

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

وحید برزنونی*

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

عبدالامیر بک خوشنویس

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

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی دینامیک جریان و اثرات 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 اینورتر که سبب تغییر در سرعت دورانی الکترو موتور تونل باد میشود، صورت گرفته است. نتایج نشان داد: در کلیه موقعیت های دنباله شتاب جریان و افزایش سرعت سبب ایجاد گردابه هایی با اندازه کوچکتر می گردند. 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 می یابد همچنین مقادیر پارامتر مذکور در دنباله دور عمدتاً بیشتر از دنباله نزدیک است. همچنین در قسمت هایی از دنباله که اثرات لایه های برشی وجود دارد اضمحلال انرژی بیشتر است و این مساله سبب تشکیل گردابه هایی با اندازه کوچکتر می گردد. **واژه های 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، $Re_x = \rho U_0 x / \mu$ که U_0 نوسان سرعت (rms) است، μ میکرو مقیاس تیلور و ν لزجت سینماتیکی است) در گذشته بطور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. جریان سنج سیم داغ می تواند اندازه گیری دقیقی از S ، با حلی که تاکنون با دیگر روشهای تجربی مطابقت داده نشده است، ارائه دهد. مشتق سرعت تحت تاثیر حرکت مقیاس های کوچک¹ (SSM) قرار می گیرد که تحلیل درست آن را مشکل می سازد. از طرفی، وضوح نمونه برداری زمانی سیگنال سرعت نیز بر روی اندازه گیری SSM تاثیر می گذارد. با استفاده از شبیه سازی عددی مستقیم حالت آشفته می توان به ارزیابی اثرات ناشی از فضای محدود و وضوح موقتی جریان سنج سیم داغ بکار گرفته شده در آزمایشات پرداخت. آشفته گی توسط اختلالات فشار و سرعت در میدان توزیع خواهد شد. خواص آماری نسبت به ناهمسانی حساس بوده و برای اندازه گیری

۱- مقدمه

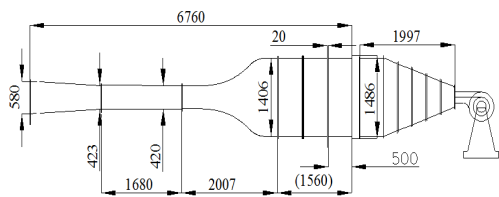
اگرچه آشفته گی یکی از مسائل بسیار قدیمی در حوزه مکانیک سیالات می باشد اما همچنان حل نشده باقی مانده است. این پدیده عموماً در اکثر مسائل مربوط به تبدیل انرژی، مباحث مربوط به جریان سیال، سیستم های انتقال و ... وجود دارد. روش ممکن جهت توصیف آشفته گی به کمک قوانین عمومی مکانیک پیوسته توسط رینولدز در اواخر قرن گذشته پایه گذاری شد. در این روش، میدان سرعت آشفته به دو مولفه تجزیه می شود که یکی مربوط به حرکت متوسط و دیگری مربوط به نوسانات وابسته به زمان سرعت سیال است. بنابراین منطقی ترین روش جهت توصیف آشفته گی مربوط به نظریه هایی است که بر پایه ی فرضیات آماری مرتبط با معادلات دینامیک جریان سیال شکل می گیرند. نظریه ی 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 ی خاص از نظر آماری می گردد. پیش بینی های نظریه برای چولگی و

¹ Small Scale Motion

است. خلیقی [۱۲] در آزمایش‌هایی نمودارهای شدت اغتشاشی و نمودارهای سرعت را برای یک نمونه خودرو به دست آورد. صدفیان و آذرخویش [۱۳] اثر چند پارامتر را در محاسبه ضریب پسا بررسی کردند. واتکینس [۱۴] نیز به بررسی تغییرات ضریب درگ و برآ دو مدل احمد پشت سر هم پرداخته است. از آنجا که تاکنون اثرات جریان شتابدار روی پارامترهای مختلف دنباله خودرو نظیر مقادیر مرتبه بالای اسکیننس، کورتوسیس و طول مقیاس کولموگروف به صورت تجربی مورد بررسی قرار نگرفته است و همچنین نیاز به فهم و درک بیشتر دنباله مغشوش خودرو در جریان شتابدار و بررسی دنباله در جریان ناپایا احساس می‌شود، لذا در این تحقیق سعی بر آن است تا با ارائه نمودارهای مختلف روند تغییرات این پارامترها و اثرات شتاب جریان را به طور جزئی مورد بررسی قرار دهیم. ایده انجام این کار از چندین مقاله بویژه [۱۵] گرفته شده است. در مرجع [۱۵] 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- روش آزمایش

