

# آشکار سازی جریان توسط نمونه برداری تطبیقی یک سیم داغ متقاطع در یک آزمایش بسیار طولانی

مجتبی رجائی

دانشگاه براون، مرکز مکانیک سیالات، پروویدنس، رود آیلند

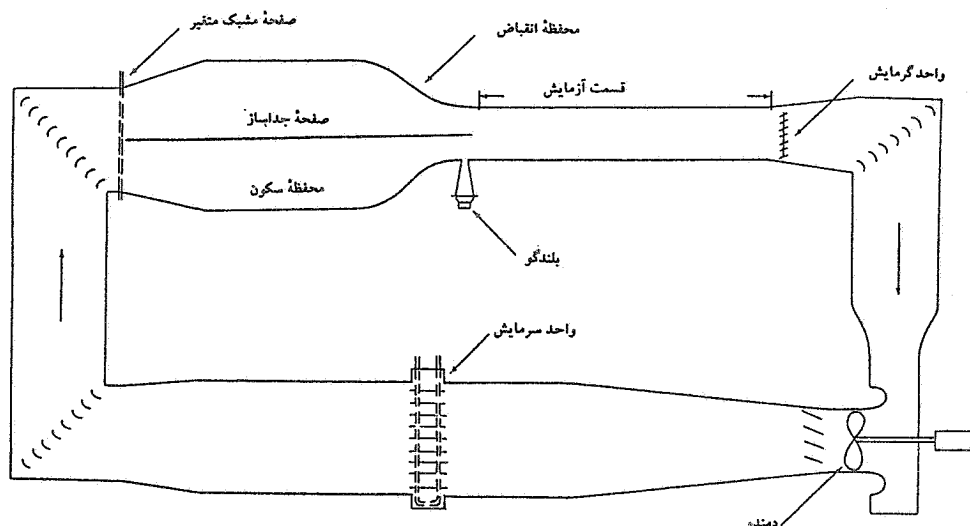
چکیده - روشهای آشکار سازی جریان با استفاده از نشانگذارهایی مانند رنگ، دود، حبابهای هیدروژن و غیره به طور گسترده در بررسیهای تجربی سازه‌های با مقیاس بزرگ میدانهای مختلف جریان به کار می‌رود. نقش این روشها درک فیزیکی تشکیل و تکامل این سازه‌ها در نواحی انتقالی و مغشوش میدانهای جریان بسیار مهم است؛ با این حال آنها نمی‌توانند اطلاعات کمی دقیقی در باره جریان فراهم آورند. در این مقاله روش جدیدی برای تهیه تصاویر کمی جریان از یک لایه اختلاطی جریان برشی آزاد در یک ناحیه دو بعدی ارائه شده است. برای اندازه گیری جریان در یک زمانبندی همفاز با سازه‌های متشکل جریان، از یک سیم داغ متقاطع استفاده شده است. این روش بازسازی تصاویر لحظه‌ای جریان را از اندازه گیریهای سیم داغ در یک آزمایش طولانی امکانپذیر می‌سازد. برای حل مشکل اعتبار درجه بندی که ناشی از اندازه گیری بسیار طولانی با سیم داغ است، از روش دقیقی برای بهنگام کردن درجه بندی استفاده شده است. این روش عامل مهمی در بازسازی تصاویر جریان است و معادله پیوستگی را با دقت بسیار زیادی ارضا می‌کند.

## Flow Visualization by Conditional Sampling of a Single X-Wire Probe in a Very Long Run Experiment

Mojtaba Rajaei

Brown University, Center for Fluid Mechanics, Providence, RI 02912, USA

**ABSTRACT-** Flow visualization techniques using tracer markers such as dye, smoke, hydrogen bubbles, etc., have been widely used in experimental investigations of large scale structures of a variety of flow fields. They have played an important role in understanding the physics of the coherent structures' formation and evolution in the transitional as well as the turbulent regions of the flow fields. However, they lack to provide detailed quantitative information about the flow. Here, a new approach is taken in obtaining quantitative flow field snapshots from a region of a two-dimensional free shear flow mixing layer. A single cross-wire probe is used to make measurements of the flow in a time frame phase locked with the coherent flow structures which facilitates reconstructed flow snapshots from the hot-wire measurements in a very long run experiment. A new detailed calibration updating scheme is developed to resolve the problem of calibration validity encountering very long time hot-wire measurements. This is a key factor in facilitating reconstructed flow snapshots that satisfy the continuity equation with a very high accuracy.



شکل ۱ - تونل باد مدار بسته

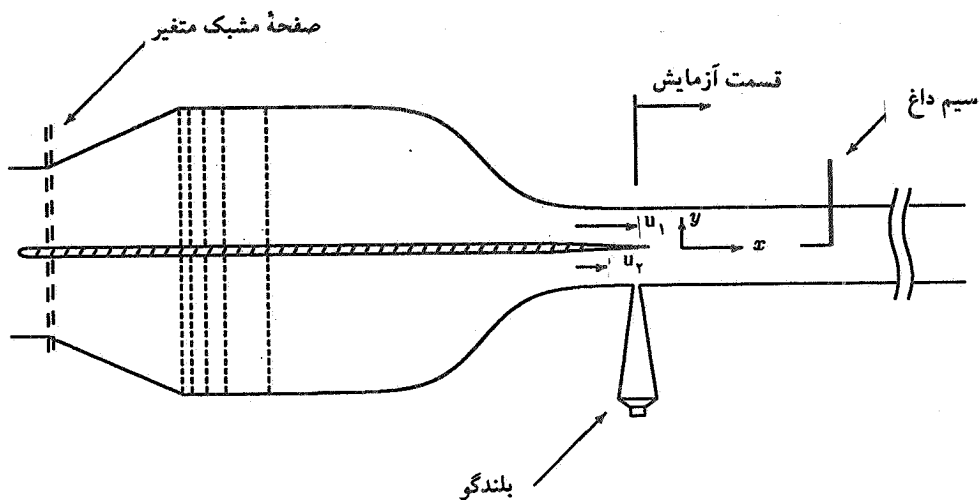
#### ۱- مقدمه

آشکار سازی جریان در مطالعات تجربی میدانهای گوناگون جریان به طور گسترده مورد استفاده بوده است (براون و راشکو [۱])، وینانت و براوند [۲]، هووهوانگ [۳] و دیگران). ازدود، رنگ، حبابهای هیدروژن و دیگر نشانگذارها برای ردیابی سازه‌های میدان جریان استفاده شده تا تصویر قابل رؤیتی از جریان به وجود آید. گرچه این روشها اطلاعات کیفی از میدان جریان به دست می‌دهند، لیکن فاقد اطلاعات کمی جریان هستند. در برخی از میدانهای جریان مانند جریان در یک تونل باد بزرگ، استفاده از دود عملی نیست و لازم است از روشهای دیگری برای ایجاد تصاویر لحظه‌ای جریان استفاده شود. کوازنی و همکاران [۴]، میائو و کارلسن [۵] و پژوهشگران دیگر از روش نمونه برداری تطبیقی<sup>۲</sup> برای تهیه اطلاعات کمی در باره تکامل تدریجی لایه‌های اختلاطی استفاده کرده‌اند. در این مقاله یک روش نمونه برداری تطبیقی با استفاده از زمانبندی همفاز با سازه‌های متشکل میدان جریان ارائه می‌شود. به کمک یک سیم داغ متقاطع و اندازه‌گیری‌هایی که در چارچوب زمانی فوق‌الذکر انجام می‌شود، بخش بزرگی از میدان جریان ترسیم شده و تصاویر لحظه‌ای جریان در آن چارچوب زمانی ایجاد می‌شود. این روش می‌تواند علاوه بر اطلاعات کمی دقیق، تصاویر کیفی از جریان را نیز ایجاد کند. داده‌های به دست آمده از میدان جریان توسط تجزیه عمودی کامل<sup>۳</sup> روابط همبستگی دو نقطه‌ای سرعت در

