

بررسی تجربی اثر دنباله یک مدل تریلر بر آیرودینامیک یک مدل خودرو

عبدالامیر بک خوشنویس^۱ و وحید برزنونی^۲

گروه مهندسی مکانیک

دانشکده فنی مهندسی

دانشگاه حکیم سبزواری

(تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۱۲)

چکیده

در این پژوهش دنباله نزدیک در پشت یک مدل خودرو Notch Back با استفاده از تکنیک سرعت سنج سیم داغ به صورت یک بعدی تجزیه و تحلیل شده است. مؤلفه‌های نوسانی و متوسط زمانی سرعت جریان در دنباله خودرو به طور مستقل و هم‌چنین زمانی که در دنباله یک مدل تریلر قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری شده است. هم‌چنین، تغییرات ضریب نیروی پسای خودرو که در دنباله تریلر و در فاصله‌های مختلف نسبت به آن قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق سعی شده که از روش دنباله‌ای و معادله‌ای که اخیراً توسط Van Dam استخراج شده، برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا استفاده شود. فاصله بدون بعد بین خودروها از $X/L=0.1$ تا $X/L=3$ متغیر است (طول تریلر L و فاصله از پشت تریلر X). مشاهده می‌شود که مقدار ضریب پسای خودرو در مقایسه با حالت مجزای آن در فاصله بدون بعد 0.1 تا $1/3$ ابتدا یک روند صعودی و سپس نزولی دارد. با توجه به نمودارها و نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌ها، مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله در جهت طولی (X) میزان شدت اغتشاش‌های دنباله بیشتر و میزان بیشینه سرعت کاهش می‌یابد. هم‌چنین، دامنه ناحیه برشی افزایش یافته و علاوه بر آن با دور شدن از خودرو در جهت طولی (X) قله‌های کمینه سرعت نیز از بین می‌روند.

واژه‌های کلیدی: بررسی تجربی، نیروی پسا، تونل باد، شدت اغتشاشات، مدل خودرو

Experimental Investigation of the Trailer Wake Effects on the Aerodynamics of a Car Model

A. Khoshnevis and V. Barzanooni

Mech. Eng. Group

Eng. Dept.

Hakim Sabzevari Univ.

(Received: 3 May, 2010; Accepted: 3 Dec., 2011)

ABSTRACT

The aerodynamics of road vehicles has frequently been studied in simplified geometries to separate the effect of various components on aerodynamic drag and on near wake flow dynamics. In this work, the characteristics of the near wake of a Notch-Back car model were investigated, using hot-wire anemometer. The main objectives of this study are to gain a better understanding of the flow structure in the near wake region. The time-averaged and the fluctuating components of velocity were measured for the car model at various distances behind it. The effect of distance behind the car model to create maximum and minimum peaks of speed and turbulence intensity has been also investigated. Inter-model non-dimensional spacing was varied from 0.1 to 3.0, based on the lead model length. Surprisingly, significant drag increase was found for the rear model for spacing 0.1-1.3.

Keywords: Drag, Car Model, Wind Tunnel, Experimental Investigation

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): khosh1966@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: mrvahid4154@yahoo.com

فهرست علائم

b	پهنای مدل
c_d	ضریب پسا
h	ارتفاع مدل
L	طول تریلر
l	طول خودرو
p_t	فشار کلی
p_s	فشار استاتیک
q	فشار دینامیک
\bar{q}	فشار دینامیک متوسط
Re	عدد رینولدز
Tu	شدت اغتشاش‌های جریان سیال $\frac{U'}{U_\infty}$
U	سرعت جریان آزاد
u, v, w	مؤلفه‌های سرعت
u', v', w'	مؤلفه‌های اغتشاشی سرعت
x	فاصله از انتهای خودرو
X	فاصله از انتهای تریلر
ρ	چگالی، kg/m^3
w	مقادیر در دنباله
∞	مقادیر در جریان آزاد
*	حالت بدون بعد

علائم یونانی

زیرنویس

بالانویس

۱- مقدمه

از آنجایی که روش‌های تئوری و محاسبات هنوز با طراحی عملی مهندسی فاصله دارد، آزمایش با دستگاه تونل باد اغلب تنها روشی است که برای تعیین درست پارامترهای جریان، از جمله شدت اغتشاش‌های مدل‌ها به کار می‌رود. بدین منظور در این تحقیق به بررسی تجربی جریان در دنباله خودرو پرداخته و اثرات فاصله دو خودرو در ایجاد اغتشاش نشان داده شده است. در روش‌های تجربی نیاز به مدل، تجهیزات آزمایش و دستگاه‌های اندازه‌گیری است و به‌طور معمول

پرهزینه‌تر از روش‌های عددی و تحلیلی است. محاسبه ضریب نیروی پسا در خودروها از دیرباز مورد توجه مهندسی‌ها بوده است. بخش عمده‌ای از سوخت خودروهای در حین حرکت، صرف خنثی کردن نیروهای اصطکاک هوا می‌شود. حدود نیمی از توان تولید شده خودرویی که با سرعت ۸۸ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کند، صرف غلبه بر نیروهای ناشی از اصطکاک هوا می‌شود [۱].

در تحلیل‌های آیرودینامیک خودرو، به‌طور کلی سه پارامتر اهمیت دارد: ۱- اندازه‌گیری نیروی پسا در سرعت‌ها و شکل‌های مختلف برای رسیدن به مدل بهینه، ۲- اندازه‌گیری مقدار فشار بر روی سطح رو، کف و ناحیه پشت خودرو و ۳- آشکارسازی جریان در اطراف خودرو و مشخص کردن محل جدایش جریان.

در روش‌های تجربی مهم‌ترین وسیله مورد استفاده تونل باد است که توسط آن می‌توان به هر یک از پارامترهای فوق دست یافت. این در حالی است که به‌طور دائم تکنیک‌های نوینی برای آنها در حال ارائه است [۲]. تکنیک‌های عملی برای محاسبه ضریب نیروی درگ خود به چند روش تقسیم می‌شود. روش اول آن است که با مشخص کردن توزیع فشار بر روی جسم، این ضریب را تعیین کنیم. اما این روش دو مشکل دارد، اول آنکه ساخت مدل آن مشکل است و دوم آنکه اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا در طول دهانه مدل امکان‌پذیر نیست. روش دیگر اندازه‌گیری این ضریب با استفاده از بالانس است که عیب‌های آن مربوط به کالیبره کردن و عدم امکان اندازه‌گیری ضریب نیروی درگ در طول دهانه است. اما روش آخر، روش به‌کار رفته در این تحقیق است. اساس این روش بر اختلاف مومنتوم در پشت و جلو جسم است. حسن این روش این است که عیب‌های روش‌های قبلی را ندارد؛ اما مشکل این روش در اندازه‌گیری پارامترهای جریان و به‌ویژه جریان‌های به‌شدت مغشوش است؛ زیرا برای اندازه‌گیری سرعت به‌طور عموم از لوله پیتوت استفاده می‌شود که متأسفانه کارایی خود را در جریان‌هایی که اغتشاش آنها بالا است، از دست می‌دهد. به‌همین علت در این تحقیق از جریان‌سنج سیم داغ یک بعدی برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان استفاده شده است. این دستگاه ساخت شرکت فراسنجش صبا بوده و قادر است شدت اغتشاش‌های

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطبیق‌های به‌نسبت خوبی بین نتیجه‌های حاضر با نتیجه‌های ساها^۱ و همکارانش [۱۳] و همچنین شادآرام و همکارانش [۱۴] که به‌صورت تقریب عدد رینولدز یکسانی دارند، مشاهده می‌شود. (لازم به یادآوری است این مطلب فقط جهت اعتبار بخشیدن به نتیجه‌های حاضر آورده شد). در این تحقیق مقدار انتخابی برای این ضریب با توجه به شرایط آزمایشگاهی و تونل باد، ۰/۰۹ می‌باشد که بر طبق آن مقیاس مدل‌ها ۱/۷۵ می‌باشد بر اساس مورلی^۲ و هرلیش^۳ [۱۶-۱۵]

۴- معادله‌های روش دنباله ای^۴

معادله‌هایی که برای اندازه‌گیری نیروی پسا استفاده می‌شوند به‌راحتی با اعمال قانون‌های مومنتوم و بقای جرم در یک حجم کنترل، قابل استخراج هستند.

