

بررسی تجربی اثرات جریان شتابدار روی نوسانات، پارامترها و مقادیر مرتبه بالای سرعت در دنباله‌ی یک مدل جریانبند

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی وحدت تربت جام، تربت جام، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

*وحید برزنونی

عبدالامیر بک خوشنویس

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی دینامیک جریان شتابدار روی پارامترهای مختلف دنباله نظیر چولگی، ضریب صافی، طول مقیاس کولموگروف و در دنباله یک مدل خودرو پرداخته شد و اثرات شتاب جریان در آهنگ و روند تغییرات پارامترهای مختلف دنباله مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور شبیه سازی جریان سیال از تونل باد مدار باز و دمشی استفاده شده است. افزایش سرعت به طور پیوسته و توسط یک دستگاه اینپورت که سبب تغییر در سرعت دورانی الکترو موتور تونل باد می‌شود، صورت گرفته است. نتایج نشان داد: در کلیه موقیت‌های دنباله شتاب جریان و افزایش سرعت سبب ایجاد گردابه‌هایی با اندازه کوچکتر می‌گردد. گذشت زمان و افزایش سرعت تاثیری در روند تغییرات پارامتر چولگی و ضریب صافی در دنباله نزدیک ندارد. با افزایش سرعت مقادیر طول مقیاس کولموگروف عموماً کاهش می‌یابد همچنین مقادیر پارامتر مذکور در دنباله دور "عدمتأ" بیشتر از دنباله نزدیک است. همچنین در قسمت هایی از دنباله که اثرات لایه‌های برشی وجود دارد اضاحملال انرژی بیشتر است و این مساله سبب تشکیل گردابه‌هایی با اندازه کوچکتر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: جریان شتابدار، طول مقیاس کولموگروف، بررسی تجربی، چولگی.

Experimental study of the effects of accelerated flow on the fluctuation, parameters and high-order values of velocity in the wake of a bluff body

V. Barzanooni

Mechanical Engineering, Vahdat Institute of higher education, Torbat-e Jam, Khorasan Razavi Province, Iran

A. Bak Khoshnevis

Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Abstract

In this study, flow dynamics and accelerated flow effects on the various parameters of the wake of a bluff body model Such as Skewness, Kurtosis and Kolmogorov scale length, investigated experimentally. In addition, the effects of acceleration in the rate and trend of variation of the various parameters of the wake studied. The blow open circuit wind tunnel used to simulate fluid flow. An inverter that causes the changes in rotational speed of the wind tunnels electro motor has increased the inlet wind velocity continuously. On all wake positions, flow Accelerate and Increasing velocity creates smaller sized vortices. The passage of time and the increase in velocity do not have any effect on the changes of the skewness and kurtosis parameters in the near wake. By increasing the velocity, the values of the Kolmogorov scale length reduced generally. also; the values of the parameter in the far wake are greater than the close wake. There is a greater energy dissipation in the parts of the wake where the effects of the shear layers are and this causes smaller sized vortices

Keywords: accelerated flow, Kolmogorov scale length, experimental investigation, skewness.

وابستگی آن به عدد رینولدز آشفته، $Re_L = \frac{U_L}{v}$ که U_L نوسان

سرعت (rms) است، Δ میکرو مقیاس تیلور و لرجت سینماتیکی است) در گذشته بطور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. جریان سنج سیم داغ می‌تواند اندازه گیری دقیقی از Δ با حی که تاکنون با دیگر روش‌های تجربی مطابقت داده نشده است، ارائه دهد. مشتق سرعت تحت تاثیر حرکت مقیاس‌های کوچک¹ (SSM) قرار می‌گیرد که تحلیل درست آن را مشکل می‌سازد. از طرفی،وضوح نمونه برداری زمانی سیگنال سرعت نیز بر روی اندازه گیری SSM تاثیر می‌گذارد. با استفاده از شبیه سازی عددی مستقیم حالت آشفتگی می‌توان به ارزیابی اثرات ناشی از فضای محدود و واضح موقعیت جریان سنج سیم داغ بکار گرفته شده در آزمایشات پرداخت.

آشفتگی توسط اختلالات فشار و سرعت در میدان توزیع خواهد شد. خواص آماری نسبت به ناهمسانی حساس بوده و برای اندازه گیری

۱- مقدمه

اگرچه آشفتگی یکی از مسائل بسیار قدیمی در حوزه مکانیک سیالات می‌باشد اما همچنان حل نشده باقی مانده است. این پدیده عموماً 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 اوایل قرن گذشته پایه گذاری 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 منطقی ترین روش جهت توصیف آشفتگی مربوط به نظریه‌هایی است که بر پایه‌ی فرضیات آماری مرتبط با معادلات دینامیک جریان سیال شکل می‌گیرند. نظریه‌ی آماری نیازمند داشتن اطلاعاتی در مورد ارزیابی تابع توزیع احتمال چگالی و تابع همبستگی متناظر است. تابع همبستگی مرتبه بالا (مانند چولگی، صافی و ...) باعث بهبود جامعیت مدل آشفتگی خاص از نظر آماری می‌گردد. پیش‌بینی‌های نظریه برای چولگی و

¹ Small Scale Motion

نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: v.barzanooni@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۵/۲۲

ناهمسانی می‌توان از کمیت‌های آماری استفاده 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 (چولگی و ضربی صافی) نیز افزایش خواهد یافت.

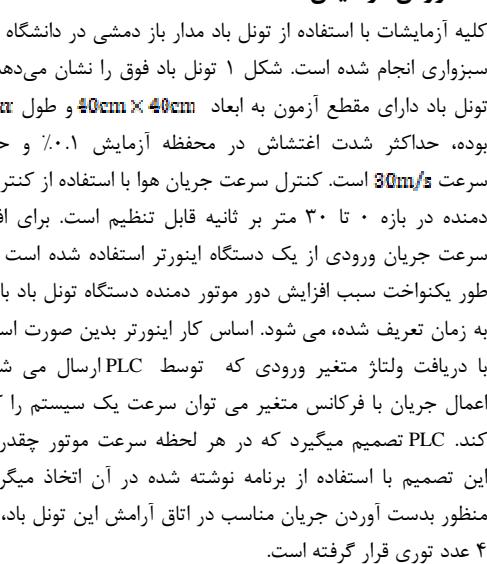
مرور کاملی از روابط آماری موجود بین ممان‌های سرعت مرتبه بالا در جریان درون کاتال، لایه مرزی و جت آزاد در [۱] آمده است. ویر والی و ورهت [۲] در سال ۱۹۸۹، آزمایش تجربی انجام دادند و نشان دادند که خواص آماری نظری چولگی و ضربی صافی در لایه اختلاط، از توزیع نرمال فاصله می‌گیرند. آن‌ها مشاهده کردند که مکان بیشینه چولگی و ضربی صافی 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 ناحیه پر-انرژی به سمت ناحیه کم انرژی اتفاق می‌افتد. کنگ و منیوی [۳] در سال ۲۰۰۸ نتایج تجربی مشابه ویروالی و ورهت را با اعداد رینولدز بالاتر و همچنین با استفاده از مدل شبیه سازی گردابه‌های بزرگ به صورت عددی انجام دادند و نشان دادند که تاثیر گردابه‌های بزرگ بر روی چولگی و کورتوسیس بیش از گردابه‌های کوچکتر می‌باشد.