مرجع دیگری بررسی شده است [۶]. برای تهیه تصاویر لحظه‌ای بسیار دقیق با شبکه بندی ریز، باید روش بهنگام کردن درجه بندی جامعی برای حسگرهای سیم داغ تهیه شود. جزئیات روشی که ما برای بهنگام کردن درجه بندی<sup>۴</sup> تهیه کرده‌ایم، به خاطر نقش مهمی که در انجام یک آزمایش طولانی دارد، در این مقاله تشریح می‌شود.

#### ۲- دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش همان است که در مقاله‌های قبلی ذکر شده است [۶] و [۷]. از یک تونل باد کم سرعت مدار بسته (شکل ۱) به عنوان دستگاه تأمین کننده لایه برشی آزاد استفاده شده است. یک صفحه جداساز، جریان را به دو بخش کند و تند تقسیم می‌کند. صفحه جداساز از محفظه سکون آغاز می‌شود و تا انتهای محفظه انقباض ادامه دارد، به گونه‌ای که نوک تیز آن در ابتدای بخش آزمایش قرار می‌گیرد. سرعتهای تند و کند با تنظیم سوراخهای موجود در صفحات مشبکی که در ابتدای صفحه جداساز قرار گرفته تنظیم می‌شود. ارتفاع قسمت آزمایش ۵۷ cm، پهنای آن ۸۱ cm و طول آن ۳۸۰ cm است. طراحی دقیق محفظه سکون جدید به گونه‌ای انتخاب شده که اغتشاش اولیه بسیار کم و در سطح ۰/۰۳ درصد سرعت جریان تند است. در طراحی محفظه سکون جدید که طول تقریبی آن ۱۴ فوت (۴/۲۷ متر) است، توجه خاصی به پایین بودن سطح



شکل ۲ - تصویر شماتیک مدار جریان

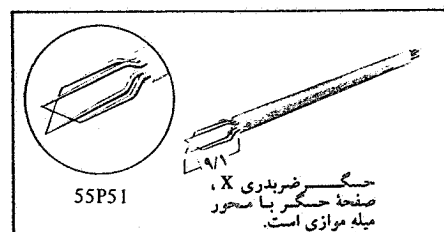
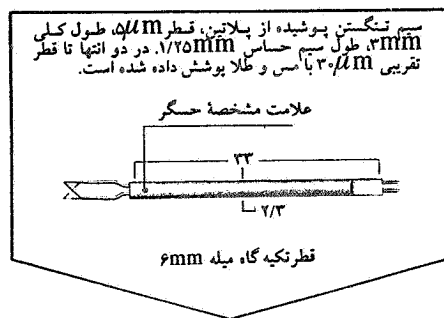
فیلتر کم گذر با بسامد قطع  $40\text{ Hz}$ ، این همبستگی به  $0.85$  رسید که مربوط به انتقال فاز اغتشاش اعمال شده به میزان  $32^\circ$  درجه است. وقتی که ریشه میانگین مربعی (rms) ولتاژ تغذیه بلندگو  $1/5$  ولت بود، ریشه میانگین مربعی سطح اغتشاش سرعت در انتهای صفحه جداساز  $0.4$  درصد سرعت جریان آزاد اندازه گیری شد.

برای اندازه گیری سرعت جریان از روش سرعت سنجی سیم داغ<sup>۵</sup> استفاده می شود. به طور خلاصه می توان گفت که سیم داغ سیم باریکی است که در جریان قرار داده می شود. هرگاه جریان برق از سیم بگذرد، دمای آن خیلی بالاتر از دمای سیال اطراف آن خواهد بود. از این رو جریان سیال اثر خنک کنندگی روی سیم داغ دارد. هر چه جریان تندتر باشد، اعداد رینولدز و نوسلت بزرگتر خواهند بود و اثر خنک کنندگی جریان بیشتر است. انرژی ای که سیم داغ از دست می دهد از طریق توان الکتریکی  $RI^2$  جبران می شود ( $R$  مقاومت سیم داغ و  $I$  شدت جریان آن است). بین ولتاژ دو سر سیم داغ و سرعت خنک کنندگی مؤثر جریان که توسط سیم حس می شود، یک رابطه تجربی وجود دارد. ترجیح ما این است که موقع درجه بندی سیم داغ، از برازش یک چندجمله ای درجه سوم استفاده کنیم. برای اطلاعات بیشتر در مورد سرعت سنجی با سیم داغ به پری [۸] و بردشاو [۹] رجوع کنید.

برای اینکه درجه بندی سیم داغ در حین آزمایش معتبر باشد، باید که دمای جریان هر چه ممکن است به دمای جریان مرجعی که

اغتشاش و یکنواختی جریانی شده است که وارد قسمت آزمایش می شود. بدین منظور  $5$  ردیف ورق مشبک ریز در مقاطع مختلف در طول محفظه سکون نصب شده و دیوارهای جانبی محفظه انقباض بین محفظه سکون و قسمت آزمایش براساس منحنی چند جمله ای درجه پنجم به گونه ای طراحی شده که اثر انقباض روی جریان ورودی به قسمت آزمایش کاهش یابد (شکل ۲). همان گونه که در مقاله قبلی گفته شد [۶]، این جریان برشی آزاد عمدتاً دوی بعدی است. تحریک دوی بعدی جریان برشی به روش صوتی صورت می گیرد. یک بلندگو به قطر  $8$  اینچ ( $20/3$  سانتیمتر) که یک قطعه واسط با سطح مقطع ثابت آن رابه یک شکاف عرضی در کف مقطع شروع آزمایش وصل می کند، می تواند اغتشاشهای دوی بعدی با بسامد مطلوب را در دامنه مورد نظر ایجاد کند. بلندگو با کامپیوتری تحریک می شود که سیگنال ایجاد شده از آن شامل دو موج سینوسی برهم نهاده است: سیگنال اصلی که با بسامد طبیعی ناپایدار برابر است و اولین زیرهماهنگ آن با اختلاف فاز مطلوب برای سنجش دو بعدی بودن اغتشاش تولیدی، اندازه گیریهای همبستگی سرعت بین یک سرعت سنج ساکن در مرکز لبه عقبی صفحه جداساز،  $X = 1\text{ cm}$ ،  $Y = 2\text{ mm}$  و  $Z = 0$ ، و یک سرعت سنج که در جهت  $Z$  جابه جا می شود صورت می گیرد. ضریب همبستگی در  $Z = 20\text{ cm}$  به مقدار  $0.7$  می رسد. باید دانست که سطح نوسانها در این موقعیت  $X$ ، بسیار کم است. با یک

ولتاژ خروجی حسگرها باید خیلی سریع اندازه گیری شود. برای این کار از یک کامپیوتر ۳۲ بیتی که برای نمونه برداری و ذخیره سازی سریع داده‌ها با قدرت تفکیک ۲/۴ میلی ولت طراحی شده، استفاده می‌شود. این مینی کامپیوتر مجهز به هر دو نوع مبدل A/D و D/A است. مبدل A/D (آنالوگ به رقمی) می‌تواند همزمان از ۱۶ کانال داده دریافت کند. مبدل D/A برای تولید سیگنال آنالوگ برای ایجاد اغتشاش در جریان بلندگو به کار می‌رود.



