



## بررسی عددی و تجربی تأثیر فاصله‌ی طولی دو خودرو بر مصرف سوخت و ضریب پسا

نسترن ربیعی، محمدمامین محمودآباد بزچلو، مجید بازارگان\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳ شهریور ۱۳۹۵

بازنگری: ۳ اسفند ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۵ اسفند ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۲۳ اسفند ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

ضریب پسا

مصرف سوخت

حرکت پشت سرهم خودروها

فاصله‌ی طولی خودروها

بزرگراه‌های اتوماتیک

**چکیده:** در این پژوهش با بهره‌گیری از تست تجربی میدانی و هم‌چنین مدل‌سازی و حل عددی به بررسی تأثیر فاصله‌ی طولی بین دو خودرو در سرعت‌های گوناگون و ارائه‌ی یک فاصله و سرعت بهینه برای داشتن کمترین میزان ضریب پسا و مصرف سوخت به وسیله‌ی الگوریتم هوش مصنوعی پرداخته شده است. به این منظور سه سرعت ثابت ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت برای خودروها در نظر گرفته شده است. برای اطمینان یافتن از نتایج حل عددی، با استفاده از اندازه‌گیری دقیق مصرف سوخت یک دستگاه خودروی سواری، در برخی حالات از تست میدانی بهره گرفته شده است. نتیجه‌ی این پژوهش نشان می‌دهد که حرکت پشت سرهم خودروها با رعایت فاصله‌ی بهینه‌ی محاسبه شده کاهش ۷ درصدی ضریب پسای خودروها را به دنبال خواهد داشت. نتایج پژوهش کنونی برای بزرگراه‌های اتوماتیک که فاصله‌ی ایمن بین دو خودرو می‌تواند خیلی کمتر از فاصله‌های خودروها در بزرگراه‌های متعارف باشد، کاربرد بسزایی دارد.

### ۱- مقدمه

حرکت هر خودرو در دنباله‌ی<sup>۱</sup> جریان گردابه‌ای که در انتهای خودروی جلویی واقع شده است، منجر به کاهش اختلاف فشار ایجاد شده بین ابتدا و انتهای خودرو می‌شود و ضریب پسا را کاهش می‌دهد. آنچه بهره‌مندی از نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه را محدود می‌سازد رعایت فاصله‌ی ایمن بین دو خودرو می‌باشد. بدیهی است ایمنی مسافران بر کاهش ضریب پسا و مصرف سوخت تقدم دارد. فاصله‌ی ایمن بین دو خودروی در حال حرکت همواره بیش از فاصله‌ای است که جریان دنباله‌ی خودروی جلویی بتواند تأثیر قابل توجهی بر خودروهای پشت سر باقی بگذارد.

گسترش ایده‌ی بزرگراه‌های اتوماتیک و به وجود آمدن امکان فاصله‌ی کمتر بین خودروها ایجاب می‌کند این مسأله مورد بازنگری قرار گیرد. در واقع محدودیت فاصله‌ی ایمن دو خودروی در حال حرکت تا حد قابل ملاحظه‌ای از میان برداشته می‌شود و یافتن طولی بهینه بین دو خودرو که منجر به کمترین مصرف سوخت شود موضوعیت دوباره می‌یابد.

پیش از ارائه‌ی نتایج مطالعه‌ی کنونی، مناسب است به پژوهش‌هایی که تاکنون پیرامون تأثیر فاصله‌ی طولی خودروها بر ضریب پسا صورت پذیرفته است اشاره شود. زابت و همکاران [۱] از نخستین افرادی هستند که حرکت پشت سرهم دو، سه و چهار خودرو را با استفاده از تونل باد در مقیاس ۱/۸

مدل کردند. آزمایش‌ها در سرعت ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه انجام شدند. نتایج به دست آمده نشان می‌داد که هر چه فاصله‌ی بین دو خودرو بیشتر می‌شود، اثرپذیری ضریب پسای خودروی جلویی از خودروی عقبی کمتر می‌شود تا این‌که در فواصل بیشتر از یک طول خودرو، ضریب پسای خودروی جلویی تقریباً ثابت می‌گردد. در صورتی که تعداد خودروها بیشتر شود ضریب پسای خودروهای عقبی کاهش می‌یابد. به این ترتیب در یک گروه چندتایی از خودروهای پشت سرهم همواره خودروهای آخر کمترین ضرایب پسا را دارند.

در مطالعه‌ی دیگری زابت و همکاران [۲] نشان دادند با افزایش فاصله‌ی دو خودرو ضریب پسای خودروی عقبی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد تا این‌که در یک فاصله به کمترین مقدار خود می‌رسد و با بیشتر شدن فاصله به مقدار ضریب پسای خودروی منفرد نزدیک می‌شود. ضریب پسای خودروی جلویی نیز با افزایش فاصله از یک مقدار کمینه افزایش می‌یابد تا این‌که در فواصل دورتر حضور خودروی عقبی بر روی آن تأثیری نخواهد داشت.

هنگ و همکاران [۳] به صورت تجربی تأثیر فاصله‌ی طولی دو مینی‌ون را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که در سرعت‌های ۱۲۰ تا ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت، تست‌های میدانی حدود ۱۰ درصد کمتر از نتایج به دست آمده از تونل باد هستند. عبدالعظیم و عبدالجواد [۴] نیز آزمایش‌هایی با استفاده از تونل باد برای آشکارسازی جریان اطراف خودروهای پشت سرهم

1 Wake

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bazargan@kntu.ac.ir

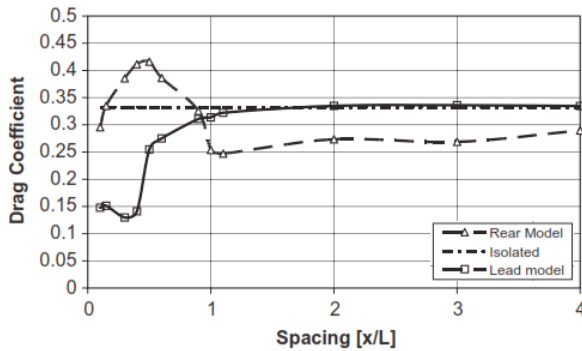


Fig. 2. Drag coefficients of two tandem Ahmed bodies in tandem in wind tunnel

### شکل ۲: ضرایب پسی دو مدل احمد پشت سرهم در تونل باد

مقابل گروهی از خودروهای پشت سرهم می‌باشد که نقش قابل توجهی در کاهش ضریب پسی خودروها دارد [۸-۹].

در این مقاله به منظور بررسی اثرپذیری مصرف سوخت خودرو از ضریب پسی آن، ابتدا حرکت دو خودروی پشت سرهم با استفاده از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت<sup>۳</sup> در سه سرعت ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت در فواصل میانی مختلف بین خودروها به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. سپس برای مقایسه و اطمینان یافتن از نتایج به دست آمده از نرم‌افزار، مصرف سوخت خودروها، با استفاده از دستگاهی که توسط داودیان و نیکفر [۱۰] به این منظور طراحی شده، اندازه‌گیری شده است. در آخر نیز با استفاده از هوش مصنوعی نرم‌افزار متلب<sup>۴</sup> فاصله و سرعت مناسب میان دو خودرو برای داشتن کمترین ضریب پسا گزارش گردیده است.

