نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۱، سال ۱۳۹۶، صفحات ۸۳ تا ۹۲
DOI: 10.22060/mej.2016.851

بررسی تجربی نوسانات، پارامترها و مقادیر مرتبه بالای سرعت در دنباله یک مدل خودرو

وحید برزنونی، امیر بک خوشنویس*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده: در این پژوهش به بررسی تجربی دینامیک جریان و پارامترهای مرتبه بالای سرعت نظیر صافی و چولگی در دنباله یک مدل خودرو سواری به‌طور مستقل و حالتی که در دنباله یک مدل تریلر قرار دارد، پرداخته شده است. همچنین روند تغییر طول مقیاس اختلاطی، عدد استروهال، اثرات لایه‌های اختلاطی و گردابه‌ها در ایجاد ناهمسانی‌ها، در دنباله بررسی شده است. کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه آیرودینامیک دانشگاه حکیم سبزواری انجام شده است. به منظور شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان سیال، از تونل باد مدار باز و دمشی استفاده شده است که حداکثر اغتشاشات اسمی و سرعت برای این دستگاه به ترتیب ۰/۱ ٪ و ۳۰ متر بر ثانیه می‌باشد. نتایج نشان داد مقادیر چولگی در ارتفاعات پایین و نزدیک به زمین کمتر از مقادیر آن در ارتفاعات بالاتر است که این موضوع با افزایش فاصله از انتهای خودرو روند عکس دارد. مقادیر صافی نیز با افزایش فاصله طولی از انتهای خودرو به تدریج کاهش می‌یابد. دنباله تریلر برای موقعیت‌های نزدیک قرارگیری خودرو به تریلر تاثیری در محل شکل‌گیری قله‌های بیشینه طول مقیاس اختلاطی ندارد. فرکانس در بیشینه دامنه و همچنین عدد استروهال در موقعیت قرارگیری $X/L=1$ به‌دلیل اغتشاش زیاد جریان کمترین مقدار را دارد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴ آذر ۱۳۹۳
بازنگری: ۷ بهمن ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۸ بهمن ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۵ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:
مدل خودرو
دنباله جریان
چولگی و صافی
جریان‌سنج سیم داغ
طول مقیاس اختلاطی

۱- مقدمه

اگرچه آشفتگی یکی از مسائل بسیار قدیمی در حوزه مکانیک سیالات می‌باشد، اما همچنان حل نشده باقی مانده است. این پدیده عموما در اکثر مسائل مربوط به تبدیل انرژی، مباحث مربوط به جریان سیال، سیستم‌های انتقال و ... وجود دارد. روش ممکن جهت توصیف آشفتگی به کمک قوانین عمومی مکانیک پیوسته توسط رینولدز در اواخر قرن گذشته پایه‌گذاری شد. در این روش، میدان سرعت آشفته به دو مولفه تجزیه می‌شود که یکی مربوط به حرکت متوسط و دیگری مربوط به نوسانات وابسته به زمان سرعت سیال است. بنابراین منطقی‌ترین روش جهت توصیف آشفتگی مربوط به تئوری‌هایی است که بر پایه فرضیات آماری مرتبط با معادلات دینامیک جریان سیال شکل می‌گیرند. نظریه آماری نیازمند داشتن اطلاعاتی در مورد ارزیابی تابع توزیع احتمال چگالی و توابع همبستگی متناظر است. توابع همبستگی مراتب بالا (مانند چولگی، صافی و ...) باعث بهبود جامعیت مدل آشفته خاص از نظر آماری می‌گردد. پیش‌بینی‌های تئوری برای چولگی و وابستگی آن به عدد رینولدز آشفته $Re_\lambda=\lambda u'/\nu$ که u' نوسان سرعت است، λ میکرو مقیاس تیلور و ν لزجت سینماتیکی است، در گذشته به‌طور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. جریان‌سنج سیم داغ می‌توانمی‌تواند اندازه‌گیری دقیقی از چولگی، با حلی که تاکنون با دیگر روش‌های تجربی مطابقت داده نشده است، ارائه دهد. مشتق سرعت تحت تاثیر حرکت مقیاس‌های کوچک[1] قرار می‌گیرد که تحلیل درست آن را مشکل می‌سازد. از طرفی، وضوح نمونه برداری زمانی سیگنال سرعت نیز بر روی اندازه‌گیری SSM تاثیر می‌گذارد. با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم حالت آشفتگی می‌توان به ارزیابی اثرات ناشی از فضای محدود و وضوح موقتی جریان‌سنج سیم داغ بکار گرفته شده در آزمایش‌ها پرداخت.

آشفتگی توسط اختلالات فشار و سرعت در میدان توزیع خواهد شد. خواص آماری نسبت به ناهمسانی حساس بوده و برای اندازه‌گیری ناهمسانی می‌توان از کمیت‌های آماری استفاه کرد. ناهمسانی را می‌توان مربوط به اختلاط دانست، بنابراین با افزایش اختلاط، ناهمسانی نیز افزایش یافته و برخی پارامترهای جریان مانند ممان‌های آماری سوم و چهارم نرمال (اسکیونس و کورتوسیس) نیز افزایش خواهند یافت.

مرور کاملی از روابط آماری موجود بین ممان‌های سرعت مرتبه بالا در جریان درون کانال، لایه مرزی و جت آزاد در مطالعه دارست و همکاران [۱] آمده است. وراواللی و وارهافت [۲] در سال ۱۹۸۹، آزمایش تجربی انجام داده و نشان دادند که خواص آماری نظیر اسکیونس و کورتوسیس در لایه اختلاط، از توزیع نرمال فاصله می‌گیرند. آن‌ها مشاهده کردند که مکان بیشینه اسکیونس و کورتوسیس در مرکز لایه اختلاط قرار ندارد. نتایج نشان داد که این نقطه بیشینه نزدیک به ناحیه‌ای با انرژی کمتر قرار دارد. این موضوع بیانگر این واقعیت است که اختلاط همراه با نفوذ گردابه‌های

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khosh1966@yahoo.com

1 Small Scale Motion (SSM)

ناحیه پرانرژی به سمت ناحیه کم انرژی اتفاق می‌افتد. کانگ و مناوو [۳] نتایج تجربی مشابه وراواللی و وارهافت [۲] را با رینولدز بالاتر و همچنین با استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به‌صورت عددی انجام داده و نشان دادند که تاثیر گردابه‌های بزرگ بر روی اسکیونس و کورتوسیس بیش از گردابه‌های کوچکتر می‌باشد. ماتوویچ [۴] از جریان‌سنج تک‌مولفه لیزری[1] جهت سنجش ممان‌های مرتبه بالای سرعت در جریان آزاد جت استفاده کرد.

مجموعه نتایج بدست آمده محققان را برآن داشت که آزمایش‌های مشابه در جریان‌های آزاد جت انجام دهند. برای این کار در مطالعه پتروویچ، از پراب جریان‌سنج سیم داغ X برای اندازه‌گیری ممان‌های سرعت تا ممان مرتبه شش استفاده شده و به ارزیابی مقادیر چولگی و اسکیونس پرداخته شده است [۵]. جنس و همکاران [۶] برای لایه مرزی با گرادیان فشار صفر، پارامترهای اغتشاشی سرعت را در بازه اعداد رینولدز $۲۵۳۰ < Re_\theta < ۲۷۳۰۰$ مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایش‌های خود را با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ و فیلم داغ برای اندازه‌گیری تنش برشی دیواره انجام داده و اثرات تغییر عدد رینولدز و اندازه پراب مورداستفاده را بر شدت اغتشاشات، چولگی و صافی جریان مورد بررسی قرار دادند.