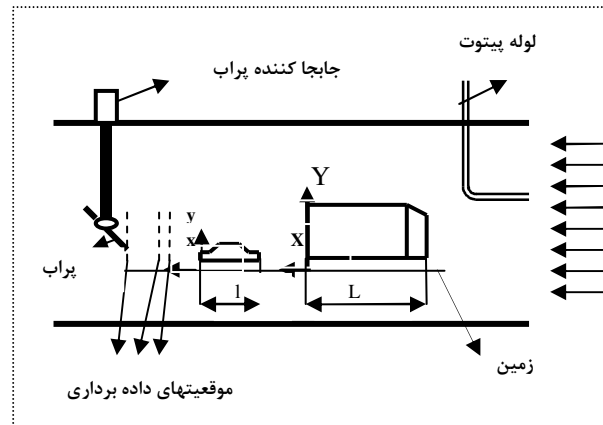
گلدستون^۵ [۱۷] در سال ۱۹۳۶ نتیجه‌های تحقیق‌های خود در رابطه با بررسی اثرهای شدت اغتشاش‌ها و نوسان‌های جریان سیال در محاسبه ضریب پسا را منتشر کرد.

چائو^۶ [۱۸] تحقیق‌های بسیار زیادی در بررسی اثرهای اغتشاش در محاسبه ضریب پسا داشته است. راجاکوپالان^۷ [۱۹] نیز اثرات اغتشاش و نوسان‌های جریان را مورد بررسی قرار داده و به نتیجه‌های جالبی رسیده است. آنتونیا^۸ [۲۰] تحقیق‌های بسیاری برای بررسی اثرهای شدت اغتشاش‌های جریان در اندازه‌گیری نیروی پسا انجام داده است.

ون دام^۹ [۲۱] معادله‌ای برای محاسبه ضریب نیروی پسا به‌دست آورد که در آن ترم‌های تنش‌های رینولدزی و شدت اغتشاش‌های جریان وجود داشتند اما از تغییرات چگالی جریان و ترم لزج صرف‌نظر شده بود. کل معادله به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_d = \int \left(\frac{p_{s,a} - p_{s,w}}{q_\infty} \right) d\left(\frac{y}{l}\right) + 2 \int \frac{\bar{u}}{U_\infty} \left(1 - \frac{\bar{u}}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{l}\right) - 2 \int \frac{\bar{u}^2}{U_\infty^2} d\left(\frac{y}{l}\right), \quad (1)$$

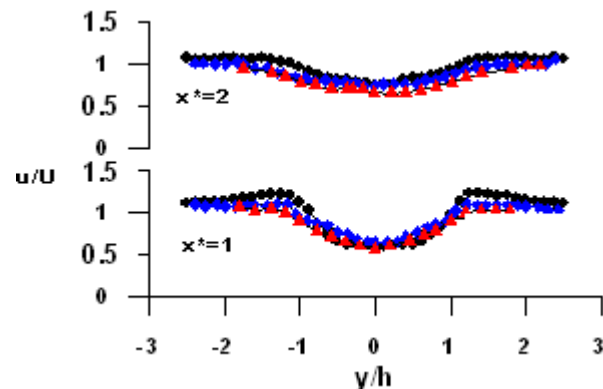
- 1- saha
- 2- Morelli
- 3- Heinrich
- 4- Wake-Survey
- 5- Goldstein
- 6- Chao
- 7- Rajagopalan
- 8- Antonia
- 9- Van Dam



شکل (۲): نمای شماتیک مدل‌ها داخل تونل باد و مکانیزم داده‌برداری.

۳- اعتبارسنجی

در ابتدا، برای بررسی صحت عملکرد دستگاه تونل باد و جریان‌سنج سیم داغ، یک نمونه داده‌برداری صورت گرفته و با کار دیگر افراد مقایسه شده است. از آنجایی که روی دنباله مدل‌های انتخابی در این تحقیق در گذشته کار مشابهی صورت نگرفته، بنابراین از یک مدل سیلندر مکعبی استفاده شده است. نمودار متوسط زمانی مؤلفه سرعت در جهت غالب جریان (\bar{U}) برای یک نمونه سیلندر مکعبی با نسبت $b/h = 1$ و در رینولدز ۸,۶۰۰ در دو مقطع مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است.



- Presentation work(Re=8600)
- ▲ Shadaram(Re=8600)
- ▲ Saha(Re=8700)

شکل (۳): پروفیل سرعت متوسط برای استوانه مربعی در دو مقطع مختلف.

روش دنباله ای در داخل تونل باد استفاده کرد و نتیجه‌های به‌دست آمده معتبر است [۲۱]. در این تحقیق از معادله (۳) برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا استفاده شده است.

۵- نتایج

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش فاصله از پشت خودرو، اختلاف سرعت در داخل و خارج دنباله کاهش می‌یابد و پروفیل‌های سرعت، یکنواخت‌تر می‌شوند. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش سرعت این روند رشد بیشتری داشته، به‌طوری که در سرعت ۲۵ m/s و در ایستگاه ششم دنباله خودرو از بین رفته است؛ درحالی که در سایر سرعت‌ها اثرات وجود دنباله مشاهده می‌شود. نکته دیگر آنکه در ایستگاه اول ($x^*=0.01$) به‌طور دقیق پشت مدل تغییرات سرعت جریان ورودی اثر چندانی در میزان سرعت متوسط دنباله ندارد. این درحالی است که با افزایش فاصله، افزایش سرعت جریان ورودی باعث افزایش میزان سرعت متوسط در داخل دنباله می‌شود و همان‌طور که اشاره شد، با افزایش سرعت، اثرهای دنباله زودتر از بین می‌رود. البته در فاصله‌های دور هم، تفاوت چندانی در پروفیل‌های سرعت متوسط دیده نمی‌شود.

مطلب دیگر وجود قله بیشینه سرعت در ارتفاع تحتانی و در مقاطع نزدیک به مدل است. علت این مطلب را می‌توان به‌خاطر وجود جت سیال و هم‌چنین مومنتوم لایه مرزی ایجاد شده بر سطح تحتانی مدل دانست. بدین صورت که در مقاطع نزدیک به مدل، جت سیال قدرت بیشتری داشته و با فاصله گرفتن از مدل اثرهای جت سیال به‌تدریج کم‌رنگ‌تر شده است و هم‌چنین در مقاطع نزدیک به مدل، مومنتوم موجود در لایه مرزی تشکیل شده بر روی سطح تحتانی مدل، پس از انحلال لایه مرزی باعث افزایش انرژی نقاط مجاور و درنهایت افزایش سرعت آنها می‌شود. این مطلب در نقاط دورتر مدل اثر خود را از دست می‌دهد و قادر به ایجاد تغییر در سرعت ذرات سیال نیست. می‌بینیم که تغییرهای سرعت جریان ورودی اثر چندانی در میزان این قله بیشینه سرعت ندارد.

$$\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

همان‌طور که می‌بینیم، این معادله از سه بخش زیر تشکیل شده است:

$$1- \text{ فشاری: } \int \left(\frac{p_{s,a} - p_{s,w}}{q_\infty} \right) d\left(\frac{y}{l}\right),$$

$$2- \text{ مومنتوم: } 2 \int \frac{\bar{u}}{U_\infty} \left(1 - \frac{\bar{u}}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{l}\right),$$

$$3- \text{ تنش رینولدزی: } 2 \int \frac{\bar{u}'^2}{U_\infty^2} d\left(\frac{y}{l}\right).$$

طبق تحلیل گلدستون وی داریم:

$$p_{s,a} = p_{s,w} + \bar{q}',$$

$$\bar{q}' = \frac{1}{2} \rho (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2).$$

اگر معادله بالا را در معادله (۱) قرار دهیم، به عبارت زیر می‌رسیم:

$$C_d = 2 \int \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \right) d\left(\frac{y}{l}\right) + \frac{1}{3} \int \frac{(\bar{v}'^2 + \bar{w}'^2 + \bar{u}'^2)}{U_\infty^2} d\left(\frac{y}{l}\right), \quad (2)$$

