

# بررسی تجربی تاثیر اندازه شتاب جریان روی پارامترهای دنباله و ضریب پساى یک مدل خودرو در جریان شتابدار

وحید برزنونی\*

دکتری مهندسی مکانیک، شرکت ملی گاز ایران، شرکت گاز خراسان رضوی، اداره گاز ناحیه سبزوار

عبدالامیر بک خوشنویس

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

## چکیده

در این پژوهش، به مطالعه تاثیر اندازه شتاب جریان روی پروفیل های سرعت و آشفتگی دنباله نزدیک و دور و همچنین تغییرات ضریب پساى یک مدل خودرو پرداخته شده است. همچنین آهنگ تغییرات پارامترهای مذکور در جریان شتابدار با شتابهای مختلف بررسی شده است. به منظور شبیه سازی جریان سیال از تونل باد مدار باز و دمشی استفاده شده است که حداکثر آشفتگی اسمی و سرعت برای این دستگاه به ترتیب ۰/۱٪ و ۳۰ m/s می باشد. افزایش سرعت به طور پیوسته، با چند شتاب مختلف و توسط یک دستگاه اینورتر صورت گرفته است. نتایج نشان می دهد: هندسه دنباله شکل گرفته مشخص و مستقل از شتاب جریان ورودی است، همچنین مستقل از شتاب جریان ورودی با گذشت زمان مقادیر نقصان سرعت در دنباله نزدیک و دور با شدت و ضعف کاهش می یابد. با افزایش شتاب جریان ورودی مولفه مومنتوم و آشفتگی ضریب پسا افزایش می یابد. جریان با بیشترین شتاب بیشترین نرخ تغییرات مولفه مومنتوم ضریب پسا را دارد. کمترین مقدار ضریب پسا غالباً در جریان با کمترین شتاب رخ می دهد که تا حدودی به مقادیر متناظر در جریان با سرعت ثابت برابر است.

واژه های کلیدی: ضریب پسا، مدل خودرو، جریان شتابدار، نرخ تغییرات، توربولانس.

## Experimental Investigation of the Effect of Flow Acceleration Magnitude on Wake Parameters and Drag Coefficient of a Model Vehicle in Accelerated Flow

V. Barzanooni  
A. Bak Khoshnevis

Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University., Sabzevar, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University., Sabzevar, Iran

### Abstract

In the present research, effects of flow acceleration magnitude on velocity profiles, near-wake and far-wake turbulences, and drag coefficients of a model vehicle are studied. Moreover, rate of changes in the mentioned parameters in an accelerated flow at various accelerations was considered. An open-circuit blowing wind tunnel was used for fluid simulation, whose maximum nominal turbulence and velocity were 0.1% and 30 m/s, respectively. Velocity was increased continuously at different accelerations using an inverter device. The results indicate that, geometry of the developed wake is consistent and independent of inlet flow acceleration. Furthermore, with the passage of time and increasing velocity, near-wake and far-wake velocity defects decreased largely and slightly, respectively. With increasing the inlet flow acceleration, momentum and turbulence components of drag coefficient increased. By enhancing the flow acceleration, drag coefficient increased. The lowest value of the drag coefficient often occurs in the current with minimal acceleration, which is approximately equal to the corresponding values in the flow at constant speed.

**Keywords:** Drag coefficient, vehicle model, Accelerated flow, Rate of change, turbulence.

### ۱- مقدمه

مطالعات تجربی و عددی بسیاری بر روی مدل های مختلف خودرو انجام شده است. از جمله این پژوهش ها می توان به مقاله احمد و همکاران [۲] اشاره کرد. وی مدل ساده ای شبیه به یک خودرو را در نظر گرفته و با آزمایش مدل هایی با زاویه های مختلف شیشه عقب، نتایج حاصله را ثبت کرده است. برخی از محققین نظیر جیلی و هاناوکا [۳-۴] مدل هایی شبیه به مدل اخیر را به صورت عددی، شبیه سازی کرده اند. از آنجا که نتیجه های ثبت شده توسط احمد محدود است، معیار مقایسه این کارهای عددی نیز به طور عموم محدود به تغییرات ضریب پسا بوده است. کاسترو [۵] به روش عددی به بررسی تغییرات لحظه ای نیروی پسا با گذشت زمان و در جریان پایا پرداخت و دریافت انحراف مقدار لحظه ای درگ

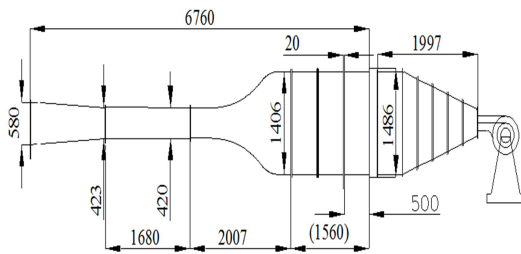
از آنجایی که روش های نظری و محاسبات هنوز با طراحی عملی مهندسی فاصله دارد، آزمایش با دستگاه تونل باد اغلب تنها روشی است که برای تعیین درست پارامترهای جریان، از جمله شدت آشفتگی و تغییرات سرعت در دنباله مدل به کار می رود. بدین منظور در این تحقیق به بررسی تجربی دنباله خودرو در یک جریان ناپایا پرداخته و روند و میزان تغییرات سرعت و شدت آشفتگی جریان در دنباله خودرو نشان داده شده است. در روش های تجربی نیاز به مدل، تجهیزات آزمایش و دستگاه های اندازه گیری است و به طور معمول پرهزینه تر از روش های عددی و تحلیلی است. در روش های تجربی مهم ترین وسیله مورد استفاده تونل باد است که توسط آن می توان به هر یک از پارامترهای فوق دست یافت. این در حالی است که به طور دائم تکنیک های نوینی برای آنها در حال ارائه است [۱]. تاکون

