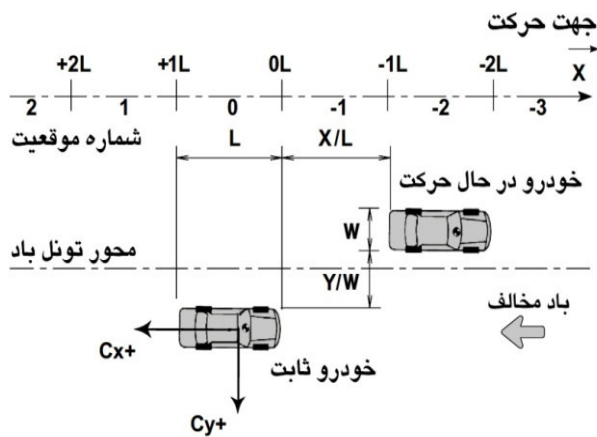
1. Abdel Azim

2. Heffley

3. Yoshida

4. Yamamoto

5. Nakagawa



شکل ۲ شماتیک مانور سبقت دو خودرو و نشانه گذاری متغیرها

به دلیل اثر متقابل دو خودرو بر یکدیگر، اختلافاتی در رفتار جریان خارجی حول بدنه خودروها مشاهده خواهد شد. این تفاوت در رفتار آئرو دینامیکی سبب اعمال یک نیروی اضافی بر آنها می شود و در نهایت بر پایداری و مصرف سوختشان تأثیر می گذارد.

فضای محاسباتی مربوط به تونل باد نیز کاملاً مشابه تونل آزمایشگاهی شبیه سازی شده است. سطح مقطع مدل در حدود ۵ درصد سطح مقطع تونل می باشد تا عبور جریان از روی دیواره ها کمترین تأثیر را بر روی نتایج داشته باشد [۱۰].

فواصل طولی و عرضی به ترتیب با تقسیم نمودن آنها به طول و عرض مدل پایه به متغیرهای بدون بعد تبدیل شده اند. با روشی مشابه نیروهای آیرودینامیکی به وسیله ضریب پسا<sup>۵</sup> ( $C_x$ ) و ضریب جانبی<sup>۶</sup> ( $C_y$ ) طبق روابط (۲) و (۳) بیان می شوند [۱۱].

$$C_x(\beta) = \frac{F_x}{\sqrt{2} \rho S_x V^2} \quad (2)$$

$$C_y(\beta) = \frac{F_y}{\sqrt{2} \rho S_y V_{cw}^2} \quad (3)$$

5. Drag Coefficient  
6. Side Coefficient

ساده شده با استفاده از نرم افزار *ANSYS CFX* می پردازد. در بخش نتایج، ضرایب پسا و نیروی جانبی به صورت توابعی از موقعیت های دو خودرو نسبت به هم (طول و عرضی) و همچنین زاویه باد مخالف ارائه می گردد. به منظور انجام تحلیل های پایدار از نرخ سرعت نسبی پایین استفاده شده است.

## ۲- مدل سازی

برای حل عددی از مدل پایه آقای احمد که نتایج آزمایشات تجربی آن موجود است، استفاده گردیده است [۹]. این مدل که در شکل ۱ نشان داده شده است، سه بعدی است و دارای سطح مقطع یکسان در طول خود می باشد. نسبت طول به عرض خودرو برابر با ۲/۷ و فاصله زمینی، ۳۳۰ میلی متر است.



شکل ۱ مدل ساده بکار رفته خودرو در شبیه سازی

مشخصات ابعادی این مدل در جدول ۱ ارائه شده است. هر دو مدل در مانور سبقت دارای ابعاد کاملاً مشابه بوده و تفاوت اصلی، در فاصله های طولی و عرضی مختلف بین آنهاست.

جدول ۱ مشخصات ابعادی مدل پایه

|                                     |               |
|-------------------------------------|---------------|
| طول                                 | ۴۳۸۴ میلی متر |
| عرض                                 | ۱۶۳۴ میلی متر |
| ارتفاع                              | ۱۵۹۴ میلی متر |
| فاصله طولی بین دو محور <sup>۱</sup> | ۱۹۷۴ میلی متر |
| فاصله عرضی بین دو چرخ <sup>۲</sup>  | ۱۳۷۴ میلی متر |
| فاصله زمینی                         | ۳۳۰ میلی متر  |

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده در این مدل سازی یک خودرو ثابت<sup>۳</sup> و خودروی دیگر<sup>۴</sup> در موقعیت های استاتیکی طولی و عرضی متفاوت فرض می شود.

1. Wheel base
2. Track
3. Overtaken Vehicle
4. Overtaking Vehicle

که لازم است نتایج به‌دست آمده برای یک شبیه‌سازی مستقل از تعداد المان‌ها باشد، شبکه تا حدی ریز شده است تا ضریب پسا محاسبه شده از نرم‌افزار در مقایسه با نتایج تجربی، مستقل از تعداد المان‌ها شود. به‌همین دلیل تعداد کل المان‌ها برای مدل مجزاً برابر با ۱۰۴۴۰۴ انتخاب گردید. از این میان تعداد ۸۳۹۰۰ المان چهار وجهی، ۴۳۵ المان هرمی و ۲۰۰۶۹ المان منشوری وجود دارد.