در تحقیق حاضر نویسندگان به دنبال فهم بهتر از دنباله مغشوش یک مدل خودرو می‌باشند. تاکنون مطالعات تجربی و عددی بسیاری بر روی مدل‌های مختلف خودرو انجام شده است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به مقاله احمد و همکاران [۷] اشاره کرد. وی مدل ساده‌ای شبیه به یک خودرو را درنظر گرفته و با آزمایش مدل‌هایی با زاویه‌های مختلف شیشه عقب، نتایج حاصله را ثبت کرده است. برخی از محققین از جمله مطالعات [۹-۸] مدل‌هایی شبیه به مدل اخیر را به‌صورت عددی، شبیه‌سازی کرده‌اند. از آنجا که نتیجه‌های ثبت شده توسط احمد و همکاران [۷] محدود است، معیار مقایسه این کارهای عددی نیز به‌طور عموم محدود به تغییرات ضریب پسا بوده است. آزمایش‌های دقیقی بر روی این مدل در پژوهش‌های [۱۱-۱۰] انجام گرفته و نتیجه‌های تجربی مختلفی نظیر بردارهای سرعت، تنش‌های رینولدز و... اندازه‌گیری و ثبت شده است. خالیقی و همکاران [۱۲] در آزمایش‌ها، نمودارهای شدت اغتشاشی و نمودارهای سرعت را برای یک نمونه خودرو به‌دست آوردند. صدفیان و آذرخویش [۱۳] اثر چند پارامتر را در محاسبه ضریب پسا بررسی کردند. واتکینز و وینو [۱۴] نیز به بررسی تغییرات ضریب پسا و لیفت دو مدل احمد به‌صورت پشت سر هم پرداخته‌اند. از آنجا که تاکنون پارامترهای مختلف دنباله خودرو نظیر مقادیر مرتبه بالای سرعت (مانند اسکیونس و کورتوسیس)، فرکانس ریزش گردابه‌ها، عدد استروهال و طول مقیاس اختلاطی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار نگرفته است و همچنین نیاز به فهم و درک بیشتر دنباله مغشوش خودرو احساس می‌شود، لذا در این تحقیق سعی بر آن است تا با ارائه نمودارهای مختلف روند تغییرات این پارامترها را به‌طور جزئی مورد بررسی قرار دهیم. ایده انجام این کار از چندین مقاله بویژه مطالعه خوشنامی دشیری و فتحعلی [۱۵] گرفته شده است. در مطالعه آنها، با محاسبه عددی پارامترهای آماری نظیر ممان‌های سوم و چهارم و مشتق‌های مکانی آنها، تغییرات این مولفه‌ها روی دینامیک بین دو جریان مغشوش مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

اندازه‌گیری مشخصات جریان در کار حاضر با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ و در تونل باد سرعت پایین صورت گرفته است. دستگاه تونل باد مورداستفاده در این تحقیق دارای اتاقک آزمونی به طول ۱۶۸ cm و عرض و ارتفاع ۴۰cm می‌باشد. طراحی مناسب کانال باعث ایجاد شدت اغتشاشات جریان آزاد در حدود ۰/۱٪ در جهت جریان شده است که دستگاه مورد نظر از این حیث دارای دقت بالایی است. حداکثر سرعت نیز ۳۰ m/s است. جریان ورودی در این آزمایش ۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد. جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده از نوع جریان ثابت بوده که دارای یک پراب تک‌مولفه‌ای می‌باشد. دستگاه تونل باد و جریان‌سنج سیم داغ مورداستفاده در این تحقیق ساخت شرکت فراسنجش صبا می‌باشند. شکل۱ نمایی از تونل باد مورداستفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

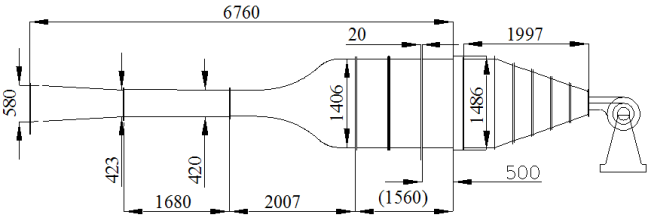

Fig. 1. a view of wind tunnel of the laboratory

شکل ۱: نمایی از تونل باد مورداستفاده

مدل‌های مورد آزمایش، مدل ساده شده پژو ۴۰۵ با ابعاد فعلی و یک مدل تریلر کلاس ۸ بدون جزئیاتی از قبیل آینه‌ها، آنتن، چرخ‌ها و سایر تجهیزات هستند. مدل‌ها به‌صورت دوبعدی ساخته شده است. توجه به ضریب اندازه بلوکه‌کردن به‌عنوان یک پارامتر مهم، اولین نکته در ساخت مدل است. مقدار پیشنهادی برای مدل بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ است تا بتوان از اثر جریان سیال روی دیواره‌های جانبی مقطع آزمایش بر سطح مدل چشم‌پوشی کرد. در این تحقیق مقدار انتخابی برای این ضریب با توجه به شرایط آزمایشگاهی و تونل باد، ۰/۰۹ است که برطبق آن مقیاس مدل‌ها ۱ به ۷۵ است. در این آزمایش‌ها ابتدا مدل خودرو به‌طور مستقل در مقابل جریان قرار گرفته و سپس مدل خودرو در فاصله‌هافاصله‌های ۰/۰۱، ۱،۲ ، ۳ و۴ برابر طول تریلر و در پشت آن قرار گرفته و در هر مورد داده‌برداری‌ها در فاصله‌های ۰/۰۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵و ۱/۵ برابر طول خودرو و در پشت آن صورت گرفته است (شکل ۲).

تغییرات فشار استاتیک در محفظه آزمایش با توجه به طراحی دیفیوزر ثابت است.

1 Laser - Doppler

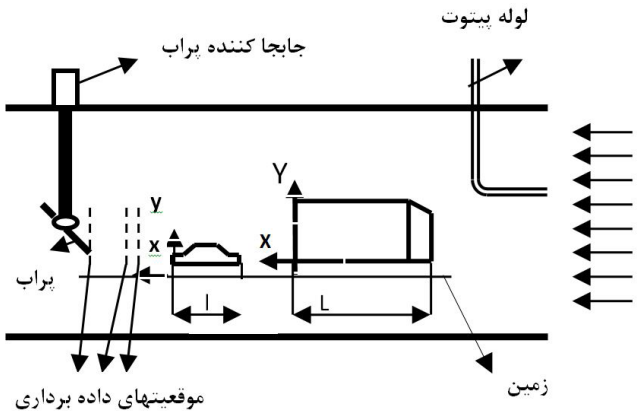

Fig. 2. Schematic view of the models inside of the tunnel and data collection mechanisms

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 پژوهشگران 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 برابر با ۱و در رینولدز ۸۶۰۰ در دو مقطع مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است.

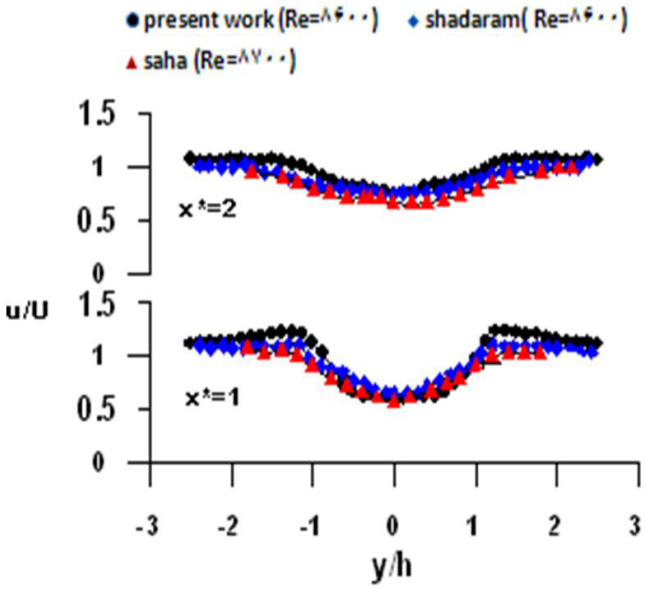

Fig. 3. average velocity for cubic cylinder in 2 different sections (or 2 different times)

شکل ۳: پروفیل سرعت متوسط برای استوانه مربعی در دو مقطع مختلف ($x^*=x/b$ نسبت فاصله طولی از انتهای مدل به پهنای مدل)

همانطور که مشاهده می‌شود، تطبیق‌های به‌نسبت خوبی بین نتیجه‌های حاضر با نتیجه‌های ساها و همکاران [۱۶] و همچنین شادآرام و همکاران [۱۷] که به‌صورت تقریبی، عدد رینولدز یکسانی دارند، مشاهده می‌شود. لازم به یادآوری است این مطلب فقط جهت اعتبار بخشیدن به نتیجه‌های حاضر آورده شده است.