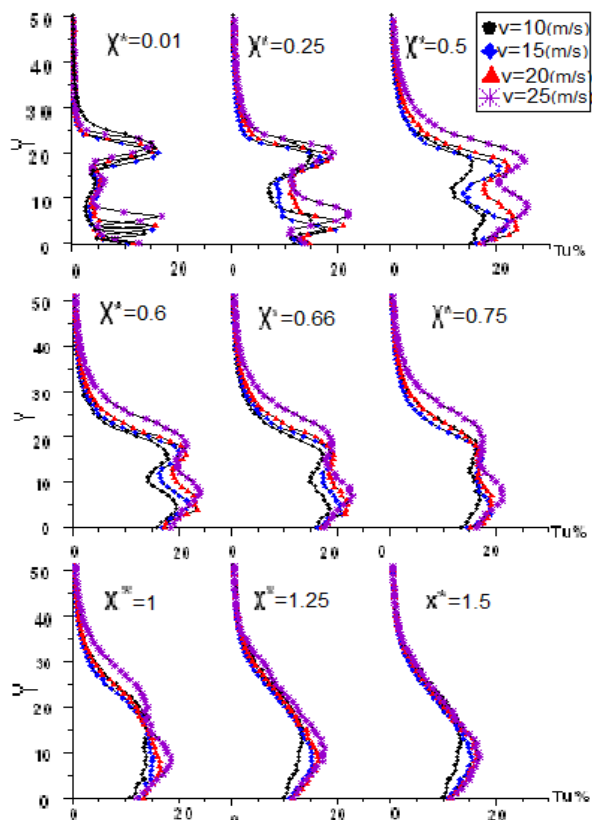
و در صورتی که فرض کنیم $u' = v' = w'$ به معادله زیر می‌رسیم:

$$C_d = 2 \int \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \right) d\left(\frac{y}{l}\right) + \frac{1}{3} \int \frac{\bar{q}'}{q_\infty} d\left(\frac{y}{l}\right), \quad (3)$$

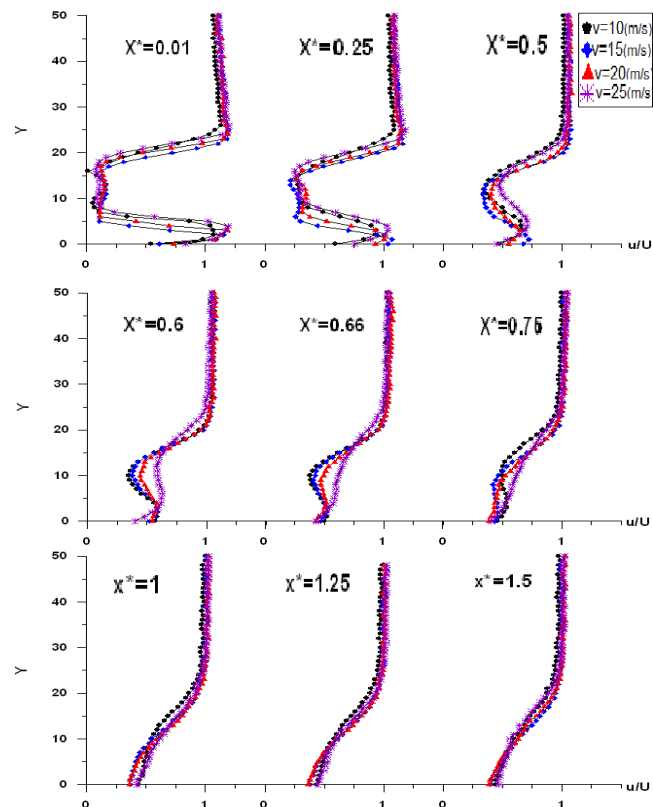
که در آن،

$$\bar{q}' = \frac{1}{2} \rho (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2).$$

از آنجایی که مدل مورد آزمایش دوبعدی است، به‌گونه‌ای که جریان فقط در امتداد محفظه آزمایش جریان دارد، بنابراین صرفاً پارامترهای u', v', w' در دنباله مدل وجود دارند (مدل مورد آزمایش در امتداد عرض مقطع آزمایش کشیده شده است و در طرفین به‌طور کامل به‌سطح جانبی مقطع آزمایش چسبیده است و هیچ جریانی از قسمت جانبی مدل عبور نمی‌کند. جریان صرفاً از روی مدل مورد آزمایش عبور می‌کند). معادله (۳) نیز برای محاسبه ضریب درگ مدل دوبعدی به‌دست آمده است. بنابراین، از این معادلات می‌توان برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا به‌روش



شکل (۵): نمودار شدت اغتشاش‌ها برحسب ارتفاع در سرعت‌های مختلف و موقعیت‌های مختلف در پشت خودرو.



شکل (۴): پروفیل سرعت متوسط برحسب ارتفاع در سرعت‌های مختلف و موقعیت‌های مختلف در پشت خودرو.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود برای دو موقعیت اول ($X/L=0.3, 0.4$) خودرو به‌طور کامل در ویک تریلر قرار گرفته و لایه‌های برشی جدا شده از سقف تریلر در فاصله‌های دورتر از پشت خودرو فرود می‌آیند. دیده می‌شود که سرعت از ارتفاع بالاتری برای $X/L=0.3$ شروع به رشد کرده است و با افزایش فاصله خودرو از تریلر، روند افزایش سرعت از ارتفاع پایین‌تری شکل می‌گیرد. در موقعیت‌های انتهایی، به‌طور تقریبی پروفیل سرعت به پروفیل سرعت دنباله خودرو (زمانی که مستقل در مقابل جریان واقع شده است) نزدیک می‌شود؛ به عبارتی اثرهای ویک تریلر روی ویک خودرو کمتر شده است و خودرو به تدریج از ویک تریلر خارج می‌شود. دیده می‌شود که میزان سرعت متوسط در پشت خودرو ($x/l=0.01$) به‌صورت تقریبی مستقل از موقعیت قرارگیری خودرو است و مقادیر سرعت با هم برابرند.

شکل ۵ نمودار شدت اغتشاش‌ها در موقعیت‌های مختلف و برای سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم، پروفیل شدت اغتشاش‌ها در موقعیت‌های مختلف و برای سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. پروفیل شدت اغتشاشات دارای دو ناحیه اکستریم در روی مرز دنباله است که با دور شدن از مدل این نقاط یکنواخت‌تر شده و اکستریم‌ها از بین می‌رود.

در $x^*=0.01$ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت قله بیشینه، اغتشاش تحتانی در ارتفاع بالاتری شکل می‌گیرد. با افزایش سرعت دیده می‌شود که میزان اغتشاش‌های دنباله و هم‌چنین محدوده ناحیه اغتشاشی نیز افزایش می‌یابد.