ماتوویچ^۱ از جریان سنج تک مولفه‌ی لیزری^۲ جهت سنجش ممان‌های مرتبه بالای سرعت در جریان آزاد جت استفاده کرد [۴].

مجموعه نتایج بدست آمده محققان را برآن داشت که آزمایشات مشابهی در جریان‌های آزاد جت انجام دهنده‌اند [۵]. برای این کار آنها از پرب جریان سنج سیم داغ X برای اندازه‌گیری ممان‌های سرعت تا ممان مرتبه شش استفاده کردند و به ارزیابی مقادیر چولگی و ضربی صافی پرداختند.

جانسون و همکاران برای لایه مرزی با گردابیان فشار صفر، پارامترهای اغتشاشی سرعت را در بازه اعداد رینولدز $27300 < Re \theta < 2530$ مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایشات خود را با استفاده از جریان سنج سیم داغ و فیلم داغ برای اندازه‌گیری تنش برشی دیواره انجام داده و اثرات تغییر عدد رینولدز و اندازه پرب مورد استفاده را بر شدت اغتشاشات، چولگی و صافی جریان مورد بررسی قرار دادند [۶].

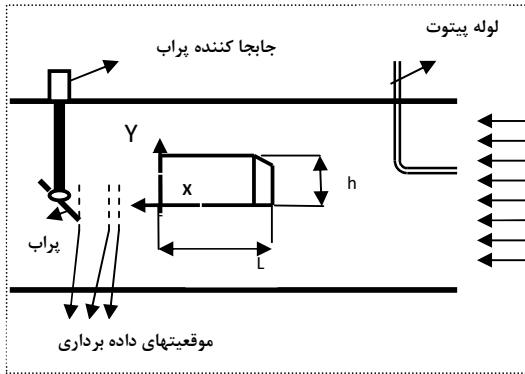
در تحقیق حاضر نویسنده‌گان به دنبال فهم بهتر از دنباله مغشوش یک مدل خودرو می‌باشند. تاکنون مطالعات تجربی و عددی بسیاری بر روی مدل‌های مختلف خودرو انجام شده‌است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به مقاله احمد [۷] اشاره کرد. وی مدل ساده‌ای شبیه به یک خودرو را در نظر گرفته و با آزمایش مدل‌هایی با زاویه‌های مختلف شیشه عقب، نتایج حاصله را ثبت کرده‌است. برخی از محققین از جمله [۸-۹] مدل‌هایی شبیه به مدل اخیر را به صورت عددی، شبیه‌سازی کرده‌اند. از آنجا که نتیجه‌های ثبت شده توسط احمد محدود است، معیار مقایسه این کارهای عددی نیز به طور عموم محدود به تغییرات ضربی پسا بوده است. آزمایش‌های دقیقی بر روی این مدل توسط [۱۰-۱۱] انجام گرفته و نتیجه‌های تجربی مختلفی نظری بردارهای سرعت، تنش‌های رینولدز و... توسط LDA اندازه‌گیری و ثبت شده



سرعت جریان ورودی از 0 تا حدود 30 متر بر ثانیه و در مدت زمان 10 ثانیه و به طور خطی افزایش می‌پابد. شتاب جریان ورودی بر این اساس 3 متر بر مجموع ثانیه می‌باشد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن از جریان سنج سیم داغ استفاده شده است. پرب جریان سنج سیم داغ از نوع یک بعدی بوده و سنسور آن از نوع تنگستن 5 میکرونی می‌باشد و داده‌های اندازه‌گیری شده توسط

¹ Matovic

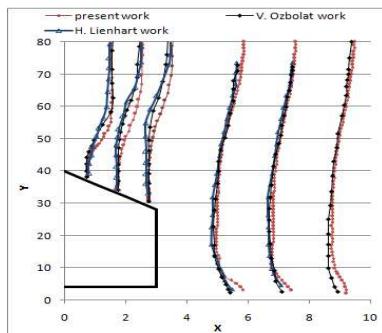
² Laser - Doppler



شکل ۲- مشخصات و ابعاد مدل و طرحواره موقعیت های داده برداری در دنباله مدل

۳- اعتبار سنجی

در ابتدا، به منظور بررسی صحت عملکرد دستگاه تونل باد و جریان سنج سیم داغ، یک نمونه داده برداری صورت گرفته و با کار دیگر افراد مقایسه شده است. نمودار متوسط زمانی مؤلفه سرعت در جهت غالب جریان (\bar{U}) برای مدل مطالعه در عدد رینولدز ۶۴۰۰ در موقعیت های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- توزیع سرعت متوسط در دنباله مدل برای موقعیت های مختلف

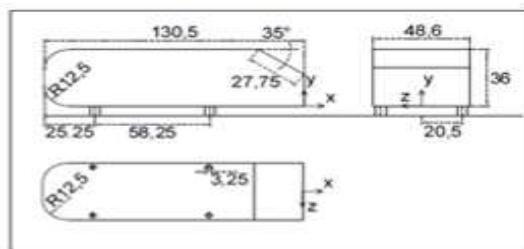
همان طور که مشاهده می شود، تطابق قابل قبولی بین نتیجه های حاضر با نتیجه های ازبلاط و همکارانش [۱۸] (رینولدز ۱۴۰۰) و همچنین لین هرت و همکارانش [۱۹] (رینولدز ۷۸۰۰) که حدوداً در محدوده عدد رینولدز یکسانی صورت گرفته، مشاهده می شود.