٤- بحث و بررسی نتایج

از آنجایی که ناهمسانی در ممان‌های مرتبه بالا، بهتر مشخص می‌شود. بنابراین برای رصد کردن ناهمسانی میدان از ممان‌های نرمال سوم و چهارم موسوم به اسکیونس (ضریب چولگی) و کورتوسیس (ضریب صافی) استفاده می‌شود. اسکیونس و کورتوسیس پارامترهای آماری هستند که در بررسی کیفی جریان سیال از آنها استفاده می‌شود.

آشفتگی ایزوتروپیک و همگن[1] با یک چولگی منفی در مشتق سرعت ($\partial u_i/\partial x_i$) مشخص می‌شود که u_i مولفه نوسانی سرعت در امتداد x_i است. در آشفتگی ایزوتروپیک و همگن، چولگی، بیانگر میزان تولید گردابی به‌واسطه انبساط گردابه بوده و مقادیر صفر آن از غیر خطی بودن معادله ناویر- استوکس ناشی می‌شود.

مولفه اغتشاش سرعت u که در جهت ناهمگن میدان می‌باشد، وظیفه انتقال انرژی جنبشی در عبور از لایه اختلاط را دارد و همین مولفه در طول فرایند اختلاط، یک ناهمسانی در لایه اختلاط به وجود می‌آورد. مقدار ممان‌های نرمال که با زمان تغییر می‌کنند، میزان ناهمسانی را نشان می‌دهند. توزیع اسکیونس ابزار اصلی در تشخیص میزان تناوب و ناهمسانی است. اسکیونس در حقیقت معیاری از وجود یا عدم تقارن تابع توزیع است. برای یک توزیع کاملا متقارن اسکیونس صفر و برای یک توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر بالاتر اسکیونس مثبت و برای توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر کوچکتر مقدار اسکیونس منفی است که در اینجا بیان کننده مقدار تقارن سرعت لحظه‌ای نسبت به سرعت متوسط جریان سیال است. زمانی که اسکیونس غیر صفر است، داده‌ها نسبت به مقدار متوسط تقارن نداشته و نمی‌توان آنها را به‌وسیله یک توزیع نرمال مدل کرد، نوسانات مولفه افقی سرعت و شدت نوسانات کوچک است. اسیلوگرام[2] در اصل، سرعت لحظه‌ای را نشان می‌دهد که اکثر داده‌ها در آن ناحیه از سرعت متوسط بیشتر هستند. اما پرش‌های منفی وجود دارند که سبب کاهش سرعت متوسط می‌شوند. میزان پرش سرعت لحظه‌ای با محاسبه میزان اسکیونس مشخص می‌شود.

کورتوسیس (صافی) همان ممان مرکزی چهارم[3] است. به میزان کشیدگی یا پخی منحنی توزیع چگالی احتمال نسبت به منحنی توزیع چگالی گوس[4] کورتوسیس گفته می‌شود. در واقع میزان پیک ناگهانی نمودار توزیع احتمال نسبت به توزیع نرمال، توسط میزان صافی بیان می‌شود. در این صورت صافی مثبت یا منفی به ترتیب بیانگر منحنی چگال کشیده‌تر یا پخ‌تر نسبت به توزیع چگالی گوس می‌باشند (شکل۴). در حالتی که میزان صافی

1 Homogeneous Isotropic Turbulence (HIT)
2 Oscillogram
3 Forth Central Moment
4 Gaussian Density Function

مثبت باشد (لپتوکورتیک)، دنباله‌های توزیع داده‌ها طولانی بوده و تغییرات دامنه داده‌ها نسبت به زمان بیشتر است. بنابراین سرعت لحظه‌ای در بسیاری از مواقع از سرعت متوسط فاصله گرفته و پرش و اغتشاشات سرعت لحظه‌ای جریان زیاد می‌شود. در حالتی که میزان صافی منفی باشد (پلاتی‌کورتیک) سرعت لحظه‌ای کمتر از سرعت متوسط است ولی دنباله‌های توزیع چگالی حجیم‌تر می‌باشند. برای منحنی توزیع چگالی گوس مقدار کورتوسیس ۳ است. چنانچه مقادیر کورتوسیس کمتر از ۳ باشد منحنی چگال‌تر و در غیر اینصورت منحنی تیزتر می‌باشد. این پارامترها مطابق روابط زیر تعریف می‌گردند:

$$S_u = 1/N\sum_{1}^{N}\frac{(u(n)-\overline{U})^3}{\sigma_u^{\,3}} \qquad (۱)$$

$$K_u = 1/N\sum_{1}^{N}\frac{(u(n)-\overline{U})^4}{\sigma_u^{\,4}} \qquad (۲)$$

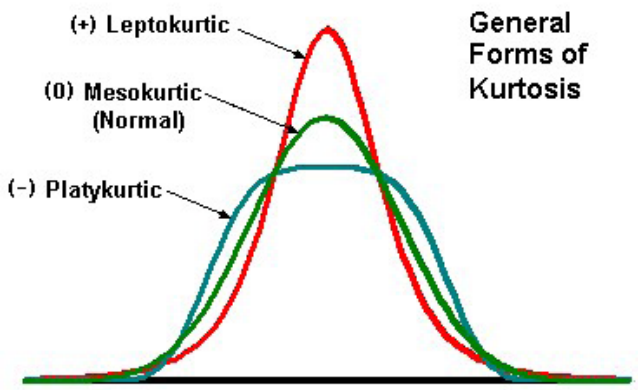

Fig. 4. The two states of flatness and stretchiness relative to the normal state

شکل ٤: دو حالت پخ و کشیده نسبت به حالت نرمال

شکل ۵ نمودار تغییرات اسکیونس و کورتوسیس دنباله مدل خودرو به‌طور مستقل را نشان می‌دهد. جریان خروجی از زیر مدل به‌دلیل وجود اثرات لایه مرزی زمین و بر همکنش آن سبب ایجاد ناهمسانی شده و چولگی مقادیر مخالف صفر دارد. در موقعیت x/l برابر با ۰/۰۱، با فاصله گرفتن از سطح (زمین) به تدریج اثرات لایه اختلاط کمتر شده و مقدار چولگی به صفر نزدیک شده و تابع توزیع چگالی احتمال مقادیر سرعت لحظه‌ای به تابع توزیع گوسی نزدیک می‌شود. کورتوسیس نیز در ابتدا مقدار ۳ دارد که به تدریج با افزایش اغتشاشات جریان رشد می‌کند. با افزایش بیشتر فاصله از زمین، اولین پیک در نمودار چولگی و کورتوسیس مشاهده می‌شود. منفی بودن چولگی در این موقعیت بیانگر کمتر بودن چگالی داده‌ها از مقادیر متوسط سرعت بوده و همچنین دلیلی بر وجود جهش‌های ناگهانی و مثبت سرعت لحظه‌ای می‌باشد رشد مقادیر کورتوسیس نیز موید این مطلب است. با افزایش بیشتر فاصله از زمین روند بیان شده کاملا معکوس شده، به عبارتی غالب داده‌های سرعت لحظه‌ای بیشتر از مقدار متوسط شده و جهش‌های منفی سرعت وجود دارد. افزایش چولگی در این ناحیه

