آشکار سازی جریان توسط نمونه برداری تطبیقی یک سیم داغ متقاطع در یک آزمایش بسیارطولانی

مجتبی رجائی
دانشگاه‌براون، مرکز مکانیک سیالات، پراویدنس، رودآیلند

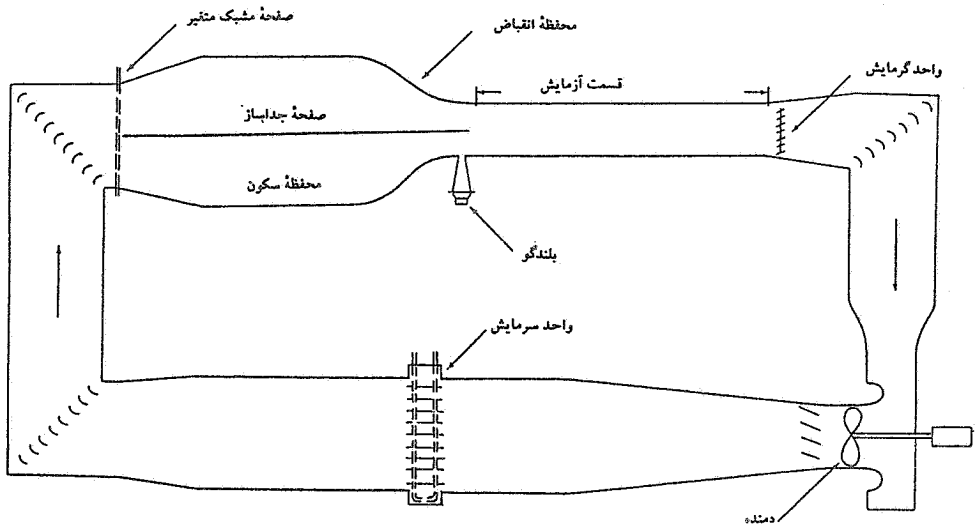
چکیده – روشهای آشکار سازی جریان با استفاده‌از نشانگذارهایی مانندرنگ، دود، حبابهای هیدروژن و غیره به طورگسترده در بررسیهای تجربی سازه‌های با مقیاس بزرگ[1] میدانهای مختلف جریان به کار می‌رود. نقش این روشهادر درک فیزیکی تشکیل و تکامل این سازه‌ها در نواحی انتقالی و مغشوش میدانهای جریان بسیار مهم است؛ بااین حال آنها نمی‌توانندا‌طلاعات کمی‌دقیقی در باره جریان فراهم آورند. در این مقاله روش جدیدی برای تهیه تصاویر کمی‌جریان از یک لایهٔ‌اختلاطی جریان برشی آزاد در یک ناحیه دو بعدی ارائه شده‌است. 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 شده‌است. این روش عامل مهمی در بازسازی تصاویر جریان است و معادلهٔ 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 Rajaee
Brown University, Center for Fluid Mechanics, Providence, RI 02912, USA

ABSTRACT- ***Flow visualization techniques using tracer markers such as die, 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.***

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]



شکل ۱ - تونل باد مدار بسته

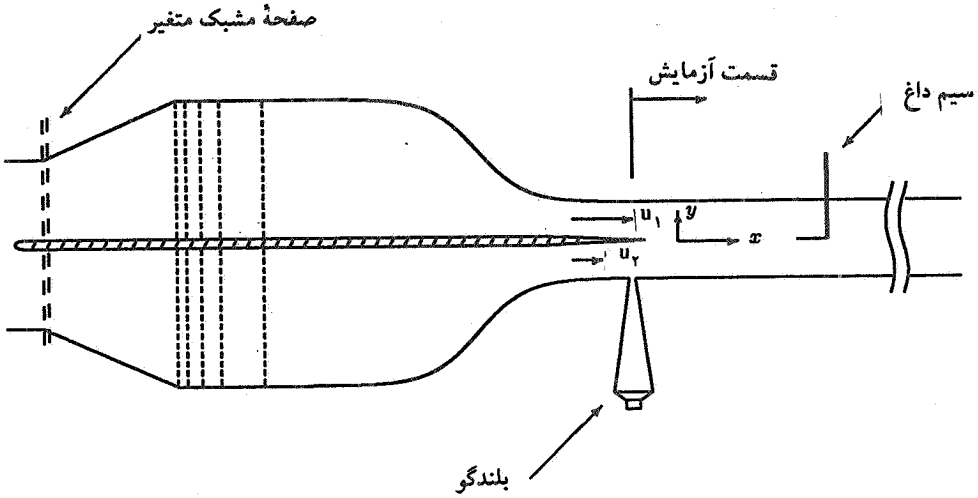
۱- مقدمه

آشکار سازی جریان در مطالعات تجربی میدانهای گوناگون جریان به طور گسترده مورد استفاده بوده‌است (براون وراشکو [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. گرچه‌این روشها اطلاعات کیفی از میدان جریان به دست می‌دهند، لیکن فاقد اطلاعات کمی‌جریان هستند. در برخی از میدانهای جریان مانند جریان در یک تونل باد بزرگ، استفاده‌از دود عملی نیست و لازم است از روشهای دیگری برای ایجاد تصاویر لحظه‌ای جریان استفاده شود. کواژنی و همکاران [۴]، میائو و کارلسن [۵] و پژوهشگران دیگراز روش نمونه برداری تطبیقی[۲] برای تهیه‌اطلاعات کمی‌در بارهٔ تکامل تدریجی لایه‌های اختلاطی استفاده کرده‌اند. در این مقاله یک روش نمونه برداری تطبیقی با استفاده‌از زمانبندی همفاز با سازه‌های متشکل میدان جریان ارائه می‌شود. به‌کمک یک سیم داغ متقاطع و اندازه‌گیریهایی که در چارچوب زمانی فوق الذکر 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 کمی‌دقیق، تصاویر کیفی از جریان را نیز ایجاد کند. داده‌های به دست آمده‌از میدان جریان توسط تجزیهٔعمودی کامل[۳] روابط همبستگی دو نقطه‌ای سرعت در مرجع‌دیگری بررسی شده‌است [۶]. برای تهیهٔ تصاویر لحظه‌ای‌بسیار دقیق با شبکه بندی ریز، باید روش بهنگام کردن‌درجه بندی جامعی برای حسگرهای سیم داغ تهیه شود. جزئیات روشی که ما برای بهنگام کردن درجه بندی[۴] تهیه کرده‌ایم، به خاطرنقش‌مهمی‌که در انجام یک آزمایش طولانی دارد، در این مقاله تشریح می‌شود.