در حل عددی میدان جریان، از روش حجم محدود استفاده شده است. جریان دائمی است زیرا در سرعت‌های پایین جریان (کمتر از ۰/۳ سرعت صوت)، می‌توان سیال را تراکم ناپذیر فرض کرد. برای کوپلینگ سرعت و فشار از الگوریتم ساده استفاده شد. فشار به‌صورت استاندارد گسسته سازی شده و منتوم، انرژی جنبشی توربولانسی<sup>۷</sup> و نرخ استهلاك توربولانسی نیز به‌روش پیشرو مرتبه دوم<sup>۸</sup> گسسته سازی شده است [۱۲]. از آنجایی که جریان هوای اطراف خودرو آشفته خواهد بود از الگوهای تحلیل جریان آشفته استفاده می‌شود. از میان روش‌های متفاوتی که برای آشفتگی وجود دارد، روش مناسب برای این نوع تحلیل، مدل توربولانسی  $k-\epsilon$  استاندارد است. این روش در شبیه‌سازی جریان در اطراف دیواره‌ها دقت مناسبی داشته و سرعت همگرایی آن بالاست [۱۳].

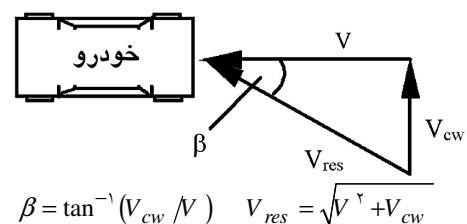
### ۳- شرایط مرزی و مقدار اولیه

مدل‌های ساخته شده همانند آنچه در شکل ۵ دیده می‌شود به نواحی ورودی<sup>۹</sup> و خروجی<sup>۱۰</sup>، دیواره‌های کناری<sup>۱۱</sup>، ناحیه خودرو ثابت<sup>۱۲</sup> و متحرک<sup>۱۳</sup>، ناحیه کف تونل<sup>۱۴</sup> و صفحه تقارن<sup>۱۵</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند.

6. Single Model
7. Turbulence Energy
8. Second Order Upwind
9. Inlet
10. Outlet
11. Free Walls
12. Fixed Vehicle
13. Moving Vehicle
14. Floor
15. Symmetric Plane

در روابط ذکر شده،  $S_x$  و  $S_y$  به‌ترتیب سطح تصویر شده مدل در جهت  $X$  و  $Y$ ، مقدار  $\beta$  زاویه حمله باد مخالف،  $V$  و  $V_{cw}$  به‌ترتیب سرعت باد مخالف در راستای طولی، عرضی است. چگالی هوا  $\rho$  در دمای  $25^\circ C$  و فشار یک اتمسفر برابر با  $1.225 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه دما در تمامی محیط حل ثابت فرض شده است، لذا خواص فیزیکی سیال که شامل لزجت ( $1.7894e-5 \text{ kg/ms}$ ) و چگالی می‌باشند، نسبت به دما در کل محیط بدون تغییر خواهند ماند. سرعت باد مخالف برابر با ۱۰ متر بر ثانیه در خلاف جهت حرکت و سرعت خودروی متحرک در تمام حالات شبیه‌سازی یکسان و ۵ متر بر ثانیه در خلاف جهت باد نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه ۱ مقدار  $k$  برابر با ۰/۲۵ می‌گردد تا شرایط پایدار بر مسئله حاکم شود. شکل ۴ رابطه میان سرعت طولی ( $V$ )، جانبی ( $V_{cw}$ ) و حمله باد ( $V_{res}$ ) را نشان می‌دهد.



شکل ۴ روابط موجود در میان بردارهای سرعت باد مخالف

در این مقاله سعی بر آن شده به دلیل اهمیت نواحی نزدیک به مرز مدل در دقت مسئله، از شبکه بندی ظریف تری در اطراف صفحات بدنه و کف تونل استفاده گردد. برای این کار از روش اینفلیشن<sup>۱</sup> در محیط شبکه بندی بهره گرفته شده است تا گره‌ها و المان<sup>۲</sup>‌ها در این منطقه متمرکز شوند.

به جهت بهبود نتایج و نزدیک شدن به نتایج آزمایشات تجربی از انواع المان‌های حجمی نظیر المان چهار وجهی<sup>۳</sup>، منشوری<sup>۴</sup> و هرمی<sup>۵</sup> برای شبکه‌بندی استفاده شد. از آنجایی

1. Inflation Method
2. Nod and Element
3. Tetrahedral Element
4. Prism Element
5. Pyramid Element

### ۳-۴- شرط مرزی خودروها

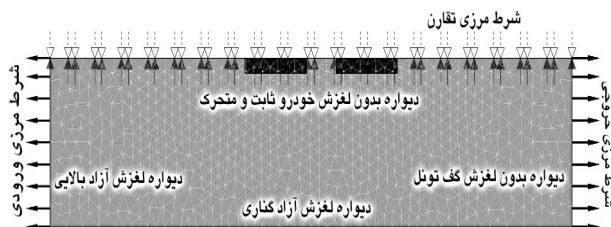
برای سطوح مربوط به خودروی ثابت و متحرک از شرط دیواره بدون لغزش<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. زبری این سطوح به صورت نرم فرض می‌شود تا نیروهای حاصل از اصطکاک را در بر گیرند.