۴- بحث و بررسی نتایج

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

جریان سنج سیم داغ از طریق کارت A/D به رایانه ارسال شده و توسط نرم افزار مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. همچنین به منظور اصلاح نمودن تاثیرات دما بر روی داده های جریان سنج سیم داغ، دمای هوا اندازه گیری شده و از طریق کارت A/D به رایانه ارسال می شود. به منظور جایجا کننده پرب برای اندازه گیری توزیع جریان هوا از مکانیزم انتقال دهنده استفاده می شود و این مکانیزم دارای دقت ۰.۱ میلی متر در جهت محورهای مختصات می باشد [۱۶]. در طول مدت کالیبراسیون پرب، غیر از مؤلفه اصلی جریان دو مؤلفه دیگر سرعت صفر می باشند. ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ تابع از اندازه بردار سرعت و زاویه جریان نسبت به پرب می باشد. سرعت مؤثر نیز بر اساس تابعی از اندازه سرعت و تابع حساسیت به زاویه (پرخورد جریان به پرب) تعریف می شود. تابع حساسیت به زاویه دارای ضراوی است که از طریق کالیبراسیون جهت مشخص می شود. هنگامی که جریان نسبت به پرب منحرف می شود، ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ که تابعی از زاویه می باشد تغییر می یابد. در نتیجه سرعت مؤثر که تابعی از زاویه برخورد است تغییر یافته و ضرایب تابع حساسیت به صورت تابعی از زاویه مشخص می شود. نهایتاً "حسگر یک بعدی پس از کالیبره شدن صرفًا" مقادیر مؤلفه سرعت در جهت غالب جریان را اندازه گیری می نماید. [۱۷]

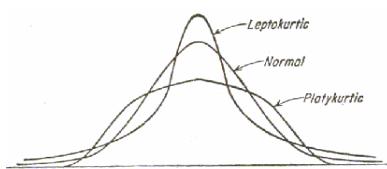
مدل مورد مطالعه در این تحقیق مدل پیشنهادی احمد با زاویه انتهایی ۳۵ درجه است. مدل مورد آزمایش دو بعدی است، به گونه ای که جریان فقط در امتداد محفظه آزمایش جریان دارد، و صرفاً پارامتر U' در دنباله مدل اندازه گیری شده است. (مدل مورد آزمایش در امتداد عرض مقطع آزمایش کشیده شده است و در طرفین به طور کامل به سطح جانبی مقطع آزمایش چسبیده است و هیچ جریانی از قسمت جانبی مدل عبور نمی کند. جریان صرفاً از روی مدل آزمایش عبور می کند). از اثرات زمین در این تحقیق صرف نظر شده است. با توجه به ضریب اندازه Blockage بعنوان یک پارامتر مهم، اولین نکته در ساخت ۰/۱ مدل است. مقدار پیشنهادی برای مدل های آزمایشگاهی کمتر از ۰/۱۰ است تا بتوان از اثر جریان سیال روی دیواره های جانبی مقطع آزمایش بر سطح مدل چشم پوشی کرد. در این تحقیق مقدار انتخابی برای این ضریب با توجه به شرایط آزمایشگاهی و تونل باد، ۰/۰۹ و ضریب مقابس مدل ۰/۱۴ می باشد. سایر مشخصات و ابعاد مدل و همچنین موقعیت های داده برداری در انتهای مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. داده برداری ها در پشت مدل در فواصل طولی $Y=-40, -38, \dots, 78, 80$ و ارتفاعی $X/h=0.5, 1, 1.5, \dots, 23, 24$



این پارامترها مطابق روابط زیر تعریف می‌گردند:

$$S_u = 1/N \sum_{n=1}^N \frac{(u(n) - \bar{U})^2}{\sigma_u^3} \quad (1)$$

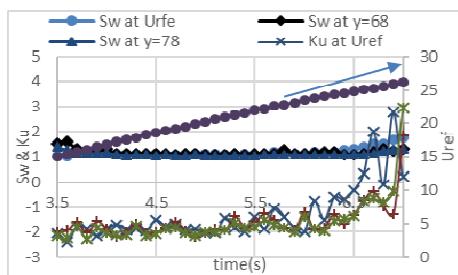
$$K_u = 1/N \sum_{n=1}^N \frac{(u(n) - \bar{U})^4}{\sigma_u^4} \quad (2)$$



شکل ۴- دو حالت پخ و کشیده نسبت به حالت نرمال

به طور کلی نتایج بدست آمده در دو قسمت عمدۀ ارائه گردیده است. ابتدا به بررسی اثرات شتاب جریان در دنباله نزدیک و در موقعیت $x/h=0.5$ پرداخته شده است. مقادیر پارامترهای چولگی، ضریب صافی، طول مقیاس کولومگروف و ... در موقعیت‌های ارتفاعی مختلف و در موقعیت طولی مذکور بررسی شده اند و آهنگ تغییرات آنها با آهنگ تغییرات سرعت جریان ورودی مقایسه شده است. در ادامه به بررسی تغییرات پارامترهای مذکور در موقعیت‌های طولی متفاوت برای دنباله نزدیک و دور پرداخته شده است.

شکل ۵ تغییرات چولگی و ضریب صافی جریان ورودی و همچنین جریان در نقاط خارج از دنباله و در موقعیت طولی $x/h=0.5$ را نشان می‌دهد. مقادیر چولگی برای جریان شتابدار ورودی و همچنین جریان خارج از دنباله همواره مقداری مثبت است. به عبارتی جریان ورودی به گونه‌ای است که همواره مقادیر لحظه‌ای سرعت بیشتر از مقدار متوسط است و البته جهش‌های منفی در جریان رخ می‌دهد. با افزایش سرعت تراکم مولفه‌های "سرعت لحظه‌ای بیشتر از سرعت متوسط" بیشتر می‌گردد. البته جهش‌های منفی در مقدار سرعت نیز شدید‌تر است. تعداد جهش‌های منفی کاهش یافته اما شدت آنها بیشتر می‌گردد.



شکل ۵- تغییرات چولگی و ضریب صافی جریان ورودی و همچنین جریان در نقاط خارج از دنباله در موقعیت طولی $x/h=0.5$

شکل ۶ روند تغییرات چولگی برای نقاط مختلف دنباله در موقعیت طولی $x/h=0.5$ و با گذر زمان را نشان می‌دهد. از سطح زیرین مدل تا موقعیت ارتفاعی $y=8mm$ با افزایش ارتفاع مقادیر چولگی افزایش می‌یابد. به عبارتی در موقعیت‌های مذکور تراکم سرعت لحظه‌ای عمده‌تر" بیشتر از سرعت متوسط است. و البته آهنگ تغییرات چولگی نیز با گذر

آشفتگی ایزوتروپی و همگن^۱ (HIT) با یک چولگی منفی در مشتق سرعت $\frac{\partial u}{\partial x}$ مشخص می‌شود که مولفه نوسانی سرعت در امتداد x است. در آشفتگی ایزوتروپی و همگن، چولگی(S)، بیانگر میزان تولید گردایی بواسطه‌ی انتساب گردابه‌ی باشد و مقادیر صفر آن از غیرخطی بودن معادله‌ی ناویر-استوکس ناشی می‌شود.