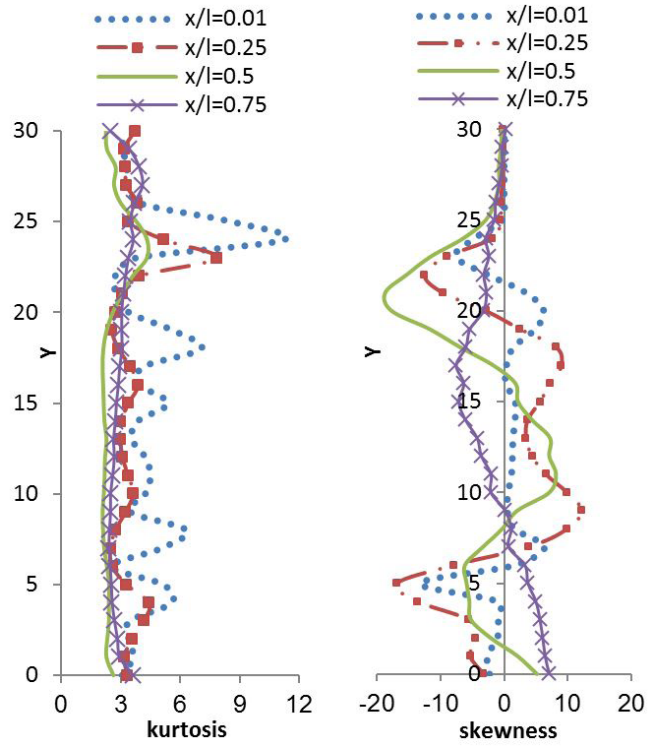

Fig. 5. The trend of changes in skewness (right) and kurtosis(left) in the wake of a single model

شکل ٥: نمودار تغییرات اسکیونس(راست) و کورتوسیس(چپ) در دنباله خودرو مجزا

سبب افزایش تناوب و ناهمسانی و به تبع آن سبب افزایش اختلاط می‌شود. پیک‌های موجود در نمودار کورتوسیس نیز نشانگر افزایش شدید در نوسانات و پرش‌های مثبت و منفی سرعت لحظه‌ای جریان است. از آنجایی که ناحیه بین بیشینه و کمینه مقدار چولگی ناحیه‌ای است که بیشترین نرخ انتقال مومنتوم آشفتگی وجود دارد، در واقع همان لایه اختلاطی جریان است. با افزایش بیشتر فاصله از زمین، وارد ناحیه دنباله شده که در این قسمت جریان کاملا همسان بوده و چولگی نزدیک صفر است و اثرات لایه اختلاطی وجود ندارد. این روند تا نزدیک شدن به سطح فوقانی مدل وجود دارد. با نزدیک شدن به سطح فوقانی مجددا اثرات ناهمسانی جریان به‌دلیل وجود اثرات لایه اختلاطی ظاهر می‌شود. لذا چولگی نیز افزایش یافته و جهش‌های شدید در سرعت لحظه‌ای زیاد می‌شود که متاثر از گردابه‌های صادر شده از قسمت فوقانی سقف خودرو می‌باشد. در ادامه با عبور از لایه اختلاطی چولگی یک کمینه مقدار را نشان می‌دهد و پس از آن به تدریج با دور شدن از دنباله و لایه اختلاطی جریان همسان شده و چولگی به صفر نزدیک می‌شود. با افزایش فاصله طولی از مدل به میزان ناهمسانی‌ها در دنباله افزوده شده و مقادیر چولگی مخالف صفر می‌شود. البته از میزان جهش‌های شدید سرعت لحظه‌ای کاسته شده است که این مساله را می‌توان ناشی از کمتر شدن قدرت گردابه‌ها و به دنبال آن تاثیر گردابه در ایجاد جهش‌های ناگهانی در سرعت لحظه‌ای دانست. در موقعیت x/l برابر با ۰/۲۵، سرعت لحظه‌ای جریان، انحراف بیشتری از مقدار متوسط داشته و جهش‌های ناگهانی مثبت

و منفی سرعت نیز بیشتر می‌باشد. با توجه به شکل واضح است که مقادیر اکسترموم چولگی افزایش یافته، همچنین قله‌های بیشینه یا به عبارتی لایه‌های اختلاطی به یکدیگر نزدیک می‌شوند. می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که عرض دنباله در حال کاهش یافتن است. با افزایش بیشتر فاصله طولی و در موقعیت x/l برابر با ۰/۵، همانطور که قله‌های بیشینه چولگی نشان می‌دهند، ناهمسانی‌ها به مرکز دنباله رسیده و لایه‌های اختلاطی فوقانی و تحتانی به یکدیگر می‌رسند و در واقع عرض دنباله کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است نقش گردابه‌های صادر شده از قسمت‌های فوقانی و تحتانی در ایجاد ناهمسانی‌ها و شکل‌گیری نقاط بیشینه چولگی قابل توجه است. با توجه به این نکته که بیشترین نرخ انتقال مومنتوم آشفتگی در حد فاصل بیشینه و کمینه مقدار چولگی رخ می‌دهد، در شکل ۵ واضح است که با دور شدن از مدل در راستای طولی این ناحیه گسترده‌تر می‌شود. البته لازم به ذکر است که ضخامت لایه اختلاطی یکی از پارامترهایی است که بیانگر میزان اختلاط است و کاهش ضخامت لایه اختلاطی به معنی شدت اختلاط است. لذا با دور شدن از مدل همانطور که مشاهده می‌شود ضخامت لایه اختلاطی افزایش یافته و لذا شدت اختلاط کاهش می‌یابد. با دور شدن از مدل قله‌های بیشینه و کمینه چولگی از بین رفته و ناهمسانی در کل ناحیه دنباله وجود دارد با این تفاوت که در قسمت‌های تحتانی مقادیر سرعت لحظه‌ای غالبا بیشتر از مقدار متوسط بوده و جهش‌های منفی سرعت وجود دارد اما در قسمت‌های فوقانی سرعت لحظه‌ای غالبا کمتر از مقدار متوسط بوده و جهش‌های مثبت سرعت وجود دارد. که این مساله احتمالا ناشی از اندازه گردابه‌های فوقانی و تحتانی می‌باشد. با افزایش فاصله از انتهای خودرو جهش‌های شدید سرعت لحظه‌ای کمتر شده و کورتوسیس در محدوده ۳ باقی می‌ماند. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نمودار تغییرات اسکیونس و کورتوسیس دنباله مدل خودرو واقع در دنباله تریلر را نشان می‌دهد. در موقعیت قرارگیری x/l برابر با ۰/۰۱ ناهمسانی در مقادیر سرعت لحظه‌ای جریان در قسمت تحتانی و جریان خروجی از زیر خودرو بسیار زیاد است. نمودار چولگی دارای یک قله کمینه است. با افزایش بیشتر ارتفاع از زمین مقادیر چولگی مثبت شده و به بیشینه مقدار خود می رسد.

در این موقعیت با افزایش فاصله از انتهای مدل خودرو مقادیر ناهمسانی و قله‌های بیشینه چولگی افزایش می‌یابد و البته این قله‌ها به قسمت‌های بالاتر منتقل می‌شوند. اثرات لایه اختلاطی و ناهمسانی در دنباله با افزایش فاصله از انتهای مدل در موقعیت‌های نزدیکتر به زمین افزایش منفی و در قسمت‌های بالاتر دنباله افزایش مثبت می‌یابد. نکته حائز اهمیت افزایش تدریجی میزان ناهمسانی‌ها در دنباله با افزایش ارتفاع است. در قسمت بالای مدل خودرو همچنان اثرات لایه اختلاطی و ناهمسانی قابل رویت هستند که ناشی از لایه برشی قسمت فوقانی مدل تریلر می‌باشند. میزان ناهمسانی جریان در قسمت بالای مدل خودرو نسبت به سایر موقعیت‌های قرارگیری خودرو در دنباله تریلر بسیار زیاد است.