کلیه آزمایشات با استفاده از تونل باد مدار باز دمشی در دانشگاه حکیم سبزواری انجام شده است. شکل ۱ تونل باد فوق را نشان می‌دهد. این تونل باد دارای مقطع آزمون به ابعاد $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ و طول 180cm بوده، حداکثر شدت اغتشاش در محفظه آزمایش 0.1% و حداکثر سرعت 30m/s است. کنترل سرعت جریان هوا با استفاده از کنترل دور دمنده در بازه ۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه قابل تنظیم است. برای افزایش سرعت جریان ورودی از یک دستگاه اینورتر استفاده شده است که به طور یکنواخت سبب افزایش دور موتور دمنده دستگاه تونل باد با توجه به زمان تعریف شده، می‌شود. اساس کار اینورتر بدین صورت است که با دریافت ولتاژ متغیر ورودی که توسط PLC ارسال می‌شود، با اعمال جریان با فرکانس متغیر می‌توان سرعت یک سیستم را کنترل کند. PLC تصمیم می‌گیرد که در هر لحظه سرعت موتور چقدر باشد این تصمیم با استفاده از برنامه نوشته شده در آن اتخاذ می‌گردد به منظور بدست آوردن جریان مناسب در اتاق آرامش این تونل باد، تعداد ۴ عدد توری قرار گرفته است.



شکل ۱- نمایی از تونل باد آزمایشگاه

سرعت جریان ورودی از ۰ تا حدود ۳۰ متر بر ثانیه و در مدت زمان ۱۰ ثانیه و به طور خطی افزایش می‌یابد. شتاب جریان ورودی بر این اساس ۳ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن از جریان سنج سیم داغ استفاده شده است. پراب جریان سنج سیم داغ از نوع یک بعدی بوده و سنسور آن از نوع تنگستن ۵ میکرونی می‌باشد و داده‌های اندازه‌گیری شده توسط

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 ضریب صافی) 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 [۱] آمده است. ویر والی و ورهت [۲] در سال ۱۹۸۹، آزمایش تجربی انجام دادند و نشان دادند که خواص آماری نظیر چولگی و ضریب صافی در لایه اختلاط، از توزیع نرمال فاصله می‌گیرند. آن‌ها مشاهده کردند که مکان بیشینه چولگی و ضریب 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 منووی [۳] در سال ۲۰۰۸ نتایج تجربی مشابه ویروالی و ورهت را با اعداد رینولدز بالاتر و همچنین با استفاده از مدل شبیه‌سازی 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].

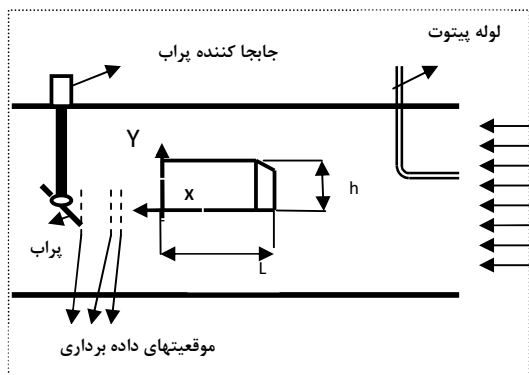
مجموعه نتایج بدست آمده محققان را برآن داشت که آزمایشات مشابهی در جریان‌های آزاد جت انجام دهند [۵]. برای این کار آنها از پراب جریان سنج سیم داغ X برای اندازه‌گیری ممان‌های سرعت تا ممان مرتبه شش استفاده کردند و به ارزیابی مقادیر چولگی و ضریب صافی پرداختند.