### ۲- روش شبیه‌سازی عددی و انجام آزمایش‌ها

در این قسمت ابتدا شبیه‌سازی عددی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت توضیح داده شده است. در ادامه نیز شرح نحوه انجام تست‌های میدانی آمده است. لازم به ذکر است که خودروی مورد استفاده در تست‌های میدانی و شبیه‌سازی عددی یک دستگاه خودروی دو سی‌یلو<sup>۵</sup> است.

#### ۲-۱- روش شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار

در گام اول مدل‌سازی خودروی دو سی‌یلو با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکس<sup>۶</sup> انجام شده است. در گام بعدی از مدل دوبعدی خودرو برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس-فلوئنت استفاده می‌شود تا شرایط مرزی روی آن تعریف شوند. بزرگی محدوده<sup>۷</sup> تعریف شده در اطراف خودرو می‌بایست به صورتی باشد که بتواند شرایط واقعی را برای خودرو(ها) شبیه‌سازی نماید،

انجام دادند و نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین را تأیید و تقویت نمودند. توسی و ساواس [۵] اثرهای نوسان حرکت و سرعت یکی از خودروهایی را که به صورت پشت سرهم حرکت می‌کنند بر روی نیروهای وارده بر سایر خودروهای موجود در گروه بررسی کردند. به این ترتیب مسأله‌ی طرح شده در حوزه‌ی زمان و با استفاده از تونل باد با مقیاس ۱/۲۰ بررسی گردید. کاهش و افزایش فاصله‌ی یک خودرو با خودروی جلویی یا عقبی آن باعث تغییر در توزیع فشار اطراف خودروها و در نتیجه تغییر ضریب پسی آن‌ها می‌شود. یکی از اقدام‌های هوشمندانه در این زمینه استفاده از تونل باد برای تست الگوی حرکت پشت سرهم خودروها با استفاده از جسم احمد<sup>۱</sup>، توسط واتکینز و وینو [۶] است. ایده‌ی جسم احمد نخستین بار توسط احمد و همکاران [۷] در سال ۱۹۸۴ میلادی معرفی گردید. شماتیک کلی از این جسم در شکل ۱ مشاهده می‌گردد. جسم احمد مدل ساده‌ای است که ضمن دارا بودن مشخصات آیرودینامیکی یک خودروی سواری، بیان‌گر تأثیر هندسه‌ی پشت خودرو بر روی جریان اطراف آن و نیروی پسی وارده می‌باشد.

در پشت خودرو نیز به دلیل رخداد جدایش و پدیدار شدن جریان دنباله، گردابه‌هایی در اثر کمبود فشار ایجاد می‌شوند که به طور مستقیم بر نیروی پسی وارده بر خودرو مؤثر می‌باشند. طبق مطالعه‌های انجام شده در این زمینه ضریب پسی خودرو در حالتی که زاویه‌ی بین شیشه‌ی عقب خودرو و محور افقی<sup>۲</sup> ۱۲/۵ درجه باشد به میزان ۸ درصد کاهش خواهد داشت.

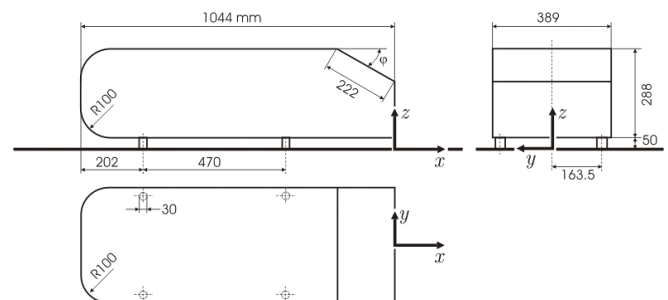


Fig. 1. A general schematic of Ahmed body

### شکل ۱: شماتیک کلی از جسم احمد [۷]

به این ترتیب نتایج به دست آمده مستقل از مدل خودروی مورد استفاده برای انجام آزمایش خواهند بود. شکل ۲ نتایج به دست آمده از آن پژوهش را به نمایش می‌گذارد. این نتایج مشابه نتایج به دست آمده از زاویه و همکاران [۱] است و فقط در ارائه‌ی فاصله‌ی مناسب بین دو خودرو برای داشتن کمترین ضریب پسا با هم تفاوت دارند. به دلیل استفاده از جسم احمد به عنوان مدل در این آزمایش‌ها، مسلماً نتایج آن‌ها قابل اطمینان‌تر از نتایج پژوهش‌های پیشین می‌باشد.

در سال‌های اخیر نیز پژوهش‌هایی در رابطه با حرکت پشت سرهم خودروها در بزرگراه‌ها با استفاده از نرم‌افزار و حل عددی انجام شده است. هدف در این پروژه‌ها بررسی تأثیر حضور دو وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین در

3 ANSYS-FLUENT  
4 MATLAB  
5 Daewoo Cielo  
6 SOLIDWORKS  
7 Domain

1 Ahmed body  
2 Slant angle

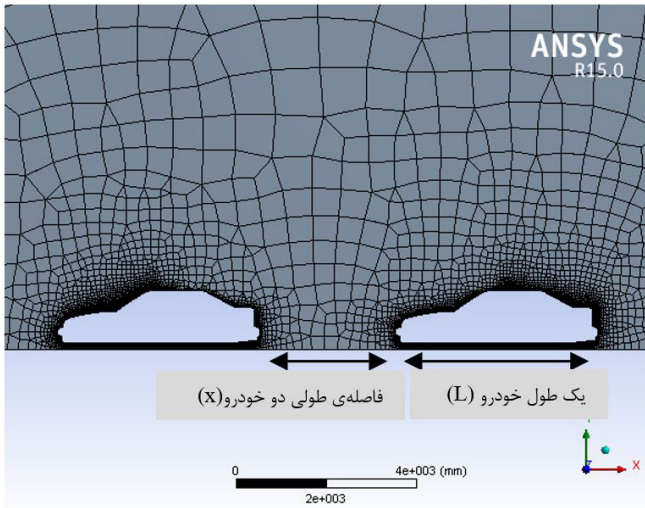


Fig. 3. Meshing grid of two vehicles in tandem in ANSYS software

### شکل ۳: مش‌بندی دو خودروی پشت سرهم در نرم‌افزار انسیس

با توجه به دو شکل مذکور مشاهده می‌شود که می‌بایست در مسائل مربوط به خودروی منفرد از المان‌های با مینیمم اندازه‌ی ۳ میلی‌متر و به تعداد ۱۴۷۵۰۰ و در مسائل مربوط به دو خودروی پشت سرهم از المان‌های با مینیمم اندازه‌ی ۴ میلی‌متر به تعداد ۱۳۸۰۰۰، استفاده شود. کیفیت شبکه‌بندی مورد استفاده نیز برای خودروی منفرد و دو خودروی پشت سرهم مطابق جدول ۱ هستند.