### ۳-۵- شرط مرزی کف تونل

ناحیه مربوط به کف تونل دارای شرایط مرزی دیواره بدون لغزش است با این تفاوت که دارای سرعتی برابر ۵ متر بر ثانیه و هم جهت با باد مخالف به آن داده می‌شود تا در نهایت آنچه که در واقعیت اتفاق می‌افتد، مدل سازی شود. (سرعت جریان هوا نسبت به زمین برابر ۱۰ متر بر ثانیه است).

### ۳-۶- شرط مرزی تقارن

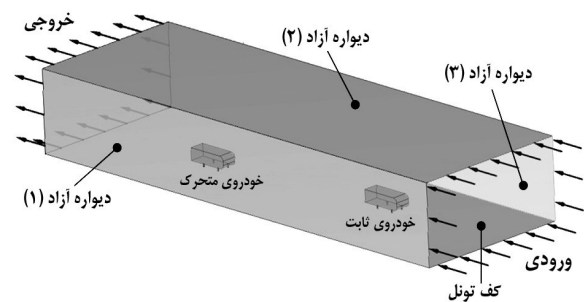
در مواردی که مدل دارای تقارن صفحه‌ای باشد به منظور کاهش حجم محاسبات و زمان حل از شرط مرزی تقارن استفاده می‌شود. تمامی شرایط مرزی توضیح داده شده در شکل ۶ به نمایش درآمده است.



شکل ۶ نمای بالایی مدل شبکه‌بندی شده و نمایش شرایط مرزی

### ۳-۷- مقدار دهی اولیه و شرایط حل

مقدار دهی اولیه برای حل پایدار مسئله بدین صورت که فشار استاتیکی برابر با یک اتمسفر فرض شد و نرخ شدت توربولانسی و لزجت تلاطم به طور متوسط انتخاب گردید. نرم افزار CFX برای حل عددی معادلات حاکم بر مسئله از روش حجم کنترل استفاده می‌کند که به ترتیب شامل: الف) تقسیم بندی حوزه حل به حجم کنترل های مجزا با استفاده



شکل ۵ نامگذاری نواحی مرزی در شبیه سازی

### ۳-۱- شرط مرزی ورودی

برای این منظور از شرط ورودی سرعت در نرم افزار استفاده شده است. سرعت ورودی جریان یکنواخت و برابر با ۱۵ متر بر ثانیه در تمامی حالات در نظر گرفته شده است. این سرعت برابر مجموع سرعت باد مخالف و سرعت خودروی متحرک می‌باشد. جریان به صورت عمود بر صفحه ورودی وارد می‌شود. شدت توربولانس بر مبنای اندازه گیری های صورت گرفته توسط هات وایر<sup>۱</sup> [۱۴] در تونل باد تحت شرایط آزمایش برابر با ۵/۰ درصد و طول جریان متلاطم ۰/۱ متر فرض می‌گردد.

### ۳-۲- شرط مرزی خروجی

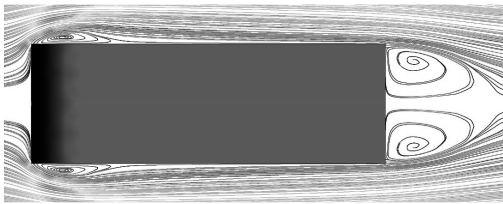
در خروجی از شرط فشار استفاده شده است. برای دستیابی به دقت بالاتر، مرز خروجی در فاصله از مدل قرار گرفته است که جریان پایین دست تونل (نزدیک به مرز خروجی) تحت تأثیر جریان بالا دست آن (نزدیک به مرز ورودی) قرار نگیرد و هیچگونه گرادیان فشاری در اطراف مرز خروجی در راستای عمود بر این مرز وجود نداشته باشد، این بدین معناست که می‌بایست فشار خروجی با فشار محیط برابر باشد یا به عبارت دیگر فشار نسبی برابر با صفر باشد.

### ۳-۳- شرط مرزی دیواره

برای دیواره های کناری سمت راست و بالای مدل از شرط دیواره استفاده می‌شود. این دیواره ها همانند آنچه در تونل باد تجربی اتفاق می‌افتد دارای لغزش آزاد<sup>۲</sup> هستند.