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

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۶

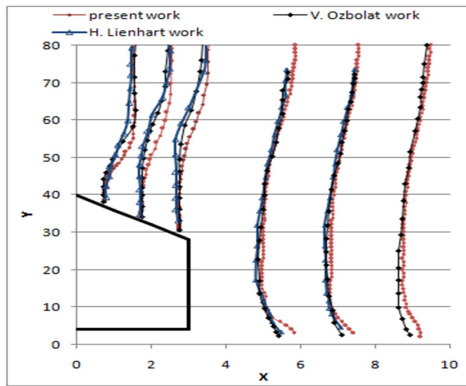
شود. کلیه آزمایشات با استفاده از تونل باد مدار باز دمشی در دانشگاه حکیم سبزواری انجام شده است. شکل ۱ تونل باد فوق را نشان می‌دهد. این تونل باد دارای مقطع آزمون به ابعاد  $40\text{cm} \times 40\text{cm}$  و طول  $180\text{cm}$  بوده، حداکثر شدت اغتشاش در محفظه آزمایش  $0.1\%$  و حداکثر سرعت  $30\text{m/s}$  است. کنترل سرعت جریان هوا با استفاده از کنترل دور فن در بازه  $0$  تا  $30$  متر بر ثانیه قابل تنظیم است. برای افزایش سرعت جریان ورودی از یک دستگاه اینورتر استفاده شده است. جریان ورودی با شتابهای مختلف  $0.3$ ،  $1/5$ ،  $1$  و  $0.5$  متر بر مجذور ثانیه وارد اتاق آزمایش می‌شود. شکل ۲ پروفیل های سرعت جریان ورودی با شتابهای مختلف را نشان می‌دهد. در هر مورد شتاب جریان ثابت و سرعت به طور خطی با زمان تغییر می‌کند. به منظور بدست آوردن جریان مناسب در اتاق آرامش این تونل باد، تعداد  $4$  عدد توری قرار گرفته است. برای اندازه گیری 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 حسگر آن از نوع تنگستن  $5$  میکرونی می‌باشد و داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ از طریق کارت  $A/D$  به رایانه ارسال شده و توسط نرم افزار مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین به منظور اصلاح نمودن تاثیرات دما بر روی داده‌های جریان سنج سیم داغ، دمای هوا اندازه‌گیری شده و از طریق کارت  $A/D$  به رایانه ارسال می‌شود. به منظور جابجایی پراب برای اندازه‌گیری توزیع جریان هوا از مکانیزم انتقال دهنده استفاده می‌شود و این مکانیزم دارای دقت  $0.1$  میلی‌متر در جهت محورهای مختصات می‌باشد [۱۸]. حسگر یک بعدی پس از کالیبره شدن صرفاً مقادیر مولفه سرعت در جهت غالب جریان را اندازه گیری می‌نماید. [۱۹].



شکل ۱- نمایی از تونل باد آزمایشگاه

از مقدار متوسط آن حدود  $0.13\%$  است. همچنین جابجایی جانبی و زاویه ای مدل مورد مطالعه را نیز بررسی کرد. کوهری و یاماناشی [۶] به اندازه گیری رفتار دنباله ناپایا برای زوایای شیب انتهایی مختلف به منظور یافتن رابطه بین عدد استروهال و زاویه شیب انتهایی پرداختند و دریافتند عدد استروهال گردابه فوقانی حدود  $0.1$  و ثابت است. استروهال گردابه‌های تحتانی با افزایش زاویه رشد کرده و نهایتاً به  $0.6$  میرسد. هاگو [۷]، به شبیه سازی گردابه‌های شکل گرفته در دنباله یک مدل احمد در رینولدز پایین پرداختند و نشان دادند تا زمانی که جدایش در قسمت انتهایی مدل رخ دهد امکان کاهش رینولدز و بدست آوردن نتایج مطابق با رینولدزهای واقعی وجود دارد. لیوالویز [۸]، به بررسی ساختار جریان جدا شده روی جسم و هم ساختار گردابی در دنباله نزدیک مدل پرداخت. وی نشان داد در قسمت جلو مدل ناحیه جدایش توسط ریزش گردابه های نوسانی گسترش می‌یابد. خوشنویس و برزنونی [۹] به بررسی تجربی دینامیک جریان و پارامترهای مرتبه بالای سرعت در دنباله یک مدل خودرو به طور مستقل و حالتی که در دنباله یک مدل تریلر قرار دارد، پرداختند. و اثرات جریان اغتشاشی دنباله مدل جلویی را روی مدل خودرو نشان دادند. متیو و پاتریک [۱۰] به تحلیل جریان و بررسی اثرات گردابه های در دنباله یک مدل هندسی پشت مربعی پرداختند. توماس و میچارد [۱۱] به بررسی کنترل فعال جریان در پشت یک مدل دو بعدی خودرو پرداختند. گلیرون<sup>۴</sup> [۱۲] به آشکارسازی جریان و بررسی مکان جدایش جریان پرداخت. برزنونی و خوشنویس [۱۳] به بررسی اثرات کنترل فعال جریان در دنباله مدل مذکور پرداختند و نشان دادند اعمال جت جریان در مناسب‌ترین موقعیت سبب کاهش حدود  $21\%$  در ضریب پسا می‌گردد.

واتکینس [۱۴] نیز به بررسی تغییرهای ضریب پسا و لیفت دو مدل احمد پشت سر هم پرداخته است. متیو و پاتریک [۱۵] به تحلیل جریان در دنباله یک مدل هندسی پشت مربعی پرداختند و به بررسی اثرات گردابه های تشکیل شده در پشت مدل پرداختند. توماس و میچارد [۱۶] به بررسی کنترل فعال جریان در پشت یک مدل دو بعدی خودرو پرداختند. گلیرون [۱۷] به آشکارسازی جریان و بررسی مکان جدایش جریان پرداخت. اما از آنجا که بیشتر تحقیقات در جریان های پایا انجام شده است در این تحقیق سعی شده مشخصه های جریان در دنباله مدل خودرو در جریان شتابدار (با شتاب ثابت) اندازه گیری بررسی و ارائه شود. همچنین اثرات اندازه شتاب جریان روی پارامترهای مختلف در دنباله و همچنین ضریب پسا مدل بررسی



شکل ۴- توزیع سرعت متوسط در دنباله مدل برای موقعیت‌های مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق قابل قبولی بین نتیجه‌های حاضر با نتیجه‌های ازبلات و همکارانش [۲۰] (رینولدز ۱۴۰۰۰) و هم‌چنین لین‌هرت و همکارانش [۲۱] (رینولدز ۷۸۰۰۰) که حدوداً در محدوده رینولدز یکسانی صورت گرفته، مشاهده می‌شود.

### ۳- معادله‌های حاکم

معادله‌هایی که برای اندازه‌گیری نیروی پسا استفاده می‌شوند به-راحتی با اعمال قانون‌های مومنتموم و پایستاری جرم در یک حجم کنترل، قابل استخراج هستند. گلدستون [۲۲] در سال ۱۹۳۶ نتیجه-های تحقیق‌های خود در رابطه با بررسی اثرهای شدت اغتشاش‌ها و نوسان‌های جریان سیال در محاسبه ضریب پسا را منتشر کرد. چائو [۲۳] تحقیق‌های بسیار زیادی در بررسی اثرهای اغتشاش در محاسبه ضریب پسا داشته است. راجاکوپالان [۲۴] نیز اثرات اغتشاش و نوسان-های جریان را مورد بررسی قرار داده و به نتیجه‌های جالبی رسیده است. آنتونیا [۲۵] تحقیق‌های بسیاری برای بررسی اثرهای شدت اغتشاش‌های جریان در اندازه‌گیری نیروی پسا انجام داده است. ون دام [۲۶] معادله‌ای برای محاسبه ضریب نیروی پسا به‌دست آورد که در آن ترم‌های تنش‌های رینولدزی و شدت اغتشاش‌های جریان وجود داشتند اما از تغییرات چگالی جریان و عبارت لزج صرف‌نظر شده بود. کل معادله به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