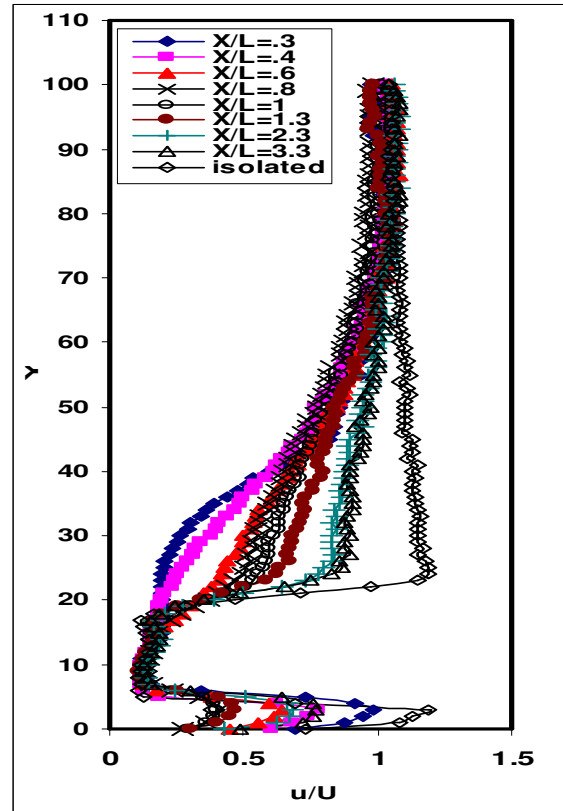
در شکل‌های ۱۲-۶ پروفیل‌های سرعت متوسط در پشت خودرو به ازای موقعیت‌های مختلف خودرو و در فاصله‌های مختلف نشان داده شده‌اند و با پروفیل‌های سرعت متوسط خودرو تنها مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، به‌طور دقیق در پشت خودرو میزان اغتشاش‌ها با افزایش فاصله خودرو از تریلر ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. کاهش میزان اغتشاش‌ها به‌طور احتمالی، به خاطر کمتر شدن جریان خروجی از زیر خودرو (به‌طور احتمالی، به خاطر وجود گردابه‌ها) است. برای فاصله‌های بسیار نزدیک خودرو از تریلر ($X/L=0.3$) و فاصله‌های دور اختلاف چندانی در میزان اغتشاش‌های دنباله خودرو با هم و اغتشاش‌های دنباله، زمانی که خودرو به‌طور مستقل در مقابل جریان قرار گرفته است، دیده نمی‌شود. علاوه بر این موارد در شکل ۱۳ وجود قله‌های بیشینه اغتشاش در قسمت تحتانی که می‌تواند به‌علت تداخل جت سیال و دنباله و هم‌چنین لایه مرزی شکل گرفته روی صفحه باشد، میزان این قله بیشینه ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. ولی بیشینه اغتشاش در قسمت تحتانی مربوط به حالتی است که خودرو به‌طور مستقل در مقابل جریان واقع شده باشد. در شکل ۱۳ هم‌چنین یک قله کمینه اغتشاش نیز وجود دارد که با افزایش فاصله خودرو از تریلر به‌تدریج افزایش می‌یابد. زمانی که خودرو در دنباله تریلر واقع شده است، میزان اغتشاش در قسمت فوقانی دنباله بیشتر از اغتشاش‌های دنباله در حالت مستقل قرارگیری خودرو در مقابل جریان است و میزان اغتشاش‌ها از ارتفاع پایین‌تری شروع به رشد می‌کند.

در قسمت فوقانی نیز قله بیشینه اغتشاش برای فاصله‌های دورتر خودرو از تریلر دیده می‌شود که به‌طور احتمالی به‌خاطر فرود آمدن لایه‌های برشی جدا شده از سقف تریلر بر روی خودرو است که این قله در فاصله‌های نزدیک خودرو به تریلر، وجود ندارد و به‌تدریج با افزایش فاصله شکل می‌گیرد. در قسمت فوقانی نمودار یک ناحیه وسیع اغتشاشی دیده می‌شود که ناشی از اثرهای لایه‌های برشی جدا شده از سقف تریلر است و این ناحیه به‌تدریج با افزایش فاصله خودرو از تریلر کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۴ میزان اغتشاش‌های دنباله افزایش یافته است و قله‌های بیشینه اغتشاش تحتانی نیز در ارتفاع بالاتری شکل می‌گیرد.

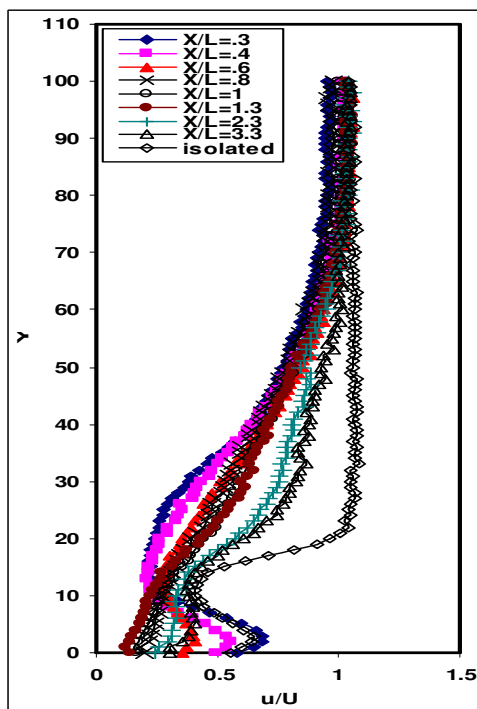
روند کلی که در شکل‌های ۱۷-۱۳ دیده می‌شود، آن است که وجود اثرات دنباله تریلر باعث کاهش میزان شدت



شکل (۶): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری آن در دنباله تریلر ($x/l=0.01$).

در قسمت تحتانی، قله‌های بیشینه سرعت که به‌دلیل وجود جت سیال و هم‌چنین از بین رفتن لایه مرزی که در سطح تحتانی مدل شکل گرفته است، مشاهده می‌شوند. دیده می‌شود که با افزایش فاصله خودرو از تریلر میزان این قله ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. به‌علت وجود اثرهای لایه مرزی سطح تحتانی مدل تریلر میزان قله بیشینه سرعت کمتر از حالتی است که خودرو به‌طور مستقل در مقابل جریان واقع شده است. با افزایش فاصله از پشت خودرو اثرهای جت سیال کمتر شده است و قله بیشینه سرعت به‌تدریج از بین می‌رود. در ایستگاه‌های انتهایی شکل‌های ۱۱ و ۱۲، قله‌های بیشینه سرعت از بین رفته و نمودارها یکنواخت‌تر هستند.

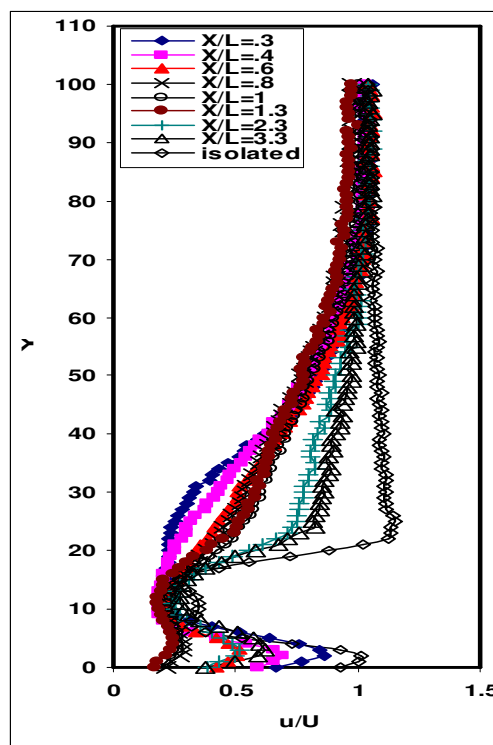
در شکل‌های ۱۷-۱۳ نمودارهای شدت اغتشاشی برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری خودرو و در ایستگاه‌های مختلف در پشت خودرو نشان داده شده‌اند.



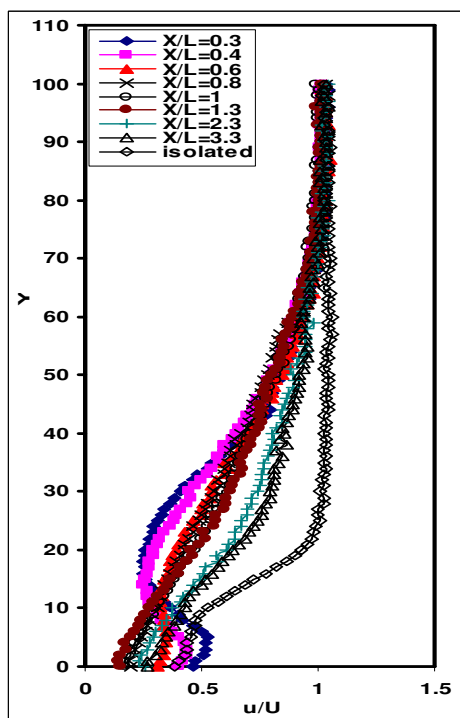
شکل (۸): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری آن در دنباله تریلر ($x/l=0.5$).

اغتشاش‌های دنباله خودرو در ارتفاع پایین می‌شود، اما در قسمت فوقانی خودرو یک محدوده وسیع اغتشاشی دیده می‌شود.