1. Hotwire
2. Free Slip Wall

3. No Slip Wall



شکل ۷ نمایش خطوط جریان و گردابه‌ها در اطراف مدل از نمای بالا



شکل ۸ نمایش بردار سرعت در نقاط مختلف بدنه

#### ۴-۲- اثر فاصله طولی

##### ۴-۲-۱- خودروی ثابت

شکل ۹ منحنی ضریب پسا برحسب فاصله طولی برای خودرو ثابت را در دو فاصله عرضی ۰/۲۵ و ۰/۷۵ ارائه می‌دهد. در این منحنی تغییرات ناگهانی نیروی پسا زمانی که دو خودرو به یکدیگر می‌رسند ( $x/l = 0$ ) به‌خوبی مشهود است. این تغییرات ناگهانی در فاصله عرضی کمتر ( $y/w = 0.25$ )، بیشتر چشمگیر است. البته باید به این موضوع اشاره کرد که آهنگ تغییرات در منحنی با فاصله عرضی کوچک، بیشتر است. زمانی که خودروی متحرک در موقعیت  $x/l = -1$  قرار دارد مقدار ضریب پسا در هر دو منحنی یکسان و برابر با ضریب پسای مدل مجزا در تونل باد است. به عبارت دیگر خودروی متحرک اثری بر ضریب پسای خودروی ثابت ندارد. با کاهش فاصله خودروی متحرک از خودروی ثابت در  $x/l = 0$  به دلیل آشفتگی جریان، ضریب پسا به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. با عبور خودروی متحرک از خودروی ثابت ( $x/l \geq 1$ )، گردابه‌هایی در پشت خودروی متحرک ایجاد می‌شود و سبب مغشوش شدن جریان و کاهش فشار نسبی می‌گردد. این عوامل، مقدار ضریب پسای خودرو ثابت را به تدریج کاهش می‌دهد و سپس با از میان رفتن اثر این جدایش‌ها، نیروی پسا در  $x/l \geq 3$  دوباره رو به افزایش می‌گذارد. اولین حداقل در ضریب پسا برای خودروی ثابت زمانی اتفاق می‌افتد که،

از شبکه محاسباتی ب) انتگرال‌گیری از معادلات بر روی حجم کنترل برای ساخت معادلات جبری برای متغیرهای مجهول نظیر سرعت و فشار و در آخر ج) خطی‌سازی معادلات مجزا و حل سیستم معادلات تا دستیابی به مقادیر جدید متغیرهاست. در این تحلیل از معیار همگرایی ریشه متوسط جذر باقیمانده<sup>۱</sup> با دقت  $10E-5$  با کمینه تکرار ۱ و بیشینه ۶۰ بار استفاده شده است.

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

##### ۴-۱- مدل مجزا

با توجه به روابط حاکم بر نیروهای آیرودینامیکی ذکر شده و به‌منظور صحت‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی عددی، در ابتدا مدل پایه به‌صورت مجزا مورد تحلیل قرار گرفت. نتیجه حاصل از این تحلیل و آزمایش تجربی [۱۵] در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ مشخصات آیرودینامیکی مدل تک در تونل باد

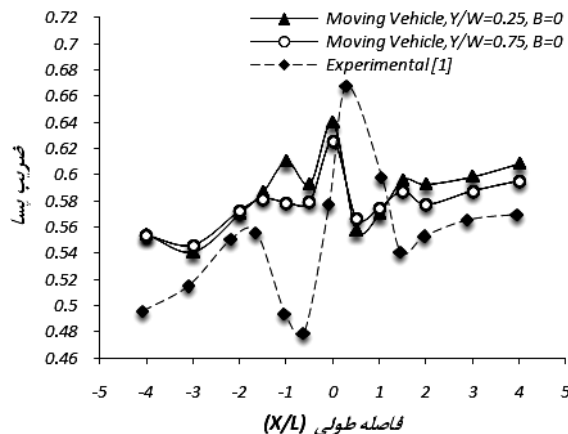
| مدل       | سطح جلو               | سرعت باد            |
|-----------|-----------------------|---------------------|
| مدل مجزا  | 1.0606 m <sup>2</sup> | 15 m/s <sup>2</sup> |
| نیروی درگ | $C_x$ شبیه‌سازی       | $C_x$ تجربی         |
| 85.7502 N | 0.586                 | 0.50                |

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار ضریب پسای به‌دست آمده توسط شبیه‌سازی در حدود ۱۷ درصد بیشتر از مقدار آن در آزمایش تجربی است. این اختلاف به دلیل لحاظ کردن ضریب پسای اصطکاکی در شبیه‌سازی عددی است. خطوط و بردارهای سرعت جریان برای مدل پایه در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در لبه‌های کناری و پشت مدل به دلیل تیز بودن و تغییر زاویه ناگهانی آنها، گردابه‌هایی شدید و جدایش جریان در این نواحی اتفاق افتاده است.

1. RMS Method



پسا برای خودروی متحرک به ترتیب در موقعیت‌های شماره ۰/۷۵ و ۰/۲۵ -۳- اتفاق می‌افتد.



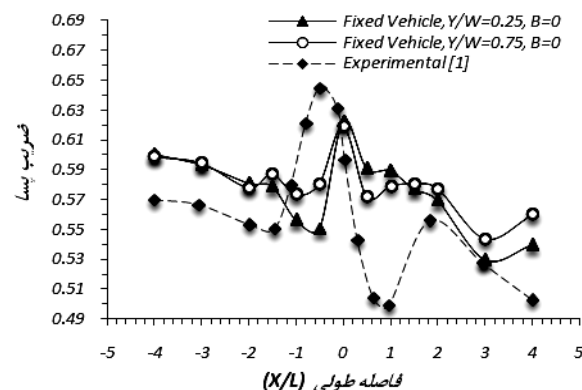
شکل ۱۰ ضریب پسا بر حسب فاصله طولی برای خودروی متحرک در دو فاصله عرضی ۰/۷۵ و ۰/۲۵

#### ۴-۲-۳- خودروی ثابت و متحرک

در شکل ۱۱ تغییرات ضریب پسا بر حسب فاصله طولی برای دو خودروی ثابت و متحرک را به طور همزمان به نمایش درآمده است. در فاصله طولی کم ( $x/l = 0.5$ )، به دلیل کاهش فشار و فشار در پشت خودروی ثابت، ضریب پسا برای هر دو خودرو دچار افت شدیدی می‌شود. به عبارت دیگر، این موقعیت یک فاصله بهینه از لحاظ وارد آمدن کمترین نیروی طولی به خودروها می‌باشد. به مرور با افزایش فاصله و بالا رفتن فشار و فشار، نیروی های آیرودینامیکی تشدید می‌یابد تا بالاخره در  $x/l \geq 4$ ، حالت یکنواختی به خود می‌گیرد.