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

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

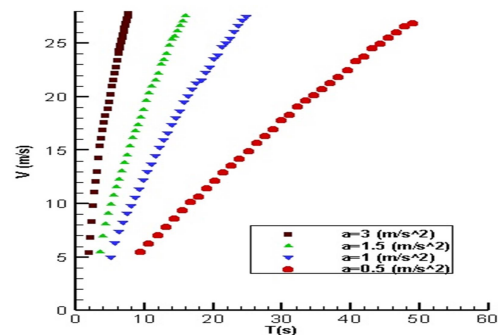
۲- مومنتموم:  $2 \int \frac{\bar{u}}{U_\infty} \left( 1 - \frac{\bar{u}}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{l}\right)$

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

طبق تحلیل گلدستون داریم:

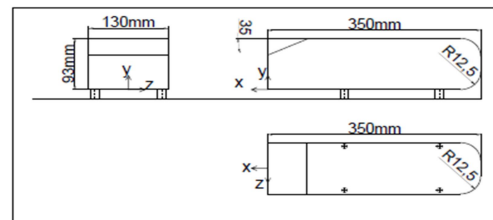
$$C_d = 2 \int \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \right) d\left(\frac{y}{l}\right) + \frac{1}{3} \int \frac{(\bar{v}^2 + \bar{w}^2 + \bar{u}'^2)}{U_\infty^2} d\left(\frac{y}{l}\right) \quad (2)$$

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



شکل ۲- جریان شتابدار ورودی به محفظه آزمایش

مدل مورد مطالعه در این تحقیق مدل پیشنهادی احمد با زاویه انتهایی ۳۵ درجه است. مدل مورد آزمایش دوبعدی است، به‌گونه‌ای که جریان فقط در امتداد محفظه آزمایش جریان دارد. 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 مدل‌های آزمایشگاهی کمتر از 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 و ضریب مقیاس مدل ۰/۱۴ می‌باشد. سایر مشخصات و ابعاد مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. داده برداری‌ها در پشت مدل در فواصل طولی  $X/h=0/5, 1, 1/5, \dots, 23$  و ارتفاعی  $Y=40, -38, \dots, 78, 80$  تکنیک‌های عملی برای محاسبه ضریب نیروی پسا به چند روش تقسیم می‌شود. روش به‌کار رفته در این تحقیق استفاده از روش Wake-Survey است. اساس این روش بر اختلاف مومنتموم در پشت و جلو جسم است. در این تحقیق از جریان سنج سیم داغ یک بعدی برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان استفاده شده است.

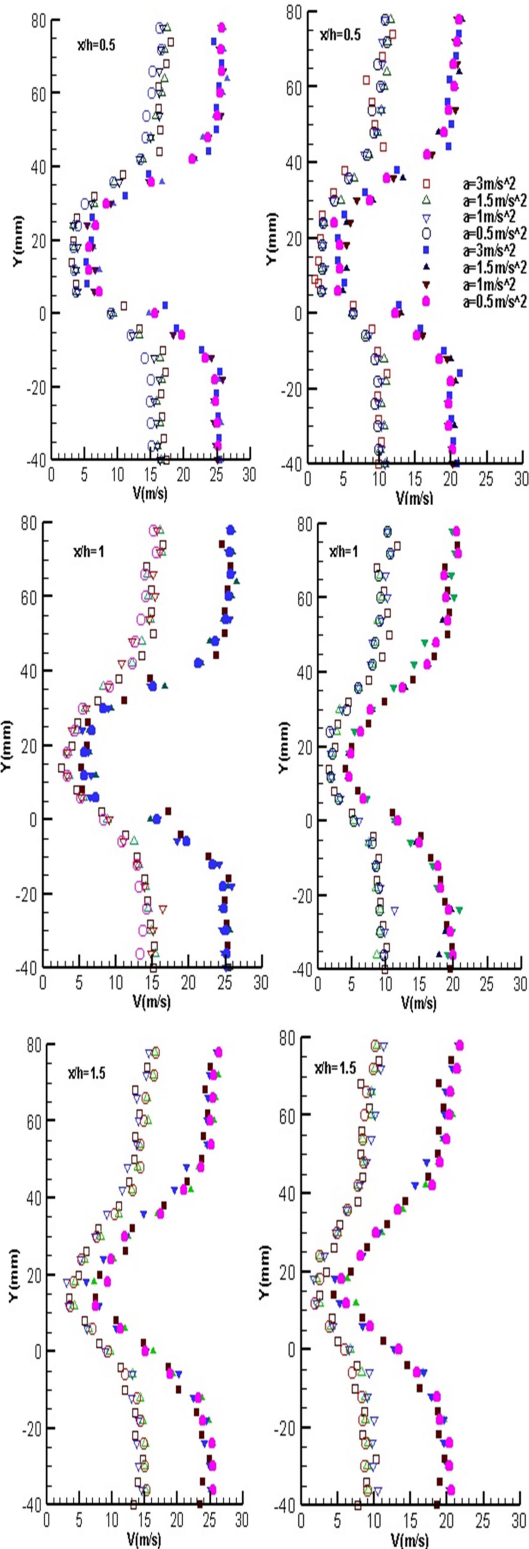


شکل ۳- مشخصات و ابعاد مدل

### ۲- اعتبار سنجی

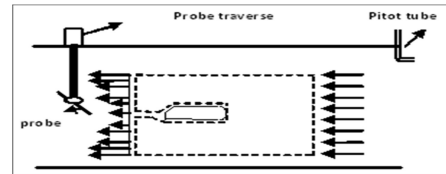
در ابتدا، به منظور بررسی صحت عملکرد دستگاه تونل باد و جریان سنج سیم داغ، یک نمونه داده‌برداری صورت گرفته و با کار دیگر افراد مقایسه شده است. نمودار متوسط زمانی مؤلفه سرعت در جهت غالب جریان ( $\bar{U}$ ) برای مدل مورد مطالعه در رینولدز ۶۴۰۰۰ در موقعیت‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.

نزدیک ندارد اما در دنباله دور با افزایش شتاب جریان ورودی مقادیر سرعت نیز افزایش می یابد.



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

معادله (۳) برای محاسبه ضریب پسا مدل دوبعدی به دست آمده است. بنابراین، از این معادلات می توان برای اندازه گیری ضریب نیروی پسا به روش Wake-Survey در داخل تونل باد استفاده کرد و نتیجه های به دست آمده معتبر است [۲۷]. در این تحقیق از معادله (۳) برای اندازه گیری ضریب نیروی پسا استفاده شده است. حجم کنترل انتخابی جهت محاسبه ضریب پسا در شکل ۵ نشان داده شده است.