شکل ۳ - سیم داغ با سیمهای متقاطع

### ۳ - اندازه گیری با سیم داغ

۳-۱ - درجه بندی سیم داغ گام نخست در پژوهشهای تجربی، درجه بندی تجهیزات اندازه گیری است. همان گونه که قبلاً گفته شد، برای اندازه گیری مؤلفه‌های سرعت در میدان جریان از سیم داغ استفاده می‌شود. خروجی دستگاه سیم داغ ولتاژ است که باید به عنوان سرعت بر حسب متر بر ثانیه تعبیر شود. بنابراین لازم است که خروجی سیم داغ بر حسب یک سرعت معین درجه بندی شود. این کار با درجه بندی ولتاژ خروجی سیم داغ بر حسب سرعت جریان آزاد انجام می‌شود. هد دینامیکی سرعت جریان آزاد به وسیله لوله پیتوتی که به یک ترانسدیوسر فشاری وصل است اندازه گیری می‌شود. سپس ولتاژ خروجی سیم داغ از طریق برازش یک چند جمله‌ای درجه سوم با سرعتی که از لوله پیتوت در گستره تغییرات سرعت جریان به دست می‌آید مرتبط می‌شود.

سیستم فرآوری داده‌های A/D دارای قدرت تفکیک محدود ۲/۴ میلی ولت است. بنابراین سیگنالهای دریافتی از حسگرهای سیم داغ باید قبل از نمونه برداری تقویت شوند تا نوسانهای کوچک جریان برشی قابل اندازه گیری شود. به همین دلیل، خروجی ترانسدیوسر فشاری نیز ۱۰ برابر تقویت می‌شود تا درجه بندی دقیقتر صورت گیرد.

۳-۲ - روش درجه بندی برای درجه بندی سیم داغ، سرعت سنج حامل سیم داغ و لوله پیتوت هر دو در یک مقطع طولی و عرضی (عمودی) در قسمت سریع جریان آزاد قرار داده می‌شوند. سرعت جریان آزاد در گستره تغییرات ممکن، به طور پیوسته تغییر داده می‌شود. داده‌های سیم داغ متقاطع و ترانسدیوسر فشاری همزمان ثبت می‌شود. ۳۰۰ داده که هر یک متوسط روی فاصله زمانی کوتاهی است گردآوری

در درجه بندی سیم داغ به کار رفته نزدیک باشد. در غیر این صورت، می‌تواند دقت اندازه گیری را کاهش دهد. برای فراهم کردن چنین کنترلی روی دما، از واحدهای سرمایش و گرمایش استفاده می‌شود. واحد سرمایش یک مبادله کن گرماست که مجموعه لوله‌های آن عمود بر جریانی است که از دمنده خارج می‌شود. سیال خنک کننده آن آب بادبی تنظیم پذیر است. برای کنترل بهتر دما، جریان هوا را همزمان گرم و سرد می‌کنیم. به عبارت دیگر، جریان هوا را به وسیله آب، بیش از حد سرد می‌کنیم و دوباره دمای هوا را به کمک گرمکنهای الکتریکی که با ترموستات کنترل می‌شوند و در پایین دست قسمت آزمایش واقع اند افزایش می‌دهیم (شکل ۱). از ترکیب همزمان سرمایش و گرمایش می‌توان دما را در دراز مدت در گستره تقریبی  $5/0 \pm$  کنترل کرد. برای به حداقل رساندن جریان ثانویه، که ناشی از همرفتی حرارتی در قسمت آزمایش است، باید دما در تونل باد تا حد ممکن به دمای محیط آزمایشگاه نزدیک باشد تا لایه مرزی حرارتی روی دیواره‌های پلکسی گلاس حذف شود.

در روش سرعت سنجی سیم داغ با سیمهای متقاطع می‌توان دو مؤلفه سرعت را اندازه گرفت. سرعت سنج X شکل، یک سرعت سنج DISA با سیم تنگستن پوشیده از پلاتین است (شکل ۳). مکانیزمی که سرعت سنج بر آن استوار است در دو جهت عرضی و طولی به کمک موتورهای دور متغیر که با کامپیوتر کنترل می‌شود حرکت می‌کند و دقت آن  $0/0005$  اینچ ( $0/127$  میلی‌متر) است.

یکی از منابع خطاست. از معادله (۱) می‌توان خطا را به صورت زیر برآورد کرد:

$$\Delta U_{e1} = a_1 \Delta E_1 + 2a_2 E_1 \Delta E_1 + 3a_3 E_1^2 \Delta E_1 \quad (2)$$

$$\Delta U_{e2} = b_1 \Delta E_2 + 2b_2 E_2 \Delta E_2 + 3b_3 E_2^2 \Delta E_2$$

با جاگذاری ضرایب درجه بندی در معادله (۲)، خطای تخمینی برای اندازه‌گیریهای سرعت ناشی از توانایی تفکیک  $2/4A/D$  میلی ولتی حداکثر  $\pm 0.6 \text{ cm/s}$  است.

توانایی تفکیک  $A/D$  نه تنها باعث خطا در فرایند درجه بندی سیم داغ می‌شود، در اندازه‌گیری با ترانسدیوسر فشاری نیز باعث خطا می‌شود. هد دینامیکی جریان آزاد که لوله پیتوت و یک ترانسدیوسر فشاری آن را اندازه می‌گیرد طبق معادله زیر با سرعت جریان مربوط می‌شود:

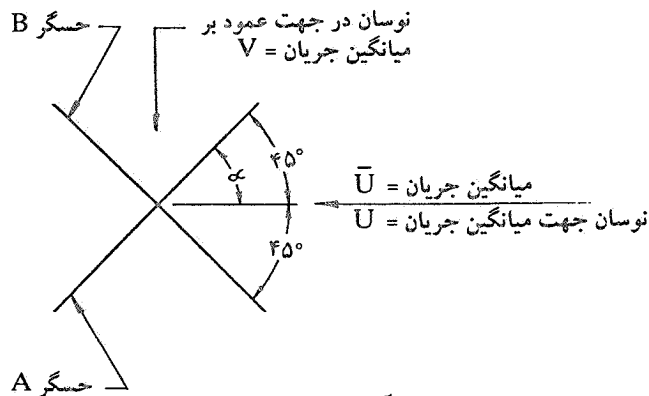
$$u_0 = 0.9171 \sqrt{E_0} \quad (3)$$

که  $E_0$  خروجی ترانسدیوسر بر حسب ولت و  $u_0$  سرعت جریان آزاد بر حسب متر بر ثانیه است. خطای تعیین سرعت جریان آزاد توسط لوله پیتوت را که ناشی از توانایی تفکیک  $2/4A/D$  میلی ولتی در سیستم گردآوری داده‌ها از ترانسدیوسر فشاری است، می‌توان از معادله (۳) برآورد کرد:

$$\Delta u_0 = 0.4585 \Delta E_0 / \sqrt{E_0} \quad (4)$$

بنابراین، خطای تخمینی روی منحنیهای درجه بندی در حدنهایی سرعت زیاد و کم به ترتیب  $\pm 0.1$  تا  $\pm 0.7$  سانتیمتر بر ثانیه است.