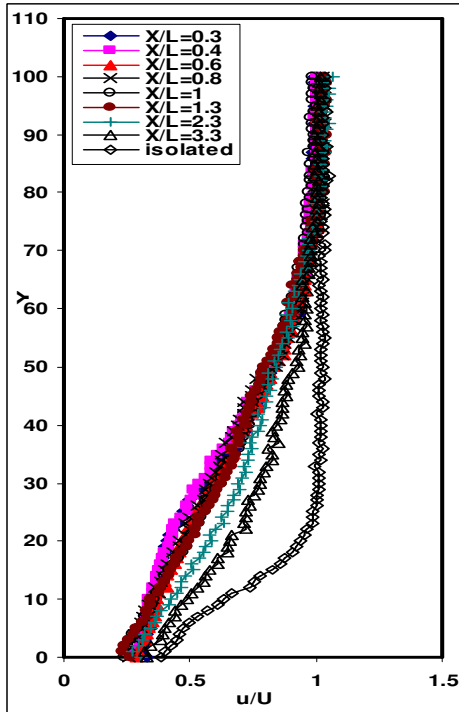
با افزایش فاصله از پشت خودرو میزان اغتشاش‌های دنباله ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با افزایش فاصله از پشت خودرو، لایه‌های برشی جدا شده از سقف خودرو و تریلر به سمت پایین حرکت کرده است و میزان اغتشاش افزایش می‌یابد و با دور شدن از پشت خودرو اثرهای این لایه‌های برشی کمتر می‌شود. دیگر آنکه با افزایش فاصله از پشت خودرو نمودارهای شدت اغتشاشی یکنواخت‌تر شده و قله‌های بیشینه و کمینه اغتشاشی به‌طور کلی از بین رفته است.



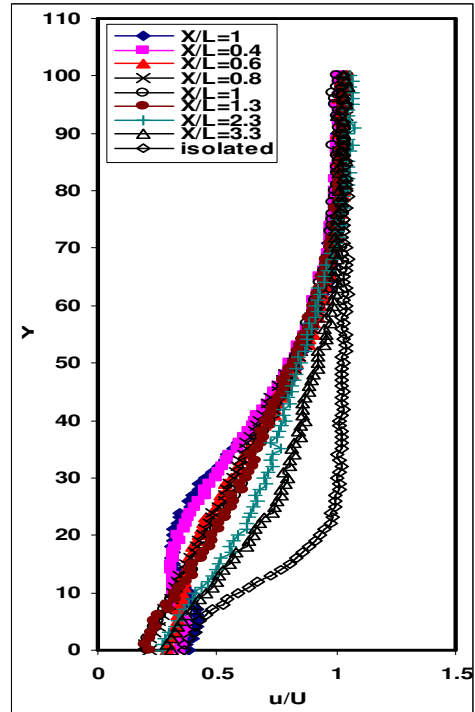
شکل (۷): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری آن در دنباله تریلر ($x/l=0.25$).



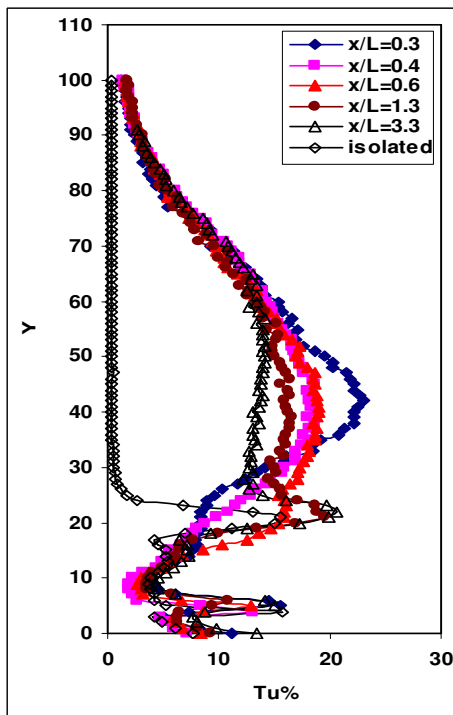
شکل (۹): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری آن در دنباله تریلر ($x/l=0.75$).



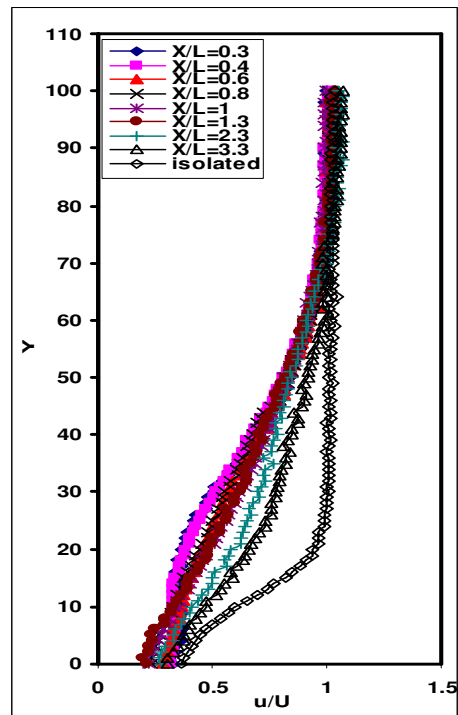
شکل (۱۲): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری آن در دنباله تریلر ($x/l=1.5$).



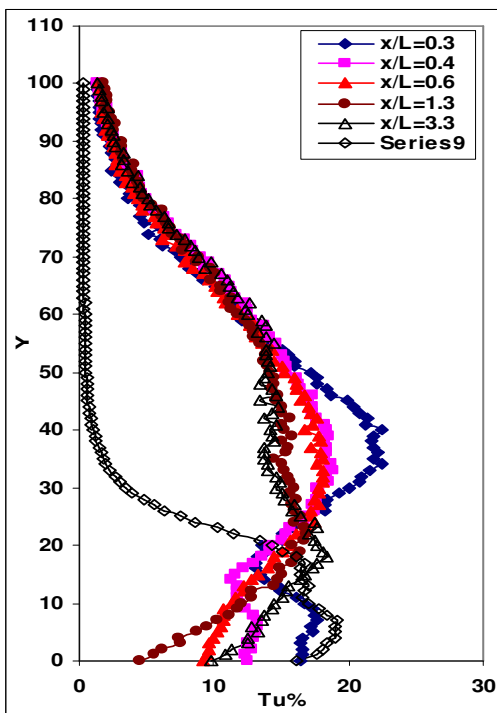
شکل (۱۰): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری آن در دنباله تریلر ($x/l=1$).



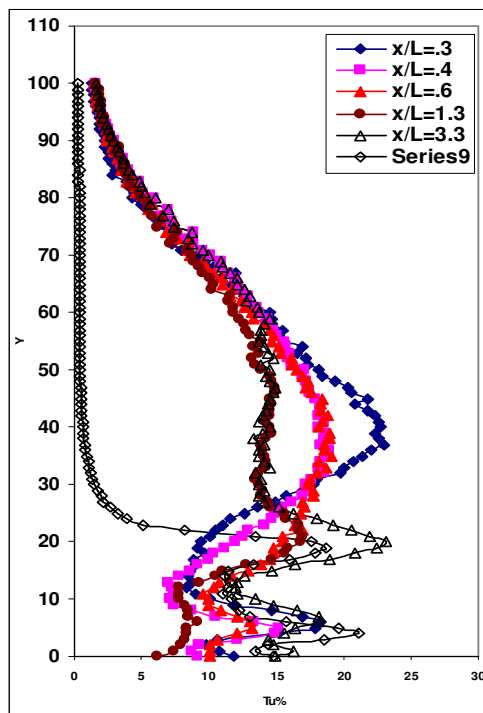
شکل (۱۳): پروفیل شدت اغتشاش‌های دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف ($x/l=0.01$).



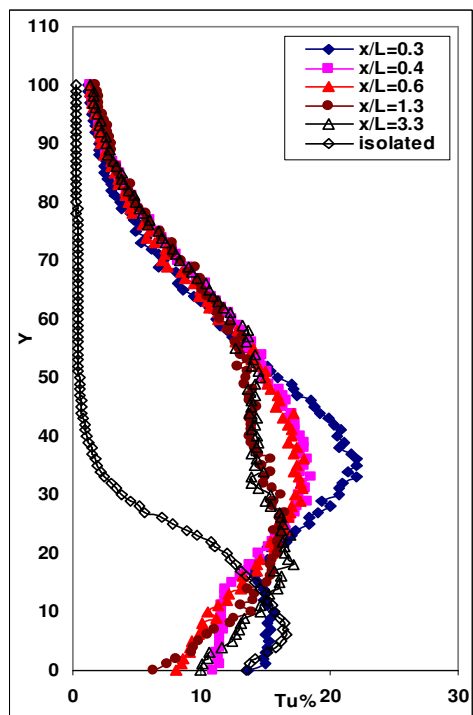
شکل (۱۱): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری آن در دنباله تریلر ($x/l=1.25$).