به طور کلی منحنی ضریب پسا برای خودرو متحرک در سطح پایین تری نسبت به خودرو ثابت قرار دارد و این به دلیل افت محسوس گرادیان فشار، سرعت و چگالی هوا در فضای پشت خودروی ثابت است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ کانتور سرعت جریان را در دو فاصله مذکور نمایش می‌دهند. باید خاطر نشان کرد زاویه باد مخالف و فاصله عرضی در این حالت صفر در نظر گرفته شده است.

قسمت جلوی خودروی متحرک در نزدیکی بخش انتهایی خودروی ثابت باشد (برای فاصله عرضی ۰/۲۵ و ۰/۷۵ به ترتیب موقعیت‌های شماره ۰/۵- و ۱-). دومین حداقل در هر دو فاصله عرضی نام برده شده در موقعیت شماره ۳+ هنگامی که گرادیان فشار کاهش می‌یابد، به موقع می‌پیوندد. رفتار منحنی ضریب پسا با نتایج تجربی صورت گرفته همخوانی خوبی دارد و تنها اختلاف در مقدار تابع است [۱].

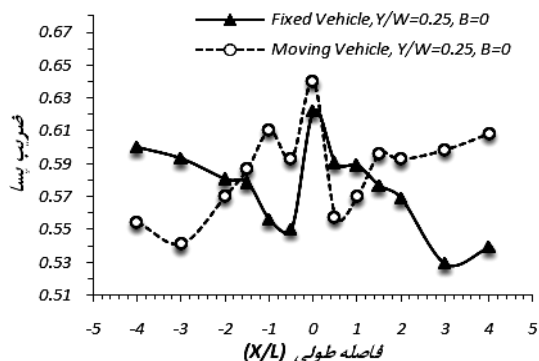


شکل ۹ ضریب پسا بر حسب فاصله طولی برای خودروی ثابت در دو فاصله عرضی ۰/۷۵ و ۰/۲۵

#### ۴-۲-۲- خودروی متحرک

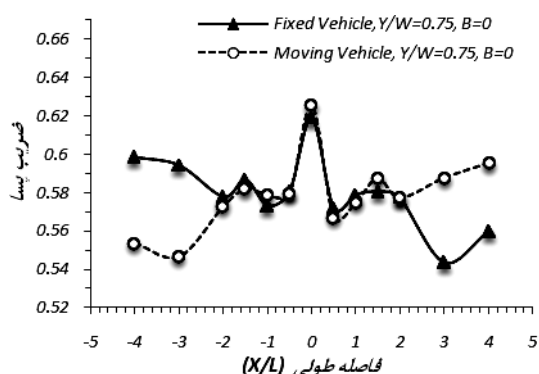
شکل ۱۰ تغییرات ضریب پسا بر حسب فاصله طولی برای خودروی متحرک را در دو فاصله عرضی ۰/۲۵ و ۰/۷۵ نشان می‌دهد. نتایج همانند آنچه در نتایج تجربی اتفاق افتاده است، می‌باشد [۱]. با نزدیک شدن خودروی متحرک به خودروی ثابت، ضریب پسا دچار تغییرات شدیدی می‌شود. آنچه در این نمودار قابل ذکر می‌باشد، کاهش تدریجی نیروی پسا در قبل و بعد از رسیدن خودروی متحرک به خودرو ثابت است. همانطور که مشاهده می‌شود، هر سه منحنی از یک الگوی تغییرات پیروی می‌کنند و نقطه بیشینه برای هر دوی آنها در  $x/l = 0$  به وقوع می‌پیوندد با این تفاوت که مقدار آن در  $y/w = 0.75$  پایین‌تر از  $y/w = 0.25$  قرار دارد. برای خودروی در حال سبقت، حداقل مقدار در ضریب

رسیدن به فاصله صفر را دارد. به عبارتی در شکل ۱۵ دیگر منحنی ها نسبت به مرکز مختصات متقارن می باشند.



شکل ۱۴ ضریب پسا برحسب فاصله طولی برای خودروی ثابت و متحرک در فاصله عرضی ۰/۷۵

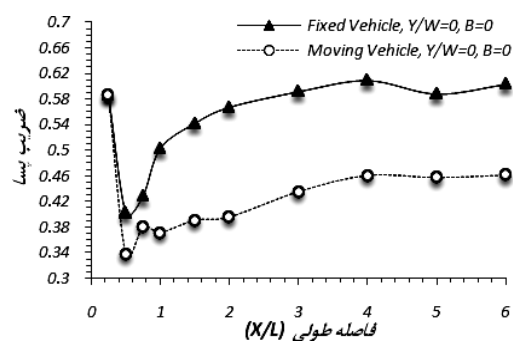
نمودار مربوط  $y/w = 0.75$  همانند نمودار قبلی است با این تفاوت که این تغییرات همان طور که مشاهده می گردد در فاصله عرضی بیشتر، کمتر می باشد.