(ب) خطای ناشی از تغییرات دمای جریان و کهنگی سیم داغ فرض می‌شود که دمای جریان در طول اندازه‌گیری ثابت بماند. گرچه ثابت نگه داشتن دما بسیار سخت است، ولی در طول یک آزمایش ۲۴ ساعته می‌توان آن را با دقت  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  در همسایگی دمای درجه بندی ثابت نگه داشت. لیکن، در آزمایشهای کوتاهتر، دما را بهتر می‌توان کنترل کرد. تغییر دمای جریان منجر به خطا در اندازه‌گیری سیم داغ می‌شود، زیرا ولتاژ خروجی سیم



شکل ۴ - آرایش استاندارد میدان x

می‌شود و سپس یک چند جمله‌ای درجه سوم بر آنها برازش می‌شود. شکل کلی چند جمله‌ای به این صورت است.

$$U_{e1} = a_0 + a_1 E_1 + a_2 E_1^2 + a_3 E_1^3 \quad (1)$$

$$U_{e2} = b_0 + b_1 E_2 + b_2 E_2^2 + b_3 E_2^3$$

که در آن  $U_{e1}$  و  $U_{e2}$  سرعتهای مؤثری است که سرعت سنج سیم متقاطع حس می‌کند، و  $E_1$  و  $E_2$  مقادیر ولتاژهای دو سیم داغ است. نصف مجموع  $U_{e1}$  و  $U_{e2}$  برابر مؤلفه طولی سرعت جریان،  $u$ ، است و نصف اختلاف این دو مقدار وقتی در ضریب تصحیح  $1/0.8$  (که مبتنی بر یک رابطه تجربی است) ضرب شود، مؤلفه عرضی سرعت جریان،  $v$  است (شکل ۴).

فرایند درجه بندی با یافتن ضرایب ثابت رابطه (۱) برای دو سیم،  $a_i = 0-3$  و  $b_i = 0-3$  کامل می‌شود. چند جمله‌ای مرتبه بالاتر دقت در درجه بندی را بالاتر نمی‌برد. بلکه برازش چند جمله‌ای مرتبه بالاتر به تغییرات چگالی داده‌های گردآوری شده حساستر می‌شود و گاه خطای بزرگی ایجاد می‌کند. بعد از هر درجه بندی، ثابتهای حاصل از درجه بندی در تعیین سرعت جریان معلومی به کمک اندازه‌گیریهای سیم داغ به کار می‌روند تا دقت آنها سنجیده شود. آنگاه نتایج با سرعت جریانی که از خواندن لوله پیتوت به دست می‌آید مقایسه می‌شود. توافقی در حد  $\pm 0.2$  درصد قابل قبول است.

۳-۳ - تحلیل خطای سیم داغ (الف) خطای تفکیک  $A/D$  توانایی تفکیک  $2/4A/D$  میلی ولتی در سیستم گردآوری داده‌ها

داغ به اختلاف دمای جریان و دمای از پیش تعیین شده حسگرسیم داغ بستگی دارد. کهنه شدن سیم داغ در طول یک آزمایش یکروزه نیز سبب خطا می شود. مثلاً بعد از یک آزمایش ۲۴ ساعته، برآورد سرعت جریان آزاد در محل درجه بندی بر اساس ضرایب درجه بندی روز قبل می تواند تا ۱/۵٪ اختلاف داشته باشد. برای اصلاح دقت اندازه گیری سرعت، از دو مجموعه ضرایب درجه بندی، که یکی پیش از آغاز آزمایش و دیگری بعد از پایان آن به دست آمده، استفاده می شود. بدین منظور لازم است زمان انجام اندازه گیریهایی که در هر موقعیت مکانی در قلمرو آزمایش صورت می گیرد، معین شود تا بتوان نسبت تأثیر هر یک از دو مجموعه ضرایب درجه بندی را در محاسبه سرعت در آن موقعیت مکانی تعیین کرد.

۳-۴ - بهنگام کردن درجه بندی فرض کنید اندازه گیریهای زیادی به وسیله سیم داغ در نقاط مختلف شبکه در یک ناحیه جریان دو بعدی انجام شده است (بخش ۵ را ببینید). در هر نقطه شبکه، سرعت سنج سیم متقاطع برای انجام اندازه گیریها با نرخ نمونه برداری معینی، ثابت نگه داشته می شود. برای این گونه اندازه گیریها که ممکن است در یک دوره زمانی ۲۴ ساعته کامل شوند، باید درجه بندی دقیقتر تصحیح شود، مخصوصاً اگر دما به طور ناخواسته از کنترل خارج شود. در آزمایشهایی مانند بررسی دستگاه معادلات دینامیکی [۶ و ۱۰] که مستلزم شبکه بندی ریز است، بیش از سه روز طول می کشد تا آزمایش کامل شود و تصحیح درجه بندی باید دقیقتر از آنچه که قبلاً گفته شد، انجام شود. برای انجام این کار بلافاصله پس از انجام آزمایش سه روزه، سیم داغ را در طول ناحیه اندازه گیری حرکت می دهیم و سرعتهای جریان آزاد را که توسط سیم داغ متقاطع در موقعیتهای حدی جریان در نواحی تند و کند اندازه گیری می شود، ثبت می کنیم. توزیع مؤلفه طولی (در جهت جریان) سرعت دو بخش مذکور در کمتر از ۳۰ دقیقه اندازه گیری می شود. سپس درجه بندی سیم داغ بهنگام می شود. با استفاده از مجموعه ضرایب جدید درجه بندی، توزیع مؤلفه طولی سرعت (در جهت جریان) در دو بخش (تند و کند) محاسبه و با مقادیر مربوطه که از مجموعه ضرایب درجه بندی قبلی برآورد شده، و نیز با اندازه گیریهای سیم داغ در دو

موقعیت حدی شبکه در دو بخش (تند و کند) در طول آزمایش سه روزه مقایسه می شود. باید دانست که اولین مجموعه ضرایب درجه بندی همیشه پیش از آغاز آزمایش تهیه می شود.