### جدول ۱: کیفیت شبکه‌بندی مورد استفاده در حل عددی

Table 1. The quality of the meshing used for numerical simulation

| کیفیت متوسط | کجی متوسط المان | نسبت عرضی متوسط |                    |
|-------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| ۰/۷۵        | ۰/۱۲            | ۱/۹             | خودروی منفرد       |
| ۰/۸۶        | ۰/۱۶            | ۱/۱۹            | دو خودروی پشت سرهم |

با توجه به این که پارامتر مورد نظر مسأله ضریب پسا است، این مسأله بر پایه‌ی فشار<sup>۷</sup> بوده و پایا<sup>۸</sup> است. در تمامی دیوارها نیز شرط عدم لغزش<sup>۹</sup> برقرار است. با توجه به مغشوش بودن جریان در اطراف خودرو(ها)، از مدل توربولانس  $k-\epsilon$  بهره برده شده است. روش حل نیز روش سیمپل سی<sup>۱۰</sup>، انتخاب شده است. دقت حل مسأله نیز بر روی  $10^{-6}$  تنظیم شده است.

### ۲-۲- انجام تست‌های میدانی

در تست‌های میدانی برای اندازه‌گیری مصرف سوخت از دستگاهی که توسط داودیان و نیکفر [۱۰] در دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی طراحی و ساخته شده، استفاده گردیده

- 7 Pressure based
- 8 Steady
- 9 No slip condition
- 10 SIMPLEC

لایه مرزی ایجاد نکند و تأثیری بر روی نتایج به دست آمده نداشته باشد. به این ترتیب ابعاد این محدوده ۳ الی ۴ برابر طول و ارتفاع خودرو از جلو، عقب و بالای خودرو در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی محدوده از پایین خودرو نیز که در شرایط واقعی سطح زمین می‌باشد، در حدود ۰/۳۵ متر است. در حالت مدل‌سازی دو خودروی پشت سرهم نیز فاصله‌ی دو خودرو از یکدیگر متغیر بوده و مورد بحث قرار گرفته است. به این ترتیب ضلع مقابل به خودرو به عنوان ورودی<sup>۱</sup>، ضلعی که در پشت خودرو واقع شده است به عنوان خروجی<sup>۲</sup>، اضلاع بالایی و پایینی و همچنین بدنه‌ی خودرو به عنوان دیوار<sup>۳</sup> در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به این که ضلع پایینی محدوده در حکم زمین است و فاصله‌ی کمی با خودرو دارد، برای جلوگیری از ایجاد لایه مرزی این ضلع به صورت دیوار متحرک<sup>۴</sup> تعریف می‌شود که سرعت آن با سرعت سیال در جریان در محدوده می‌بایست برابر باشد.

لازم به ذکر است که حل‌های عددی با استفاده از شرط فشار ثابت بر روی ضلع بالایی محدوده نیز در برخی حالات انجام پذیرفت. با توجه به عدم وجود اختلاف بین جواب‌های به دست آمده با دو شرط مرزی متفاوت و همچنین بیشتر شدن زمان حل در حالت اعمال شرط مرزی فشار ثابت، تمامی حل‌های عددی انجام شده با در نظر گرفتن شرط مرزی دیوار برای ضلع بالایی محدوده است. این موضوع بیانگر استقلال حل‌های عددی از اندازه‌ی محدوده‌ی در نظر گرفته شده برای مسأله است که نشان می‌دهد محدوده‌ی مذکور به حد کافی بزرگ در نظر گرفته شده است

مش‌بندی مدل با استفاده از قسمت مش در نرم‌افزار انسیس صورت می‌گیرد. برای خودروی منفرد از روش چهارضلعی<sup>۵</sup> برای مش‌بندی استفاده شده است. در حالتی که دو خودرو پشت سرهم قرار می‌گیرند، استفاده از روش مش‌بندی ترکیبی<sup>۶</sup> در نواحی حساس می‌تواند به حل بهتر کمک کند (شکل ۳). لازم به ذکر است که در هر دو حالت خودروی منفرد و دو خودرو پشت سرهم، ناحیه‌هایی که به خودرو نزدیک‌تر می‌باشند اهمیت بیشتری برای حل مسأله و بررسی جریان بر روی آن‌ها پیدا می‌کنند. به همین منظور المان‌های مش‌بندی در این نواحی ریزتر از سایر نواحی در نظر گرفته می‌شوند.

برای استفاده از کمترین تعداد المان در مش‌بندی مدل‌ها به منظور دستیابی به نتایج با دقت قابل قبول در کمترین زمان ممکن، می‌بایست استقلال شبکه از مش‌بندی بررسی شود. به این ترتیب یکی از حالت‌های مسأله در هر دو حالت خودروی منفرد و دو خودروی پشت سرهم با فاصله‌ی میانی یک طول خودرو، با سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. با تغییر سایز المان‌ها، ضرایب پسای خودروها محاسبه شده و نتایج به دست آمده در شکل ۴ و شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.

- 1 Inlet
- 2 Outlet
- 3 Wall
- 4 Moving Wall
- 5 Quadrilateral
- 6 Multi-zone



Fig. 6. The fuel consumption measuring device

شکل ۶: دستگاه اندازه گیری مصرف سوخت خودرو (باک جایگزین)

و شیب جاده از جمله‌ی این عوامل می‌باشند. به دلیل مسائل ایمنی امکان انجام تست‌های میدانی در فواصل کم بین دو خودرو و همچنین سرعت‌های بالا وجود ندارد. در نتیجه تست‌های میدانی تنها با سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت و با فاصله‌ی دو طول<sup>۳</sup> خودرو انجام شده‌اند. همچنین برای فواصل بیشتر نیز دقت دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری مصرف سوخت، به اندازه‌ای نیست که بتواند تغییر مصرف سوخت را به صورت ملموسی به دست دهد. برای امکان مقایسه‌ی نتایج به دست آمده، تست‌های میدانی انجام شده ابتدا برای خودروی منفرد در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت و سپس برای دو خودرو در همان سرعت انجام شده‌اند. مسافت مناسب برای انجام تست‌های میدانی، طبق استاندارد، نیز حدود ۶/۷ کیلومتر است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج شبیه‌سازی عددی

در جریان لزج حول یک جسم، همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد خطوط جریان با توجه به هندسه منحرف شده و همین انحراف موجب تغییرات در سرعت و در نتیجه تغییرات در فشار می‌گردد. بدین ترتیب که در طول جسم خطوط جریان به یکدیگر نزدیک شده و در نتیجه سرعت افزایش می‌یابد. طبق رابطه‌ی برنولی<sup>۴</sup>، افزایش سرعت منجر به کاهش فشار می‌شود. این روند تا رسیدن به نقطه‌ی جدایش ادامه دارد و پس از آن فشار افت شدیدی می‌کند.