۲- دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش همان است که در مقاله‌های قبلی ذکر شده‌است [۶] و [۷]. از یک تونل بادکم سرعت مداربسته (شکل ۱) به عنوان دستگاه تأمین کنندهٔ لایه برشی آزاد استفاده شده‌است. یک صفحهٔ جداساز، جریان را به دو بخش کُند و تند تقسیم می‌کند. صفحهٔ جداساز از محفظهٔ سکون آغاز می‌شود و تا انتهای محفظهٔ انقباض ادامه دارد، به گونه ای که نوک تیزآن در ابتدای بخش آزمایش قرار می‌گیرد. سرعتهای تند و کند با تنظیم سوراخهای موجود در صفحات مشبکی که در ابتدای صفحهٔ جداساز قرارگرفته تنظیم می‌شود. ارتفاع قسمت آزمایش ۵۷ cm، پهنای آن ۸۱cm و طول‌آن ۳۸۰ cmاست. طراحی دقیق محفظه سکون جدید به گونه‌ای انتخاب شده‌که‌اغتشاش اولیه بسیار کم و در سطح ۰/۰۳درصد سرعت جریان تنداست. در طراحی محفظه سکون جدید که طول تقریبی‌آن۱۴فوت(۴/۲۷ متر)است، توجه‌خاصی‌به‌پایین‌بودن سطح

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]



شکل ۲ - تصویرشماتیک مدارجریان

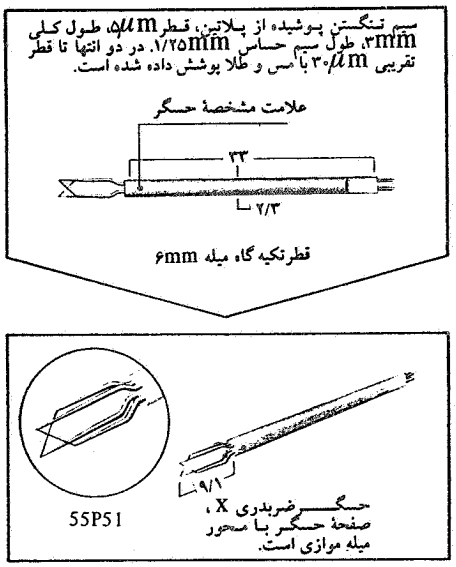
اغتشاش و یکنواختی جریانی شده‌است که وارد قسمت آزمایش می‌شود. بدین منظور ۵ ردیف ورق مشبک ریز در مقاطع مختلف در طول محفظهٔ سکون نصب شده و دیوارهای جانبی‌محفظهٔ انقباض بین محفظهٔ سکون و قسمت آزمایش براساس منحنی چند جمله‌ای درجه پنجم به گونه‌ای طراحی شده که‌اثر انقباض روی جریان ورودی به قسمت آزمایش کاهش یابد (شکل ۲). همان گونه که‌درمقالهٔقبلی‌گفته‌شد [۶]، این‌جریان‌برشی‌آزادعمدتاًدوبعدی‌است.

تحریک دوبعدی جریان برشی به روش صوتی صورت می‌گیرد. یک بلندگوبه قطر ۸ اینچ (۲۰/۳ سانتیمتر) که یک قطعهٔ واسط با سطح مقطع ثابت آن رابه یک شکاف عرضی درکف مقطع شروع آزمایش وصل می‌کند، می تواند اغتشاشهای دوبعدی با بسامد مطلوب را در دامنهٔ مورد نظر ایجاد کند. بلندگو باکامپیوتری 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 واولین زیرهماهنگ آن با اختلاف فاز مطلوب برای سنجش دو بعدی بودن اغتشاش تولیدی، اندازه گیریهای همبستگی سرعت بین یک سرعت سنج ساکن در مرکز لبهٔ عقبی صفحهٔ جداساز، $X = 1$ cm، $Y = 2$ mm و $Z = 0$، و یک سرعت سنج که در جهت Z جابه‌جا می‌شود صورت می‌گیرد. ضریب همبستگی در $Z = 20$ cm به مقدار ۰/۷ می‌رسد. باید دانست که سطح نوسانهادر این موقعیت X، بسیار کم است. با یک فیلترکم گذر با بسامد قطع ۴۰Hz، این همبستگی به ۰/۸۵ رسید که مربوط به‌انتقال فاز اغتشاش اعمال شده به میزان ۳۲ درجه‌است. وقتی که ریشه میانگین مربعی (rms) ولتاژ تغذیهٔ بلندگو ۱/۵ ولت بود، ریشه میانگین‌مربعی سطح اغتشاش سرعت در انتهای صفحه جداساز ۰/۴ درصد سرعت جریان آزاد اندازه گیری شد.