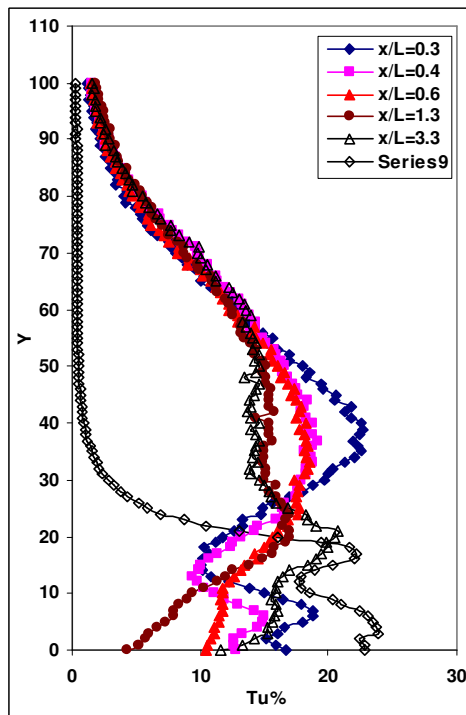
شکل (۱۶): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف ($x/l=0.75$).



شکل (۱۴): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف ($x/l=0.25$).

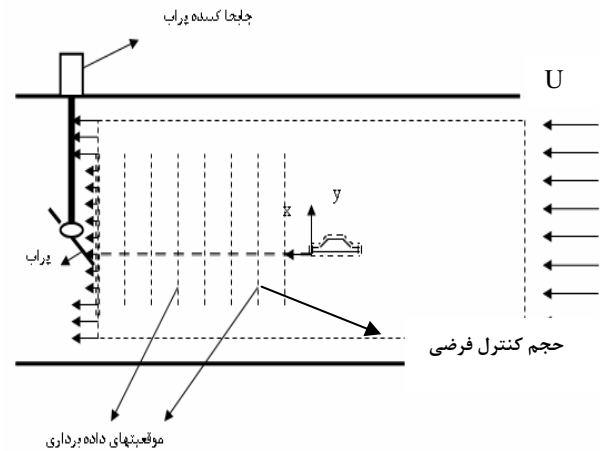


شکل (۱۷): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف ($x/l=1$).

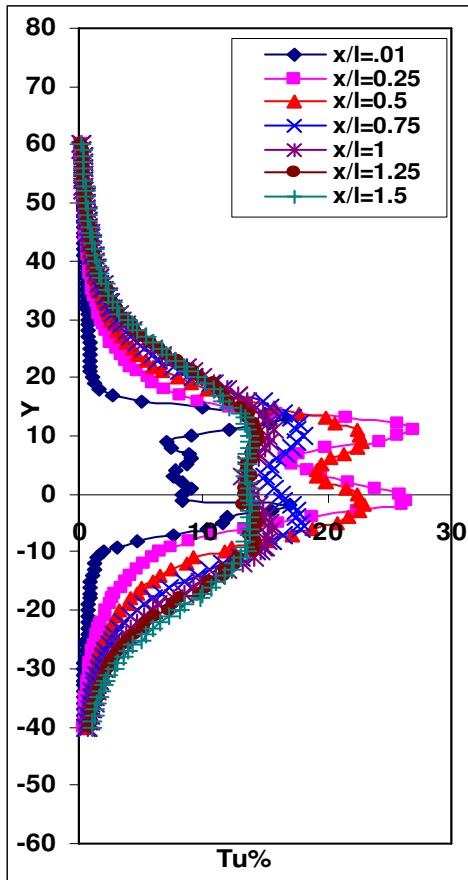


شکل (۱۵): پروفیل سرعت متوسط دنباله خودرو برای موقعیت‌های مختلف ($x/l=0.5$).

در ادامه به بررسی ضریب پسا خودرو به صورت مجزا می پردازیم. نحوه قرارگیری مدل در مقطع آزمایش و انتخاب حجم کنترل در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل (۱۸): نمای شماتیکی از نحوه قرارگیری مدل خودرو و انتخاب حجم کنترل.

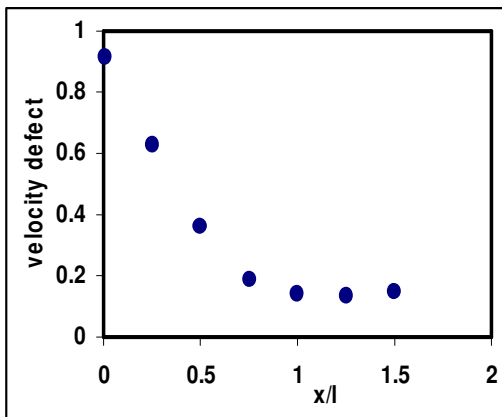


شکل (۱۹): پروفیل شدت اغتشاش‌ها در پشت خودرو در فاصله‌های مختلف.

توزیع شدت اغتشاش‌ها در فاصله‌های مختلف در پایین دست مدل و در سرعت ۲۰ m/s در شکل ۱۹ رسم شده است. همان طور که می بینیم حداکثر شدت اغتشاش‌های در فاصله $0.25L$ به حدود 27% می رسد. هم چنین با افزایش فاصله از مدل، ابتدا شدت اغتشاش‌ها افزایش و سپس کاهش می یابد و متناسب با فاصله، نرخ تغییر آن کمتر می شود.

شکل ۲۱ توزیع سرعت را در فاصله‌های مختلف و در پشت مدل نشان می دهد. همان طور که می بینیم، هرچه از مدل دور می شویم، پروفیل سرعت پهن تر و نازک تر می شود که نشان از افزایش دامنه دنباله تشکیل شده در پشت جسم دارد.

شکل ۲۰ نمودار پارامتر نقصان سرعت^۱ در موقعیت‌های مختلف برای سرعت‌های متفاوت را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، تغییر سرعت و موقعیت داده برداری باعث تغییرات در مقدار پارامتر نقصان سرعت می شود. نتیجه‌ها نشان می دهد که با افزایش سرعت در موقعیت‌های مختلف پارامتر نقصان سرعت کاهش می یابد.



شکل (۲۰): نمودار نقصان سرعت (تفاوت بین کمینه سرعت دنباله و سرعت جریان آزاد) برای موقعیت‌های مختلف در پشت خودرو.

1- Velocity Defect

برابر فرض شده است [۱۷]. همان‌طور که می‌بینیم، هرچه از خودرو دور می‌شویم، تأثیر ترم مومنتوم افزایش یافته و از تأثیر ترم تنشی کاسته می‌شود. مقادیر ضریب نیروی درگ مرجع [۸] نیز ۰/۲ منظور شده است.

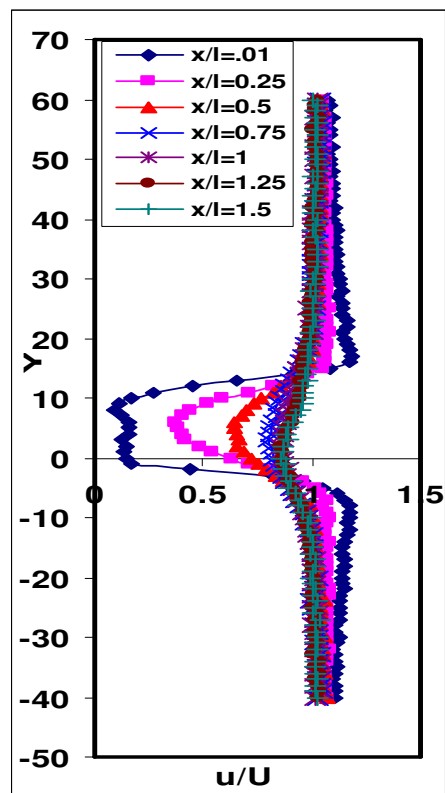
جدول (۱): مقدارهای محاسبه شده ضریب درگ در فاصله‌های مختلف از پشت خودرو.