جانسون و همکاران برای لایه مرزی با گرادیان فشار صفر، پارامترهای اغتشاشی سرعت را در بازه اعداد رینولدز $27300 < Re_0 <$ ۲۵۳۰ 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 پراب 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 شده است. 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 کرده است. 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 به‌طور عموم محدود به تغییرات ضریب پسا بوده است. آزمایش‌های دقیقی بر روی این مدل توسط [۱۰-۱۱] انجام گرفته و نتیجه‌های تجربی مختلفی نظیر بردارهای سرعت، تنش‌های رینولدز و... توسط LDA اندازه‌گیری و ثبت شده

¹ Matovic

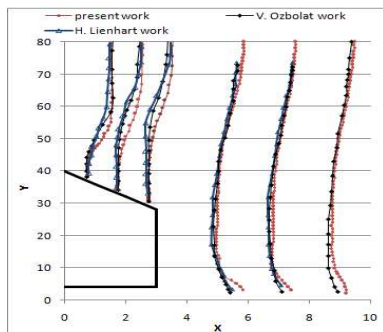
² Laser - Doppler



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 مورد مطالعه در عدد رینولدز ۶۴۰۰۰ 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 ازبلات و همکارانش [۱۸] (رینولدز ۱۴۰۰۰) و همچنین لین هرت و همکارانش [۱۹] (رینولدز ۷۸۰۰۰) که حدوداً در محدوده عدد رینولدز یکسانی صورت گرفته، مشاهده می شود.

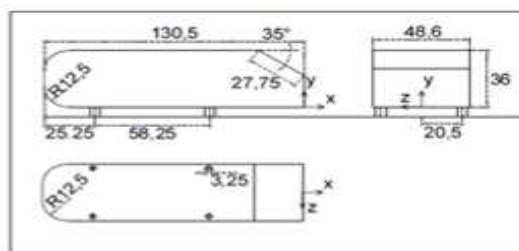
۴- بحث و بررسی نتایج

از آنجایی که ناهمسانی در ممان های مرتبه بالا، بهتر مشخص می شود. بنابراین برای رصد کردن ناهمسانی میدان از ممان های شمال سوم و چهارم موسوم به اسکینوس (ضریب چولگی) و کورتوسیس (ضریب صافی) استفاده می شود. اسکینوس (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 جابجایی پرآب 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 پرآب، غیر از مؤلفه اصلی جریان دو مؤلفه دیگر سرعت صفر می باشند. ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ تابعی از اندازه بردار سرعت و زاویه جریان نسبت به پرآب می باشد. سرعت موثر نیز بر اساس تابعی از اندازه سرعت و تابع حساسیت به زاویه (برخورد جریان به پرآب) تعریف می شود. تابع حساسیت به زاویه دارای ضرایبی است که از طریق کالیبراسیون جهت مشخص می شود. هنگامی که جریان نسبت به پرآب منحرف می شود، ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ که تابعی از زاویه می باشد تغییر می یابد. در نتیجه سرعت موثر 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 صرفاً 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 دوبعدی 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 مورد آزمایش عبور می کند). از اثرات زمین در این تحقیق صرف نظر شده است. با توجه به ضریب اندازه Blockage به عنوان یک پارامتر مهم، اولین نکته در ساخت مدل است. مقدار پیشنهادی برای مدل های آزمایشگاهی کمتر از ۰/۱ 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 مقیاس 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

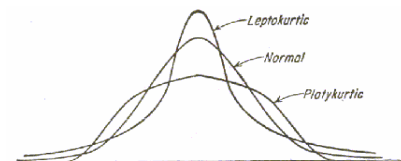
$$Y = -40, -38, \dots, 78, 80 \text{ و ارتفاعی } X/h = 0.5, 1, 1.5, \dots, 23, 24$$



این پارامترها مطابق روابط زیر تعریف می گردند:

$$S_u = 1/N \sum_{i=1}^N \frac{(u_i(t) - \bar{U})^3}{\sigma_u^3} \quad (1)$$

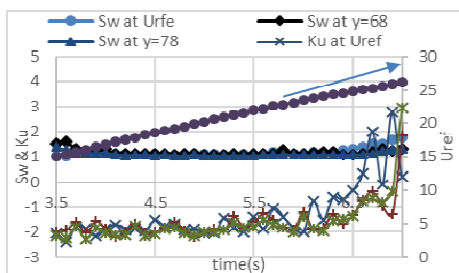
$$K_u = 1/N \sum_{i=1}^N \frac{(u_i(t) - \bar{U})^4}{\sigma_u^4} \quad (2)$$