مولفه اغتشاش سرعت u ، که در جهت ناهمنگ 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 ناهمنسانی را نشان می‌دهند. توزیع اسکیونس ابزار اصلی در تشخیص میزان تابو و ناهمنسانی است. اسکیونس در حقیقت معیاری از وجود یا عدم تقارن تابع توزیع است. برای یک توزیع کاملاً متقاضان اسکیونس(ضریب چولگی) صفر و برای یک توزیع نامتقاضان با کشیدگی به سمت مقادیر بالاتر اسکیونس مثبت و برای توزیع نامتقاضان با کشیدگی به سمت مقادیر کوچکتر مقدار اسکیونس(ضریب چولگی) منفی است که در اینجا بیان کننده مقدار تقارن سرعت لحظه‌ای نسبت به سرعت متوسط جریان سیال است. زمانی که اسکیونس(ضریب چولگی) غیر صفر است، داده‌ها نسبت به مقدار متوسط تقارن ندارند و داده‌ها را نمی‌توان توسط یک توزیع نرمال مدل کرد، نوسانات مولفه افقی سرعت و شدت نوسانات کوچک است.

اسیلوگرام^۲ 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 می‌گردند. میزان پرش سرعت لحظه‌ای با محاسبه میزان اسکیونس(ضریب چولگی) مشخص می‌شود.

کورتوسیس(صفافی) همان معان مرکزی چهارم^۳ است. به میزان کشیدگی یا پخش منحنی توزیع چگالی احتمال نسبت به منحنی توزیع چگالی گوس^۴ کورتوسیس(ضریب صافی) گفته می‌شود. در واقع میزان اوج 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 کشیده تر یا پیچ تر نسبت به توزیع چگالی گوس می‌باشد(شکل ۴). در حالی که میزان صافی مثبت باشد(Leptokurtic)، دنباله‌های توزیع داده‌ها طولانی بوده و تغییرات دامنه داده‌ها نسبت به زمان بیشتر است. بنا براین سرعت لحظه‌ای در بسیاری از مواقع از سرعت متوسط فاصله گرفته و پرش و اغتشاشات سرعت لحظه‌ای جریان زیاد می‌شود. در حالی که میزان صافی منفی باشد(Platykurtic) سرعت لحظه‌ای کمتر از سرعت متوسط است ولی دنباله‌های توزیع چگالی حجمی‌تر می‌باشند. برای منحنی توزیع چگالی گوس مقدار کورتوسیس(ضریب صافی)^۵ است. چنانچه مقادیر کورتوسیس (ضریب صافی) کمتر از ۳ باشد منحنی چگال تر و در غیر اینصورت منحنی تیز تر می‌باشد.

¹ Homogeneous Isotropic Turbulence

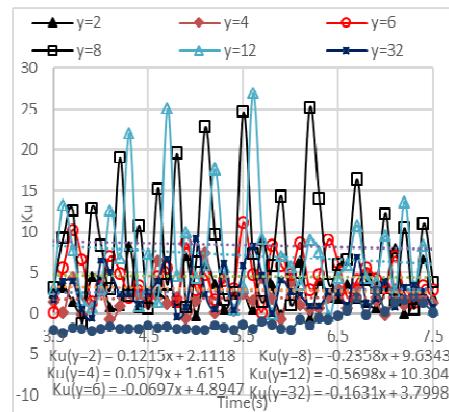
² Oscillogram

³ Forth Central Moment

⁴ Gaussian Density Function

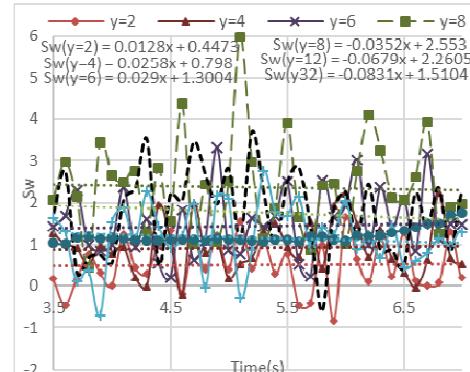
کولموگروف شکسته شدند، انرژی خود را به وسیله اضمحلال لزج به گرما تبدیل می کنند. تحلیل و بررسی پارامتر فوق علاوه بر فهم بهتر هندسه جریان در دنباله مدل در انتخاب یک شبکه محاسباتی مناسب به منظور حل دقیق میدان جریان آشفته دنباله با استفاده مستقیم از معادلات بقا به طوری که جزئی ترین پدیده ها نیز مد نظر قرار گیرند حائز اهمیت است.

شکل ۸ مقادیر طول مقياس کولموگروف را در موقعیت های ارتفاعی مختلف در دنباله و در موقعیت $x/h=0.5$ و در جریان شتابدار نشان می دهد. در کلیه موقعیت های دنباله با افزایش سرعت جریان و گذشت زمان ادی هایی با اندازه های کوچکتر شکل میگیرند. شتاب جریان و افزایش سرعت سبب ایجاد گردابه هایی با اندازه کوچکتر می گردد. کوچکترین گردابه ها در قسمت های تحتانی دنباله و غالباً "در موقعیت های $y=2, 4, 6, 8, 12, 32$ mm و در قسمت های فوقانی در موقعیت $y=32$ mm تشکیل می شوند. آهنگ کاهش اندازه ادی ها در جریان شتابدار تا موقعیت $y=8$ mm روند کاهشی دارد. به عبارتی در جریان شتابدار، با افزایش سرعت و افزایش ارتفاع تا موقعیت مذکور، روند کوچکتر شدن اندازه ادی ها، افزایش می یابد و از موقعیت $y=8$ mm به بعد این روند معکوس است. به بیان دیگر از این موقعیت به بعد با افزایش سرعت تمایل به تشکیل گردابه هایی با اندازه کوچکتر کمتر است. شکل ۸ مقادیر کوچکترین ادی های دنباله در جریان شتابدار را نشان می دهد که به سبب چرخش سریع به دور خود سبب اضمحلال سریعتر انرژی جنبشی دورانی منتقل شده به خود می گردد. ادی های دنباله پس از آنکه به این اندازه شکسته و کوچک شدند مضمحل می گردند.