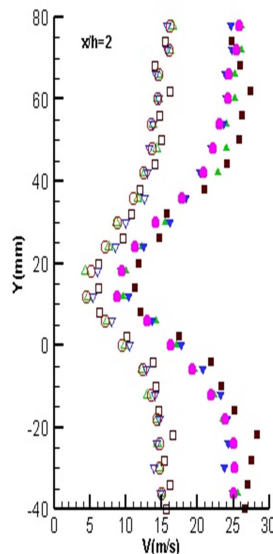
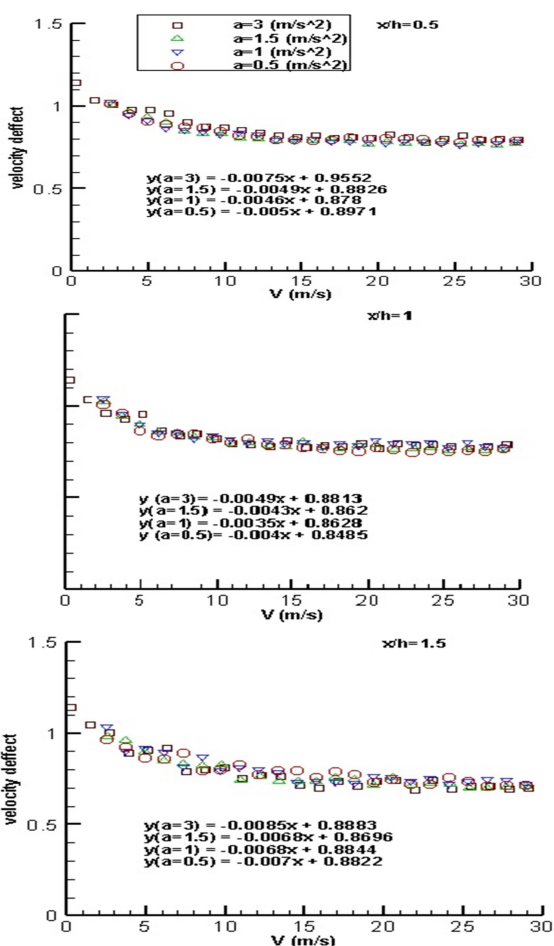


شکل ۵- حجم کنترل انتخابی

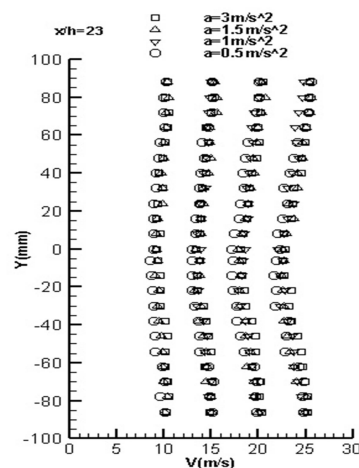
#### ۴- بحث و تحلیل نتایج

در تحقیق حاضر به بررسی و تحلیل ناحیه دنباله و تغییرات ضریب پسای مدل احمد در جریان شتابدار پرداخته می شود و اثرات شتابهای مختلف جریان در تغییرات احتمالی سرعت و شدت آشفتگی در دنباله نزدیک و دور و همچنین تغییرات ضریب پسا مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۶ مقادیر سرعت در دنباله نزدیک و دور و در موقعیت های طولی مختلف و برای جریان با شتابهای مختلف در حین افزایش سرعت جریان را نشان می دهد. با توجه به تعداد زیاد نمودارها در بازه زمانی افزایش سرعت، پروفیل های سرعت در چهار سرعت مشخص نشان داده شده است. به گونه ای که دقیقاً زمانی که سرعت جریان با شتابهای مختلف به سرعت های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه رسیده است نمودارها رسم شده اند به عبارتی سرعت های مذکور مربوط به سرعت جریان ورودی است که برای لحظه ای به این سرعت رسیده و از آن عبور کرده است و نمودارهای دنباله نیز دقیقاً مربوط به همان زمان خاص است. با توجه به نمودارها و به طور کلی با گذشت زمان و افزایش سرعت جریان ورودی، عمق دنباله افزایش می یابد و این مساله مستقل از شتاب جریان ورودی و موقعیت دنباله است. در موقعیت طولی  $X/H=0/5$  مقادیر سرعت در دنباله دقیقاً در پشت مدل تقریباً بدون تغییر بوده و مستقل از شتاب جریان ورودی است. در سایر موقعیت های طولی در دنباله صرفاً در  $a^*t=15$  این اتفاق رخ داده است و در سایر سرعت ها مقادیر سرعت در دنباله متغیر است. نکته قابل توجه اینکه مقدار شتاب جریان تاثیری در شکل گیری دنباله در موقعیت های طولی مختلف در دنباله نزدیک ندارد و هندسه دنباله شکل گرفته مشخص و مستقل از شتاب جریان ورودی است. شکل ۷ مقادیر سرعت در دنباله دور و در موقعیت  $x/h=23$  را نشان می دهد. به طور غالب با کاهش شتاب جریان ورودی مقادیر سرعت در دنباله دور کاهش می یابد. هر چند تغییر شتاب جریان ورودی تاثیر قابل توجهی در مقادیر سرعت در دنباله نزدیک نداشت. همچنین با افزایش سرعت جریان به تدریج دنباله نیز در موقعیت های دور شکل میگیرد. به طور کلی شتاب جریان ورودی تاثیر قابل توجهی در سرعت جریان دنباله

کمترین شتاب بیشتر از مقدار آن در جریان با سایر شتابها است. به عبارتی جریان با کمترین شتاب بیشترین مقادیر نقصان سرعت در دنباله را دارد. در دنباله دور تغییرات پارامتر نقصان سرعت برای جریان های با شتاب 1 و 1/5 تقریباً ناچیز است. و در طول مدت افزایش سرعت جریان ورودی ثابت است. به تدریج و با افزایش فاصله از مدل، با کاهش شتاب جریان ورودی پارامتر نقصان سرعت افزایش می یابد. در کلیه نقاط در دنباله نزدیک و دور با افزایش شتاب جریان ورودی نرخ تغییرات نقصان سرعت ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. این مساله در شکل ۹ نشان داده شده است. به طور کلی برای جریان با شتاب بیشتر از ۱ متر بر مجذور ثانیه نرخ تغییرات نقصان سرعت با گذشت زمان کاهش می یابد. به عبارتی در جریان با شتاب بیشتر نفوذ جریان به دنباله بیشتر اتفاق می افتد و سبمی گردد سرعت کمینه در دنباله با نرخ بیشتر رشد کند.