شکل ۱۵ ضریب پسا برحسب فاصله طولی برای خودروی ثابت و متحرک در فاصله عرضی ۰/۷۵

#### ۴-۳- اثر فاصله عرضی

در این شبیه سازی خودروها به موازات هم و در فاصله های عرضی قرار می گیرند. نتایج نشان می دهد، تقلیل در فاصله عرضی باعث افزایش قابل ملاحظه ای در مقادیر ضرایب آیرودینامیکی می شود. رفتار تغییرات این پارامتر در آزمایشات



شکل ۱۱ ضریب پسا برحسب فاصله طولی برای خودروی ثابت و متحرک



شکل ۱۲ کانتور سرعت جریان در  $x/l = 0.5$



شکل ۱۳ کانتور سرعت جریان در  $x/l = 4$

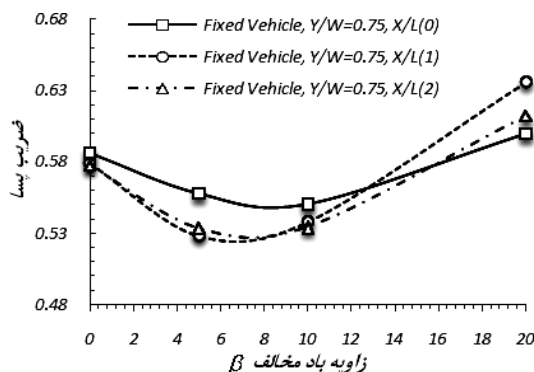
با توجه به شکل ۱۴ در فاصله طولی  $x/l = -4$  خودروی ثابت، ضریب پسایی برابر با یک خودروی مجزایی در تونل باد را داراست. اما در همین فاصله، خودروی متحرک دارای ضریب پسای کمتری است. زیرا سرعت جریان باد مخالف هنگام عبور از خودروی ثابت کاهش می یابد. با نزدیک شدن خودروها به یکدیگر ضریب پسا برای خودروی ثابت، شروع به کاهش و برای خودرو متحرک رو به افزایش می گذارد و همانند آنچه در تفاسیر گذشته بررسی شد، تغییرات ناگهانی در هنگام عبور خودروها از هم دیده می شود.

نکته قابل توجه اینجاست که با عبور خودروی متحرک از خودرو ثابت، ویژگی های آیرودینامیکی خود را با یکدیگر مبادله می کنند. به عبارت دیگر رفتاری که خودروی متحرک قبل از رسیدن به خودروی ثابت داشت، این بار خودروی ثابت داراست و بالعکس، خودروی متحرک رفتاری همانند خودروی ثابت تا قبل از



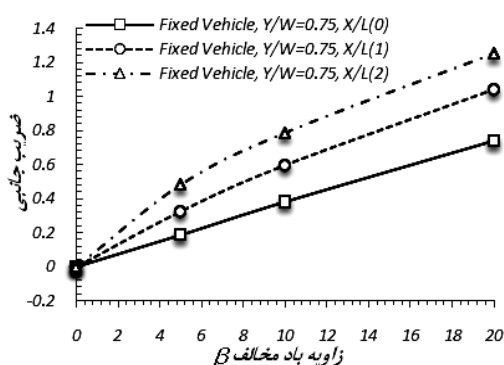
## ۴-۴-۱- خودروی ثابت

آنچه که شکل ۱۸ نشان می‌دهد، کاهش مقدار ضریب پسا از زاویه حمله صفر تا ۸ زاویه درجه است. این کاهش در زاویه ۸ درجه به کمترین مقدار خود می‌رسد و سپس با افزایش مجدد زاویه، این ضریب نیز رو به افزایش می‌گذارد. روند تغییرات ضریب جانبی و گشتاور یاو برحسب زاویه حمله کاملاً مشابه است و در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



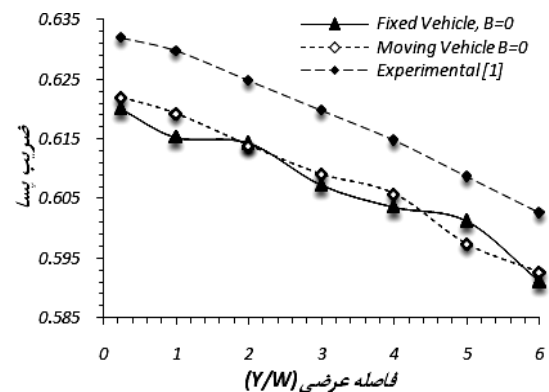
شکل ۱۸ ضریب پسای خودروی ثابت برحسب زاویه باد مخالف در فواصل طولی صفر، ۱ و ۲

روند تغییرات منحنی در فاصله طولی صفر از نرخ کمتری برخوردار است. تغییرات در فاصله‌های طولی ۱ و ۲ در زوایای کوچک باد مخالف یکسان است. با افزایش زاویه برخورد، مقدار ضریب جانبی به‌طور مداوم افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹ ضریب جانبی خودروی ثابت برحسب زاویه باد مخالف در فواصل طولی صفر، ۱ و ۲

تجربی با آنچه در شبیه‌سازی حاصل گردیده است کاملاً مشابه است [۱]. در شکل ۱۶ مشهود است که، با افزایش فاصله عرضی دو خودرو از یکدیگر، از اثر متقابل آنها برهم به تدریج کاسته می‌شود. این اثر در  $y/w \geq 4$  بسیار ناچیز است. کانتور جریان در فاصله نزدیک عرضی در شکل ۱۷ آورده شده است.