شکل ۷- مقادیر ضریب صافی در دنباله مدل برای موقعیت های ارتفاعی مختلف و در موقعیت طولی $x/h=0.5$ با گذر زمان

زمان و افزایش سرعت تا موقعیت مذکور روند افزایشی دارد. به عبارتی به موازات افزایش سرعت جریان تا موقعیت مذکور به تراکم سرعت لحظه ای بیشتر از سرعت متوسط، اضافه می گردد. و البته جهش های منفی سرعت نیز شدیدتر می شود. از موقعیت $y=8$ mm تا قسمت های فوقانی مدل همچنان مقادیر چولگی مثبت است اما آهنگ تغییرات پارامتر مذکور با افزایش بیشتر ارتفاع کاهش می یابد. به عبارتی در موقعیت های فوقانی با افزایش سرعت جریان مقادیر چولگی کاهش می یابد. به بیان دیگر از تراکم سرعت لحظه ای بیشتر از سرعت متوسط کاسته می گردد. شکل ۷ تغییرات ضریب صافی در دنباله مدل برای موقعیت های ارتفاعی مختلف و در موقعیت طولی $x/h=0.5$ را نشان می دهد. هرچند مقدار پارامتر مذکور برای جریان آزاد غالباً "منفی است. به عبارتی منحنی توزیع چگالی پیش تر است. ولی مقدار این پارامتر برای سایر نقاط دنباله همواره مثبت است. به بیان دیگر سرعت لحظه ای خیلی از اوقات از سرعت متوسط فاصله زیادی گرفته و پرش اغتشاش های سرعت لحظه ای جریان زیاد است. که این امر احتمالاً "ناشی از شکل گیری و از بین رفتن گردابه ها در دنباله مدل است. در موقعیت های ارتفاعی $y=8, 12, 32$ mm مقادیر ضریب صافی بیشترین مقدار را دارد. در این موقعیتها سرعت لحظه ای از سرعت متوسط بسیار فاصله گرفته و جهش های شدیدی در مقدار سرعت لحظه ای وجود دارد. آهنگ تغییرات ضریب صافی با گذشت زمان و افزایش سرعت و افزایش ارتفاع تا $y=12$ mm کاهش می یابد. به عبارتی تا موقعیت مذکور افزایش سرعت سبب کاهش در میزان افت و خیز های سرعت لحظه ای نسبت به سرعت متوسط می گردد.

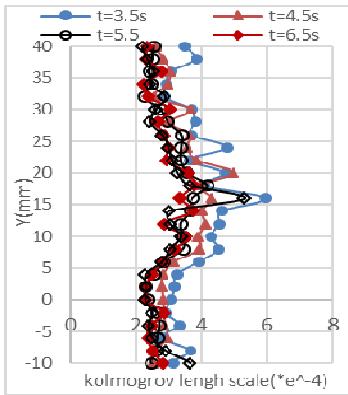


شکل ۶- مقادیر چولگی در دنباله مدل برای موقعیت های ارتفاعی مختلف و در موقعیت طولی $x/h=0.5$ با گذر زمان

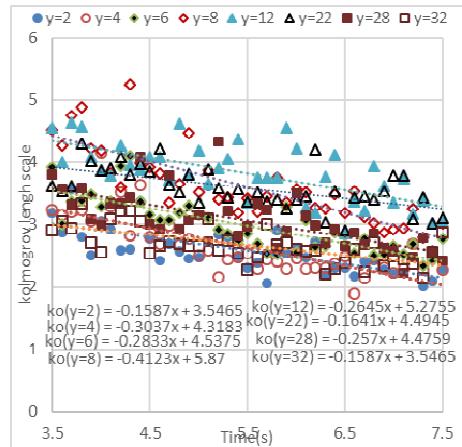
از آنجایی که جریان در دنباله مدل جریانی آشفته است که شامل ادی های در هم پیچیده و در اندازه های مختلف می باشد لذا به منظور در ک بهتر اندازه کوچکترین ادی های شکل گرفته در دنباله مدل با استی اندازه کوچکترین ادی ها بر حسب طول مقياس کولموگروف تعیین گردند. اندازه کوچکترین ادی های هم مرتبه اندازه طول مقياس کولموگروف δ می باشد. وی ثابت نمود:

$$\delta = \left(\frac{y}{\ln y} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

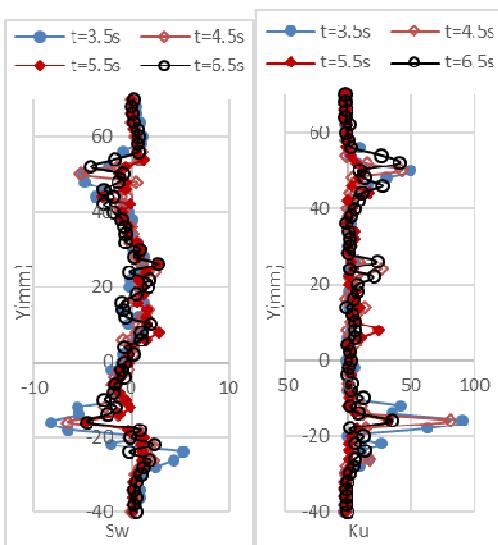
که در آن y لزج سینماتیک و δ آهنگ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته است. بعد از آنکه ادیها به اندازه هایی در طول مقياس



شکل ۹- مقادیر طول مقياس کولموجروف در دنباله مدل و در موقعیت
x/h=0.5 در چند زمان مختلف در حین افزایش سرعت



شکل ۸- مقادیر طول مقياس کولموجروف در موقعیت های ارتفاعی
مختلف در دنباله و در موقعیت طولی x/h=0.5، با گذره زمان

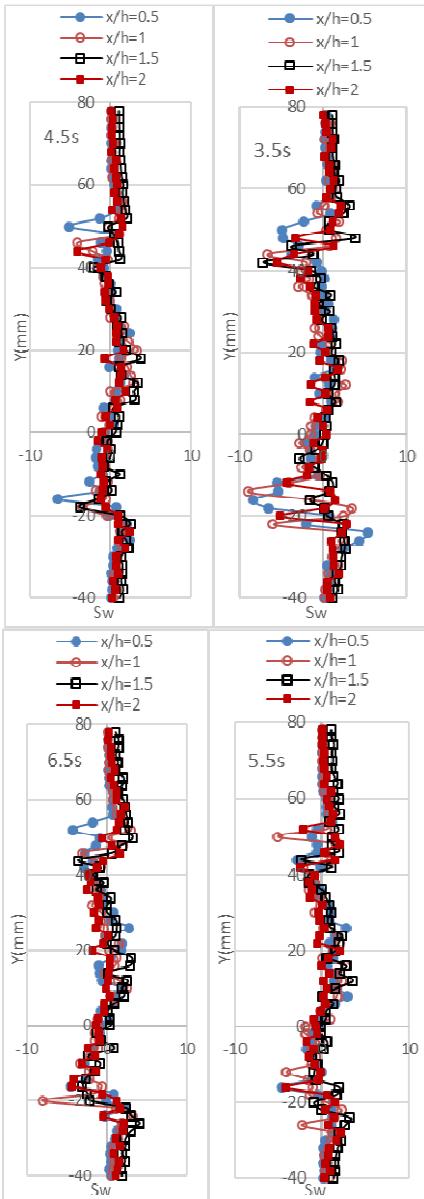


شکل ۱۰- مقادیر چولگی و ضربب صافی در دنباله مدل و در موقعیت
طولی x/h=0.5 در زمان های مختلف