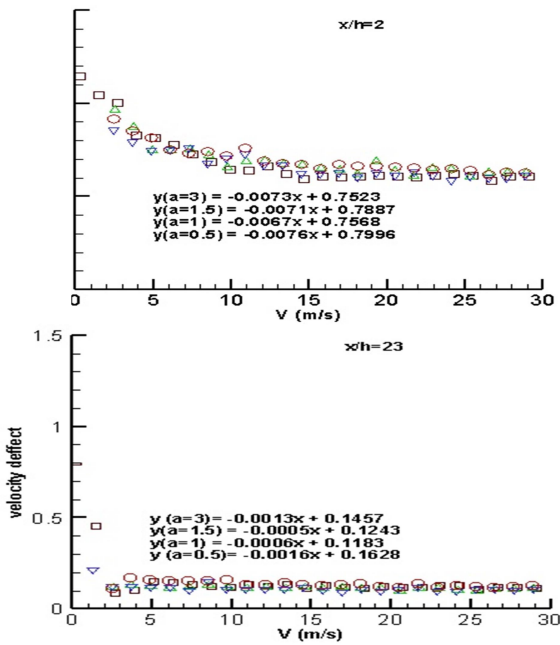
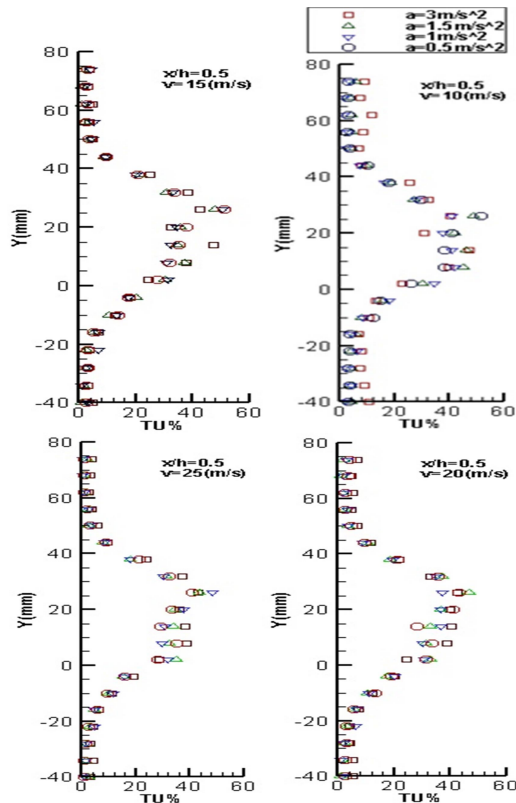
شکل ۶- پروفیل سرعت دنباله نزدیک در جریان با شتابهای مختلف و در چند لحظه مشخص



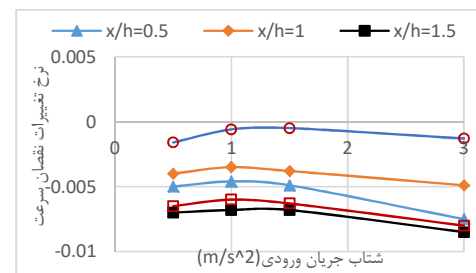
شکل ۷- پروفیل سرعت دنباله دور در جریان با شتابهای مختلف و در چند لحظه مشخص

شکل ۸ مقادیر نقصان سرعت در دنباله نزدیک و دور مدل را برای جریان با شتابهای مختلف و با گذشت زمان و در موقعیت های طولی مختلف را نشان می دهد. به منظور امکان مقایسه و بررسی تفاوت های احتمالی و با توجه به اینکه زمان افزایش سرعت در شتابهای مختلف متفاوت است لذا بدین منظور به جای رسم نمودار ها بر اساس زمان، گرافها بر اساس پارامتر  $a^*t$  که در واقع همان سرعت لحظه ای جریان است رسم شده اند. مستقل از شتاب جریان ورودی با گذشت زمان مقادیر نقصان سرعت در دنباله نزدیک و دور با شدت و ضعف کاهش می یابد. با افزایش فاصله در راستای طولی میزان پراکندگی مقادیر نقصان سرعت افزایش یافته است. به گونه ای که در دنباله دور تفاوت قابل ملاحظه ای بین مقادیر این پارامتر در جریان با شتابهای مختلف وجود دارد. در دنباله دور مقادیر پارامتر نقصان سرعت با کاهش شتاب جریان ورودی کاهش می یابد اما مقادیر این پارامتر در جریان با

طرفی با حرکت به قسمت های فوقانی دنباله شدت اغتشاش با شیب تندتری کاهش یافته است. این مساله در موقعیت  $x/h=2$  و در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به شکل خفیف تری وجود دارد. شدت آشفته گی در دنباله دور و مستقل از شتاب جریان ورودی در بیشترین مقدار و در سرعت های مختلف همواره کمتر از ۱۰٪ است. شکل ۱۱ مقادیر بیشینه شدت آشفته گی جریان در دنباله نزدیک و دور و برای مقادیر مختلف شتاب جریان ورودی را نشان می دهد. در تمام موقعیت های پشت مدل همواره با گذشت زمان و افزایش سرعت جریان ورودی میزان بیشینه شدت اغتشاشات دنباله کاهش می یابد. به طور کلی با گذشت زمان و افزایش سرعت جریان ورودی مقدار بیشینه شدت آشفته گی دنباله مستقل از شتاب جریان ورودی یافته است هر چند میزان این کاهش در موقعیت های مختلف دنباله و برای شتابهای مختلف متفاوت است. مساله دیگر آنکه نرخ کاهش شدت اغتشاشات دنباله برای جریان با شتابهای مختلف و در موقعیت های مختلف در دنباله روند خاصی را دنبال نمیکند.