برای اندازه گیری سرعت جریان از روش سرعت سنجی سیم داغ[5] استفاده می‌شود. به طور خلاصه می توان گفت که سیم‌داغ سیم باریکی است که در جریان قرار داده می‌شود. هرگاه جریان برق از سیم‌بگذرد، دمای آن خیلی بالاتر از دمای سیال اطراف آن خواهد بود. ازاین روجریان سیال اثر خنک کنندگی روی سیم‌داغ دارد. هر چه جریان تندترباشد، اعداد رینولدز و نوسلت بزرگتر خواهند بود و اثر خنک کنندگی جریان بیشتر است. انرژی‌ای که سیم‌داغ از دست می‌دهد از طریق توان الکتریکی RI^2 جبران می‌شود (R مقاومت سیم‌داغ و I شدت جریان آن است). بین ولتاژ دو سر سیم داغ و سرعت خنک کنندگی مؤثر جریان که توسط سیم حس می‌شود، یک رابطه تجربی وجود دارد. ترجیح ما این است که موقع درجه بندی سیم داغ، از برازش یک چندجمله‌ای 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 درحین آزمایش معتبر باشد، بایدکه دمای جریان هر چه ممکن است به دمای جریان مرجعی که

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]



شکل ۳ - سیم داغ با سیمهای متقاطع

در درجه بندی سیم داغ به کار رفته نزدیک باشد. در غیر این صورت، می‌تواند دقت اندازه گیری راکاهش دهد. برای فراهم کردن چنین کنترلی روی دما، از واحدهای سرمایش و گرمایش استفاده می‌شود. واحد سرمایش یک مبادله کن گرماست که مجموعهٔ لوله‌های آن عمود بر جریانی است که‌از دمنده خارج می‌شود. سیال خنک کنندهٔ آن آب بادبی تنظیم پذیراست. برای کنترل بهتر دما، جریان هوا را همزمان گرم و سرد می‌کنیم. به عبارت دیگر، جریان هوا را به وسیلهٔ 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 واقع‌اندافزایش می‌دهیم (شکل ۱). از ترکیب همزمان سرمایش و گرمایش می‌توان دما را در دراز مدت در گسترهٔ تقریبی ۰/۵°C± 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 مؤلفهٔسرعت را اندازه گرفت. سرعت‌سنج X شکل، یک سرعت سنج DISA باسیم تنگستن پوشیده از پلاتین است (شکل۳). مکانیزمی‌که سرعت سنج برآن استواراست در دو جهت عرضی و طولی به کمک موتورهای دورمتغیر که با کامپیوتر کنترل می‌شود حرکت می‌کند و دقت آن ۰/۰۰۰۵ اینچ (۰/۰۱۲۷ میلیمتر) است.

ولتاژ خروجی حسگرها باید خیلی سریع اندازه گیری شود. برای این کار از یک کامپیوتر ۳۲ بیتی‌که 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 کارمی‌رود.

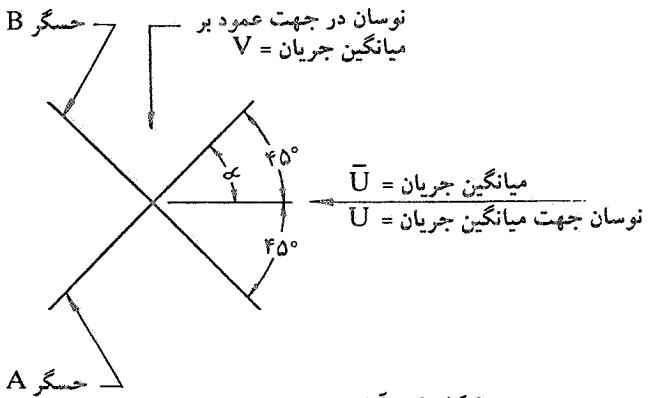
۳ - اندازه گیری با سیم داغ

۳ - ۱ - درجه بندی سیم داغ گام نخست در پژوهشهای تجربی، درجه بندی تجهیزات اندازه گیری است. همان گونه که قبلاًگفته 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 وسیلهٔ 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 که‌از لولهٔ پیتوت در گسترهٔ تغییرات سرعت جریان به دست می‌آید مرتبط می‌شود.

سیستم فراوری 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 درجه‌بندی سیم‌داغ، سرعت‌سنج حامل سیم‌داغ ولوله‌پیتوت هردودریک‌مقطع طولی و عرضی (عمودی) در قسمت سریع جریان آزاد قرار داده می‌شوند. سرعت جریان آزاد در گسترهٔ تغییرات ممکن، به طور پیوسته تغییر داده می‌شود. داده‌های سیم‌داغ‌متقاطع وترانسدیوسرفشاری‌همزمان‌ثبت می‌شود. ۳۰۰ داده که هر یک متوسط روی فاصلهٔ زمانی کوتاهی است گردآوری

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]



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.

$$U_{e1} = a_0 + a_1E_1 + a_2E_1^2 + a_3E_1^3$$
$$U_{e2} = b_0 + b_1E_2 + b_2E_2^2 + b_3E_2^3 \qquad (1)$$

که در آن U_{e1} و U_{e2} سرعتهای مؤثری است که سرعت‌سنج سیم متقاطع حس می‌کند، و E_1 و E_2 مقادیر ولتاژهای دو سیم‌داغ است. نصف مجموع U_{e1} و U_{e2} برابر مؤلفه‌طولی سرعت جریان، u، است و نصف اختلاف این دو مقدار وقتی در ضریب تصحیح ۱/۰۸ (که مبتنی بر یک رابطه تجربی است) ضرب شود، مؤلفه‌عرضی سرعت جریان، v است(شکل ۴).

فرایند درجه بندی با یافتن ضرایب ثابت رابطه (۱) برای دوسیم، $a_i = 0 - 3$ و $b_i = 0 - 3$ کامل می‌شود. چند جمله‌ای مرتبه بالاتردقت 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 معلومی‌به کمک اندازه‌گیریهای سیم داغ به کار می‌روند تا دقت آنها سنجیده شود. آنگاه نتایج با سرعت جریانی که‌از خواندن لوله پیتوت به دست می‌آید مقایسه می‌شود. توافقی در حد ۰/۲ ± درصد قابل قبول است.