سه ضریب ثابت اول در چند جمله ای معادله (۱) یعنی عرض از مبدأ،  $a_0$ ، جمله درجه اول،  $a_1$ ، و جمله درجه دوم،  $a_2$  ضرایب حاکم بر درجه بندی هستند. اهمیت ثابت درجه بندی  $a_2$  در چند جمله ای درجه دوم، کمتر از سه ثابت دیگر است. فرض می کنیم که عرض از مبدأ،  $a_0$ ، تغییر نمی کند و تصحیحات رازوی ضرایب درجه اول و درجه دوم اعمال می کنیم. بنابراین، با داشتن سرعت دو جریان آزاد، می توانیم ثابتهای درجه اول و درجه دوم درجه بندی را تصحیح کنیم. برای انجام این کار، باید یک دستگاه دو معادله و دو مجهول را برای هر یک از موقعیتهای طولی حل کرد. نخست بر مبنای ضرایب درجه بندی اولیه، سرعتهای مؤثر جریان آزاد در دو بخش (تند و کند) را برآورد می کنیم. سپس آنها را با برآوردهای مربوطه که از اندازه گیریهای اخیر توزیع سرعت جریان به دست آمده مقایسه می کنیم. به این ترتیب یک دسته ضرایب درجه بندی جدید به دست می آید. چنانچه اولین و آخرین ضرایب درجه بندی  $a_0^1$  و  $a_2^1$  را ثابت بگیریم، از معادله (۱) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} U_i^1 &= a_0^1 + a_1^1 E_i + a_2^1 E_i^2 + a_3^1 E_i^3 \\ U_i^c &= a_0^c + a_1^c E_i + a_2^c E_i^2 + a_3^c E_i^3 \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن  $U_i^1$  سرعت مؤثر سیم اول است که بر مبنای اولین مجموعه ضرایب درجه بندی،  $a_0^1$ ،  $a_1^1$ ،  $a_2^1$  و  $a_3^1$  برآورد شده است. اندیس ۱ برای هر دو نقطه شبکه در نواحی تند و کند به کار می رود.  $U_i^c$  بیانگر برآوردهای جدید سرعت جریان در نواحی تند یا کند است که به عنوان مرجع در محاسبات ضرایب درجه بندی،  $a_0^c$ ،  $a_1^c$ ،  $a_2^c$  با ثابت نگه داشتن  $a_0^1$  و  $a_2^1$  و با استفاده از  $E_i$  اندازه گیری قبلی سیم داغ، به کار می رود.  $E_i$  بیانگر میانگین زمانی اندازه گیریهای سیم داغ در دو موقعیت حدی عرضی شبکه در نواحی تند و کند و در هر مقطع طولی است که در آزمایش سه روزه به دست می آید. در معادله (۵)، بالانویس ۱ بیانگر درجه بندی پیشین و بالانویس c بیانگر ضرایب درجه بندی تصحیح شده است که می خواهیم به دست آوریم. معادله (۵) برای هر دو موقعیت شبکه در جریانهای آزاد به کار می رود. بنابراین

$$U_h^c - U_h^l = (a_c^c - a^l) E_h + (a_c^c - a^l) E_h^{\gamma} \quad (6)$$

$$= C_1 E_h + C_2 E_h^{\gamma}$$

$$U_1^c - U_1^l = (a_c^c - a^l) E_1 + (a_c^c - a^l) E_1^{\gamma}$$

$$= C_1 E_1 + C_2 E_1^{\gamma}$$

که در آن زیرنویسهای  $h$  و  $l$  به ترتیب مربوط به جریان آزاد در نقاط حدى شبکه در نواحى تند و کند در هر موقعیت طولی هستند. دو معادله و دو مجهول  $C_1$  و  $C_2$  را داریم. از حل دستگاه دو معادله و دو مجهول برای هر موقعیت طولی، تصحیحات  $C_1$  و  $C_2$  برای ضرایب درجه اول و درجه دوم درجه بندی حاصل می شود. ضرایب تصحیح شده عبارت اند از:

$$a_1(x) = a_c^c = a^l + C_1(x) \quad (7)$$

$$a_2(x) = a_c^c = a^l + C_2(x)$$

که با ثابت نگه داشتن  $a_0$  و  $a_p$  به دست آمده اند. ضرایب درجه بندی سیم دوم به همین ترتیب تصحیح می شوند. سرعتهای جدید جریان آزاد که بر مبنای اندازه گیریهای قبلی سیم داغ  $E_1$  و مجموعه ضرایب تصحیح شده درجه بندی برآورد شده، به مقادیر مربوطه از اندازه گیریهای توزیع سرعت جریان آزاد مرجع بسیار نزدیک اند.

#### ۴ - شرایط جریان برشی آزاد

جریانهای برشی آزادی که میزان اغتشاش جریان آزاد آنها کم است به ناپایداریهایی که از اغتشاشهای کوچک سرچشمه می گیرد بسیار حساس اند. از طرف دیگر منحنی ناپایداری لایه های برشی با توزیع سرعت هذلولی مماسی (منکویتز و هوره [۱۱]) دارای قله تندی در نقطه حداکثر نرخ تقویت نیستند و در این نقطه تقریباً مسطح اند. بنابراین ممکن است اغتشاشهایی که بسامدشان به بسامدهایی که بیش از همه تقویت شده اند نزدیک باشد، در صورت اعمال بر روی لایه برشی، تقویت شوند.

بسامد مشخصه بیشتر تونلهای بادناشی از نوعی ارتعاش در تونل است. چنانچه بسامد این ارتعاشها به بسامدهایی که بیشتر از همه تقویت شده اند نزدیک باشد، ممکن است تقویت شوند. در تونل باد مورد بحث، ارتعاشهای ضعیفی با بسامد ۱۳۶ Hz وجود دارد که با تحلیل طیفی مؤلفه های سرعت در لایه برشی آشکار شدند. این ارتعاشها جریان برشی را آشفتته می کنند و در ترکیبهای

مختلف جریان آزاد با سرعتهای زیاد و کم حضور دارند. اما به قدری ضعیف اند که در جریان آزاد بیرون لایه برشی آشکار نمی شوند. با اینکه این اغتشاشهای ناخواسته اهمیت چندانی ندارند، ولی ترجیح می دهیم که یک ناپایداری طبیعی با بسامد منفرد داشته باشیم تا با آن کار کنیم. پس از یک دسته اندازه گیریهای ممتد، دریافتیم که برای جریان آزاد تند ۵/۸ m/s و جریان آزاد کند ۳ m/s، در جریان برشی عاری از اغتشاش، یک موج ناپایداری طبیعی در همان بسامد ۱۳۶ Hz تشکیل می شود. به همین دلیل این ترکیب از سرعتهای زیاد و کم را انتخاب کردیم.

بسامد ناپایداری طبیعی که از نظریه پایداری خطی برای یک توزیع سرعت هذلولی مماسی پیش بینی می شود (منکویتز و هوره [۱۱]، میخالک و هرمان [۱۲])، از عدد استروهل  $St = f_n \theta_0 / \bar{U} = 0.32$  محاسبه می شود که در آن  $\bar{U} = (U_1 + U_2)/2$  است. با در نظر گرفتن ضخامت ممتوم در محلی که گردابه حاصل از لبه انتهای صفحه جداساز ناپدید می شود، مقدار بسامد طبیعی از این رابطه در حدود  $f_n = 142$  Hz به دست می آید. ضخامت ممتوم بر اساس تعریف زیر معادل  $\theta_0 = 0.99$  mm برآورد می شود:

$$\theta_0 = \int_{y_1}^{y_2} \frac{(u_2 - u)(u - u_1)}{(u_2 - u_1)^2} dy \quad (8)$$

در این رابطه  $u_1$  و  $u_2$  به ترتیب سرعتهای جریانهای آزاد تند و کند هستند. اندیس "۰" به شرایط اولیه جریان در  $X \approx 10$  cm مربوط می شود؛ جایی که اثر گردابه جداساز ناپدید شده است.  $y_1$  و  $y_2$  میانگر حدود انتگرال جریانهای آزاد تند و کند در اندازه گیری توزیع عرضی مؤلفه های طولی سرعت هستند. گفتنی است که تعریف فوق تعریف کاملی از ضخامت ممتوم نیست، زیرا کاهش ممتوم را نشان نمی دهد.