با افزایش فاصله خودرو از مدل تریلر در موقعیت X/L برابر با ۱، میزان

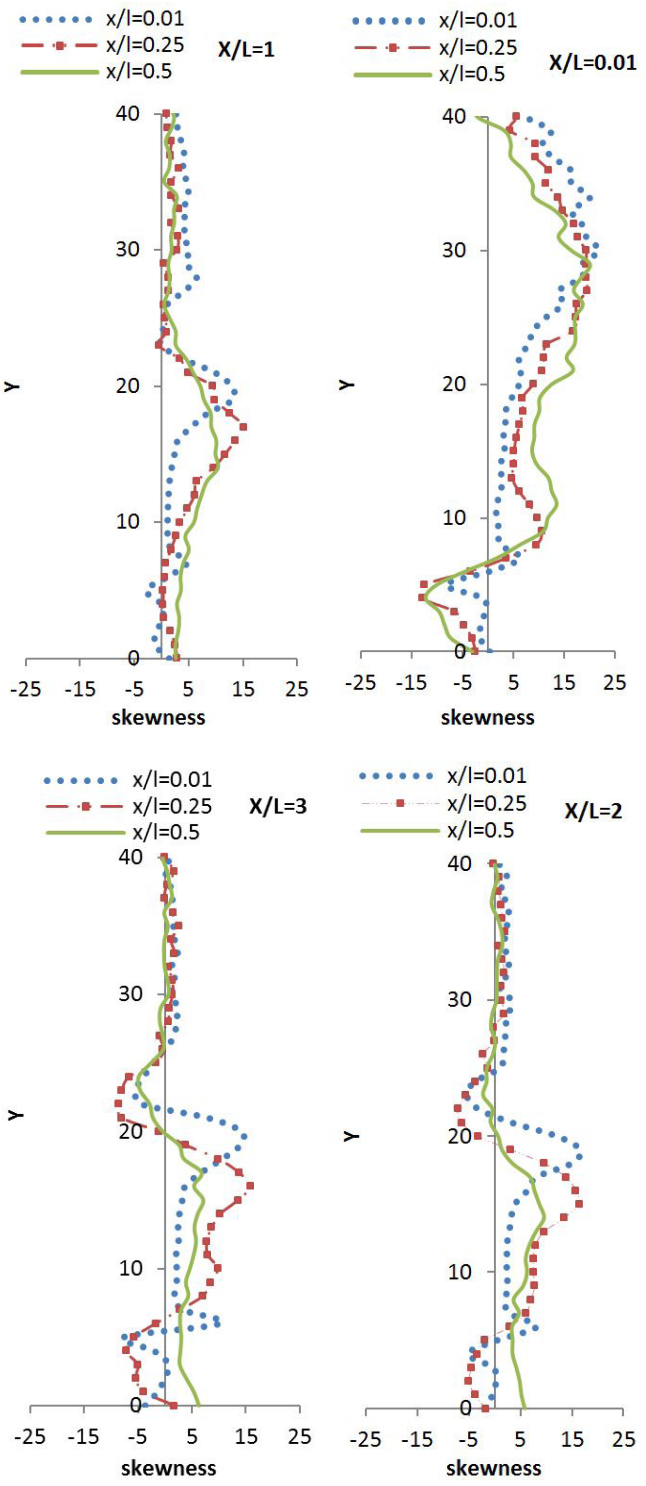

Fig. 6. The trend of skewness changes in different positions of the car in the wake of trailer

شکل ٦: روند تغییرات اسکیونس برای موقعیت های مختلف قرارگیری خودرو در دنباله تریلر

ناهمسانی در قسمت‌های تحتانی بسیار کمتر شده، چولگی در موقعیت ابتدایی ناچیز در سایر موقعیت‌ها مثبت است. مقادیر سرعت لحظه‌ای غالبا در موقعیت‌های نزدیک به زمین در محدوده سرعت متوسط بوده و نوسانات و تناوب در این ناحیه ناچیز است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله

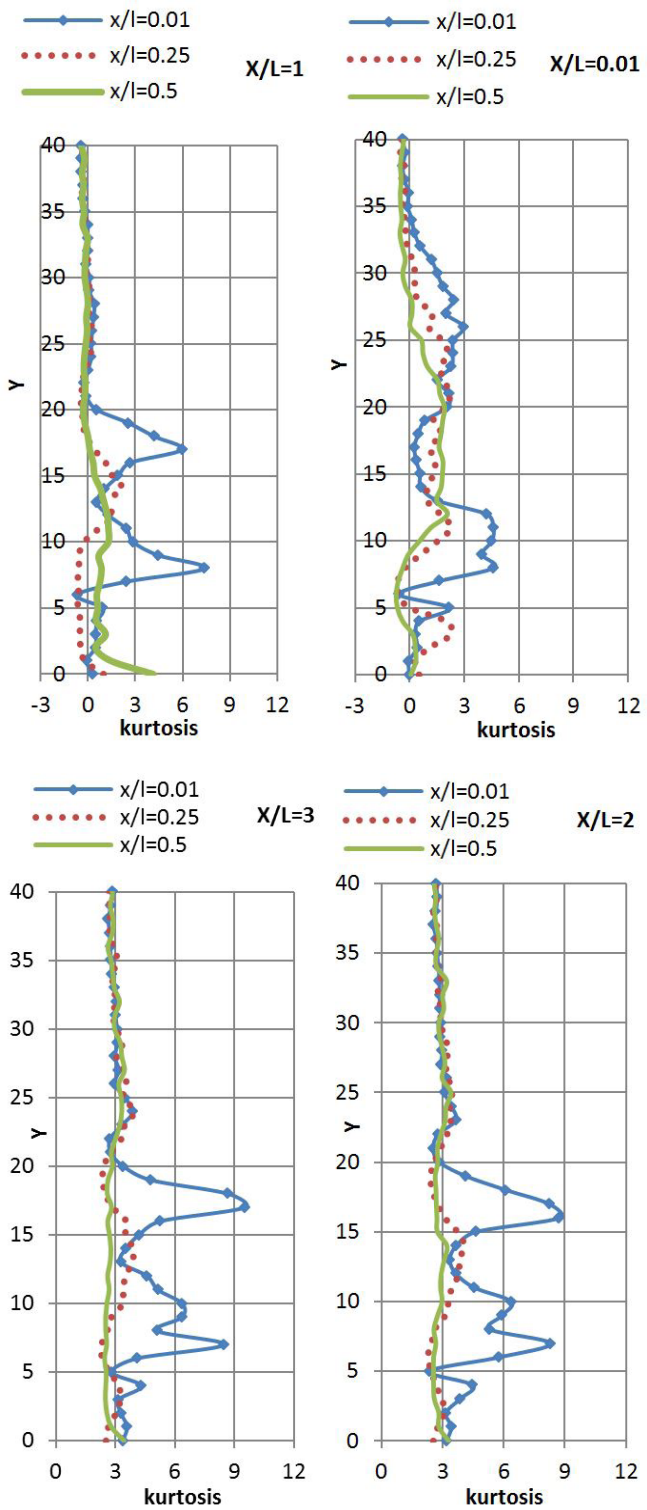

Fig. 7. The trend of kurtosis changes in different positions of the car in the wake of trailer

شکل ۷: روند تغییرات کورتوسیس برای موقعیت های مختلف قرارگیری خودرو در دنباله تریلر

خودرو از مدل تریلر و در این موقعیت لایه اختلاطی و جریان خروجی از زیر مدل تریلر به قسمت‌های فوقانی هدایت شده و پس از برخورد با مدل خودرو از قسمت فوقانی مدل عبور کرده و باعث ایجاد ناهمسانی شدید در قسمت فوقانی دنباله مدل خودرو شده است. همانطور که از نمودار دیده می‌شود در این موقعیت قله‌های بیشینه چولگی در ارتفاعی معادل ارتفاع سقف مدل خودرو شکل گرفته‌اند. البته با افزایش فاصله از انتهای خودرو این قله‌های بیشینه چولگی کمی به سمت پایین‌تر متمایل می‌شوند. نکته دیگری که قابل توجه است مقادیر کم چولگی در حد فاصل سقف خودرو تا سقف مدل تریلر برای موقعیت‌های X/L برابر با ۱ و بیشتر از آن است. ناهمسانی ناشی از دنباله تریلر در قسمت‌های فوقانی ظاهر می‌شود که احتمالا به‌دلیل رخداد جدایش روی سقف مدل تریلر و حرکت گردابه‌های ایجاد شده به قسمت‌های فوقانی می‌باشد. با افزایش بیشتر فاصله خودرو از تریلر و در موقعیت‌های X/L برابر با ۲ و ۳، مجددا در قسمت‌های تحتانی دنباله شاهد ناهمسانی‌هایی هستیم. جریان عبوری از قسمت تحتانی مدل و لایه اختلاطی ایجاد شده سبب فاصله گرفتن چولگی از مقدار صفر می‌شود. از موقعیت X/L برابر با ۲، به بعد مجددا لایه‌های اختلاطی دنباله در قسمت‌های تحتانی شکل می‌گیرد. ظاهر شدن مجدد قله‌های بیشینه و کمینه چولگی موید این مطلب می‌باشند.