۳ - ۳ - تحلیل خطای سیم داغ (الف) خطای تفکیک A/D

توانایی تفکیک ۲/۴A/D میلی ولتی در سیستم گردآوری داده‌ها یکی از منابع خطاست. از معادلهٔ (۱)می‌توان خطا را به صورت زیر برآورد کرد:

$$\Delta U_{e1} = a_1\Delta E_1 + 2a_2E_1\Delta E_1 + 3a_3E_1^2\Delta E_1$$
$$\Delta U_{e2} = b_1\Delta E_2 + 2b_2E_2\Delta E_2 + 3b_3E_2^2\Delta E_2 \qquad (2)$$

با جاگذاری ضرایب درجه بندی درمعادلهٔ (۲)، خطای تخمینی برای اندازه گیریهای سرعت ناشی از توانایی تفکیک ۲/۴A/D میلی ولتی‌حداکثر $\Delta u = \pm 0/6$ cm/s است.

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

$$u_0 = 0/09171\sqrt{E_0} \qquad (3)$$

که E_0 خروجی ترانسدیوسر بر حسب ولت و u_0 سرعت جریان آزاد بر حسب متر بر ثانیه‌است. خطای تعیین سرعت جریان آزاد توسط لولهٔ پیتوت راکه ناشی از توانایی تفکیک ۲/۴A/D میلی ولتی در سیستم گردآوری داده‌ها از ترانسدیوسر فشاری است، می‌توان از معادلهٔ (۳) برآورد کرد:

$$\Delta u_0 = 0/04585\Delta E_0/\sqrt{E_0} \qquad (4)$$

بنابراین، خطای تخمینی روی منحنیهای درجه بندی در حدنهایی سرعت زیاد و کم به ترتیب ۰/۱ ± تا ۰/۷ ± سانتیمتر بر ثانیه است.

(ب) خطای ناشی از تغییرات دمای جریان وکهنگی سیم‌داغ فرض می‌شودکه دمای جریان در طول اندازه گیری ثابت بماند. گرچه ثابت نگه داشتن دما بسیار سخت است، ولی در طول یک آزمایش ۲۴ ساعته می‌توان آن را با دقت ۰/۵°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 اندازه‌گیری‌سیم داغ می‌شود، زیرا ولتاژ خروجی سیم

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]

داغ به‌اختلاف دمای جریان و دمای از پیش تعیین شدهٔ حسگرسیم داغ بستگی‌دارد.کهنه شدن سیم داغ در طول یک آزمایش یکروزه‌نیزسبب خطا می‌شود. مثلاً بعد از یک آزمایش ۲۴ ساعته، برآوردسرعت جریان آزاد در محل درجه بندی بر اساس‌ضرایب‌درجه بندی روز قبل می‌تواند تا ۱/۵٪ اختلاف داشته‌باشد.برای اصلاح دقت اندازه گیری سرعت، از دو مجموعهٔ ضرایب‌درجه بندی، که یکی پیش از آغاز آزمایش و دیگری بعد ازپایان آن به دست آمده، استفاده می‌شود. بدین منظور لازم است‌زمان انجام اندازه گیریهایی که در هر موقعیت مکانی در قلمروآزمایش صورت می‌گیرد، معین شود تا بتوان نسبت تأثیر هریک از دو مجموعهٔ ضرایب درجه بندی را در محاسبهٔ سرعت درآن موقعیت مکانی تعیین کرد.

۳-۴ - بهنگام‌کردن درجه بندی فرض کنید اندازه‌گیریهای زیادی به وسیلهٔ سیم داغ در نقاط مختلف شبکه در یک ناحیه جریان دو بعدی انجام شده‌است (بخش۵ را ببینید). در هر نقطهٔ شبکه، سرعت‌سنج سیم متقاطع برای انجام اندازه گیریها با نرخ نمونه برداری معینی، ثابت نگه داشته می‌شود. برای این گونه‌اندازه گیریها که ممکن است در یک دورهٔ زمانی ۲۴ ساعته کامل شوند، باید درجه بندی دقیقتر تصحیح شود، مخصوصاً اگر دما به طور ناخواسته‌از کنترل خارج شود. در آزمایشهایی مانند بررسی دستگاه معادلات دینامیکی [۶ و ۱۰]که‌مستلزم شبکه بندی ریز است، بیش از سه روز طول می‌کشد تا آزمایش کامل شود و تصحیح درجه بندی باید دقیقتر از آنچه که قبلاً گفته شد، انجام شود. برای انجام این کاربلافاصله پس از انجام آزمایش سه روزه، سیم داغ را در طول ناحیه‌اندازه گیری حرکت می دهیم و سرعتهای جریان آزاد راکه توسط سیم داغ متقاطع در موقعیتهای حدی جریان در نواحی تند و کند اندازه گیری می‌شود، ثبت می‌کنیم. توزیع مؤلفه‌طولی(در جهت جریان) سرعت دو بخش مذکور در کمتر از ۳۰ دقیقه‌اندازه‌گیری می‌شود. سپس درجه بندی سیم داغ بهنگام می‌شود. با استفاده‌از مجموعهٔ ضرایب جدید درجه بندی، توزیع مؤلفه‌طولی سرعت (در جهت جریان) در دو بخش (تند و کند) محاسبه و با مقادیر مربوطه که‌از مجموعه ضرایب درجه بندی قبلی برآورد شده، و نیز بااندازه گیریهای سیم داغ دردو موقعیت حدی شبکه در دو بخش(تند و کند) در طول آزمایش سه روزه مقایسه می‌شود. باید دانست که‌اولین مجموعهٔ ضرایب درجه بندی همیشه پیش از آغاز آزمایش تهیه می‌شود.