شکل ۱۱ مقادیر چولگی در چند موقعیت زمانی و چند موقعیت طولی مختلف در دنباله نزدیک مدل را نشان می دهد. روند تغییرات این پارامتر برای موقعیت های طولی مختلف حدوداً "یکسان است. در قسمت های فوقانی و تحتانی جهش های مثبت و منفی دیده می شود که اثرات لایه های برشی جدا شده از قسمت های فوقانی و تحتانی مدل می باشد. مقادیر چولگی در قسمت های پشت مدل در تمام موقعیت های طولی و همچنین در طول زمان افزایش سرعت غالباً مثبت است، به این معنا که غالباً "مقادیر چولگی ای سرعت در پشت مدل بیشتر از مقدار متوسط است. و جهش های منفی وجود دارد. که این مساله بیانگر مغلوط بودن جریان در دنباله است. روند تغییرات پارامتر مذکور به گونه است که از مرکز دنباله به سمت بالا و پایین مقادیر این پارامتر کاهش می یابد. به عبارتی بیشترین مقدار چولگی در مرکز دنباله اتفاق می افتد. با گذشت زمان و با افزایش سرعت انحنای نمودار در قسمت پشت مدل بیشتر شده و به عبارتی آهنگ کاهش مقادیر چولگی با حرکت از مرکز دنباله به سمت بالا و پایین شدیدتر است. کاهش چولگی با حرکت از مرکز دنباله به قسمت های تحتانی و

شکل ۹ مقادیر طول مقياس کولموجروف در دنباله مدل و در موقعیت x/h=0.5 و در چند زمان مختلف در حین افزایش سرعت جریان ورودی و در جریان شتابدار نشان می دهد. از آنجایی که کوچکترین ادی ها به واسطه چرخش سریع به دور خود، باعث اضمحلال ابریزی جنبشی دورانی منتقل شده به خود می گردند و از طرفی با توجه به اینکه فرایند تقسیم ادی ها به ادی های کوچکتر تا جایی ادامه پیدا می کند که افزایش سرعت دورانی ادی و نیز افزایش آهنگ اضمحلال آنها به یک سطح تعادلی برسند لذا در شکل ۹ و در قسمت های تحتانی و فوقانی ناحیه دنباله به دلیل وجود اثرات لایه های برشی ایجاد شده اضمحلال ابریزی بیشتر است و این مساله سبب تشکیل گردابه های با اندازه کوچکتر می گردد و در مقابل در محدوده ارتفاعی $y=5\text{--}25\text{mm}$ و در پشت مدل که اثرات لایه های برشی تحتانی و فوقانی کمتر است کوچکترین گردابه های شکل گرفته، بزرگتر می باشند. همچنین به مرور و با افزایش سرعت گردابه های با اندازه کوچکتر شکل میگیرند.

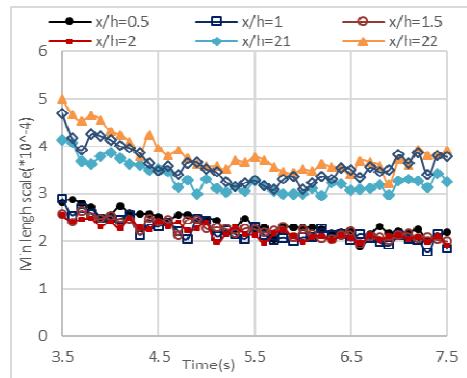
شکل ۱۰ مقادیر چولگی و ضربب صافی در دنباله مدل و در موقعیت طولی x/h=0.5 در جریان شتابدار را نشان می دهد. در طول مدت افزایش سرعت جریان غالباً "مقادیر چولگی در دنباله و در پشت مدل مثبت است. و با نزدیک شدن به قسمت های فوقانی و تحتانی دنباله مقادیر این پارامتر کاهش می یابد. تا زمانی که قله های کمینه شکل می گیرند. و پس از آن افزایش دز مقادیر این کمینه کمیت رخ می دهد. در واقع حد فاصل بین قله های بیشینه و کمینه کمیت مذکور ناحیه جریان برشی است که از سطوح تحتانی و فوقانی مدل جدا شده است. متناظر با موقعیت های مذکور در نمودار ضربب صافی نیز اوج های در نمودار این پارامتر ها شکل گرفته است. در واقع در موقعیت های مذکور که ناحیه جریان برشی است، جریان دنباله دارای افت و خیز های شدید بوده که می تواند ناشی از حضور گردابه شکل گرفته در قسمت های فوقانی و تحتانی باشد. نکته دیگر آنکه گذشت زمان و افزایش سرعت تاثیری در روند تغییرات پارامتر های مذکور ندارد.