مغایرت بین بسامد ناپایداری طبیعی اندازه گیری شده ۱۳۶ Hz  $f_n =$  و پیش بینی نظری می تواند ناشی از اثر گردابه باشد. همان گونه که هوانگ [۱۳] تجربه کرده است، وجود گردابه، بسامد طبیعی را در مقایسه با جوابی که از توزیع هذلولی مماسی به دست می آید، کاهش می دهد.

نسبت سرعت، با تعریف  $R = (u_2 - u_1)/(u_2 + u_1)$ ،  $R = 0.32$

است. عدد رینولدز جریان که بر مبنای نصف مجموع سرعت‌های جریان آزاد و ضخامت ممنتوم اولیه،  $\theta = 0.99 \text{ mm}$ ، محاسبه می‌شود تقریباً ۲۸۵ است.

یک بلندگوی ۸ اینچی که به یک قطعه واسط با سطح مقطع ثابت متصل است اغتشاش‌های دو بعدی را به یک شکاف عرضی در ابتدای کف قسمت آزمایش انتقال می‌دهد. سیگنال تقویت شده‌ای که با کامپیوتر تولید می‌شود، بلندگو را به کار می‌اندازد این سیگنال از دو موج سینوسی ساخته شده است: یکی موج اصلی (پایه) که به طور طبیعی بسامدموجی ناپایدار ایجاد می‌کند؛ دیگری هارمونیک اول آن، با اختلاف فاز از پیش تعیین شده. اندازه‌گیری نشان می‌دهد که هر گاه ریشه میانگین مربعی ولتاژ ورودی بلندگو  $1/5$  ولت باشد، ریشه میانگین مربعی نوسانهای سرعت در فاصله بسیار کمی از لبه‌انتهایی صفحه جداساز  $0.4\%$  میانگین سرعت جریان آزاد است. پایین بودن اغتشاش جریان آزاد در سطح  $0.3\%$  امکان می‌دهد که یک جریان اساساً دو بعدی داشته باشیم. اما در یک لایه برشی، یک سازه طولی (در امتداد جریان) وجود دارد که کمتر از  $10\%$  انرژی اغتشاش کل در ناحیه‌ای از جریان بین  $x = 2 \text{ cm}$  تا  $x = 40 \text{ cm}$  در پایین دست لبه‌انتهایی صفحه جداساز را در بردارد [۱۰].

### ۵- روش آزمایش

برای حالت برهمکنش جفت شدن گردابه‌ها<sup>۶</sup> مربوط به اختلاف فاز اولیه  $270^\circ$  (بین مؤلفه‌های موج سینوسی زیر هماهنگ و موج اصلی سیگنال تحریک) که طبق آزمایش‌های قبلی عامل تخفیف شدید سه بعدی شدن جریان بوده است آزمایش انجام شد. یک سرعت سنج  $x$  شکل سیم داغ که می‌تواند با دقت  $0.0005$  اینچ ( $0.0127 \text{ mm}$ ) در هر دو جهت طولی و عرضی جابه‌جا شود، برای اندازه‌گیری سرعت دو بعدی به کار گرفته شد.

۱-۵- عکسهای لحظه‌ای مرکب اندازه‌گیریها بین  $x = 2 \text{ cm}$  تا  $x = 35 \text{ cm}$  و بین  $y = -6 \text{ cm}$  تا  $y = -6 \text{ cm}$  در فواصل  $1 \text{ mm}$  در هر دو جهت و در مجموع به تعداد  $(331 \times 121)$  موقعیت در شبکه انجام می‌گیرد. این چنین شبکه بندی ظریفی برای محاسبات دقیقتر ضرایب ثابت معادله‌های دینامیکی ضروری است [۶ و ۱۰]، زیرا مستلزم استفاده از تفاضلهای مکانی توابع ویژه و میانگین

مؤلفه‌های سرعت جریان است. در هر نقطه شبکه، داده‌های سرعت سنج سیم متقاطع و مؤلفه‌زیرهماهنگ سیگنال تحریک به مدت  $\frac{1}{10}$  ثانیه با آهنگ نمونه برداری  $3060/\text{sec}$  (مضربی از  $68 \text{ Hz}$  که بسامد مؤلفه‌هماهنگ سیگنال تحریک است) گردآوری می‌شود. آهنگ نمونه برداری بالا برای بالا بردن دقت ضروری است، با این حال به دلیل نیاز به فضای زیاد دیسک برای ذخیره سازی داده‌ها برای فراوری بعدی، محدودیت وجود دارد. چنانچه داده‌های کافی با فواصل زمانی کم به کار رود، اکثر پدیده‌های ناشی از حرکت سازه‌های متشکل و نامتشکل را می‌توان ثبت کرد. این موضوع مهمی است که در این آزمایش مورد توجه بوده است. در هر نقطه شبکه، گردآوری داده‌ها در یک زمان مرجع، یعنی از لحظه‌ای که قطع صفر با شیب مثبت روی یک سیکل مؤلفه‌زیرهماهنگ سیگنال تحریک رخ می‌دهد، شروع می‌شود و به مدت  $\frac{1}{10}$  ثانیه که معادل بیش از ۱۲ پریود مؤلفه‌زیرهماهنگ سیگنال تحریک است، ادامه می‌یابد. حداکثر خطا در زمان شروع گردآوری داده  $\frac{1}{3059}$ ، یا کمتر از  $3 \times 10^{-4}$  ثانیه است که با میانبایی و انتقال داده‌ها به زمان صحیح شروع، تصحیح می‌شود. روش تصحیح به شرح زیر است.

مؤلفه‌زیرهماهنگ سیگنال تحریک را که یک موج سینوسی است در نظر بگیرید. مناسبترین زمان شروع گردآوری داده درست در لحظه قطع صفر است. از طرفی ممکن است در آن لحظه داده‌ای برداشت نشود. شکل (۵) نمونه داده برداشت شده از مؤلفه‌زیرهماهنگ سیگنال تحریک و سیگنال سیم داغ مربوطه در موقعیت  $x = 35 \text{ cm}$  و  $y = 0$  روی شبکه را که هر دو در یک زمان گرفته شده، نشان می‌دهد. فرض کنید  $E_2^\circ$  سیگنال سیم داغ بعد از قطع صفر و  $E_1^\circ$  سیگنال سیم داغ پیش از قطع صفر و مقادیر برداشت شده مؤلفه‌زیرهماهنگ سیگنال تحریک مربوطه به ترتیب  $r_1^\circ$  و  $r_2^\circ$  باشد. در لحظه قطع صفر می‌توان سیگنال سیم داغ  $E^\circ$  را از رابطه زیر میانبایی کرد