سه ضریب ثابت اول در چند جمله‌ای معادلهٔ (۱) یعنی عرض از مبدأ، a_0، جمله درجهٔاول، a_1، و جملهٔ درجهٔ 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 نمی‌کند و تصحیحات راروی ضرایب درجه‌اول و درجه دوم اعمال می کنیم. بنابراین، با داشتن سرعت دو جریان آزاد، می‌توانیم ثابتهای درجه‌اول و درجه دوم درجه بندی را تصحیح کنیم. برای انجام این کار، باید یک دستگاه دو معادله و دومجهول را برای هر یک از موقعیتهای طولی حل کرد. نخست برمبنای ضرایب درجه بندی اولیه، سرعتهای مؤثر جریان آزاد دردوبخش (تند و کند) را برآورد می‌کنیم. سپس آنها را با برآوردهای‌مربوطه که‌از اندازه گیریهای اخیر توزیع سرعت جریان به‌دست آمده مقایسه می‌کنیم. به این ترتیب یک دسته ضرایب درجه‌بندی جدید به دست می آید. چنانچه‌اولین و آخرین ضرایب‌درجه بندی a_0^1 و a_2^1 را ثابت بگیریم، از معادلهٔ (۱) خواهیم‌داشت:

$$U_i^1 = a_0^1 + a_1^1 E_i + a_2^1 E_i^2 + a_3^1 E_i^3$$
$$U_i^c = a_0^1 + a_1^c E_i + a_2^c E_i^2 + a_3^1 E_i^3 \qquad (۵)$$

که در آن U_i^1 سرعت مؤثر سیم اول است که بر مبنای اولین مجموعهٔ ضرایب درجه بندی، a_0^1، a_1^1، a_2^1 و a_3^1، برآورد شده‌است. اندیس i برای هر دو نقطه شبکه در نواحی تند و کند به کار می‌رود. U_i^c بیانگربرآوردهای جدید سرعت جریان در نواحی تند یا کند است که به عنوان مرجع در محاسبات ضرایب درجه بندی، a_1^c، a_2^c، با ثابت نگه داشتن a_0^1 و a_3^1، و با استفاده‌از E_i، اندازه گیری قبلی سیم داغ، به کار می‌رود. 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 می‌آید. در معادلهٔ (۵)، بالانویس ۱ بیانگر درجه بندی پیشین و بالانویس c بیانگر ضرایب درجه بندی تصحیح شده‌است که می‌خواهیم به دست آوریم. معادلهٔ (۵) برای هر دو موقعیت شبکه در جریانهای آزاد به کار می‌رود. بنابراین

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]

$$U_h^c - U_h^1 = (a_1^c - a_1^1)E_h + (a_2^c - a_2^1)E_h^2 = C_1E_h + C_2E_h^2$$
$$U_l^c - U_l^1 = (a_1^c - a_1^1)E_l + (a_2^c - a_2^1)E_l^2 = C_1E_l + C_2E_l^2 \qquad (۶)$$

که در آن زیرنویسهای h و l به ترتیب مربوط به جریان آزاد در نقاط حدی شبکه در نواحی 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 درجه‌اول و درجه دوم درجه بندی حاصل می‌شود. ضرایب تصحیح شده عبارت‌اند از:

$$a_1(x) = a_1^c = a_1^1 + C_1(x)$$
$$a_2(x) = a_2^c = a_2^1 + C_2(x) \qquad (۷)$$

که با ثابت نگه داشتن a_0 و a_2 به دست آمده‌اند. ضرایب درجه بندی سیم دوم به همین ترتیب تصحیح می‌شوند. سرعتهای جدید جریان آزاد که بر مبنای اندازه گیریهای قبلی سیم داغ E_i، و مجموعه ضرایب تصحیح شده درجه بندی برآورد شده، به مقادیر مربوطه‌از اندازه گیریهای توزیع سرعت جریان آزاد مرجع بسیار نزدیک‌اند.

۴ - شرایط جریان برشی آزاد

جریانهای برشی آزادی که میزان اغتشاش جریان آزاد آنها کم است به ناپایداریهایی که‌از اغتشاشهای کوچک سرچشمه می‌گیرد بسیار حساس‌اند. از طرف دیگر منحنی ناپایداری لایه‌های برشی با توزیع سرعت هذلولی مماسی (منکویتزوهوره[۱۱]) دارای قلهٔ تندی در نقطهٔ حداکثر نرخ تقویت نیستند و در این نقطه تقریباً مسطح‌اند. بنابراین ممکن است اغتشاشهایی که بسامدشان به بسامدهایی که بیش از همه تقویت شده‌اندنزدیک باشد، در صورت اعمال برروی لایه برشی، تقویت شوند.

بسامد مشخصهٔ بیشتر تونلهای بادناشی از نوعی ارتعاش در تونل است. چنانچه بسامد این ارتعاشهابه بسامدهایی که بیشتر از همه تقویت شده‌اندنزدیک باشد، ممکن است تقویت شوند. در تونل باد مورد بحث، ارتعاشهای ضعیفی با بسامد ۱۳۶ Hz وجود دارد که باتحلیل طیفی مؤلفه‌های سرعت در لایهٔ برشی آشکار شدند. این ارتعاشها جریان برشی را آشفته می‌کنندو درترکیبهای مختلف جریان آزاد با سرعتهای زیاد و کم حضور دارند. امابه قدری ضعیف‌اند که در جریان آزاد بیرون لایهٔ برشی آشکار نمی‌شوند. با اینکه‌این اغتشاشهای ناخواسته‌اهمیت چندانی ندارند، ولی ترجیح می‌دهیم 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 Hz ۱۳۶ تشکیل می‌شود. به همین دلیل این ترکیب از سرعتهای زیاد و کم‌را انتخاب کردیم.