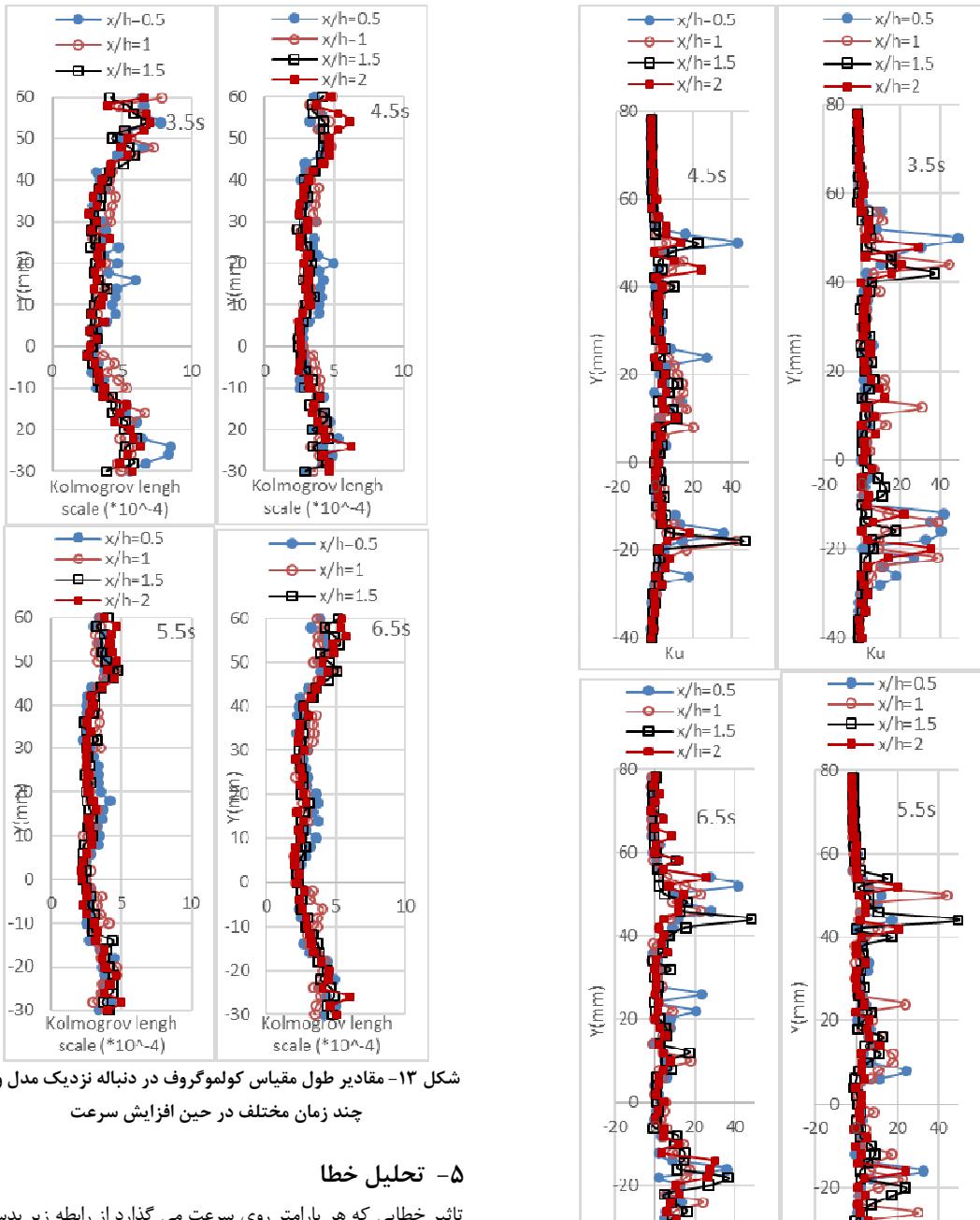
شکل ۱۱- مقادیر چولگی در چند موقعیت زمانی و در موقعیت های طولی مختلف

فوقانی سبب کاهش تناب و به تبع آن سبب کاهش اختلاط می گردد. که با رسیدن به ناحیه جریان شتابدار نشان می دهد. پارامتر مذکور در قسمت های تحتانی و فوقانی دنباله به دلیل اثرات لایه های برشی جداسده دارای جهش های شدیدی است. غالباً مقادیر این پارامتر مشتب است که بیانگر این مطلب است که غالب مقادیر سرعت لحظه ای دارای جهش های فراوانی در مقدار خود هستند. به عبارتی منحنی چگال کشیده تر تسبیت به توزیع گوس میباشد. که نشانگر اوج نمودار سرعت لحظه ای جریان سیال در دنباله است. اوج های موجود در نمودار ضریب صافی بیانگر افزایش شدید در نوسانات و پرس های مشتب و منفی سرعت لحظه ای جریان است. این اوج ها غالباً در قسمت های تحتانی و فوقانی و در محل وجود لایه های برشی وجود دارد. هر چند در دنباله و در قسمت های پشت مدل نیز این اوج ها وجود دارد.

شکل ۱۳ مقادیر طول مقیاس کولموگروف را در دنباله نزدیک مدل و در چند زمان مختلف در حین افزایش سرعت جریان را نشان می دهد. به طور غالب در همه موقعیت های طولی در دنباله مقدار پارامتر مذکور کمتر از مقدار آن در قسمت های فوقانی و تحتانی دنباله است. به این معنا که در قسمت های پشت مدل در دنباله گردابه های با اندازه های کوچکتر نسبت به سایر قسمت های دنباله شکل میگیرد. این مساله با گذشت زمان و افزایش سرعت برقرار است. البته با افزایش سرعت مقادیر این پارامتر عموماً کاهش می یابد. شکل ۱۴ روند تغییرات کمینه اندازه طول مقیاس کولموگروف و یا کوچکترین اندازه گردابه های شکل گرفته در دنباله نزدیک و دور را نشان می دهد. هم در دنباله نزدیک و هم در دنباله دور مقادیر این کمیت با گذشت زمان و افزایش سرعت جریان ورودی، کاهش می یابد. به عبارتی در جریان شتابدار با افزایش تدریجی و پیوسته سرعت جریان گردابه های شکل گرفته در دنباله تا اندازه های کوچکتری شکسته میشوند که سبب افزایش سرعت دورانی گردابه ها و به تبع آن افزایش سریعتر آهنگ اضمحلال انرژی



شکل ۱۴- تغییرات کمینه اندازه طول مقیاس کولموگروف در موقعیت های طولی مختلف و با گذشت زمان



شکل ۱۲- مقادیر طول مقیاس کولموگروف در دنباله نزدیک مدل و در چند زمان مختلف در حین افزایش سرعت

۵- تحلیل خطای

تأثیر خطایی که هر پارامتر روی سرعت می گذارد از رابطه زیر بدست می آید که با عنوان عدم قطعیت استاندارد نسبی بیان می شود[۲۰].

$$Error(\%) = \frac{1}{k} + \frac{1}{u} * \Delta y_i \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{ضریب همگرایی} & k \\ & \text{انحراف معیار} & \frac{1}{u} * \Delta y_i \end{aligned}$$

و در نهایت مجموع خطاهای ناشی از پارامتر های مختلف روی سرعت لحظه ای از رابطه زیر بدست می آید[۲۰].

$$Error(\%) = 2 \sqrt{\sum (\frac{1}{k} * \frac{1}{u} * \Delta y_i)^2} \quad (5)$$

شکل ۱۳- مقادیر ضریب صافی در چند موقعیت زمانی و در موقعیت های طولی مختلف

- در قسمت های پشت مدل در دنباله گردابه های با اندازه های کوچکتر نسبت به سایر قسمت های دنباله شکل میگیرد. و این مساله با گذشت زمان و افزایش سرعت برقرار است. البته با افزایش سرعت مقادیر این پارامتر عموماً "کاهش می یابد.
- مقادیر طول مقیاس کولموگروف در دنباله دور عمدتاً بیشتر از دنباله نزدیک است که بیانگر پایین تر بودن آهنگ اضمحلال انرژی در دنباله دور نسبت به دنباله نزدیک است.