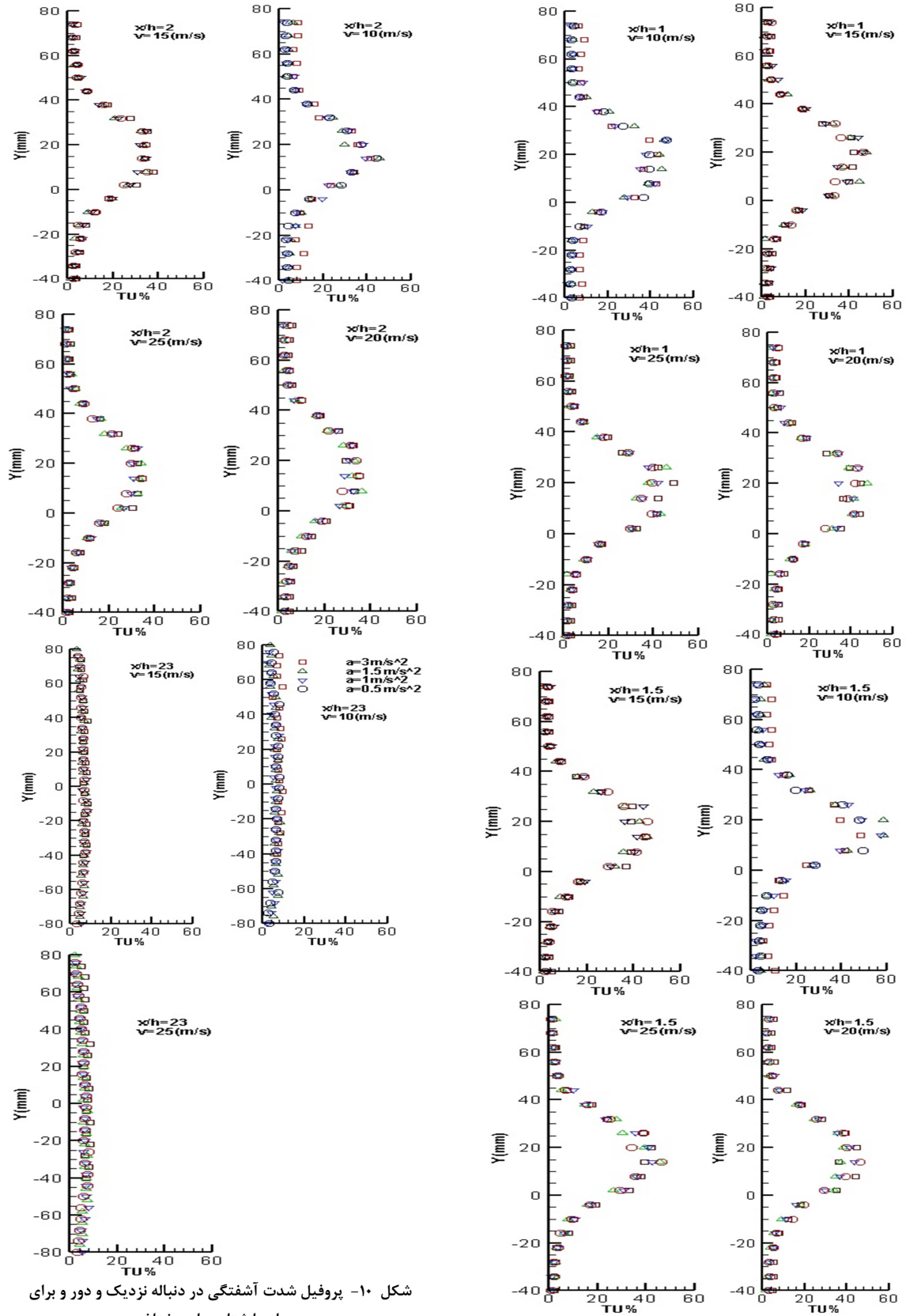


شکل ۸- پروفیل نقصان سرعت دنباله نزدیک و دور در جریان با شتابهای مختلف و در طول زمان افزایش سرعت



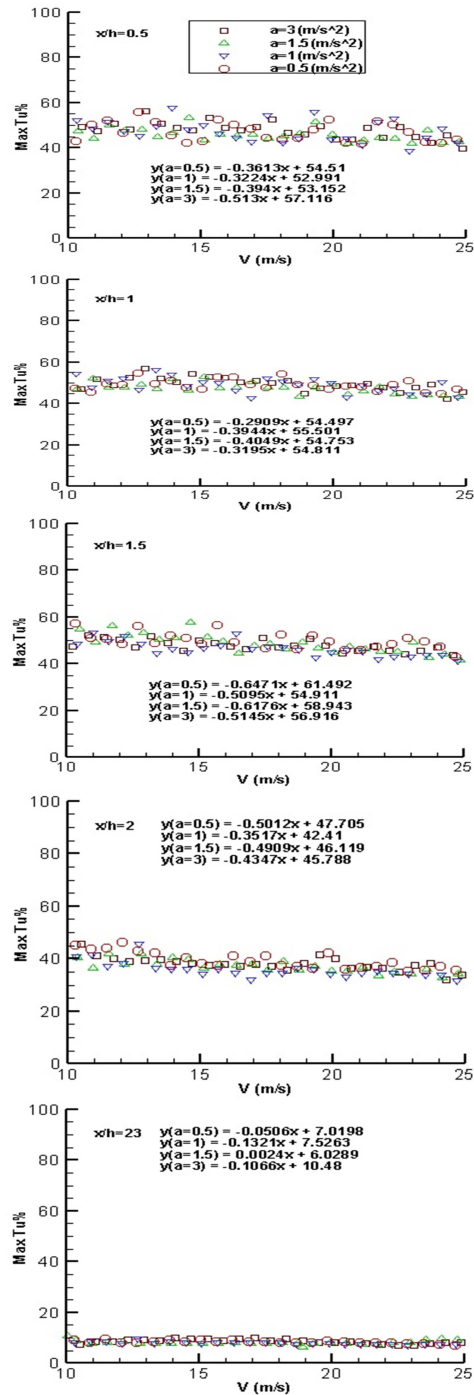
شکل ۹- نرخ تغییرات نقصان سرعت در جریان با شتابهای مختلف

شکل ۱۰ پروفیل شدت آشفته گی در دنباله نزدیک و دور و برای جریان با شتاب های مختلف و در زمانهای مختلف را نشان میدهد. با توجه به تعداد زیاد نمودارها ، پروفیل آشفته گی برای زمانهایی که سرعت جریان شتابدار به ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه می رسد رسم شده است. با توجه به نمودار ها شتاب جریان تاثیر مشخص و قابل توجهی در مقادیر شدت اغتشاش در دنباله نزدیک و دور ندارد. هر چند تفاوت هایی در مقدار پارامتر مذکور در نمودارها مشهود است اما این تفاوت ها روند مشخصی ندارد به طور کلی با افزایش سرعت مستقل از شتاب جریان ورودی، از مقدار آشفته گی دنباله کاسته شده است. بیشترین مقدار شدت آشفته گی در دنباله در موقعیت  $x/h=1/5$  و در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه شکل می گیرد. به مرور و با فاصله گرفتن از مدل و همچنین با افزایش سرعت جریان ورودی پروفیل شدت آشفته گی دنباله هموار تر شده و جهش های اغتشاش در قسمت های پشت مدل کاهش یافته است. نکته قابل توجه در تمام نمودارها مربوط به موقعیت  $x/h=1/5$  و برای سرعت جریان ورودی ۱۰ متر بر ثانیه اتفاق می افتد به گونه ای که در این موقعیت و مستقل از شتاب جریان ورودی بیشترین مقدار اغتشاش در دنباله و در پشت مدل رخ می دهد و از