در اثر کاهش فشار، گردابه‌هایی در پشت جسم ایجاد می‌شوند. همان طور که در شکل ۸ دیده می‌شود قرار گرفتن خودروی عقبی در گردابه‌ی خودروی جلویی، با توجه به کاهش اختلاف فشار بین جلو و عقب خودرو، کاهش ضریب پسا را به دنبال خواهد داشت. زمانی که فاصله‌ی دو خودرو کم است

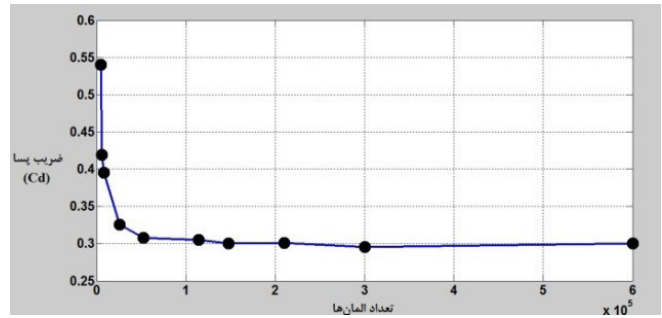


Fig. 4. Variation of the drag coefficient of single vehicle with the number of meshing elements

شکل ۴: تغییر ضریب پسای خودروی منفرد با تعداد المان‌های موجود در مش‌بندی

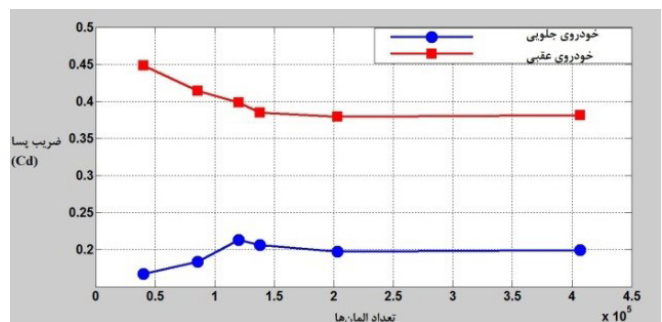


Fig. 5. Variation of the drag coefficient of two vehicles in tandem with the number of meshing elements

شکل ۵: تغییر ضریب پسای دو خودروی پشت سرهم با تعداد المان‌های موجود در مش‌بندی

است. این دستگاه دارای چهار قسمت اصلی است و به عنوان باک جایگزین از آن استفاده می‌شود. مطابق شکل ۶، باک شماره ۱ که در آن از پمپ بنزین خودروی دوسریلو استفاده شده، همواره دارای بنزین است. از باک شماره ۲ برای اندازه‌گیری میزان سوخت با استفاده از ترازو قبل و بعد از مسیر طی شده استفاده می‌شود. باک شماره ۳ نیز برای مواقعی که خودرو در حال تست نمی‌باشد طراحی شده است. با تغییر موقعیت شیر سه راهی نیز به اقتضای شرایط می‌توان مسیر بنزین را در مسیر باک ۲ به باک ۱ یا باک ۳ به باک ۱ هدایت نمود. این دستگاه بر روی صندلی عقب خودرو نصب می‌شود. به منظور استانداردسازی تست‌های میدانی انجام شده، از یکی از استانداردهای انجمن مهندسان خودروسازی<sup>۲</sup> استفاده شده است. در این استاندارد شرایطی برای انجام تست‌های میدانی معرفی شده‌اند که از جمله‌ی آنها می‌توان به شرایطی برای دمای هوا، سرعت وزش باد، باد لاستیک‌ها، شرایط جاده، شرایط رانندگی و مانند این‌ها اشاره نمود. بنابراین با توجه به شرایط تعیین شده، یکی از بزرگراه‌های شهر تهران برای انجام تست‌های میدانی انتخاب شده است. در انجام تست‌های میدانی نیز عواملی باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شوند. خطاهای انسانی در ثابت نگه‌داشتن سرعت و فاصله‌ی بین خودروها، وزش باد، حضور سایر خودروها در بزرگراه‌ها، استهلاک خودرو

3 طول خودروی مورد آزمایش ۴/۵ متر می‌باشد

4 Bernoulli's equation

1 SAE J1082

2 Society of Automotive Engineers (SAE)



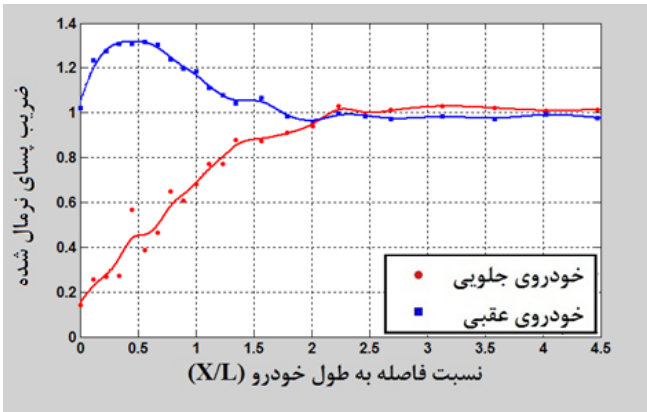


Fig. 9. Variation of the normalized drag coefficient of two vehicles in tandem with the ratio of inter-vehicle distance to the vehicle length at 70 Km/h vehicle speed

شکل ۹: تغییر ضرایب پسای نرمال شده‌ی دو خودروی پشت سرهم با نسبت فاصله‌ی بین دو خودرو بر طول آن در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت

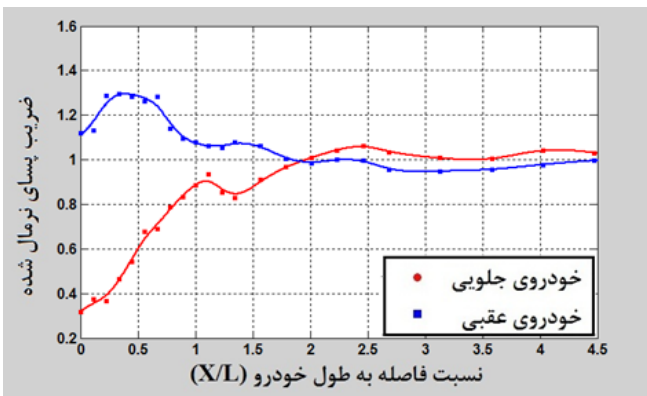


Fig. 10. Variation of the normalized drag coefficient of two vehicles in tandem with the ratio of inter-vehicle distance to the vehicle length at 90 Km/h vehicle speed

شکل ۱۰: تغییر ضرایب پسای نرمال شده‌ی دو خودروی پشت سرهم با نسبت فاصله‌ی بین دو خودرو بر طول آن در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت

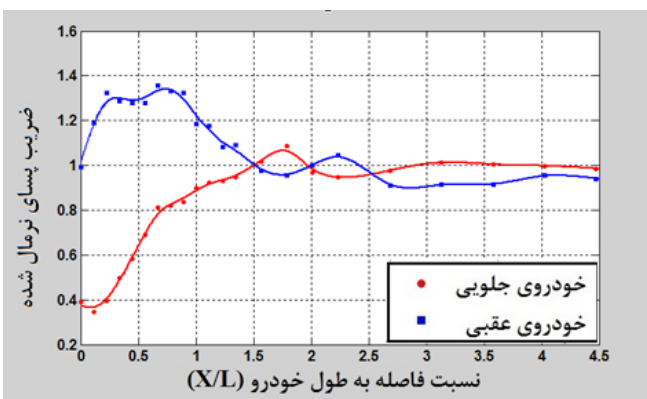


Fig. 11. Variation of the normalized drag coefficient of two vehicles in tandem with the ratio of inter-vehicle distance to the vehicle length at 110 Km/h vehicle speed

شکل ۱۱: تغییر ضرایب پسای نرمال شده‌ی دو خودروی پشت سرهم با نسبت فاصله‌ی بین دو خودرو بر طول آن در سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت

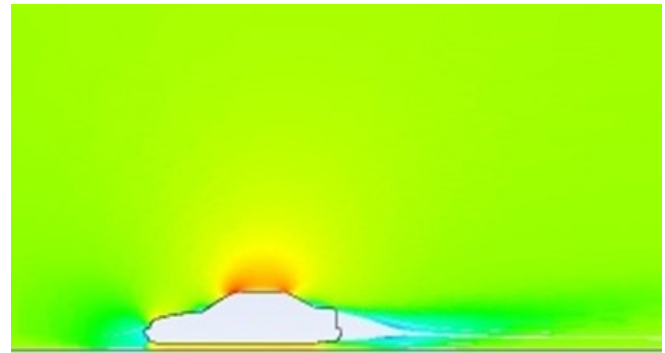


Fig. 7. Streamlines around a single vehicle

شکل ۷: خطوط جریان اطراف خودروی منفرد

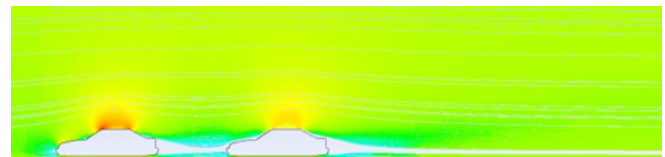


Fig. 8. Streamlines around two vehicles in tandem

شکل ۸: خطوط جریان حول دو خودروی پشت سرهم

ناحیه‌ی پرفشار خودروی عقب بر روی خودروی جلو تأثیر می‌گذارد و فشار را در ناحیه‌ی کم‌فشار آن تا حدی افزایش می‌دهد. در نتیجه، اختلاف فشار میان قسمت ابتدایی و انتهایی خودروی جلویی کاهش می‌یابد. به همین ترتیب فشار در ناحیه‌ی پرفشار خودروی عقبی نیز کاهش می‌یابد و موجب کاهش ضریب پسا می‌شود.

برای مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از تحلیل عددی دو خودروی پشت سرهم، ضریب پسای خودروی منفرد در سه سرعت ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت محاسبه و مطابق جدول ۲ است.

جدول ۲: ضرایب پسای خودروی منفرد در سرعت‌های متفاوت

Table 2. Drag coefficients of single vehicle at different speeds

| سرعت خودرو (کیلومتر بر ساعت) | ضریب پسای یک خودرو ( $C_d$ ) |
|------------------------------|------------------------------|
| ۷۰                           | ۰/۱۸۵                        |
| ۹۰                           | ۰/۳                          |
| ۱۱۰                          | ۰/۴۴۸                        |

نتایج به دست آمده با استفاده از تحلیل عددی برای دو خودرو در قالب نمودارهایی در شکل ۹ تا ۱۱ تهیه شده است. در این نمودارها محور عمودی ضریب پسای نرمال شده است که منظور از آن، نسبت ضریب پسای به دست آمده به ضریب پسای خودروی منفرد است.

همان‌گونه که در نمودارهای رسم شده نشان داده شده است، ضریب پسای خودروی جلویی دارای روند صعودی است که در نهایت با افزایش فاصله‌ی بین دو خودرو تا حد زیادی، مقدار ضریب پسای آن به ضریب پسای خودرو در حالت منفرد همگرا می‌شود. در اثر افزایش فاصله‌ی دو خودرو

در مرحله‌ی بعدی با توجه به داده‌های کد هوش مصنوعی، صفحاتی در فضای سه بعدی برای هر یک از خودروهای جلویی و عقبی ایجاد گشته‌اند که نمایانگر ضرایب پسای نرمال شده برای هر خودرو در نسبت فاصله به طول خودرو و سرعت‌های متفاوت هستند. در این نمودارها محور افقی و عمودی مشابه نمودارهای رسم شده در قسمت ۳-۱ به ترتیب همان نسبت فاصله به طول خودرو و ضریب پسای نرمال شده هستند. محور جدید اضافه شده به این نمودارها مربوط به سرعت خودرو است. شکل ۱۳ نمودار سه بعدی مربوط به خودروی جلویی و شکل ۱۴ نمودار سه بعدی خودروی عقبی را نشان می‌دهد.

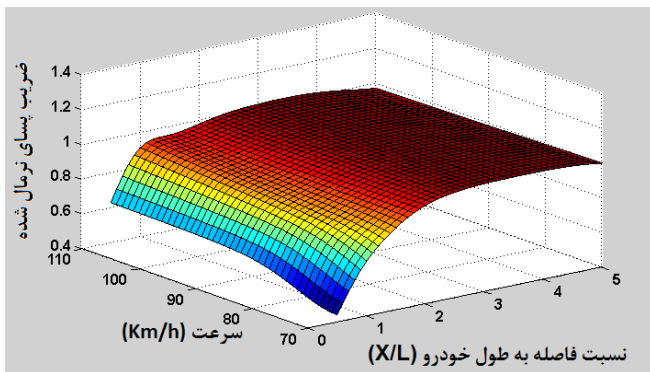


Fig. 13. Three-dimensional variation of the normalized drag coefficient for the front vehicle with vehicle speed and the ratio of distance to vehicle length

شکل ۱۳: تغییر سه بعدی ضریب پسای نرمال شده‌ی خودروی جلویی با سرعت و نسبت فاصله به طول خودرو