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

به طور کلی نتایج بدست آمده در دو قسمت عمده 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 کولموگروف و .. در موقعیت های 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 موقعیت های 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 می دهد. مقادیر چولگی برای جریان شتابدار ورودی و همچنین جریان خارج از دنباله همواره مقداری مثبت است. به عبارتی جریان ورودی به گونه است که همواره مقادیر لحظه ای سرعت بیشتر از مقدار متوسط است و البته جهش های منفی در جریان رخ می دهد. با افزایش سرعت تراکم مولفه های "سرعت لحظه ای بیشتر از سرعت متوسط" بیشتر می گردد. البته جهش های منفی در مقدار سرعت نیز شدید تر است. (تعداد جهش های منفی کاهش یافته اما شدت آنها بیشتر می گردد.)



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 می دهد. از سطح زیرین مدل تا موقعیت ارتفاعی $y=8\text{mm}$ با افزایش ارتفاع مقادیر چولگی افزایش می یابد. به عبارتی در موقعیت های مذکور تراکم سرعت لحظه ای عمدتاً بیشتر از سرعت متوسط است. و البته آهنگ تغییرات چولگی نیز با گذر

آشفتنگی ایزوتروپی و همگن^۱ (HIT) با یک چولگی منفی در مشتق سرعت $\frac{\partial u_i}{\partial x_i}$ مشخص می شود که τ_{ij} مولفه نوسانی سرعت در امتداد x_i است. در آشفتنگی ایزوتروپی و همگن، چولگی (S)، بیانگر میزان تولید گردابی بواسطه ی انبساط گردابه می باشد و مقادیر صفر آن از غیرخطی بودن معادله ی ناویر- استوکس ناشی می شود.

مولفه اغتشاش سرعت u ، که در جهت ناهمگن میدان می باشد 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 می آورد. مقدار ممان های نرمال که با زمان تغییر می کنند، میزان ناهمسانی را نشان می دهند. توزیع اسکینوس ابزار اصلی در تشخیص میزان تناوب و ناهمسانی است. اسکینوس در حقیقت معیاری از وجود یا عدم تقارن تابع توزیع است. برای یک توزیع کاملاً متقارن اسکینوس (ضریب چولگی) صفر و برای یک توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر بالاتر اسکینوس مثبت و برای توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر کوچکتر مقدار اسکینوس (ضریب چولگی) منفی است که در اینجا بیان کننده مقدار تقارن سرعت لحظه ای نسبت به سرعت متوسط جریان سیال است. زمانی که اسکینوس (ضریب چولگی) غیر صفر است، داده ها نسبت به مقدار متوسط تقارن ندارند و داده ها را نمی توان توسط یک توزیع نرمال مدل کرد، نوسانات مولفه افقی سرعت و شدت نوسانات کوچک است.

اسیلوگرام^۲ در اصل، سرعت لحظه ای را نشان می دهد که اکثر داده ها در آن ناحیه از سرعت متوسط بیشتر هستند. اما پرشهای منفی وجود دارند که سبب کاهش سرعت متوسط می گردند. میزان پرش سرعت لحظه ای با محاسبه ی میزان اسکینوس (ضریب چولگی) مشخص می شود.

کورتوسیس (صافی) همان ممان مرکزی چهارم^۳ است. به میزان کشیدگی یا پخی منحنی توزیع چگالی احتمال نسبت به منحنی توزیع چگالی گوس^۴ کورتوسیس (ضریب صافی) گفته می شود. در واقع میزان اوج ناگهانی نمودار توزیع احتمال نسبت به توزیع نرمال، توسط میزان صافی بیان می شود. در این صورت صافی مثبت یا منفی به ترتیب بیانگر منحنی چگال کشیده تر یا پخ تر نسبت به توزیع چگالی گوس می باشند (شکل ۴). در حالتی که میزان صافی مثبت باشد (Leptokurtic)، دنباله های توزیع داده ها طولانی بوده و تغییرات دامنه داده ها نسبت به زمان بیشتر است. بنابراین سرعت لحظه ای در بسیاری از مواقع از سرعت متوسط فاصله گرفته و پرش و اغتشاشات سرعت لحظه ای جریان زیاد می شود. در حالتی که میزان صافی منفی باشد (Platykurtic) سرعت لحظه ای کمتر از سرعت متوسط است ولی دنباله های توزیع چگالی حجیم تر می باشند. برای منحنی توزیع چگالی گوس مقدار کورتوسیس (ضریب صافی) ۳ است. چنانچه مقادیر کورتوسیس (ضریب صافی) کمتر از ۳ باشد منحنی چگال تر و در غیر اینصورت منحنی تیز تر می باشد.