Down-stream Location	Cd			
	Momentum	Stress	Total	Error%
۰/۰۱	-۰/۴۸۰	۰/۰۰۸	-۰/۴۷۲	۳۳۶
۰/۲۵	-۰/۰۷۱	۰/۰۳۱	-۰/۰۴۰	۱۳۵
۰/۵	۰/۱۴۶	۰/۰۳۴	۰/۱۸۰	۱۰
۰/۷۵	۰/۱۹۸	۰/۰۲۶	۰/۲۲۴	۱۲
۱	۰/۱۶۳	۰/۰۲۳	۰/۱۸۶	۷
۱/۲۵	۰/۱۷۴	۰/۰۲۱	۰/۱۹۶	۲
۱/۵	۰/۱۸۱	۰/۰۲۱	۰/۲۰۲	۱

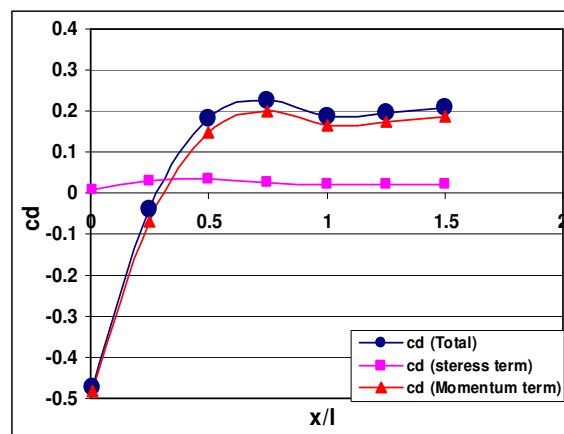
همان‌طور که از نتیجه‌ها مشخص است، در فاصله‌های نزدیک به خودرو، ضریب نیروی درگ محاسبه شده دارای خطای بسیار زیادی است که می‌تواند ناشی از چند علت باشد. اول آنکه به علت شدت اغتشاش‌های زیادی که جریان در این ناحیه دارد، امکان اندازه‌گیری پارامترهای جریان سیال میسر نیست (خطای ذاتی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ). دوم اینکه دنباله بر اساس پدیده‌های سه بعدی هستند و تأثیر چند بعدی بودن جریان در نواحی نزدیک به خودرو بسیار بیشتر است و همین امر باعث می‌شود که در اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا دچار خطای زیادی شویم و معادله (۳) جوابگو نیست. ارائه نتیجه‌ها فقط برای توضیح بیشتر بوده و نتیجه‌ها در فاصله‌های بسیار نزدیک معتبر نیست.

لازم به توضیح است تغییرهای فشار استاتیک در محفظه آزمایش با توجه به طراحی دیفیوزر ثابت است و آزمایش‌ها براساس داخل صورت گرفته است.

در ادامه، با قرار گرفتن خودرو در دنباله تریلر به محاسبه ضریب پسی آن می‌پردازیم. ابتدا مدل تریلر در محفظه آزمایش قرار گرفته و با انتخاب یک حجم کنترل، پروفیل سرعت در مقطع خروجی آن اندازه‌گیری شده است. نکته مهم



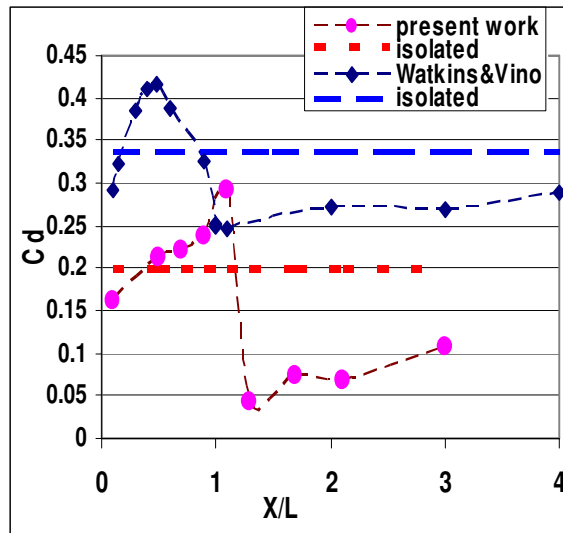
شکل (۲۱): پروفیل سرعت متوسط در پشت خودرو.



شکل (۲۲): مقادیر محاسبه شده ضریب نیروی پسا در فاصله‌های مختلف از پشت خودرو.

در شکل ۲۳ و در جدول ۱ نیز ضریب نیروی درگ محاسبه شده را می‌بینیم. لازم به ذکر است از آنجا که برای اندازه‌گیری ضریب نیروی درگ از جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده، مقادیر سه مؤلفه شدت اغتشاش‌ها با یکدیگر

یک مقدار بیشینه افزایش یافته و پس از یک کاهش شدید به یک قله کمینه می‌رسد. سپس با افزایش بیشتر فاصله مقدار، این ضریب به تدریج افزایش می‌یابد و اثرات دنباله تریلر روی خودرو کمتر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات عمده ضریب پسا در $1/3$ تا $1/1$ X/L است.

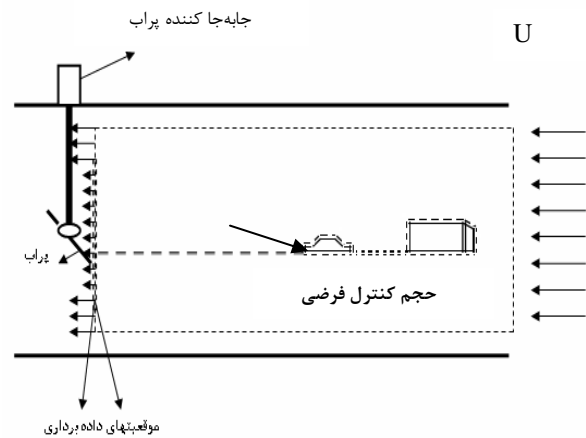


شکل (۲۴): مقایسه روند تغییرهای ضریب درگ خودرو با کارهای مشابه صورت گرفته.

لازم به ذکر است در $X/L < 1$ روند کلی تغییرهای مقادیر ضریب پسا در تحقیق حاضر با روند تغییرهای مقادیر ضریب پسا [۱۲] تطابق خوبی دارد. البته تأکید می‌شود که فقط روند تغییرات با هم مشابه‌اند و از آنجایی که مدل مورد آزمایش در تحقیق حاضر با مدل آزمایش شده در تحقیق صورت گرفته توسط مرجع [۱۲] از نظر هندسی با هم متفاوت هستند، بنابراین مقادیر ضریب پسا و البته تفاوت در مکان‌های کمینه و بیشینه ضریب پسا می‌تواند به دلیل تفاوت در مدل‌های مورد آزمایش و همچنین ابعاد دو مدل نسبت به هم باشد.

برای درک بهتر پروفیل‌های سرعت نمودار نقصان سرعت سطح مقطع خروجی در شکل ۲۵ نشان داده شده است که مقدار آن ابتدا افزایش و پس از یک افت شدید دوباره افزایش می‌یابد که این موضوع نیز روند تغییرهای ضریب پسا را تصدیق می‌کند.

در انتخاب حجم کنترل، دور بودن مرزهای ورودی و خروجی جریان تا حد امکان، به سبب یکی شدن فشار مرزهای حجم کنترل با فشار محیط است. پس از به دست آوردن پروفیل سرعت و شدت اغتشاش‌های مقطع خروجی مقدار ضریب پسا مدل تریلر (که در حقیقت مبین میزان کاهش مومنوم حجم کنترل است) با استفاده از معادله (۳) محاسبه شده است. مقدار ضریب پسا به دست آمده 0.477 است. سپس مدل خودرو در فاصله‌های مختلف و در پشت مدل تریلر قرار می‌گیرد (شکل ۲۳).



شکل (۲۳): نمای شماتیک قرارگیری مدل خودرو در دنباله تریلر و نحوه انتخاب حجم کنترل.