شکل ۱۰- پروفیل شدت آشفتگی در دنباله نزدیک و دور و برای جریان با شتاب های مختلف

مومنوم ضریب پسا است. همچنین در سرعت های پایین مقدار مولفه مومنوم جریان با شتاب کم (۰/۵) بیشتر از مقدار این مولفه در جریان با سایر شتابهاست. به طور کلی مولفه مومنوم ضریب پسا با افزایش شتاب جریان ورودی افزایش یافته است. مقدار مولفه آشفتگی ضریب پسا در جریان با شتابهای ۱ و ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه بیشتر است. با افزایش سرعت جریان ورودی مقادیر این پارامتر عمدتا کاهش یافته است. به طور کلی با افزایش شتاب جریان ورودی مولفه مومنوم و آشفتگی ضریب پسا افزایش می یابد. شکل ۱۳ مقادیر ضریب پسی مدل را در جریان شتابدار با شتابهای مختلف و همچنین مقادیر این پارامتر را در جریان با سرعت های ثابت نشان می دهد. با افزایش سرعت جریان ورودی و مستقل از شتاب آن مقادیر ضریب پسا کاهش می یابد. که این مساله احتمالا ناشی از نفوذ بیشتر جریان به ناحیه دنباله است. مقادیر این پارامتر در جریان با شتاب ۰/۵ غالبا کمتر از مقدار متناظر آن در جریان با سایر شتاب ها است. همچنین ضریب پسا در جریان شتابدار با شتاب ۰/۵ غالبا کمتر از مقدار این پارامتر در جریان پایا و در سرعت های متناظر است. بجز در جریان با شتاب ۰/۵ عمدتا در جریان با سایر شتابها مقدار ضریب پسا بیشتر از مقدار متناظر آن در جریان پایاست. شکل ۱۴ مقادیر ضریب پسا در جریان پایا و همچنین مقدار این ضریب در لحظاتی که سرعت جریان به مقدار مشخص شده می رسد را نشان می دهد. در این شکل مقادیر ضریب پسا زمانی محاسبه شده اند که سرعت جریان با شتابهای مختلف به ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه رسیده است. و این مقدار ضریب پسا با مقدار متناظر آن در حالتی که جریان به صورت پایا و با سرعت ثابت وجود داشته مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که کمترین مقدار ضریب پسا غالبا در جریان با کمترین شتاب رخ می دهد که این مقادیر از مقادیر متناظر در جریان با سرعت ثابت نیز کمتر است. مقادیر ضریب پسا در جریان با شتاب های ۱ و ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه تقریبا با هم برابرند و بیشترین تفاوت ها در جریان های با شتاب زیاد و شتاب کم است. ضریب پسا برای مدل مورد مطالعه در [۲] و در عدد رینولدز واقعی، ۰/۲۶ گزارش شده است. چارلز [۲۸] نیز، این ضریب را در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ حدود ۰/۳۱۵ گزارش نموده است. آنجلینا [۲۹] نشان داد وجود اثرات زمین سبب افزایش حدود ۱/۵٪ در مقدار ضریب پسا می-شود. مقادیر ضریب پسا در کار حاضر و در جریان با سرعت ثابت (۳۰ متر بر ثانیه،  $Re=60600$ ) حدود ۰/۳۱ بدست آمده که حدود ۱۷٪ با مقدار واقعی آن اختلاف دارد. این تفاوت ناشی از عدد رینولدز پایین و در نظر نگرفتن اثرات زمین می باشد. حدود ۵٪ ضریب پسی محاسبه شده مربوط به آشفتگی دنباله و ۹۵٪ مربوط به کاهش مومنوم و نقصان فشار در دنباله است.



شکل ۱۱- بیشینه شدت آشفتگی جریان در دنباله نزدیک و دور و برای مقادیر مختلف شتاب جریان ورودی

شکل ۱۲ مولفه های مومنوم و آشفتگی ضریب پسی مدل را برای جریان با شتابهای مختلف نشان می دهد. جریان با کمترین و بیشترین شتاب بیشترین نرخ تغییرات مولفه مومنوم ضریب پسا را دارند. به گونه ای که با افزایش سرعت مقدار این مولفه ضریب پسا کاهش قابل ملاحظه ای دارد. این در حالی است که مقدار این مولفه ضریب پسا برای جریان با شتاب ۱ و ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه تقریبا ثابت است. جریان با شتاب ۳ متر بر مجذور ثانیه دارای بیشترین مقدار مولفه



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 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. با در نظر گرفتن تمام عوامل فوق میزان خطای کل اندازه گیری سرعت لحظه‌ای در حین آزمایش ۴/۰۳ درصد می باشد.

### ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی تغییرات پروفیل های سرعت و شدت آشفستگی در دنباله نزدیک و دور و همچنین روند تغییرات ضریب پسا و مولفه های آن با افزایش سرعت خودرو پرداخته شد و اثرات شتاب جریان روی پارامتر های مذکور مطالعه گردید. نتایج نشان داد:

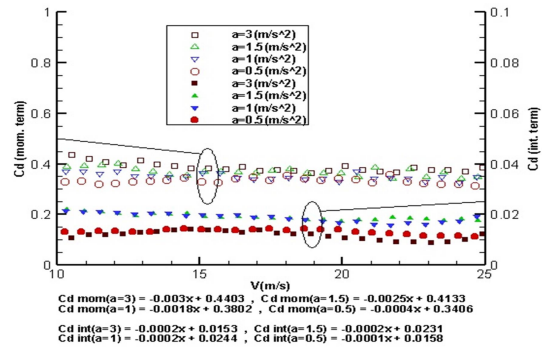
- شتاب جریان تاثیری در شکل گیری دنباله در موقعیت های طولی مختلف در دنباله نزدیک ندارد و هندسه دنباله شکل گرفته مشخص و مستقل از شتاب جریان ورودی است. اما در دنباله دور با افزایش شتاب جریان ورودی مقادیر سرعت نیز افزایش می یابد.
- مستقل از شتاب جریان ورودی با گذشت زمان مقادیر نقصان سرعت در دنباله نزدیک و دور با شدت و ضعف کاهش می یابد و با افزایش سرعت جریان ورودی مقدار بیشینه شدت آشفستگی دنباله کاهش یافته است هر چند میزان این کاهش در موقعیت های مختلف دنباله و برای شتابهای مختلف متفاوت است. همچنین در کلیه نقاط در دنباله نزدیک و دور با افزایش شتاب

• جریان ورودی نرخ تغییرات

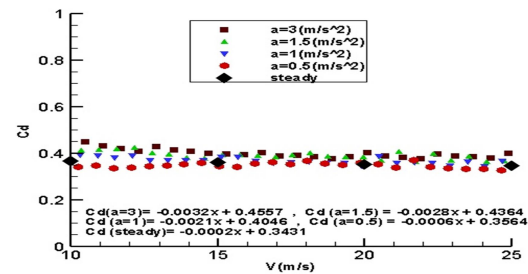
- نقصان سرعت ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. جریان با کمترین شتاب نیز بیشترین مقادیر نقصان سرعت در دنباله را دارد.
- به طور کلی با افزایش شتاب جریان ورودی مولفه مومنوم و آشفستگی ضریب پسا افزایش می یابد. جریان با کمترین و بیشترین شتاب بیشترین نرخ تغییرات مولفه مومنوم ضریب پسا را دارند.