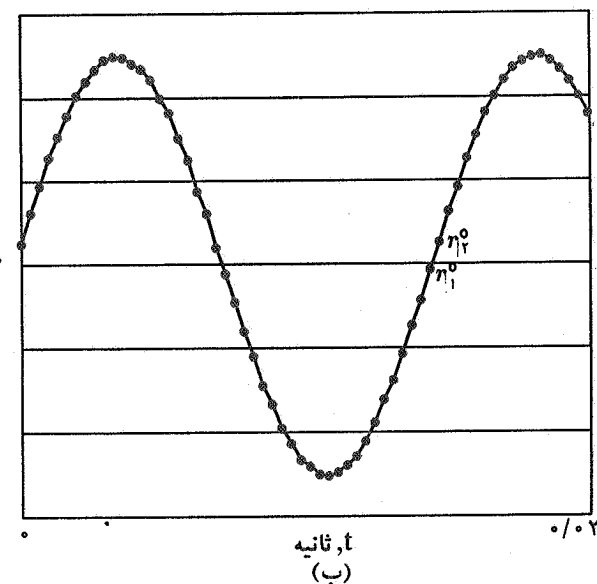
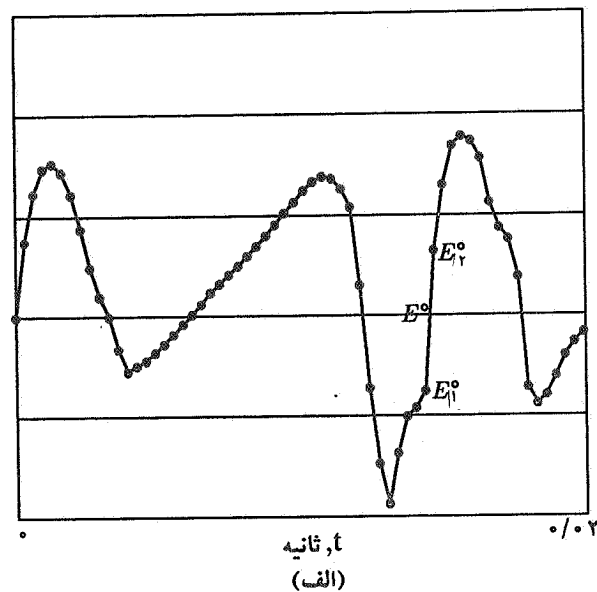
$$\frac{E_2^\circ - E^\circ}{E_1^\circ - E^\circ} = \frac{r_2^\circ - r^\circ}{r_1^\circ - r^\circ} \quad (9)$$

به طوری که  $r^\circ = 0$  قطع صفر مؤلفه‌زیرهماهنگ سیگنال تحریک است. بنابراین



تحریک صورت می‌گیرد. با فرض اینکه در همان چارچوب زمانی که همفاز سیگنال تحریک است، اطلاعاتی از همه نقاط شبکه برداشت شود، می‌توان به کمک این اطلاعات تصاویر لحظه‌ای مرکبی تهیه و تولید کرد. برای هر زمان خاص یا هر فاز، دو مؤلفه سرعت اندازه‌گیری شده از کلیه نقاط شبکه رویهم مونتاز می‌شوند و به این ترتیب تصاویری از میدان جریان ساخته می‌شود که زمان شروع آنها  $t_0$ ، یعنی زمان آغازگردآوری داده‌ها در لحظه قطع صفر است. در هر زمان، بقای جرم یا پیوستگی برای این تصاویر مرکب با مقایسه جریانهای ورودی و خروجی از کلیه مرزهای ناحیه‌ای از جریان که بین دو مقطع مختلف جریان قرار دارند، کنترل می‌شود. برای ناحیه‌ای از جریان که بین مقطع  $x = 2 \text{ cm}$  و هر مقطع دیگر جریان قرار دارد، اختلاف بین جریانهای ورودی با جریانهای خروجی حداکثر ۴٪ است. یعنی دقت در ارضای معادله دوبعدی پیوستگی، حداقل ۹۶٪ است. شکل (۶) بخش بزرگی از دو تصویر مرکب در زمانهای مختلف در ناحیه بین  $x = 10 \text{ cm}$  تا  $x = 35 \text{ cm}$  را نشان می‌دهد. در این شکل میدان بردارهای سرعت ازدیدگاه یک دستگاه مختصات متحرک رسم شده است. سرعت دستگاه مختصات مذکور نصف مجموع سرعت جریانهای آزاد است. دیده می‌شود که در  $x = 10 \text{ cm}$  سازه‌های گردابی عرضی<sup>۷</sup> به وضوح تشکیل شده‌اند و در پایین دست جریان گردابه‌ها به یکدیگر می‌پیوندند. تصاویر مرکب، معادله دوبعدی پیوستگی را با دقت زیادی ارضا می‌کند و این شرط برای ارائه آنها به عنوان یک تصویر لحظه‌ای مناسب، لازم است.

تصاویر مرکب معادل تصاویر لحظه‌ای برای استخراج سازه‌های جریان متشکل به شمار می‌روند. ۵۴۰ تصویر مرکب که برابر تعداد نمونه‌های گرفته شده در ۱۲ سیکل موج زیر هماهنگ است به وجود می‌آید. فیلمی که از خطوط جریان لحظه‌ای ساخته شده [۱۰] به روشنی نشان می‌دهد که سطح مشترک ناپایدار بین نواحی جریانهای تند و کند تقریباً بلافاصله در پایین دست لبه انتهایی صفحه جداساز در  $x = 2 \text{ cm}$  در هم می‌پیچد. همچنین تکامل و تبدیل سطح مشترک در هم پیچیده به سازه‌های بزرگ - مقیاس عرضی را نشان می‌دهد که با جذب انرژی از جریان میانگین رشد می‌کنند. شکل (۷) مراحل اولیه در هم پیچیدن سطح مشترک و تبدیل آن به یک سازه متشکل بیضوی را نشان می‌دهد که نسبت به جهت جریان

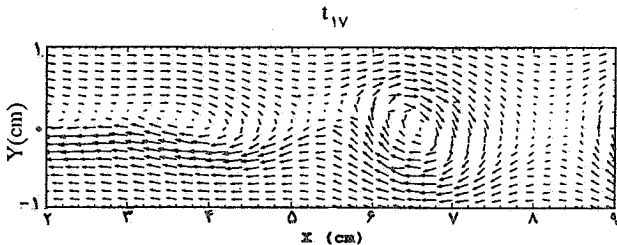
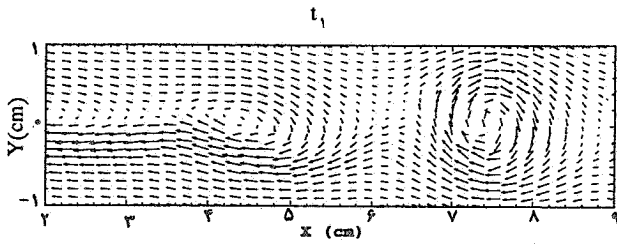


شکل ۵ - (الف) نتایج اندازه‌گیری سیم داغ در  $x = 35 \text{ cm}$  و  $y = 0$ ، (ب) مؤلفه زیرهماهنگ نمونه برداری شده سیگنال محرک که مفهوم نمونه برداری تطبیقی را برای تولید تصاویر مرکب نشان می‌دهد.