به ازای هر موقعیت پروفیل، سرعت و شدت اغتشاش‌های مقطع خروجی اندازه‌گیری و یک ضریب پسا برای کل حجم کنترل به دست می‌آید که این ضریب بیانگر میزان کاهش مومنوم حجم کنترل به دلیل اثرات فشاری و اصطکاکی مدل‌ها است. در حقیقت اثرات دو مدل در کاهش مومنوم حجم کنترل به دست آمده است. بنابراین برای محاسبه ضریب پسا خودرو باید اثرهای مدل خودرو در کاهش مومنوم حجم کنترل را لحاظ کرد. به همین منظور میزان ضریب پسا مدل تریلر که در قبل محاسبه شده است، از ضریب پسا کلی کم می‌شود تا اثرات مدل خودرو در کاهش مومنوم و به عبارتی میزان ضریب پسا خودرو به دست آید.

شکل ۲۴ مقدار ضریب پسا خودرو در موقعیت‌های مختلف قرارگیری آن در ویک تریلر را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که مقدار ضریب پسا با افزایش فاصله از تریلر ابتدا به

نزدیکی آن تأثیر می‌گذارد،

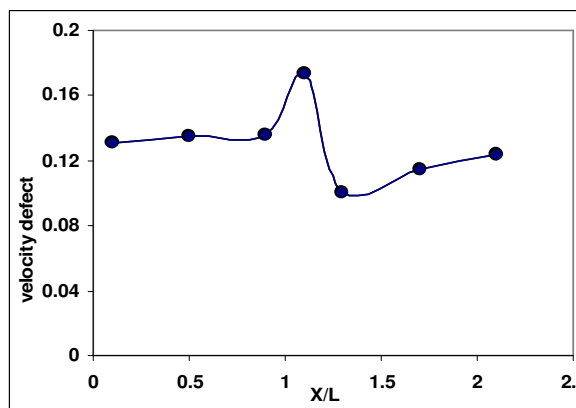
۸) با استفاده از جریان‌سنج سیسم داغ یک بعدی می‌توان ضریب پسای مدل را از فاصله $1/25$ برابر طول مدل خودرو با دقت خوبی محاسبه کرد،

۹) در فاصله بدون بعد $0/9$ تا $1/7$ ضریب پسای خودرو دارای تغییرهای زیادی است و

۱۰) با افزایش فاصله خودرو از تریلر مقدار ضریب پسا ابتدا افزایش یافته است، به یک قله بیشینه می‌رسد و سپس افت شدید داشته است، به یک کمینه می‌رسد و دوباره روند افزایشی دارد.

مراجع

1. Hu Cho, H. "Aerodynamics of Road Vehicles", 1989.
2. Barlow, J.B., Rae, W.H., and Pope, A. "Low-Speed Wind Tunnel Testing", John Wiley & Sons, 1999.
3. Ahmed, S.R., Ramm, R. and Faltn, G. "Some Salient Features of the Time Averaged Ground Vehicle Wake", SAE Technical Paper Series 840300, Detroit, 1984.
4. Gilli, P. and Chometon, F. "Modelling of Stationary Three-dimensional Separated Air Flows around an Ahmed Reference Model", The 3rd Int. Workshop on Vortex, ESAIM Proceedings, Vol. 7, No2, pp 92-99, 1999.
5. Hanaoka, Y. and Kiyohira A. "Vehicle Aerodynamic Development, Using PAMFLOW", 1995.
6. Gillieron, P. and Spohn, A., "Flow Separations Generated by a Simplified Geometry of an Automotive Vehicle", 2002.
7. Lienhart, H. and Stoochs, C. "Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model)", DGLR Fach Symp. Der AG STAB, Stuttgart UNIV., 15-17 Nov., 2000.
8. Khalighi, B., Zang, S., Koromilas, C., Balkanyi, S., Bernal, L.P., Iaccarino, G. and Moin, P. "Experimental and Computational Study of Unsteady Wake Flow Behind a Body with a Drag Reduction Device", SAE PPR. 2001-01-1042, 2001.
9. Javareshkiyan, M.H., Shayesteh Sadafiyan, R., and Azarkhish, A. "Numerical and Experimental Investigation of Aerodynamics Forces on the Base Model of Vehicle", Tabriz Univ journal, Vol. 18, No. 1, pp. 49-64, 2006 (in Persian).
10. Shayesteh R. "Numerical Investigation on Wake Shape of Base Model of a Vehicle at Different



شکل (۲۵): نمودار نقصان سرعت سطح مقطع خروجی برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری خودرو در پشت تریلر.

۶- نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین نتیجه‌های به‌دست آمده در این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱) با افزایش فاصله از خودرو منطقه شدت اغتشاشی افزایش می‌یابد،
- ۲) با افزایش فاصله دو خودرو از یکدیگر قله بیشینه شدت اغتشاشی ناشی از تداخل جت سیال و دنباله به تدریج کاهش یافته و در فاصله‌های نزدیک‌تری به خودرو عقبی از بین می‌رود،
- ۳) قله بیشینه شدت اغتشاشی جدیدی در ارتفاعی برابر سقف خودرو عقبی با افزایش فاصله دو خودرو از یکدیگر شکل می‌گیرد،
- ۴) با افزایش فاصله دو خودرو قله بیشینه شدت اغتشاشی ناشی از تداخل جت سیال و دنباله به صورت دقیق در پشت خودرو ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد،
- ۵) افزایش سرعت باعث افزایش میزان شدت اغتشاش‌ها در پشت خودرو می‌شود و این افزایش اغتشاش زمانی بیشتر است که خودرو در دنباله تریلر قرار گرفته باشد،
- ۶) نتیجه‌های این تحقیق نشان می‌دهد به‌منظور دستیابی به مقدار صحیح ضریب پسا باید موقعیت داده‌برداری را تا حد ممکن دور از مدل انتخاب کنیم،
- ۷) دنباله تشکیل شده در پشت خودرو مغشوش است و این اغتشاش‌ها بر اندازه‌گیری پارامترهای جریان و به‌ویژه در

17. Goldstein, S. "A Note on the Measurement of Total Head and Static Pressure on a Turbulent Stream", Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 155, No.32, pp. 570-575, 1936
18. LU, B. and Bragg, M.B. "Experimental Investigation of the Wake-Survey Method for a Bluff Body with Highly Turbulent Wake", AIAA-3060, 2002.
19. LU, B. and Bragg, M.B. "Experimental Investigation of Airfoil Drag Measurements with Simulated Leading-Edge Ice, Using Wake-Survey Method", AIAA3919, year 2000.
20. LU, B. and Bragg, M.B. "Airfoil Drag Measurement with Simulated Leading Edge Ice, Using Wake-Survey Method", AIAA1094, 2003.
21. Van Dam, C.P. "Recent Experience with Different Methods of Drag Prediction", Progress in Aerospace. Sci., Vol. 35, No. 8, pp. 751-798, 1999.
- Angle", M.Sc. Thesis, Mech. Eng. Dep't., Tabriz Univ., 2002 (In Persian).
11. Javareshkiyan, M.H., Zehsaz, M., and Azarkhish, A. "Experimental Optimazation of Aerodynamics Forces on the Base Model of a Vehicle", 9th Fluid Dyn. Conf., Shiraz Univ., 2005 (In Persian).
12. Watkins, S. and Vino, G. "The Effect of Vehicle Spacing on the Aerodynamics of Representative Car Shape", J. Wind Eng. and Industrial Aerodyn., Vol. 96, No. 3, pp. 1232-1239, 2008.
13. Saha, A.K., Muralidhar, K., and Biswas, G. "Experimental Study of Flow Past a Square Cylinder at High Reynolds Numbers", Exp. in Fluids, Vol. 29, No. 4, pp. 553-563, 2000.
14. Shadaram, A., Azimifrad, M., and Rostami, N. "Study of Characteristic Flow at the Near Wake of Square Cylinder", J. Mech.-Aerospace, Vol. 3, No. 4, 2007 (In Persian).
15. Morelli, A. "General Layout Characteristics and Performance of a New Wind Tunnel for Aerodynamics", SAE Paper No. 710214, Soc. of Automotive Eng., Warrendale, Pa., 1971.
16. Wplf-Heinrich, H. "Aerodynamics of Road Vehicles", 4th Ed., SAE, Soc. of Automotive Engineers Inc., Warrendale, Pa, 1998.