در موقعیت X/L برابر با ۳، اثرات دنباله تریلر در ایجاد ناهمسانی در دنباله مدل خودرو تقریبا ناچیز است و پروفیل‌های چولگی مستقل از اثرات دنباله تریلر می‌باشند. نمودار صافی نیز در این موقعیت ابتدا ناچیز است اما به تدریج و با افزایش ارتفاع قله‌های بیشینه و کمینه آشکار می‌شوند. به تدریج با افزایش ارتفاع جهش‌های منفی و مثبت سرعت لحظه‌ای زیاد می‌شود. در نقاطی که مقادیر صافی کمتر از ۳ است غالب سرعت‌های لحظه‌ای کمتر از سرعت متوسط می‌باشد. همانگونه که در نمودار چولگی دیده شد، در اولین موقعیت قرارگیری خودرو در دنباله تریلر، اثرات ناهمسانی در قسمت‌های فوقانی سقف خودرو وجود دارد که ناشی از لایه برشی جدا شده از سقف تریلر و ورود گردابه‌ها به این ناحیه می‌باشد. در سرتاسر این ناحیه مقادیر صافی مثبت (بیشتر از ۳) است و بیانگر ناهمسانی و افت و خیزهای شدید در سرعت لحظه‌ای در این ناحیه می‌باشد که با فاصله گرفتن خودرو از تریلر این اثرات کم می‌شود. با توجه به بالا بودن پاسخ فرکانسی دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ نسبت به سیستم‌های سرعت‌سنج دیگر، مناسب است تا از این امکان استفاده کرده و با پردازش نتایج خام بدست آمده، نمودارهای با مفهومی را از آنالیز طیفی دنباله جریان نشان دهیم. از آنجاییکه دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ، اطلاعات هر نقطه را به‌صورت هزاران داده ذخیره می‌کند، ارائه اطلاعات از تمامی نقاط به‌صورت نقطه به نقطه امکان پذیر نمی‌باشد. با این وجود آنالیز طیفی مولفه‌های سرعت در جهت x و y و در نقاط منتخبی از دنباله جریان، دینامیک دنباله را تا حدودی آشکار می‌سازد.

عدد استروهال، از اعداد بی‌بعد است که فرکانس نوسانات گردابه‌های کارمن تشکیل شده پشت مدل را به‌صورت بی‌بعد بیان می‌کند. عدد استروهال به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$St = f\frac{h}{U} \qquad (۳)$$

که f، فرکانس گردابه پشت مدل، h، ارتفاع مدل و U سرعت جریان آزاد سیال می‌باشد. فرکانس گردابه‌های تشکیل شده پشت مدل را می‌توان

بوسیله سنسور جریان‌سنج سیم داغ در تونل باد بدست آورد.

سنسور سیم داغ میزان نوسانات جریان سیال در تونل باد را به‌صورت نوسان در زمان یا بعبارتی در حوزه زمان دریافت می‌کند و با استفاده از تبدیل سری فوریه، آن را به حوزه فرکانس برده، در نمایشگر به‌صورت دامنه نوسان برحسب فرکانس نوسان نشان می‌دهد. در تونل باد مورد آزمایش، فرکانس داده‌برداری ۵ کیلوهرتز انتخاب شده است (شکل ۸).

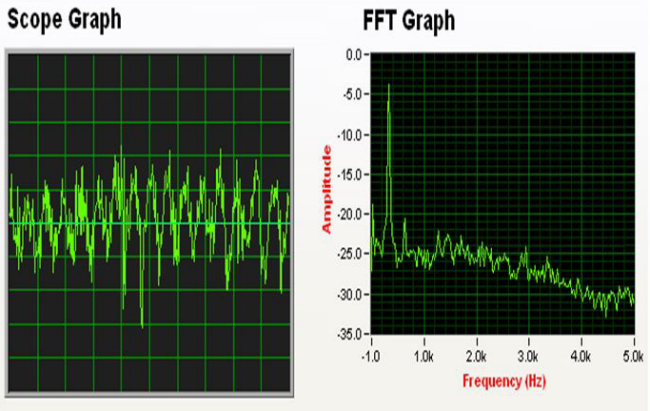

Fig. 8. Current fluctuations in the time domain(left) and right in the frequency domain

شکل ۸: سمت چپ نوسانات جریان در حوزه زمان و سمت راست در حوزه فرکانس

در حوزه فرکانس، می‌توانیم دامنه تمامی نوسانات (با فرکانس‌های مختلف) جریان که توسط سنسور اندازه‌گیری می‌شود را مشاهده کنیم. از بین تمامی نوسانات جریان پشت مدل، مسلم است که نوسانات گردابه‌های کارمن دارای بیشترین دامنه هستند. بنابراین فرکانس مربوط به بیشترین دامنه، در واقع همان مقدار فرکانس گردابه کارمن است (شکل ۹).

با توجه به شکل ۹ می‌توان گفت، در دنباله مغشوش شده، در تمام موقعیت‌های قرارگیری خودرو در دنباله تریلر، بیشینه فرکانس در نقاط تحتانی و فوقانی مدل رخ می‌دهد. یعنی در موقعیتی که جریان از قسمت فوقانی و تحتانی جدا شده و گردابه‌ها شکل می‌گیرند. همچنین می‌توان گفت با قرارگیری خودرو در دنباله فرکانس تشکیل گردابه‌ها کاهش یافته است. ایجاد اغتشاش در مجموع سبب کاهش فرکانس در بیشینه دامنه و بالتبع آن، کاهش عدد استروهال می‌گردد. با افزایش فاصله خودرو از تریلر مقادیر فرکانس ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. مقادیر عدد استروهال به ازای تغییر موقعیت قرارگیری خودرو (که با استفاده از رابطه ۳ بدست آمده است) در جدول ۱ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۹ و جدول ۱ واضح است که فرکانس در بیشینه دامنه و همچنین عدد استروهال در موقعیت قرارگیری X/L برابر با ۱، کمترین مقدار را دارد که می‌توان دلیل آن را اغتشاش زیاد جریان در این حالت دانست.

یک روش پیشنهاد شده برای بدست آوردن اندازه تنش برشی رینولدزی مرتبط نمودن اندازه این تنش آشفته به میدان سرعت متوسط می‌باشد. این روش در توصیف جریانات آشفته آزاد نظیر دنباله و جت موفق عمل نموده