۷- نمادها	
پهنهای مدل	b
ضریب چولگی	skewnees
ضریب صافی	flatness
تابع توزیع چگالی احتمال	p(x)
ارتفاع مدل خودرو	h
طول خودرو	l
فشار کلی	p_t
فشار استاتیک	p_s
سرعت جریان آزاد	U
مؤلفه‌های سرعت	u, v, w
مؤلفه‌های اغتشاشی سرعت	u', v', w'
فاصله از انتهای خودرو	x
چگالی، kg/m^3	ρ
مقادیر در دنباله	علامت یونانی
مقادیر در جریان آزاد	W
حالات بدون بعد	∞
	*

۸- مراجع

- [1] Durst F., Jovanović J. and Kanevčić Lj., Probability density distribution in turbulent wall-bounded shear layer flows, *Turbulent Shear Flows*, Springer-Verlag 5, pp. 197-220, 1987.
- [2] Veeravalli S., Warhaft Z., The shearless turbulence mixing layer", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 207, pp. 191-229, 1989.
- [3] Kang H. S., Meneveau C., Experimental study of an active grid-generated shearless mixing layer and comparisons with large-eddy simulation", *Physics of Fluids*, Vol. 20, pp. 115-102, 2008.
- [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.

خطاهای بوجود آمده در آزمایشات صورت گرفته شامل موارد زیر است:

- حداکثر ۱ درصد خطأ ناشی از کالیبراسیون با لوله پیتوت و مانومتر،
- حداکثر ۱ درصد خطأ ناشی از برازش منحنی ولتاژ بر حسب سرعت،
- حداکثر ۰.۱۲ درصد خطأ 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 می باشد: (الف) تغییرات دما در حین کالیبراسیون که حداکثر یک درجه می باشد، مقدار خطای ایجاد شده ۰۰۰۳ درصد می باشد.
- (ب) تغییرات دما در حین آزمایش: تغییرات دما در حین آزمایش حداکثر دو درجه می باشد که مقدار خطای ایجاد شده ۰۰۴ درصد می باشد، خطای ناشی از تغییرات رطوبت و فشار محیط که ناچیز است [۲۰].

با در نظر گرفتن تمام عوامل فوق میزان خطای کل اندازه گیری سرعت لحظه‌ای در حین آزمایش ۴۰۰۳ درصد می باشد.

۹- نتیجه گیری

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی پارامترهای آماری موجود بین مقادیر مرتبه بالای سرعت یعنی ضریب چولگی و صافی، طول مقیاس کولموگروف و ... در دنباله‌ی یک مدل خودرو و در یک جریان شتابدار پرداخته شد. اثرات شتاب جریان در آهنگ و روند تغییرات پارامترهای مختلف دنباله مورد مطالعه قرار گرفت. از جمله نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- به موازات افزایش سرعت جریان تا موقعیت $y=8\text{mm}$ و در موقعیت طولی $x/h=0.5$ به تراکم سرعت لحظه‌ای بیشتر از سرعت متوسط، اضافه می گردد. جهش‌های منفی سرعت نیز شدیدتر می شود.
- پارامتر ضریب صافی برای غالب نقاط دنباله همواره مثبت است. به عبارتی سرعت لحظه‌ای خیلی از اوقات از سرعت متوسط فاصله زیادی گرفته و پرش اغتشاش های سرعت لحظه‌ای جریان زیاد است. آهنگ تغییرات ضریب صافی با گذشت زمان و افزایش سرعت و افزایش ارتفاع در موقعیت طولی $x/h=0.5$ کاهش می یابد. به عبارتی افزایش سرعت سبب کاهش در میزان افت و خیز های سرعت لحظه‌ای نسبت به سرعت متوسط می گردد.
- در کلیه موقعیت‌های دنباله شتاب جریان و افزایش سرعت سبب ایجاد گردابه‌هایی با اندازه کوچکتر می گردد. که این مساله سبب می گردد اثرات گردابه‌های بزرگ در ایجاد گردادیان فشار نامطلوب کمتر شده و به تبع آن مقادیر ضریب پسا نیز کاهش یابد.
- در قسمت‌های تحتانی و فوقانی ناحیه دنباله به دلیل وجود اثرات لایه‌های برشی ایجاد شده اضمحلال انرژی بیشتر است و این مساله سبب تشکیل گردابه‌هایی با اندازه کوچکتر می گردد.
- گذشت زمان و افزایش سرعت تاثیری در روند تغییرات پارامتر چولگی و ضریب صافی در دنباله نزدیک ندارد.
- روند تغییرات پارامتر چولگی در موقعیت‌های طولی مختلف در دنباله نزدیک به گونه است که از مرکز دنباله به سمت بالا و پایین مقادیر این پارامتر کاهش می یابد. به عبارتی بیشترین مقدار

- [6] Jens M. Sterlund & Arne V. Johansson, "Turbulence Statistics of Zero Pressure Gradient Turbulent Boundary Layers", 13th European Turbulence conference, Warsaw, September 2011.
- [7] Ahmed S. R., Ramm R. and Faltin G., Some Salient Features of the Time Averaged Ground Vehicle Wake, SAE Technical Paper Series 840300, Detroit, 1998.
- [8] Gilli P. and Chometon F. Modelling of Stationary Three-Dimensional Separated Air Flows around an Ahmed Reference Model, Third International Workshop on Vortex, ESAIM Proceedings, Vol. 7, No.10, pp.124 1999.
- [9] Hanaoka Y. And Kiyohira A., Vehicle Aerodynamic Development using PAMFLOW, 2003.
- [10] Gillieron P. and Spohn A., Flow Separations Generated by a Simplified Geometry of an Automotive Vehicle, 2007.
- [11] Lienhart H. and Stoecks 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, 2010.
- [12] 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. 2006-01-1042.
- [13] Javareshkiyan M. H., Shayesteh Sadafiany R., Azarkish A., Numerical and Experimental investigation of Aerodynamics forces on the base model of vehicle , SID, Vol. 18 No. 1, pp. 49-64 (1385 in Persian)
- [14] Watkins S., Vino G., The Effect of Vehicle Spacing on the Aerodynamics of Representative Car Shape, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96 1232-12393ED, Vol.96, No.3, pp.1232-1239, 2011.
- [15] Khoshnami Deshiri, M., Fathali, M., "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] Ardekani M. A., Farhani F., Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures, Flow Measurement and Instrumentation., pp.174-179, 2009.
- [17] [اردکانی محمد علی, جریان سنج سیم داغ. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, تهران ۱۳۸۵.]
- [18] Tunay T., Sahin B., Ozbolat V., Effects of rear slant angles on the flow characteristics of Ahmed body, Experimental Thermal and Fluid Science No.57, pp.165-176, 2014.
- [19] Lienhart H., Stoots, C., Becker, S., "Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (Ahmed model), Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering, 205, pp. 174-183, 2009.
- [20] Jorgensen Finn, E., How to measure turbulence with hot-wire anemometers, Dantec Dynamics, 2002.