بسامد ناپایداری طبیعی که ازنظریه پایداری خطی برای یک توزیع سرعت هذلولی مماسی پیش بینی می‌شود (منکویتزوهوره[۱۱]، میشالک وهرمان[۱۲])،ازعدداستروهال $St = f_n\theta_0/\bar{U} = ۰/۰۳۲$ محاسبه می‌شود که درآن $\bar{U} = (U_1 + U_2)/2$است. بادرنظرگرفتن ضخامت ممنتوم در محلی که گردابه حاصل از لبهٔ‌انتهایی صفحه جداساز ناپدید می‌شود، مقدار بسامد طبیعی از این رابطه در حدود $f_n = ۱۴۲$ Hz به دست می‌آید. ضخامت ممنتوم براساس تعریف زیر معادل $\theta_0 = ۰/۹۹$ mm برآورد می شود:

$$\theta_0 = \int_{y_1}^{y_2} \frac{(u_2 - u)(u - u_1)}{(u_2 - u_1)^2}\, dy \qquad (۸)$$

در این رابطه u_1 و u_2 به ترتیب سرعتهای جریانهای آزاد تند و کند هستند. اندیس "۰" به شرایط اولیه جریان در $X \approx ۱۰$ cm مربوط می‌شود؛ جایی که‌اثر گردابهٔ صفحهٔ جداساز ناپدید شده‌است. y_2 و y_1 بیانگر حدود انتگرال جریانهای آزاد تند و کند در اندازه گیری توزیع عرضی مؤلفه‌های طولی سرعت هستند. گفتنی است که تعریف فوق تعریف کاملی از ضخامت ممنتوم نیست، زیرا کاهش ممنتوم را نشان نمی‌دهد.

مغایرت بین بسامد ناپایداری طبیعی اندازه گیری شده ۱۳۶ Hz = f_n، و پیش بینی نظری می‌تواند ناشی از اثر گردابه باشد. همان گونه که هوانگ [۱۳] تجربه کرده‌است، وجود گردابه، بسامد طبیعی رادر مقایسه با جوابی که‌از توزیع هذلولی مماسی به دست می‌آید، کاهش می‌دهد.

نسبت سرعت، با تعریف $R = (u_2 - u_1)/(u_2 + u_1)$، ۰/۳۲

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]

است. عدد رینولدز جریان که بر مبنای نصف مجموع سرعتهای جریان آزاد و ضخامت ممنتوم اولیه، $\theta_0 = 0/99$ mm ، محاسبه می‌شود تقریباً ۲۸۵ است.

یک بلندگوی ۸ اینچی که به یک قطعهٔ واسط با سطح مقطع ثابت متصل است اغتشاشهای دو بعدی رابه یک شکاف عرضی در ابتدای کف قسمت آزمایش انتقال می‌دهد. سیگنال تقویت شده‌ای که باکامپیوتر تولید می‌شود،بلندگو رابه کار می‌اندازداین سیگنال از دو موج سینوسی ساخته شده‌است: یکی موج اصلی (پایه)که به طور طبیعی بسامدموجی ناپایدارایجاد می‌کند؛ دیگری هارمونیک اول آن، با اختلاف فاز از پیش تعیین شده. اندازه‌گیری نشان می دهد که هرگاه ریشه میانگین مربعی ولتاژ ورودی بلندگو ۱/۵ ولت باشد، ریشه میانگین مربعی نوسانهای سرعت در فاصلهٔ بسیار کمی‌از لبهٔانتهایی صفحهٔ جداساز ۰/۴٪ میانگین سرعت جریان آزاد است.

پایین بودن اغتشاش جریان آزاد در سطح ۰/۰۳٪ امکان می‌دهد که یک جریان اساساً دو بعدی داشته باشیم. اما در یک لایهٔ برشی، یک‌سازهٔطولی (در امتدادجریان) وجوددارد که کمتر از ۱۰٪ انرژی اغتشاش کل در ناحیه‌ای از جریان بین $x = 2$ cm تا $x = 40$cm در پایین دست لبهٔانتهایی صفحه جداساز را در بردارد [۱۰].

۵ - روش آزمایش

برای حالت برهمکنش جفت شدن گردابه‌ها[۶] مربوط به‌اختلاف فاز اولیه ۲۷۰° (بین مؤلفه‌های موج سینوسی زیر هماهنگ و موج اصلی سیگنال تحریک) که طبق آزمایشهای قبلی عامل تخفیف شدید سه بعدی شدن جریان بوده است آزمایشی انجام شد. یک سرعت سنج x شکل سیم داغ که می‌تواند با دقت ۰/۰۰۰۵ اینچ (۰/۰۱۲۷ mm) در هر دو جهت طولی و عرضی جابه جا شود، برای اندازه‌گیری سرعت دو بعدی به کار گرفته شد.