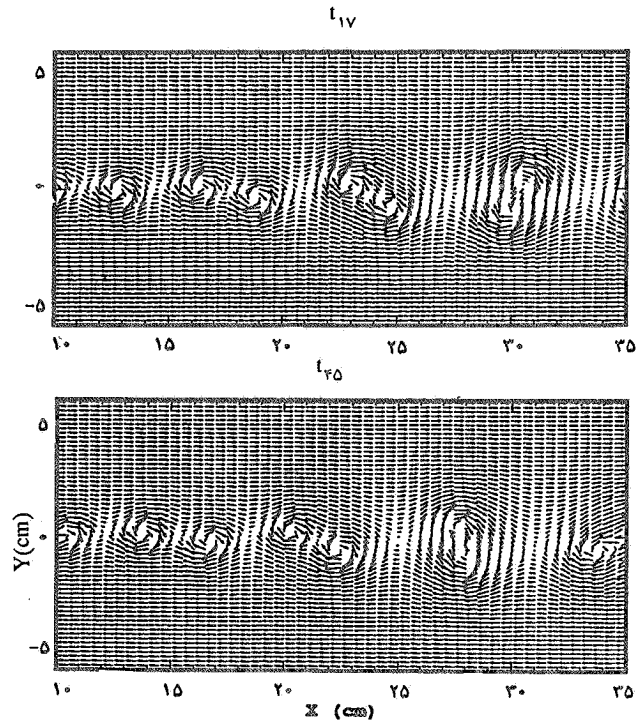
$$E^0 = E_2^0 - \frac{r_2^0}{r_2^0 - r_1^0} (E_1^0 - E_2^0) \quad (10)$$

بنابراین طبق معادله (۱۰)، کلیه داده‌های برداشت شده باید به عقب برگردانده شوند تا خطای زمان شروع گردآوری داده‌ها که در بالا به آن اشاره شد، کاهش یابد.

در هر نقطه از شبکه، اندازه‌گیریهای دو مؤلفه سرعت در فازها یا زمانهای زیادی، در چارچوب زمانی مؤلفه زیرهماهنگ سیگنال



شکل ۷ - میدان بردارهای سرعت از ناحیه کوچکی از جریان بالا دست در  $t_1$  و  $t_{17}$



شکل ۶ - میدان بردارهای سرعت برای دو تصویر مرکب در  $t_{17}$  و  $t_{25}$

تصاویر مرکب برای یک تحلیل همه جانبه به "روش تصاویر لحظه‌ای" [۱۴] برای ایجاد یک فضای تابع ویژه با تعداد ابعاد کم<sup>۸</sup> که سازه‌های عرضی با مقیاس بزرگ را تشریح کند به کار رفته است. از این توابع برای استخراج یک دستگاه معادلات دینامیکی که رفتار دینامیکی سازه‌های متشکل بزرگ را بیان می‌کند، استفاده شده است [۶ و ۱۰].

#### ۶ - نتیجه

هدف اصلی این مقاله تشریح جزئیات اجرای یک آزمایش طولانی است که در آن از یک سیم متقاطع برای تولید تصاویر لحظه‌ای برای آشکار سازی تکامل مکانی - زمانی میدان جریان استفاده می‌شود. این کار مستلزم یک برنامه بهنگام کردن درجه بندی دقیق و نیز تحلیل خطاست. فیلمی از سازه‌های میدان جریان به کمک تصاویر میدان جریان ساخته شده که در این مقاله ارائه نشده است.

یک زاویه تند می‌سازد. این مایل شدن سبب می‌شود که سازه نوزاد از جریان میانگین انرژی جذب کند و انرژی آن در جهت جریان به صورت نمایی زیاد شود [۷]. این سازه در پایین دست به سازه گردابی کاملاً مدوری تبدیل می‌شود. تکامل تدریجی این سازه متشکل از لحظه  $t_1$  تا لحظه  $t_{17}$  در شکل (۷) به روشنی دیده می‌شود. در  $t_{17}$  ( $x = 3/5 \text{ cm}$ )، یک سازه کوچک تشکیل شده که ضمن حرکت به سوی پایین دست، رشد می‌کند. با مشاهده این سازه در  $t_1$  و بعداً در  $t_{17}$ ، تکامل و تبدیل آن به یک شکل نسبتاً مدور در  $x = 6/5 \text{ cm}$  دیده می‌شود. در  $x = 7/5 \text{ cm}$  ( $t_1$ ) کاملاً شکل گرفته و به پایین دست می‌رود. باید دانست که  $t_1$  نسبت به  $t_{17}$  تقدم فاز دارد.

این سازه‌های گردابی به تدریج کاملتر می‌شوند، به این صورت که یک سازه حول سازه‌ای که در مجاورت و بلافاصله در پایین دست آن قرار گرفته می‌چرخد و با آن می‌آمیزد و در پایین دست به یک سازه بزرگتر تبدیل می‌شود. این فرایند ناپایدار ثانوی "پدیده جفت شدن" یا "برهمکنش جفت شدن گردابه‌های زیرهماهنگ" نامیده می‌شود. آمیزش گردابه‌ها در بیرون ناحیه مورد بررسی، تقریباً در  $x \approx 40 \text{ cm}$  پایینتر از لبه‌انتهایی صفحه جداساز، که در کار قبلی دیده شده [۷]، رخ می‌دهد.

- |                           |  |  |
|---------------------------|--|--|
| 1. large-scale structures | decomposition                          | 8. low-dimensional eigenfunction space |
| 2. calibration updating   | 5. hot-wire anemometry                 |  |
| 3. conditional sampling   | 6. distinct pairing vortex interaction |  |
| 4. proper orthogonal      | 7. spanwise vortical structures        |  |

1. Brown, G. L., and Roshko, A., "On Density Effects and Large Structure in Turbulent Mixing Layers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 64, p. 775, 1974.
2. Winant, C. D., and Browand, F. K., "Vortex Pairing the Mechanism of Turbulent Mixing Layer Growth at Moderate Reynolds Number," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 64, p. 237, 1974.
3. Ho, C. M., and Huang, L. S., "Subharmonics and Vortex Merging in Mixing Layers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 119, p. 443, 1982.
4. Kovasznay, L. S. G., Kibens, V., and Blackwelder, R. F., "Large-Scale Motion in the Intermittent Region of Turbulent Boundary Layer," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 41, p. 283, 1970.
5. Miao, J. J., and Karlsson, S. K. F., "Flow Structures in the Developing Region of a Symmetric Wake and an Unsymmetric Wake," *Physics of Fluids*, Vol. 30, p. 2389, 1987.
6. Rajaei, M., Karlsson, S. K. F., and Sirovich, L., "Low-Dimensional Description of Free-Shear-Flow Coherent Structures and their Dynamical Behavior," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 258, p. 1, 1994.
7. Rajaei, M. and Karlsson, S. K. F., "On the Fourier Space Decomposition of Free Shear Flow Measurements and Mode Degeneration in the Pairing Process," *Physics of Fluids*, A, Vol. 4(2), p. 321, 1992.
8. Perry, A. E., *Hot-Wire Anemometry*, Oxford University Press, 1982.
9. Bradshaw, P., *Experimental Fluid Mechanics*, 2d ed., Oxford-New York, Pergamon Press, 1970.
10. Rajaei, M., "Measurement and Mathematical Analysis of Free Shear Flow," Ph.D. Thesis, Brown University, 1992.
11. Monkewitz, P. A., and Huerre, P., "Influence of the Velocity Ratio on the Spatial Instability of Mixing Layers," *Physics of Fluids*, Vol. 25, p. 1137.
12. Michalke, A., and Hermann, J., "On the Inviscid, Instability of a Circular Jet with External Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 114, p. 343, 1982.
13. Huang, L. S., "Small-Scale Transition in a Two-Dimensional Mixing Layer," Ph.D. Thesis, University of Southern California, 1985.
14. Sirovich, L., "Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures," parts 1-3, *Q. Appl. Math.*, Vol. 45/3, p. 561, 1987.