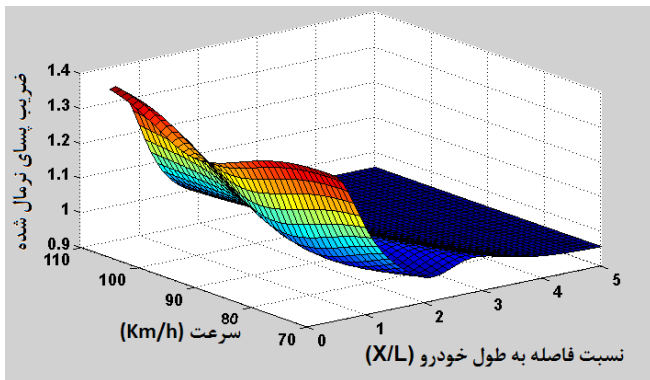


Fig. 14. Three-dimensional variation of the normalized drag coefficient for the rear vehicle with vehicle speed and the ratio of distance to vehicle length

شکل ۱۴: تغییر سه بعدی ضریب پسای نرمال شده‌ی خودروی عقبی با سرعت و نسبت فاصله به طول خودرو

با توجه به این که تعریف انجام شده در این مقاله برای حالت بهینه حالتی است که هر دو خودرو دارای کمترین ضریب پسا و در نتیجه کمترین میزان مصرف سوخت باشند، در کدنویسی انجام شده حالت بهینه به صورت کمینه شدن مجموع ضرایب پسای نرمال شده‌ی دو خودروی جلویی و عقبی تعریف شده است. شکل ۱۵ نمودار سه بعدی مجموع ضرایب پسای نرمال شده‌ی دو خودرو را در نسبت فاصله به طول خودرو و سرعت‌های گوناگون نشان

بدهی است که از یک فاصله به بعد، حضور خودروی عقبی روی خودروی جلویی تأثیری ندارد. ضریب پسای خودروی عقبی نیز با افزایش فاصله‌ی دو خودرو ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به ماکزیمم میزان خود، روند نزولی را در پی می‌گیرد. این روند نزولی تا حدی پیش خواهد رفت که در فواصل معینی حتی ضریب پسای خودروی عقبی از ضریب پسای خودروی منفرد نیز کمتر خواهد بود. به این ترتیب حضور خودروی جلویی در فاصله‌ی معینی از خودروی عقبی کاهش ضریب پسا و مصرف سوخت را برای خودروی عقب به دنبال خواهد داشت.

### ۳-۱-۱- بهینه سازی نتایج عددی

به منظور بهینه‌سازی نتایج عددی به دست آمده از مسئله‌ی پیش رو و یافتن فاصله‌ی بهینه برای داشتن کمترین ضریب پسا برای هر دو خودروی پشت سرهم، از کدنویسی هوش مصنوعی در نرم افزار متلب استفاده شده است. با استفاده از کدنویسی هوش مصنوعی امکان دستیابی به ضرایب پسای نرمال شده برای دو خودرو در سرعت‌ها و فواصل دیگر نیز فراهم می‌گردد. در روش به کار برده شده از ۷۰ درصد داده‌های عددی به دست آمده برای آموزش<sup>۱</sup>، ۱۵ درصد داده‌ها برای اعتباردهی<sup>۲</sup> و ۱۵ درصد باقی مانده برای تست<sup>۳</sup> استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان مشاهده نمود که بازده کد مورد استفاده در این مقاله، حدود ۹۸/۵۹ درصد است.

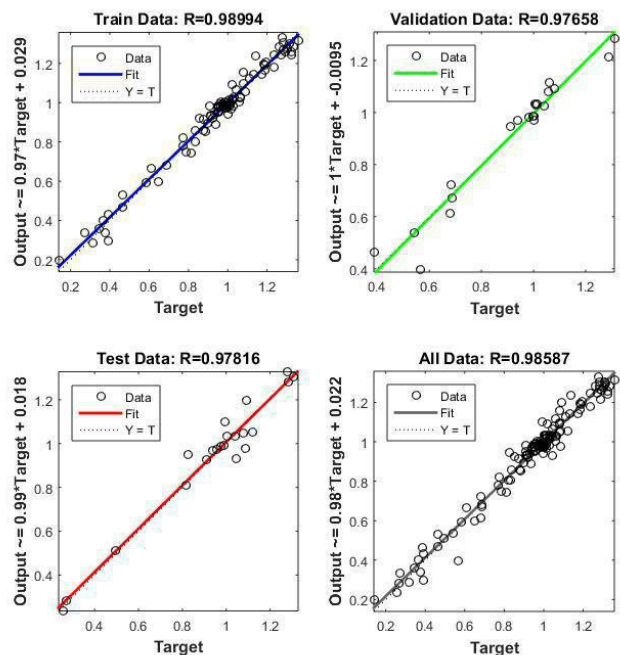


Fig. 12. The criteria showing the efficiency of the used Artificial Intelligence Coding in MATLAB

شکل ۱۲: معیارهای تعیین کننده‌ی بازده کد هوش مصنوعی استفاده شده در نرم افزار متلب

- 1 Train data
- 2 Validation data
- 3 Test data

$0.6754 \text{ g.s}^2/\text{m}^2$  و در نتیجه میانگین مصرف سوخت،  $255/36$  گرم است.

در نهایت در قدم سوم نیز خودروی حامل دستگاه اندازه‌گیری مصرف سوخت به فاصله‌ی دو طول خودرو در پشت خودروی دیگر قرار گرفته و تست تکرار شده است. نتایج در جدول ۵ گزارش شده‌اند. به این ترتیب میانگین نسبت مصرف سوخت بر مجذور سرعت برای این حالت  $0.698 \text{ g.s}^2/\text{m}^2$  و میانگین مصرف سوخت  $264/02$  گرم گزارش می‌شود.

جدول ۳: نتایج به دست آمده از تست حالت خودروی منفرد

Table 3. Results of field test for the single vehicle

| شماره تست | میزان مصرف (گرم) | زمان (ثانیه) | فاصله (کیلومتر) | سرعت متوسط (متر بر ثانیه) | نسبت مصرف سوخت بر مجذور سرعت ( $\text{g.s}^2/\text{m}^2$ ) |
|-----------|------------------|--------------|-----------------|---------------------------|--|
| ۱         | ۳۰۷              | ۳۴۶          | ۶/۷             | ۱۹/۳۶۴                    | ۰/۸۱۸۷   |
| ۲         | ۲۹۰              | ۳۴۳          | ۶/۷             | ۱۹/۵۳۴                    | ۰/۷۶۰۰   |
| ۳         | ۲۸۹              | ۳۳۷          | ۶/۷             | ۱۹/۸۸۱                    | ۰/۷۳۱۲   |

جدول ۴: نتایج به دست آمده از تست در حالت دو خودروی پشت سرهم در صورتی که خودروی مورد آزمایش خودروی جلویی باشد (فاصله‌ی دو خودرو دو برابر طول خودرو می‌باشد)