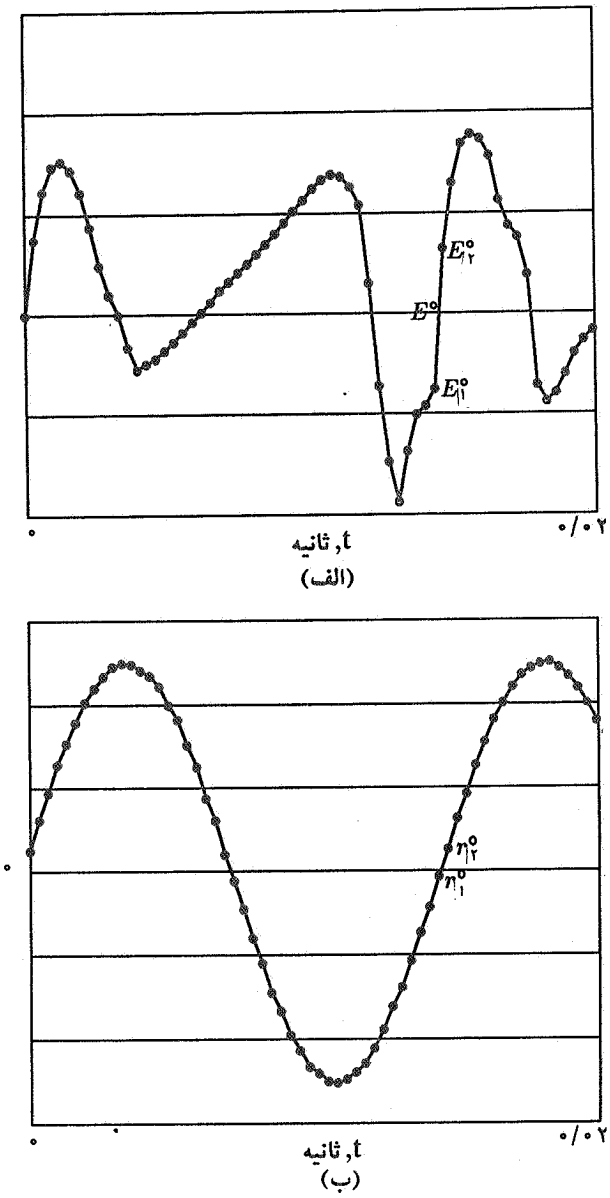
۵-۱ - *عکسهای لحظه‌ای مرکب* اندازه‌گیریها بین $x = 2$ cm تا $x = 35$ cm و بین $y = -6$ cm تا $y = -6$ cm در فواصل ۱ mm در هر دو جهت و در مجموع به تعداد (۳۳۱×۱۲۱) موقعیت در شبکه‌انجام می‌گیرد. این چنین شبکه بندی ظریفی برای محاسبات دقیقتر ضرایب ثابت معادله‌های دینامیکی ضروری است [۶ و ۱۰]، زیرا مستلزم استفاده‌از تفاضلهای مکانی توابع ویژه و میانگین مؤلفه‌های سرعت جریان است. در هر نقطهٔ شبکه، داده‌های سرعت سنج سیم متقاطع و مؤلفهٔزیرهماهنگ سیگنال تحریک به مدت $\frac{2}{10}$ ثانیه با آهنگ نمونه برداری ۳۰۶۰/sec (مضربی از ۶۸ Hz که بسامد مؤلفه‌هماهنگ سیگنال تحریک است) گردآوری می شود. 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 مهمی‌است که در این آزمایش مورد توجه بوده‌است. در هر نقطهٔ 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 $\frac{2}{10}$ ثانیه که معادل بیش از ۱۲ پریود مؤلفه‌زیرهماهنگ سیگنال تحریک است، ادامه می‌یابد. حداکثر خطا در زمان شروع گردآوری داده $\frac{1}{3059}$، یاکمتر از 3×10^{-4} ثانیه است که با میانیابی 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 لحظهٔ خاص، داده‌ای برداشت نشود. شکل (۵) نمونهٔ دادهٔ برداشت شده‌از مؤلفهٔزیرهماهنگ سیگنال تحریک و سیگنال سیم داغ مربوطه در موقعیت $x = 35$ cm و $y = 0$ روی شبکه راکه هر دو در یک زمان گرفته شده، نشان می‌دهد. فرض کنید E°_2 سیگنال سیم داغ بعد از قطع صفر و E°_1 سیگنال سیم داغ پیش از قطع صفر و مقادیر برداشت شدهٔ مؤلفه‌زیرهماهنگ سیگنال تحریک مربوطه به ترتیب r°_2 و r°_1 باشد. در لحظه قطع صفر می‌توان سیگنال سیم‌داغ E° را از رابطهٔ زیر میانیابی کرد

$$\frac{E^\circ_2 - E^\circ}{E^\circ_2 - E^\circ_1} = \frac{r^\circ_2 - r^\circ}{r^\circ_2 - r^\circ_1} \qquad (۹)$$

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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]



شکل ۵ - (الف) نتایج اندازه‌گیری سیم داغ در $x = 35cm$ و $y = 0$، (ب) مؤلفهٔ زیرهماهنگ نمونه برداری شدهٔ سیگنال محرک که مفهوم نمونه برداری تطبیقی را برای تولید تصاویر مرکب نشان می دهد.

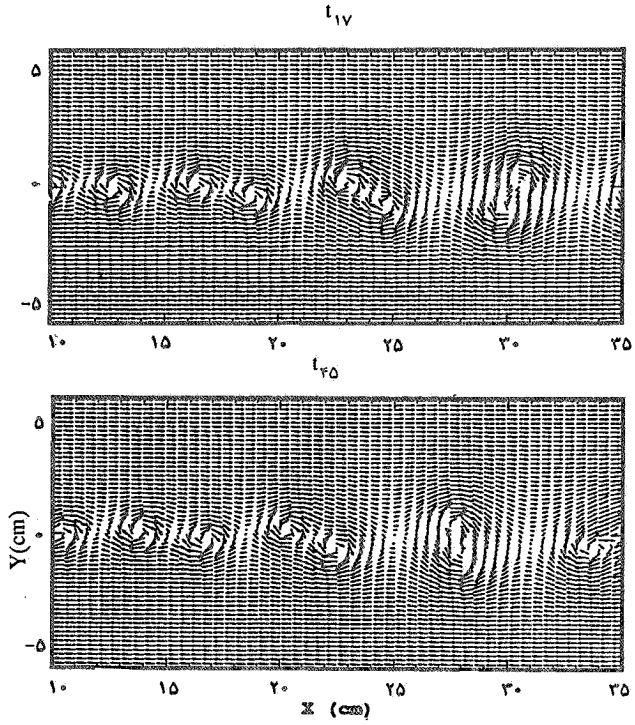
$$E^{\circ} = E^{\circ}_{2} - \frac{r^{\circ}_{2}}{r^{\circ}_{2} - r^{\circ}_{1}} (E^{\circ}_{2} - E^{\circ}_{1}) \qquad (۱۰)$$