شکل ۱۶ ضریب پسا برحسب فاصله عرضی برای خودروی ثابت و متحرک



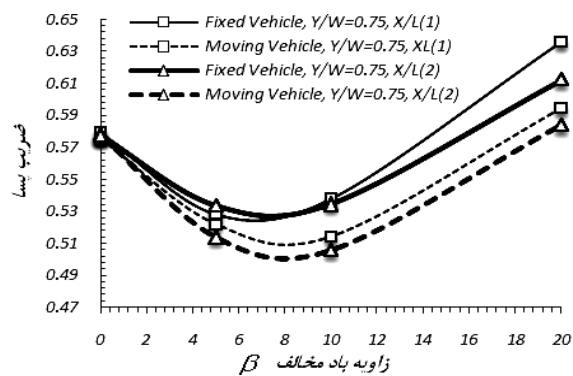
شکل ۱۷ کانتور سرعت جریان در  $y/w = 0.25$

## ۴-۴-۲ اثر زاویه باد مخالف

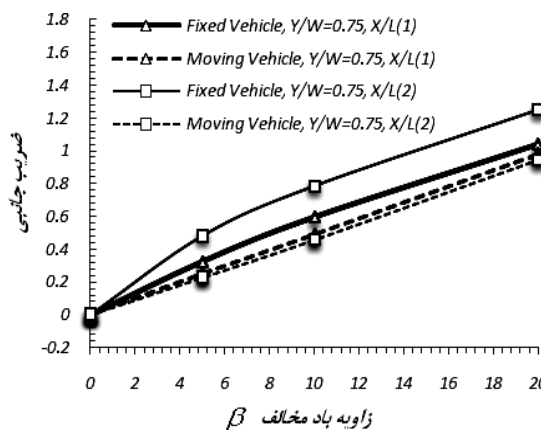
تأثیر زاویه باد مخالف بر روی ضرایب پسا و جانبی در شکل‌های ۱۸ تا ۲۲ نشان داده شده است. برای هر دو خودروی ثابت و متحرک زاویه حمله باد مقادیر صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ درجه انتخاب گردیده است. فاصله عرضی ثابت و برابر ۰/۷۵ عرض مدل پایه است. شبیه‌سازی‌ها در فاصله‌های طولی صفر، ۱ و ۲ صورت پذیرفته است.

## ۴-۳-۴- خودروی ثابت و متحرک

مقایسه ضرایب آیرودینامیکی خودروی ثابت و سبقت گیرنده به طور همزمان که در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده، نشانگر حساسیت خودروی متحرک نسبت به مانور سبقت است. منحنی تغییرات ضریب پسا نسبت به زاویه باد مخالف برای خودروی متحرک در مقایسه با خودروی ثابت در سطح پائین تری قرار دارد اما این تغییرات در ضریب جانبی کاملاً برعکس نتیجه ذکر شده است. در زاویه باد یکسان هرچه فاصله طولی بیشتر باشد، هر دو ضریب پسا و جانبی کاهش می‌یابد.



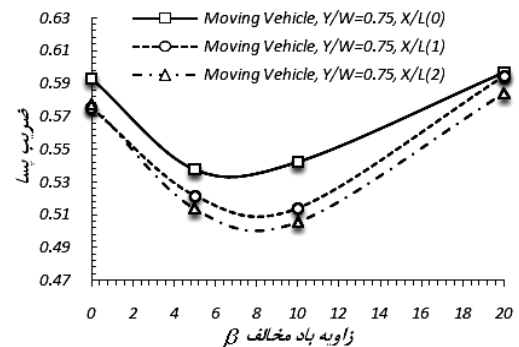
شکل ۲۱ ضریب پسا برحسب زاویه باد مخالف در دو فاصله طولی ۱ و ۲



شکل ۲۲ ضریب جانبی برحسب زاویه باد مخالف در دو فاصله طولی ۱ و ۲

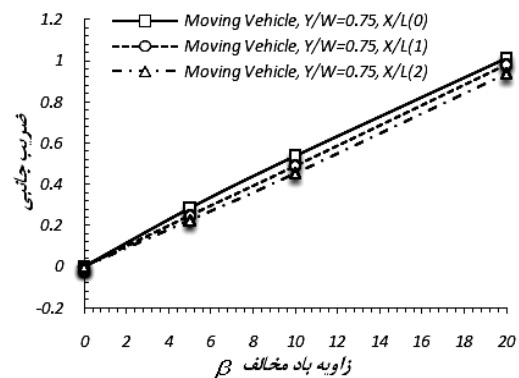
## ۴-۲-۴- خودروی متحرک

الگوی نمودار ضریب پسا برای خودروی متحرک مانند خودروی ثابت است با این تفاوت که شدت تغییرات در فاصله‌های طولی کوچک، کم می‌باشد. این شدت با افزایش این فاصله بیشتر شده و حداقل ضریب پسا همانند خودروی ثابت در نزدیکی زاویه ۸ درجه اتفاق می‌افتد (شکل ۱۹).