Table 4. Results of field test for the two vehicles in tandem with the front vehicle being tested (the distance between two vehicles is set to be two vehicle length)

| شماره تست | میزان مصرف (گرم) | زمان (ثانیه) | فاصله (کیلومتر) | سرعت متوسط (متر بر ثانیه) | نسبت مصرف سوخت بر مجذور سرعت ( $\text{g.s}^2/\text{m}^2$ ) |
|-----------|------------------|--------------|-----------------|---------------------------|--|
| ۱         | ۲۷۲              | ۳۴۱          | ۶/۷             | ۱۹/۶۴۸                    | ۰/۷۰۴۶   |
| ۲         | ۲۶۸              | ۳۲۹          | ۶/۷             | ۲۰/۳۶۵                    | ۰/۶۴۶۲   |

جدول ۵: نتایج به دست آمده از تست در حالت دو خودروی پشت سرهم در صورتی که خودروی مورد آزمایش خودروی عقبی باشد (فاصله‌ی دو خودرو دو برابر طول خودرو می‌باشد)

Table 5. Results of field test for the two vehicles in tandem with the rear vehicle being tested (the distance between two vehicles is set to be two vehicle length)

| شماره تست | میزان مصرف (گرم) | زمان (ثانیه) | فاصله (کیلومتر) | سرعت متوسط (متر بر ثانیه) | نسبت مصرف سوخت بر مجذور سرعت ( $\text{g.s}^2/\text{m}^2$ ) |
|-----------|------------------|--------------|-----------------|---------------------------|--|
| ۱         | ۲۶۲              | ۳۴۶          | ۶/۷             | ۱۹/۳۶                     | ۰/۷۰۴۱   |
| ۲         | ۲۶۴              | ۳۴۳          | ۶/۷             | ۱۶/۵۲۴                    | ۰/۶۹۱۹   |

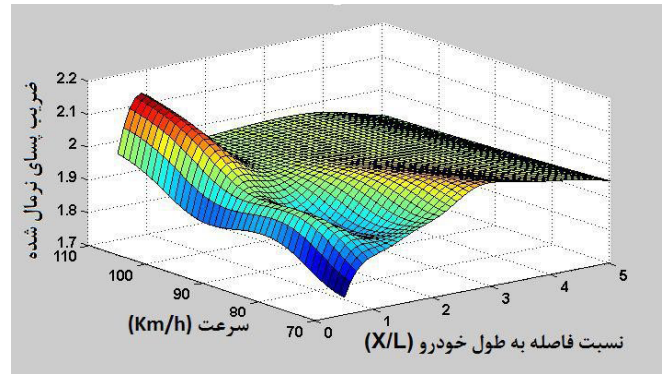


Fig. 15. Three-dimensional variation of the sum of normalized drag coefficient for both vehicles with vehicle speed and the ratio of distance to vehicle length

شکل ۱۵: تغییر سه بعدی مجموع ضرایب پسای نرمال شده‌ی دو خودرو با سرعت و نسبت فاصله به طول خودرو

می‌دهد.

با بررسی انجام شده بر روی این نمودار، نسبت فاصله به طول خودروی  $1/4$  در سرعت  $81$  کیلومتر بر ساعت به عنوان فاصله‌ی بهینه در سرعت بهینه معرفی شد. در این حالت ضریب پسای نرمال شده برای مجموع دو خودروی جلویی و عقبی  $1/86$  است که ضریب پسا  $7$  درصد نسبت به دو خودروی منفرد که می‌بایست دارای مجموع ضریب پسای نرمال شده‌ی  $2$  باشند، کاهش می‌یابد. البته باید توجه داشت که به دلیل مسائل ایمنی از جمله تأخیر سیستم‌های کنترلی در حفظ فاصله و عدم برخورد دو خودرو با یکدیگر، از بررسی فواصل کمتر از یک طول خودرو صرف‌نظر شده است.

### ۳-۲ نتایج تست‌های میدانی

نتایج حاصل از تست میدانی در حالت خودروی منفرد در جدول ۳ آمده است. با توجه به این که ضریب پسای خودرو با توان دوم سرعت رابطه دارد و همچنین رابطه‌ی میان ضریب پسا و مصرف سوخت را می‌توان با تقریب خوبی خطی در نظر گرفت، برای از بین بردن اثر سرعت بر میزان مصرف سوخت پارامتری تحت عنوان «نسبت مصرف سوخت بر مجذور سرعت» تعریف شده است. رابطه‌ی ۱ این پارامتر را نشان می‌دهد.

$$\text{نسبت مصرف سوخت بر مجذور سرعت} = \frac{\text{Fuel consumption}}{V^2} \quad (1)$$

که در این رابطه صورت کسر میزان مصرف سوخت بر حسب گرم و سرعت خودرو است. بنابراین با محاسبه‌ی پارامتر مذکور برای تک تک تست‌ها و میانگین‌گیری، میانگین نسبت مصرف سوخت بر مجذور سرعت برای خودروی منفرد  $0.77 \text{ g.s}^2/\text{m}^2$  و در نتیجه مصرف سوخت  $291/13$  گرم به دست می‌آید.

در قدم بعدی خودروی حامل دستگاه اندازه‌گیری مصرف سوخت به فاصله‌ی دو طول خودرو در جلوی خودروی دیگر، در طول مسیر تست قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تست‌ها در جدول ۴ مشاهده می‌شوند. در این حالت نیز میانگین نسبت مصرف سوخت بر مجذور سرعت برابر با

فاصله‌ی میانی دو طول خودرو ۴ الی ۶ درصد و حدود کاهش میزان مصرف سوخت در شرایط مشابه حدود ۹ الی ۱۲ درصد است. دلیل این اختلاف را می‌توان این دانست که چون در تست‌های میدانی علاوه بر آیرودینامیک خودرو عوامل دیگری نیز در مصرف سوخت دخیل می‌باشند، پس کاهش که در میزان مصرف سوخت گزارش شده است تنها متأثر از اثر آیرودینامیکی خودرو نمی‌باشد.

#### جدول ۷: مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی برای دو خودروی پشت سرهم با فاصله‌ی میانی دو طول خودرو و سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت

Table 7. Comparison of the numerical and experimental results for two vehicles in tandem with the inter-vehicle distance of two vehicle length at the speed of 70 Km/h

| خودروی عقبی | خودروی جلویی | خودروی منفرد |                     |
|-------------|--------------|--------------|---------------------|
| ۰/۹۱        | ۰/۸۸         | ۱            | مصرف سوخت نرمال شده |
| ۰/۹۶        | ۰/۹۴         | ۱            | ضریب پسای نرمال شده |
| ۹٪          | ۱۲٪          | -            | درصد کاهش مصرف سوخت |
| ۴٪          | ۶٪           | -            | درصد کاهش ضریب پسا  |