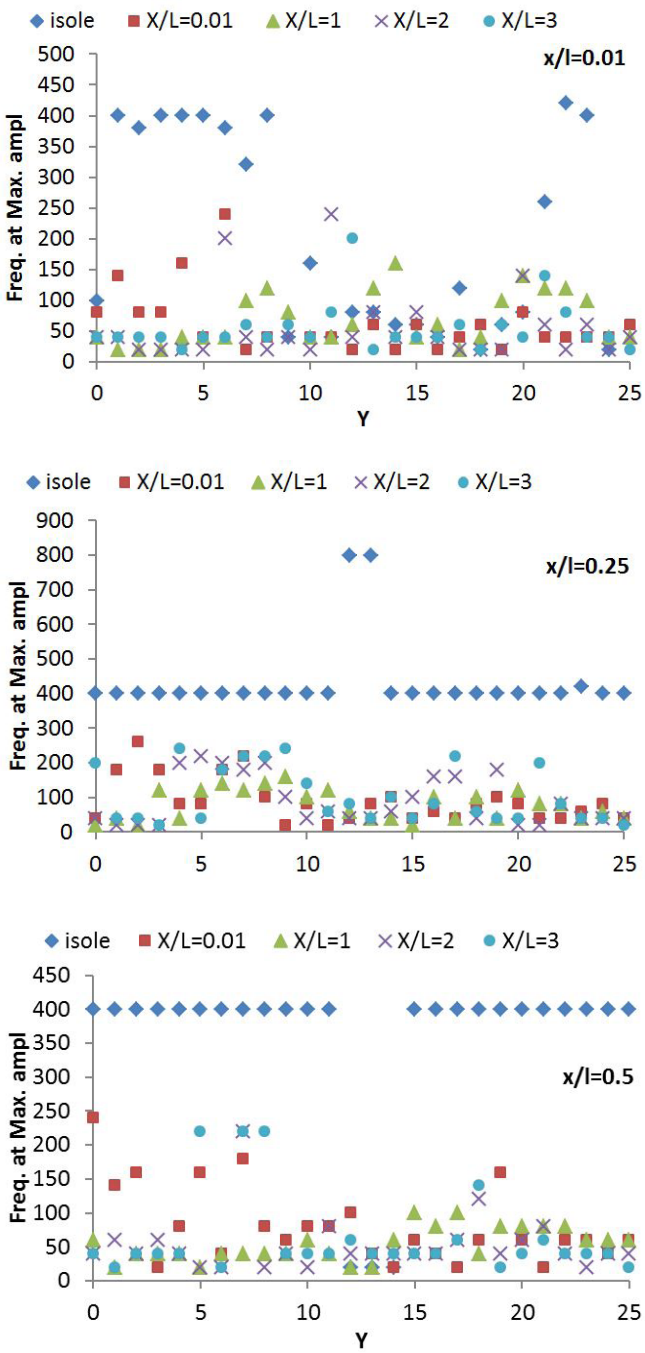

Fig. 9. Compare the frequency of maximum amplitude in different positions in the wake of trailers

شکل ۹: مقایسه فرکانس جریان در بیشینه دامنه برای موقعیت‌های مختلف قرار گیری خودرو در دنباله تریلر

است. که موفقیت این روش محدود به مسائل دوبعدی می‌باشد [۱۸].

پرانتل نشان داد که:

$$l_m^{\,2} \times \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 = -\overline{u'v'} \qquad (۴)$$

که در این رابطه l_m طول مقیاس اختلاطی و معیاری از اندازه ادی‌ها می‌باشد [۱۸]. از طرفی طبق تحلیل گلداستین [۱۹]، $u'=v'$ با قرارگیری در رابطه فوق می‌توان طول مقیاس اختلاطی را محاسبه کرد.

جدول ۱: مقادیر عدد استروهال برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری خودرو در دنباله تریلر

Table 1. The Strouhal number value for different positions of the car in the wake of trailer

	X/L	*f*	*St*
	Isolated	۴۲۰	۰/۲۸۵
	۰/۰۱	۲۴۰	۰/۱۶۳
x/l=۰/۰۱	۱	۱۶۰	۰/۱۰۸
	۲	۲۴۰	۰/۱۶۳
	۳	۲۰۰	۰/۱۳۶
	Isolated	۸۰۰	۰/۵۴۴
	۰/۰۱	۲۶۰	۰/۱۷۶
x/l=۰/۲۵	۱	۱۶۰	۰/۱۰۸
	۲	۲۲۰	۰/۱۴۹
	۳	۲۴۰	۰/۱۶۳
	Isolated	۴۰۰	۰/۲۷۲
	۰/۰۱	۲۴۰	۰/۱۶۳
x/l=۰/۵	۱	۱۰۰	۰/۰۶۸
	۲	۲۲۰	۰/۱۴۹
	۳	۲۲۰	۰/۱۴۹

شکل ۱۰ مقادیر مختلف طول مقیاس اختلاطی را برای فواصل مختلف در پشت خودرو و در موقعیت‌های مختلف قرارگیری خودرو در دنباله تریلر نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بزرگترین طول مقیاس اختلاطی در دنباله برای موقعیت‌های قرارگیری ایزوله، *X/L*=۰/۰۱ و *X/L*=۱ در موقعیت *x/l*=۰/۷۵ در پشت خودرو شکل می‌گیرد. در دو حالت ایزوله و *X/L*=۱ بیشینه طول مقیاس اختلاطی بسیار به هم نزدیکند. با افزایش بیشتر فاصله خودرو از تریلر شاهد شکل‌گیری دو قله بیشینه طول مقیاس اختلاطی در دو موقعیت *x/l*=۰/۲۵ و *x/l*=۱/۲۵ برای موقعیت قرارگیری *X/L*=۲ هستیم. با افزایش بیشتر فاصله خودرو از تریلر اندازه طول مقیاس اختلاطی کوچکتر شده و به هم نزدیکتر می‌شوند. نکته قابل توجه اینکه دقیقا در موقعیتی که برای سه حالت اولیه قرارگیری خودرو شاهد قله بیشینه طول مقیاس اختلاطی هستیم، برای دو موقعیت بعدی قله‌های کمینه طول مقیاس اختلاطی را داریم. با افزایش بیشتر خودرو از تریلر مجددا یک قله بیشینه طول مقیاس اختلاطی و در فاصله دورتری نسبت به سه حالت اولیه شکل می‌گیرد. دیده شد که دنباله تریلر برای دو موقعیت *X/L*=۰/۰۱ و *X/L*=۱ تاثیری در محل شکل‌گیری قله‌های بیشینه طول مقیاس اختلاطی ندارد.

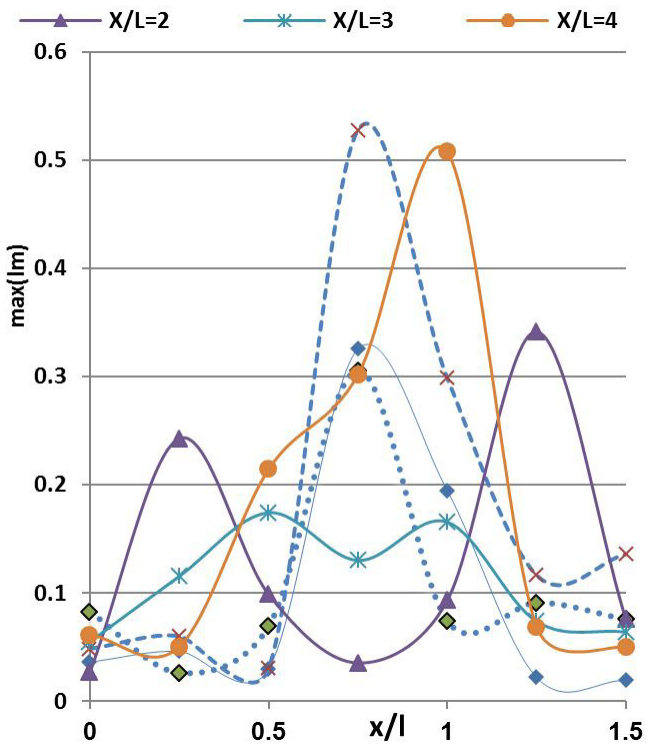

Fig. 10. The process of changes in the mixed scale length for different positions of the car in the wake trailer

شکل ۱۰: روند تغییرات طول مقیاس اختلاطی برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری خودرو در دنباله تریلر

۵- تحلیل خطا

تاثیر خطایی که هر پارامتر روی سرعت می‌گذارد از رابطه زیر بدست می‌آید که با عنوان عدم قطعیت استاندارد نسبی بیان می‌شود[۲۰].

$$Error(\%)=\frac{1}{k}.\frac{1}{u}.\Delta y_i \qquad (۵)$$

که در آن، k ضریب همگرایی و $\frac{1}{u}.\Delta y_i$ انحراف معیار می‌باشد. در نهایت مجموع خطاهای ناشی از پارامترهای مختلف روی سرعت لحظه‌ای از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۰].