¹ Homogeneous Isotropic Turbulence

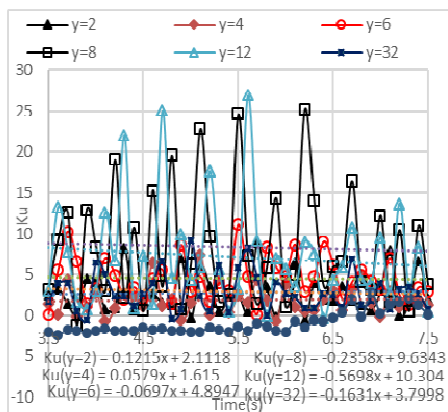
² Oscillogram

³ Forth Central Moment

⁴ Gaussian Density Function

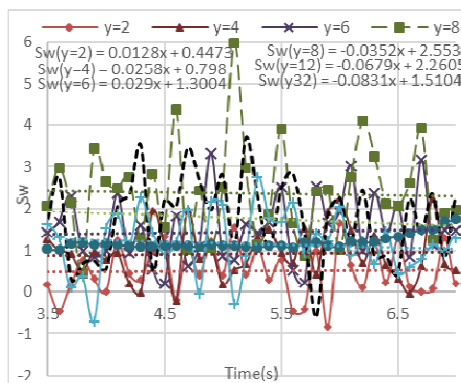
کولموگروف شکسته شدند، انرژی خود را به وسیله اضمحلال لزج به گرما تبدیل می کنند. تحلیل و بررسی پارامتر فوق علاوه بر فهم بهتر هندسه جریان در دنباله مدل در انتخاب یک شبکه محاسباتی مناسب به منظور حل دقیق میدان جریان آشفته دنباله با استفاده مستقیم از معادلات بقا به طوری که جزئی ترین پدیده ها نیز مد نظر قرار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

شکل ۸ مقادیر طول مقیاس 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 گردند. کوچکترین گردابه ها در قسمت های تحتانی دنباله و غالباً در موقعیت های $y=2,4mm$ و در قسمت های فوقانی در موقعیت $y=32mm$ تشکیل می شوند. آهنگ کاهش اندازه ادی ها در جریان شتابدار تا موقعیت $y=8mm$ 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 $y=8mm$ به بعد این روند معکوس است. به بیان دیگر از این موقعیت به بعد با افزایش سرعت تمایل به تشکیل گردابه های 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 گردند. 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 $y=8mm$ 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 پخ 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 $y=8,12mm$ 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 $y=12mm$ 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.

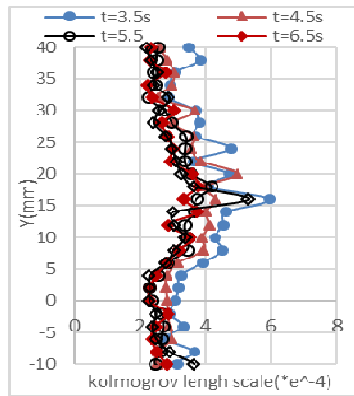


شکل ۶- مقادیر چولگی در دنباله مدل برای موقعیت های ارتفاعی مختلف و در موقعیت طولی $x/h=0.5$ با گذر زمان

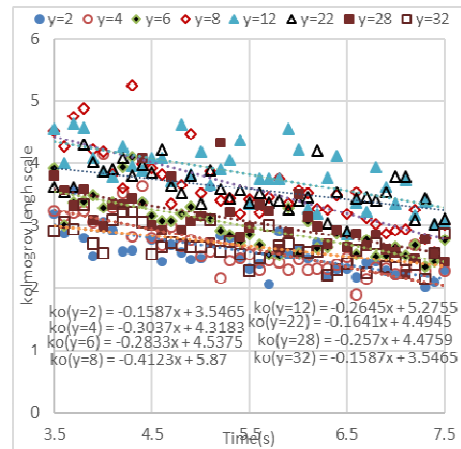
از آنجایی که جریان در دنباله مدل جریانی آشفته است که شامل ادی های در هم پیچیده و در اندازه های مختلف می باشد لذا به منظور در ک بهتر اندازه کوچکترین ادی های شکل گرفته در دنباله مدل بایستی گردند. اندازه کوچکترین ادی ها بر حسب طول مقیاس کولموگروف تعیین می باشد. وی ثابت نمود:

$$\delta = \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/4} \quad (3)$$

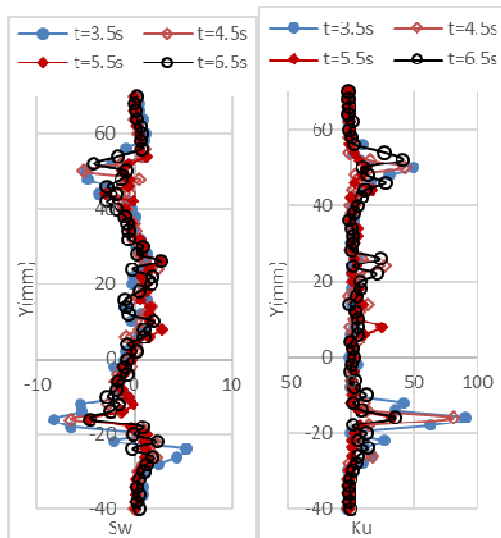
که در آن δ لزجت سینماتیک و ϵ آهنگ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته است. بعد از آنکه ادیها به اندازه هایی در طول مقیاس



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



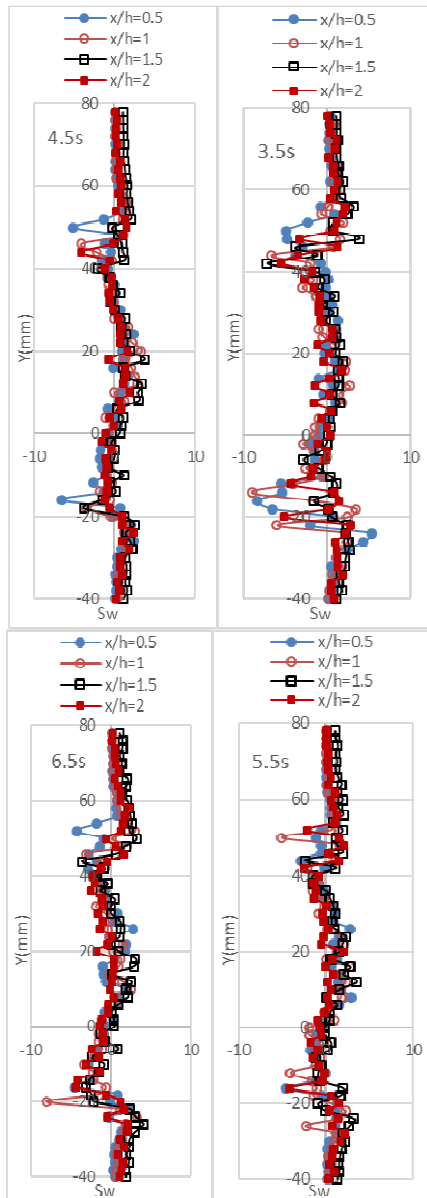
شکل ۸- مقادیر طول مقیاس کولموگروف در موقعیت های ارتفاعی مختلف در دنباله و در موقعیت طولی $x/h=0.5$ ، با گذر زمان



شکل ۱۰- مقادیر چولگی و ضریب 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 لحظه ای سرعت در پشت مدل بیشتر از مقدار متوسط است. و جهش های منفی وجود دارد. که این مساله بیانگر مغشوش 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 مقیاس کولموگروف 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 سریعتر انرژی 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 اضمحلالی 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 انرژی بیشتر است و این مساله سبب تشکیل گردابه هایی با اندازه کوچکتر می گردد و در مقابل در محدوده ارتفاعی $y=5-25mm$ 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 ضریب 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 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 ضریب صافی نیز اوج هایی 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 تأثیری در روند تغییرات پارامتر های مذکور ندارد.