#### ۴- نتیجه‌گیری

در حالت کلی می‌توان گفت که حرکت پشت سرهم خودروها در بزرگراه‌ها تأثیر قابل توجهی در مصرف سوخت خودروها دارد و از طرفی هوشمند شدن خودروها نیز محدودیت‌های موجود برای رعایت فاصله‌ی مناسب میان خودروها را از بین می‌برد. در نتیجه با این الگوی حرکت می‌توان مسأله‌ی کاهش مصرف سوخت خودروها را بدون داشتن دغدغه‌ی ایمنی آن‌ها و سرنشینان، عملی نمود. به این ترتیب با برداشتن محدودیت دیرکرد زمانی برای پاسخگویی به شرایط موجود در هنگام رانندگی (هوشمند سازی خودروها) می‌توان فاصله را تا حد ممکن کاهش داده تا از اثرات گردابه‌ای برای کاهش مصرف سوخت نیز استفاده نمود. در نتیجه با کاهش فاصله‌ها علاوه بر کاهش مصرف سوخت، ظرفیت بزرگراه‌ها بیشتر و آلودگی هوا نیز کمتر خواهد شد. با توجه به نتایج به دست آمده در این مقاله می‌توان فاصله‌ی طولی بهینه میان دو خودروی پشت سرهم را حدود ۱/۴ برابر طول خودرو در سرعت ۸۱ کیلومتر بر ساعت گزارش نمود. در این فاصله‌ی بهینه، مجموع ضریب پسای دو خودرو ۱/۸۶ بوده که کاهش ۷ درصدی ضریب پسا را نسبت به دو خودروی منفرد که می‌بایست دارای مجموع ضریب پسای نرمال‌شده‌ی ۲ باشند، نشان می‌دهد که بیان‌گر اهمیت نتیجه‌ی به دست آمده از این بهینه‌سازی است.

#### منابع

[1] M. Zabat, S. Frascaroli, F.K. Browand, Drag Measurements on 2, 3 and 4 Car Platoons, in, *SAE Technical Paper* 940421, 1994.

خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از تست‌های میدانی در جدول ۶ گردآوری شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از حل‌های عددی که برای سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت در شکل ۹ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که همان‌گونه که ضرایب پسای هر دو خودروی جلویی و عقبی در فاصله‌ی دو طول خودرو از ضریب پسای خودروی منفرد کمتر است، میزان مصرف سوخت نیز در شرایط مشابه کمتر از خودروی منفرد است. همان‌طور که در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت با فاصله‌ی میانی دو طول خودرو ضریب پسای خودروی عقبی از خودروی جلویی بیشتر می‌باشد، مصرف سوخت آن نیز از مصرف سوخت خودروی جلویی بیشتر است.

لازم به ذکر است که مصرف سوخت به عوامل متعددی بستگی دارد، اما اثرپذیری آن از ضریب پسا بیشتر است. با توجه به این‌که هدف از این پژوهش بررسی رابطه‌ی بین ضریب پسا و مصرف سوخت خودرو نمی‌باشد، برای اطلاع یافتن از این رابطه به مرجع [۱۱] مراجعه شود. از نزدیک بودن مقادیر ضرایب پسای نرمال شده و مصرف سوخت نرمال‌شده‌ی دو خودرو نیز می‌توان تأثیر متقابل ضریب پسا را بر روی میزان مصرف سوخت خودرو مشاهده نمود. به این ترتیب با انجام تست‌های میدانی نتایج مربوط به حل عددی مسأله برای سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت مورد تأیید قرار گرفت.

#### جدول ۶: خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از تست‌های میدانی برای دو خودروی پشت سرهم با فاصله‌ی میانی دو طول خودرو و سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت

Table 6. Summary of the field test results for two vehicles in tandem with the inter-vehicle distance of two vehicle length and vehicle speed of 70 Km/h

| میزان مصرف (گرم) | خودرو تنها | خودرو عقبی | خودرو جلویی |
|------------------|------------|------------|-------------|
| ۲۹۱/۱۳           | ۲۶۴/۰۲     | ۲۵۵/۳۶     |             |
| مصرف نرمالیزه    | ۱          | ۰/۹۱       | ۰/۸۸        |

#### ۳-۳- مقایسه‌ی نتایج عددی و تست‌های میدانی

در جدول ۷ مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی برای دو خودروی پشت سرهم با فاصله‌ی میانی دو طول خودرو و سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت گردآوری شده است. مطابق این جدول می‌توان مشاهده نمود که برای دو خودروی پشت سرهم با فاصله‌ی میانی دو طول خودرو و سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت نتایج به دست آمده از میزان مصرف سوخت و ضریب پسا با هم همخوانی داشته و برای خودروی عقبی هم میزان مصرف سوخت و هم ضریب پسا در این شرایط بیشتر از همین دو پارامتر برای خودروی جلویی می‌باشد. از این‌جا می‌توان به یک نتیجه‌ی کلی در رابطه با رابطه‌ی متقابل ضریب پسا و مصرف سوخت خودرو رسید، بدین ترتیب که شرایط آیرودینامیکی خودرو بر مصرف سوخت آن تأثیر قابل توجهی دارد. در دو ردیف آخر جدول نیز درصد کاهش مصرف سوخت و ضریب پسا نمایش داده شده‌اند. حدود کاهش ضریب پسا در صورت آرایش پشت سرهمی خودروها با



- [7] S.R. Ahmed, G. Ramm, G. Faltin, Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake, in, *SAE Technical Paper* 840300, 1984.
- [8] A. Dávila, M. Nombela, Sartre - Safe Road Trains for the Environment Reducing Fuel Consumption through lower Aerodynamic Drag Coefficient, in, *SAE Technical Paper* 2011-36-0060, 2011.
- [9] A. Davila, E. del Pozo, E. Aramburu, A. Freixas, *Environmental Benefits of Vehicle Platooning*, in, The Automotive Research Association of India, 2013.
- [10] M. Davoodian, H. Nikfar, *Investigation of the Effect of Windows Being Open or Closed on the Fuel Consumption of Sedan Cars*, K. N. Toosi University of Technology, 2009 (In Persian).
- [11] N. Rabiei, M. Mahmoudabadi, *Investigation of the effect of longitudinal distance between two cars on fuel consumption and drag coefficient*, K. N. Toosi University of Technology, 2016 (In Persian).
- [2] M. Zabat, N. Stabile, S. Frascaroli, F. Browand, *The Aerodynamics Performance of Platoons: Final Report*, California PATH research report, 1995.
- [3] P. Hong, B. Marcu, F. Browand, A. Tucker, *Drag Forces Experienced by Two, Full Scale Vehicles at Close Spacing*, California PATH Research Report, 1998.
- [4] A.F. Abdel Azim, A.F. Abdel Gawad, A Flow Visualization Study of the Aerodynamic Interference Between Passenger Cars, in, SAE Technical Paper 2000-01-0355, 2000.
- [5] L. Tsuei, Ö. Savaş, Transient Aerodynamics of Vehicle Platoons During In-Line Oscillations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(13) (2001) 1085-1111.
- [6] S. Watkins, G. Vio, The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6) (2008) 1232-1239.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

N. Rabiei, M. A. Mahmoudabad, M. Bazargan, Investigation of the Effect of Longitudinal Distance Between Two Cars on Fuel Consumption and Drag Coefficient, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 893-902.  
DOI: 10.22060/mej.2017.11940.5224