### ۷- مراجع

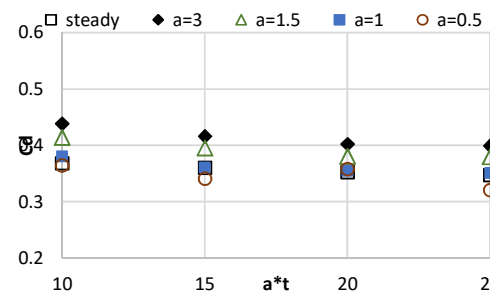
[1] Barlow B., Rae W., Pope A., Low-Speed Wind Tunnel Testing. John Wiley & Sons, 1999. Kumagai, S., and Isoda, H., Proc. Combust, Vol. 7, No.5, pp.129-137, 1984.  
 [2] Ahmed S. R., Ramm R. and Faltin G., Some Salient Features of the Time Averaged Ground Vehicle Wake, SAE Technical Paper Series 840300, Vol. 3, No.20, pp. 104-115, 1998.  
 [3] Gilli P., and Chometon F., Modelling of Stationary Three-Dimensional Separated Air Flows around an Ahmed



شکل ۱۲- مولفه های مومنوم و آشفستگی ضریب پسی مدل در جریان با شتابهای مختلف



شکل ۱۳- تغییرات ضریب پسی مدل در جریان با شتابهای مختلف



شکل ۱۴- ضریب پسی مدل در سرعت های لحظه ای مختلف در جریان با شتابهای مختلف

### 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].

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

ضریب همگرایی

k

$\frac{1}{u} * \Delta y_i$

انحراف معیار

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

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

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

- Royal Society of London, Series A, Vol. 155, No.32, pp. 570-575, 1996.
- [26] Von Den hoff A.E., Tetervin N., Determination of general relation for the behavior of turbulent boundary layer., NACA 1943.
- [27] Dixon S.L., Fluid mechanics, thermodynamics of turbo machinery..., 5th ed., Library Cataloguing in Publication Data, 2005.
- [28] Charles-Henri Bruneau, Emmanuel Creusé, Delphine Depeyras, Patrick Gilliéron, Iraj Mortazavi Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body. *Computers & Fluids*, Vol. 6, No.39, pp. 1875-1892, 2010.
- [29] Angelina I. Heft, Thomas Indinger and Nikolaus A. Adams Introduction of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations. *SAE International*, Vol. 5, No.2, pp. 179-168, 2012.
- Reference Model, *Third International Workshop on Vortex ESAIM Proceedings*, Vol. 7, No.10, pp. 124-135, 1999.
- [4] Hanaoka Y., And Kiyohira A., Vehicle Aerodynamic Development using PAMFLOW, Vol. 3, No.5, pp. 112-120, 2003.
- [5] Hugo B. Castroa, R.Rodrigo Pazb, A.Mario Stortib and E. Victorio Sonzogni, Computational study of unsteady road vehicle aerodynamics including fluid structure interaction, *Mecánica Computacional*, Vol. 9, No.2, pp. 1409-1425, 2013.
- [6] Kohri I., Yamanashi T. and Nasu T. Study on the Transient Behaviour of the Vortex Structure behind Ahmed Body, *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst*, Vol. 7, No.34, pp. 2-14 2014.
- [7] Hugo G., Castroa B., Rodrigo R., Mario A., Stortib E. Computational study of unsteady road vehicle aerodynamics including fluid-structure interaction, *Mechanical Computational*, Vol. 9, No.12, pp. 1409-1425, 2013.
- [8] Leclerc C., Levallois E., Kourta A., Gilliéron P., Aerodynamic drag reduction by synthetic jet, *A 2d numerical study around a simplified car*, Technical Report 2006-3337, in: 3rd AIAA Flow Control Conference, 2006
- [9] Barzanooni V. and Bak Khoshnevis A. Experimental Study of Fluctuations, Parameters and High-Order Values of Velocity in Wake Region of a Model Car, *Amirkabir J. Mech. Eng*, Vol. 49, No.8, pp. 83-92, 2017.
- [10] Mathieu R., Patrick G., analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry, *computr& fluids*, Vol. 38, No.19, pp. 60-70, 2009.
- [11] Ghaligne S., Thomas C., active control of the flow behind a two-dimentional bluff body in ground proximity, *comptes rendus mecanique*, Vol. 2, No.6, pp. 289-297, 2013.
- [12] Spohn A., Gillieron P., Flow separeated generated by a simplified geometry of an automotive vehicle. Vol. 23, No.7, pp. 89-97, 2011.
- [13] Barzanooni V. and Bak Khoshnevis A. Experimental study of drag reduction on a car model using an active flow control, *Amirkabir J. Mech. Eng*. Vol. 41, No.5, pp. 1-12, 2017
- [14] Watkins S., Vino G. The Effect of Vehicle Spacing on the Aerodynamics of Representative Car Shape. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No.3, pp.1232-1239, 2011.
- [15] Mathieu R., Patrick G. analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry. *computr& fluids*, Vol. 21, No.38, pp. 60-70, 2009.
- [16] Ghaligne s., Thomas c., active control of the flow behind a two-dimentional bluff body in ground proximity comptes rendus mecanique. Vol. 2, No. 341, pp. 289-297, 2013.
- [17] Spohn a., gillieron p., Flow separeated generated by a simplified geometry of an automotive vehicle Vol. 23, No. 41, pp. 89-97, 2011.
- [18] 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*, Vol. 53, No. 1, pp 174-179, 2009.
- [19] Ardakani M. A. Hot-Wire Anemometer, KN Toosi University. (in Persian) 2003.
- [20] Tunay T., Sahin, B., Ozbolat. V., Effects of rear slant angles on the flow characteristic ics of Ahmed body. *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol.10, No.57, pp.165-176, 2014.
- [21] 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*, Vol.205 No.6, pp. 174-183, 2009.
- [22] Pope A. and Goin K.L., Low Speed Wind Tunnel Testing , 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., 1984.
- [23] Ardakani M. A. Low-speed wind tunnel(design principles and application), KN Toosi University. (in Persian), 2008.
- [24] Van Dam C. P., Recent Experience with Different Methods of Drag Prediction. *Progress in aerospace science*, Vol. 35, No.8, pp. 751-798, 1999.
- [25] Goldstein S., A Note on the Measurement of Total Head and Static Pressure on a Turbulent Stream, *Proceedings of the*