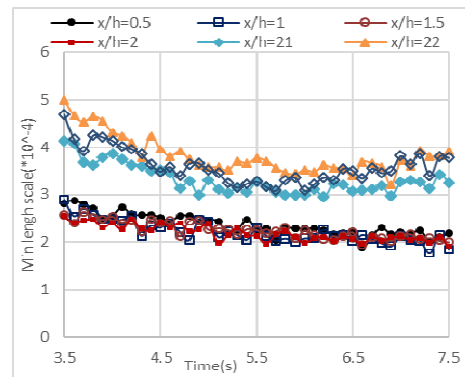


شکل ۱۱- مقادیر چولگی در چند موقعیت زمانی و در موقعیت های طولی مختلف

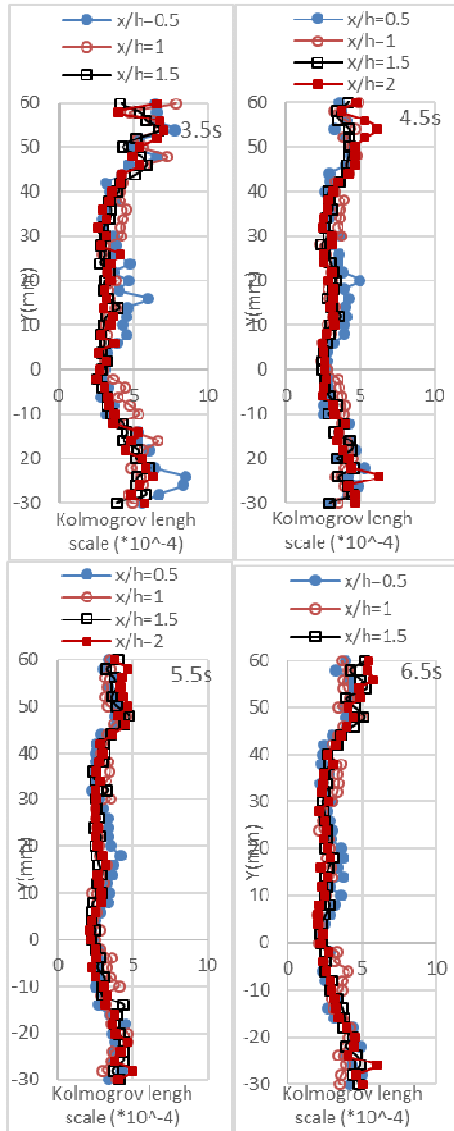
فوقانی سبب کاهش تناوب ، به تبع آن سبب کاهش اختلاط می گردد. که با رسیدن به ناحیه جریان برشی افزایش ناگهانی در مقدار این کمیت اتفاق می افتد.

شکل ۱۲ مقادیر ضریب صافی را در دنباله مدل و در موقعیت های طولی مختلف و برای جریان شتابدار نشان می دهد. پارامتر مذکور در قسمت های تحتانی و فوقانی دنباله به دلیل اثرات لایه های برشی جدا شده دارای جهش های شدیدی است. غالباً مقادیر این پارامتر مثبت 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 نسبت 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 پرش های مثبت 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. و 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 ۱۳- مقادیر طول مقیاس کولموگروف در دنباله نزدیک مدل و در چند زمان مختلف در حین افزایش سرعت

۵- تحلیل خطا

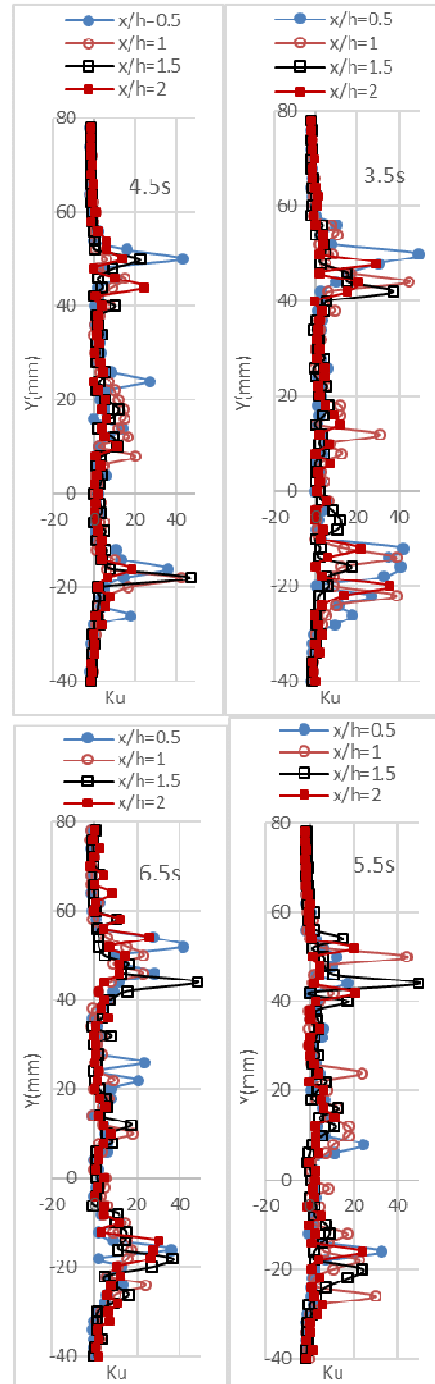
تاثیر خطایی که هر پارامتر روی سرعت می گذارد از رابطه زیر بدست می آید که با عنوان عدم قطعیت استاندارد نسبی بیان می شود [۲۰].