شکل ۱۹ ضریب پسا خودروی متحرک برحسب زاویه باد مخالف در فواصل طولی صفر، ۱ و ۲

تغییرات ضریب جانبی برحسب زاویه برخورد باد مخالف نیز از الگوی منحنی خودروی ثابت پیروی می‌کند. همانطور که شکل ۱۹ دیده می‌شود، این تغییرات نسبت به فاصله‌های طولی مختلف ناچیز و تقریباً بر هم منطبق هستند.



شکل ۲۰ ضریب جانبی خودروی متحرک برحسب زاویه باد مخالف در فواصل طولی صفر، ۱ و ۲

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله تغییرات ضرایب پسا و جانبی یک مدل ساده شده از خودرو در مانور سبقت گرفتن آنها از یکدیگر مورد بررسی قرار گرفت. اثر پارامترهایی نظیر فاصله طولی، عرضی و باد مخالف بر روی ضرایب مذکور ارزیابی گردید. نرخ سرعت نسبی با انتخاب مناسب سرعت باد و خوروی متحرک گردد. همانطور که دیده شد ضریب پسا در هنگام عبور خودروها از کنار یکدیگر تغییرات شدیدی می‌کند. این تغییرات با کم شدن فاصله عرضی خودروها نسبت به هم افزایش چشمگیری داشت. کمترین ضریب پسا برحسب فاصله طولی در موقعیت به شماره  $|x/l|=0.5$  و  $|x/l|=3$  اتفاق می‌افتد. در ادامه نشان داده شد با کاهش فاصله عرضی، خودروها اثرپذیری کمی از یکدیگر داشته و ضریب پسا مستقل از فاصله عرضی می‌شود. تغییر در زاویه برخورد باد مخالف اثرات قابل توجهی بر نیروهای آیرودینامیکی می‌گذارد. منحنی تغییرات ضریب پسا برای هر دو خودرو به صورت یک سهمی است که دارای کمینه مقدار در زاویه ۸ درجه است. ضریب جانبی با افزایش زاویه باد مخالف به صورت یک تابع خطی افزایش می‌یابد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده تأثیر شکل بدنه بر رفتار خودروی ثابت و متحرک در نظر گرفته نشده است و شرایط پایدار فرض گردیده است. به‌عنوان تحقیقات آتی می‌توان این اثرات را لحاظ کرد و مدل‌های دینامیکی را بر مسئله حاکم کرد.

## ۶- منابع

- [3] Heffley, R. K., "Aerodynamics of passenger vehicles in close proximity to trucks and buses", SAE paper no. 730235, pp. 1973 901-914.
- [4] Yoshida, Y., Muto, S., Imaizumi, T., "Transient aerodynamic forces and moments on models of vehicles passing through a crosswind", SAE Technical paper series no. 770391, 1977, pp. 1-14.
- [5] Telionis, L., Savas, O., "A wind tunnel investigation of the transient aerodynamic effects on four car platoon during passing maneuvers", SAE paper no. 2000-01-0785, 2000.
- [6] Yamamoto, S., Yanagimoto, K., Fukuda, H., China, H., Natagawa, K., "Aerodynamic influence of a passing vehicle on the stability of the other vehicle", JSAE Review 18, 1997, pp. 39-44.
- [7] Takanami, K., Sakai, T., Matsushita, A., "Measurement of transient aerodynamic forces and some consideration of their effects when a vehicle passes side wind blower", Bulletin of JSAE 6, 1974.
- [8] Gillieron, P., Noger, C., "Contribution to the analysis of transient aerodynamic effects acting on vehicles", SAE paper no. 2004-011311, 2004.
- [9] Gillieron, P. and Chometon F., "Modeling of Stationary Three-Dimensional Separated Air Flows around an Ahmed Reference Model", Third International Workshop on Vortex, ESAIM Proceedings, Vol 7, 1999
- [10] Ahmed, S.R., Ramm, R. and Faltin, G., "Some salient features of the time averaged ground vehicle wake", SAE Paper no 840300, 1984.
- [11] Abdel Azim, A.F., Abdel Gawad, A.F., "A flow visualization of the aerodynamic interference between passenger cars", SAE paper no. 2000-01-0355, 2000.
- [12] Wolf-Heinrich, H.; "Aerodynamics of Road Vehicles", Fluid Mechanics to Vehicle Engineering, 4th Edition, 1998.
- [1] C. Noger, C. Regardin, E. Sze'che'nyi, "Investigation of the transient aerodynamic phenomena associated with passing maneuvers", Journal of Fluids and Structures 21, 2005, pp. 231-241.
- [2] Abdel Azim, A. F., "An experimental study of the aerodynamic interference between road vehicles", SAE paper no. 940422. 1994.

- [15] R.J. Corin, L. He, R.G. Dominy, "A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96, 2008, pp. 1390– 1411.

[۱۳] محمد حسن شجاعی فرد، کوروش گودرزی، حسین صالحی مرزيجرانی، "بهینه سازی تجربی و عددی آیرودینامیکی دماغه خودروی سمند" مجله مهندسی مکانیک، شماره ۶۵، ۱۳۸۸، صفحه ۳۷-۴۶.

[۱۴] محمد حسن جوارشکیان، رضا شایسته صدفیان، آیرم آذرخویش، "بررسی عددی و تجربی نیروهای آیرودینامیکی وارد بر یک مدل پایه خودرو" نشریه دانشکده مهندسی، شماره یک، ۱۳۸۵، صفحه ۵۰-۶۴.