$$Error(\%)=2\sqrt{\Sigma(\frac{1}{k}.\frac{1}{u}.\Delta y_i)^2} \qquad (۶)$$

خطاهای بوجود آمده در آزمایشات صورت گرفته شامل موارد زیر است: حداکثر ۱ درصد خطا ناشی از کالیبراسیون با لوله پیتوت و مانومتر، حداکثر ۱ درصد خطا ناشی از برازش منحنی ولتاژ بر حسب سرعت، حداکثر ۰/۱۲ درصد خطا ناشی از عدم قطعیت مربوط به تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال، خطای ناشی از قرار گرفتن موقعیت پراب که قابل صرفنظر است، خطای ناشی از تغییرات دما که شامل دو قسمت می‌باشد: الف) تغییرات دما در حین کالیبراسیون که حداکثر یک درجه می‌باشد، مقدار خطای ایجاد شده ۰/۰۰۳ درصد می‌باشد، ب) تغییرات دما در حین آزمایش که حداکثر دو درجه بوده و مقدار خطای ایجاد شده ۰/۰۴ درصد می‌باشد. خطای ناشی از تغییرات رطوبت و فشار محیط که ناچیز است [۲۰]. با در نظر گرفتن تمام عوامل

فوق میزان خطای کل اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای در حین آزمایش ۴/۰۳ درصد می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به ارزیابی پارامترهای آماری موجود بین مقادیر مرتبه بالای سرعت یعنی ضرایب چولگی و صافی در دنباله یک مدل خودرو پرداخته شده است. از جمله نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

۱. تغییرات زیاد در ممان‌های مرتبه بالا در نزدیکی مقادیر گوسی، از نظر آماری، باعث پیچیده‌تر شدن آرایش جریان دنباله در مقایسه با جریان جت آزاد و جریان‌های محدود می‌گردد.

۲. قله‌های بیشینه تحتانی و فوقانی اسکیونس حاکی از وجود اختلاط بیشتر است.

۳. دنباله تریلر برای موقعیت‌های نزدیک قرارگیری خودرو به تریلر تاثیری در محل شکل‌گیری قله‌های بیشینه طول مقیاس اختلاطی ندارد.

۴. با افزایش فاصله طولی از مدل به میزان ناهمسانی‌ها در دنباله افزوده شده و مقادیر چولگی مخالف صفر می‌شود.

۵. در موقعیت x/l=۰/۵ همانطور که قله‌های بیشینه چولگی نشان می‌دهند، ناهمسانی‌ها به مرکز دنباله رسیده و لایه‌های اختلاطی فوقانی و تحتانی به یکدیگر می‌رسند.

۶. با دور شدن از مدل، ضخامت لایه اختلاطی افزایش یافته و لذا شدت اختلاط کاهش می‌یابد.

۷. در موقعیت x/l=۱ لایه اختلاطی و جریان خروجی از زیر مدل تریلر به قسمت‌های فوقانی هدایت شده و پس از برخورد با مدل خودرو از قسمت فوقانی مدل عبور کرده و باعث ایجاد ناهمسانی شدید در قسمت فوقانی دنباله مدل خودرو شده است.

۸. با قرارگیری خودرو در دنباله فرکانس تشکیل گردابه‌ها کاهش یافته است. ایجاد اغتشاش در مجموع سبب کاهش فرکانس در بیشینه دامنه و بالتبع آن، کاهش عدد استروهال گردیده است.

۹. فرکانس در بیشینه دامنه و همچنین عدد استروهال در موقعیت قرارگیری x/l=۱ کمترین مقدار را دارد که می‌توان دلیل آن را اغتشاش زیاد جریان در این حالت دانست.

فهرست علائم

b	پهنای مدل
h	ارتفاع مدل
$p(x)$	تابع توزیع چگالی احتمال
l_m	طول مقیاس اختلاطی
l	طول خودرو
L	طول تریلر
P_t	فشار کلی
P_s	فشار استاتیک
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

علائم یونانی

ρ	چگالی

زیرنویس‌ها

w	مقادیر در دنباله
∞	مقادیر در جریان آزاد

بالانویس‌ها

*	حالت بدون بعد

منابع

[1] Durst F., J. Jovanović and Lj. Kanevče, "*Probability density distribution in turbulent wall-bounded shear layer flows*", Turbulent Shear Flows, Springer-Verlag, 5 (1987): 197-220.

[2] Veeravalli, S. and Z. Warhaft, "The shearless turbulence mixing layer", *Journal of Fluid Mechanics*, 207 (1989): 191-229.

[3] Kang, H. S. and C. Meneveau, "Experimental study of an active grid-generated shearless mixing layer and comparisons with large-eddy simulation", *Physics of Fluids*, 20 (2008): 115-102.

[4] Matović, M., "*Experimental investigation of free premixed flame flow field, by laser anemometer*", Master thesis, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade, (in Serbian), 1998.

[5] Petrović, V. D., "*Research of turbulent fluid flow in the free round isothermal jet by hot wire anemometer*", Master thesis, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, (in Serbian), 1991.

[6] Sterlund, Jens M. and Arne V. Johansson, "Turbulence Statistics of Zero Pressure Gradient Turbulent Boundary Layers", 13th European Turbulenc conference, Warsaw, September 2011.

[7] Ahmed, S. R., R. Ramm and G. Faltin, "Some Salient Features of the Time Averaged Ground Vehicle Wake", " *SAE Technical Paper Series* 840300, Detroit, 1998.

[8] Gilli, P. and F. Chometon, "Modelling of Stationary Three-Dimentional Separated Air Flows around an Ahmed Reference Model", *Third International Workshop on Vortex, ESAIM Proceedings*, 7.10 (1999): 124.

[9] Hanaoka, Y. And A. Kiyohira, "*Vehicle Aerodynamic Development using PAMFLOW*", 2003.

[10] Gillieron, P. and A. Spohn, "*Flow Separations Generated by a Simplified Geometry of an Automotive Vehicle*", 2007.

[11] Lienhart, H. and C. Stoocks, "*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, 2010.

[12] Khalighi, B., S. Zang, C. Koromilas, S. Balkanyi, L.P. Bernal, G. laccarino and P. Moin, "Experimental and Computational Study of Unsteady Wake Flow Behind a Body with a Drag Reduction Device", *SAE PPR*. 2006-01-1042.

[13] Javareshkiyan, M.H. , R. Shayesteh Sadafiyan and A. Azarkhish, "Numerical and Experimental investigation of Aerodynamics forces on the base model of vehicle" , *SID*, 18.1 (1385): 49-64.(in Persian)

[14] Watkins, S., G. Vino, "The Effect of Vehicle Spacing on the Aerodynamics of Representative Car Shape", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 1232-12393ED., 96.3 (2011): 1232-1239.

[15] Khoshnami Deshiri, M. and M. Fathali, "Numerical study of the impact of the initial turbulent integral length scale on the dynamics of a two dimensional shear-free turbulent mixing layer", *Fluid Mech.*, 14 (2014): 113–123.

[16] Saha, A. K., K. Muralidhar and G. Biswas, "Experimental Study of Flow Past a Square Cylinder at High Reynolds Numbers", *Experiments in Fluids*, 29.4 (2008): 553-563.

[17] Shadaram A. Azimifrad M. and Rostami N. "Study of characteristic flow at the near wake of square cylinder" J. of Mechanical- aerospace, 3.4 (1386).(in Persain)

[18] Sanieenezhad, M., " *an intrudaction to fluctuation flow and turbulence modeling*", Tehran, 1383.

[19] 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, 155.32 (1936): 570-575.

[20] Jogensen Finn, E., "*How to measuer turbulence with hot-wire anemometers*", Dantec Dynamics, 2002.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

V. Barzanooni and A. Bak Khoshnevis, "Experimental Study of Fluctuations, Parameters and High-Order Values of Velocity in Wake Region of a Model Car", *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 83-92.

DOI: 10.22060/mej.2016.851