$$Error(\%) = \frac{1}{k} * \frac{1}{u} * \Delta y_i \quad (۴)$$

k ضریب همگرایی
 $\frac{1}{u} * \Delta y_i$ انحراف معیار

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

$$Error(\%) = 2 \sqrt{\sum (\frac{1}{k} * \frac{1}{u} * \Delta y_i)^2} \quad (۵)$$



شکل ۱۴- مقادیر ضریب صافی در چند موقعیت زمانی و در موقعیت های طولی مختلف

چولگی در مرکز دنباله اتفاق می افتد.

- 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

b	پهنای مدل
skewness	ضریب چولگی
flatness	ضریب صافی
p(x)	تابع توزیع چگالی احتمال
h	ارتفاع مدل خودرو
l	طول خودرو
p_t	فشار کلی
p_s	فشار استاتیک
U	سرعت جریان آزاد
u, v, w	مؤلفه های سرعت
u', v', w'	مؤلفه های اغتشاشی سرعت
x	فاصله از انتهای خودرو
علامت یونانی	
ρ	چگالی، kg/m ³
زیرنویس	
W	مقادیر در دنباله
∞	مقادیر در جریان آزاد
بالانویس	
*	حالت بدون بعد

۸- مراجع

- [1] Durst F., Jovanović J. and Kanevče 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 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 صرف نظر 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 ۰.۰۰۳ درصد می باشد. ب) تغییرات دما در حین آزمایش: تغییرات دما در حین آزمایش حداکثر دو درجه می باشد که مقدار خطای ایجاد شده ۰.۰۴ 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 لحظه ای در حین آزمایش ۴.۰۳ درصد می باشد.

۶- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به بررسی پارامترهای آماری موجود بین مقادیر مرتبه بالای سرعت یعنی ضرایب چولگی و صافی، طول مقیاس کولموگروف و ... در دنباله ای 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 لحظه ای بیشتر از سرعت متوسط، اضافه می گردد. جهش های منفی سرعت نیز شدیدتر می شود.
- پارامتر ضریب صافی برای اغلب نقاط دنباله همواره مثبت است. به عبارتی سرعت لحظه ای خیلی از اوقات از سرعت متوسط فاصله زیادی گرفته و پرش اغتشاش های سرعت لحظه ای 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 لحظه ای نسبت به سرعت متوسط می گردد.
- در کلیه موقعیت های دنباله شتاب جریان و افزایش سرعت سبب ایجاد گردابه هایی با اندازه کوچکتر می گردند. که این مساله سبب می گردد اثرات گردابه های بزرگ در ایجاد گردادیان فشار نامطلوب کمتر شده و به تبع آن مقادیر ضریب پسا نیز کاهش یابد.
- در قسمت های تحتانی و فوقانی ناحیه دنباله به دلیل وجود اثرات لایه های برشی ایجاد شده اضمحلال انرژی بیشتر است و این مساله سبب تشکیل گردابه هایی با اندازه کوچکتر می گردد.
- گذشت زمان و افزایش سرعت تأثیری در روند تغییرات پارامتر چولگی و ضریب صافی در دنباله نزدیک ندارد.
- روند تغییرات پارامتر چولگی در موقعیت های 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 Stooks 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 Sadafiyani R., Azarkhish 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., Vano 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 Deshri, 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.
- [۱۷] 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., Stooks, 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] Jørgensen Finn, E., How to measure turbulence with hot-wire anemometers, Dantec Dynamics, 2002.