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 نقطه‌از شبکه، اندازه گیریهای دو مؤلفهٔسرعت در فازها یا زمانهای زیادی، در چارچوب زمانی مؤلفهٔزیرهماهنگ سیگنال تحریک صورت می‌گیرد. با فرض اینکه در همان چارچوب زمانی که همفاز سیگنال تحریک است، اطلاعاتی از همهٔ نقاط شبکه برداشت شود، می‌توان به کمک این اطلاعات تصاویر لحظه‌ای مرکبی تهیه و تولید کرد. برای هر زمان خاص یا هر فاز، دو مؤلفه‌سرعت اندازه گیری شده‌از کلیه نقاط شبکه رویهم مونتاژ می‌شوند وبه‌این ترتیب تصاویری از میدان جریان ساخته می‌شود که زمان شروع آنها $t_{\circ}$، یعنی زمان آغازگردآوری داده‌ها در لحظهٔ قطع صفر است. در هر زمان، بقای جرم یا پیوستگی برای این تصاویر مرکب با مقایسه جریانهای ورودی و خروجی از کلیه مرزهای ناحیه‌ای‌ازجریان‌که بین دو مقطع مختلف جریان قرار دارند، کنترل می‌شود. برای ناحیه‌ای از جریان که بین مقطع $x = ۲\ cm$ و هر مقطع دیگر جریان قراردارد، اختلاف بین‌جریانهای 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 $x = ۱۰\ cm$ تا $x = ۳۵\ cm$ را نشان می‌دهد. در این شکل میدان بردارهای سرعت ازدیدگاه یک دستگاه مختصات متحرک رسم شده‌است. سرعت دستگاه‌مختصات مذکور نصف مجموع سرعت جریانهای آزاد است. دیده می‌شود که در $x = ۱۰\ cm$ سازه‌های گردابی عرضی[۷] به وضوح تشکیل شده‌اند و در پایین دست جریان گردابه ها به یکدیگر می پیوندند. تصاویر مرکب، معادلهٔ دوبعدی پیوستگی را با دقت زیادی ارضا می‌کند و این شرط برای ارائهٔ 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 به‌وجود می‌آید. فیلمی‌که‌از 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 لبهٔانتهایی صفحهٔ جداساز در $x = ۲\ cm$ در هم می‌پیچد. همچنین تکامل و تبدیل سطح‌مشترک در هم پیچیده به سازه‌های بزرگ - مقیاس عرضی رانشان‌می‌دهدکه با جذب انرژی از جریان میانگین رشد می‌کنند. شکل (۷) مراحل اولیه در هم پیچیدن سطح مشترک و تبدیل آن به یک سازهٔ متشکل بیضوی را نشان می‌دهدکه نسبت به جهت جریان

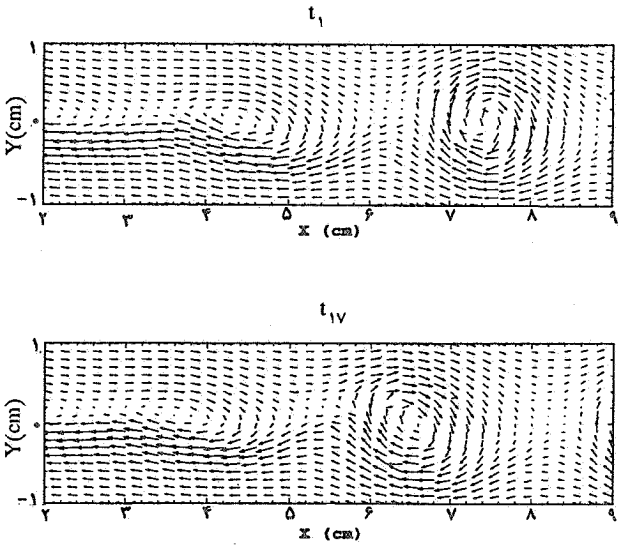
[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]



شکل ۶ - میدان بردارهای سرعت برای دو تصویر مرکب در t_{17} و t_{45}

یک زاویه تند می‌سازد. این مایل شدن سبب می شود که سازهٔ 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 دیـده می‌شـود. در t_{17} ($x = 3/5\ cm$)، یک سازه کوچک تشکیل شده که ضمن حرکت به‌سوی‌پایین دست، رشد می‌کند. با مشاهده‌این سازه در t_1 و بعداً در t_{17}، تکامل و تبدیل آن به یک شکل نسبتاً مدور در $x = 6/5\ cm$ دیده می‌شود. در $x = 7/5\ cm$ (t_1) کاملاً شکل گرفته و به پـایین دست می‌رود. باید دانست که t_1 نسبت به t_{17} تقدم فاز دارد.

این سازه‌های گردابی به تدریج کاملتر می‌شوند، به‌این صورت که یک سازه حول سازه‌ای که در مجاورت و بـلافاصله در پـایین دست آن قرار گرفته می‌چرخد و با آن می آمیزد و در پـایین دست به‌یک سازهٔ بزرگتر تبدیل می‌شود. این فرایند ناپایدار ثانوی "پدیدهٔ جفت شدن" یا "برهمکنش جفت شدن گردابـه‌های زیـرهماهنگ" نامیده می‌شود. آمیزش گردابه‌ها در بیرون ناحیهٔ مورد بررسی، تقریباً در $x \approx 40cm$ پایینتراز لبهٔ‌انتهایی صفحهٔ جداساز، که در کار قبلی دیده شده [۷]، رخ می‌دهد.



شکل ۷ - میدان بردارهای سرعت از ناحیهٔ کـوچکی از جـریان بـالا دست در t_1 و t_{17}

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

۶ - نتیجه

هدف اصلی ایـن مـقاله‌تشریح جـزئیات اجـرای یک آزمـایش طولانی است که در آن از یک سیم مـتقاطع بـرای تـولید تـصاویر لحظه‌ای برای آشکار سازی تکامل مکانی - زمانی مـیدان جـریان استفاده می‌شود. این کار مستلزم یک برنامهٔ بهنگام کردن درجه بندی دقیق و نیز تحلیل خطاست. فیلمی‌از سازه‌های مـیدان جـریان بـه کمک تصاویر میدان جریان سـاخته شـده کـه در ایـن مـقاله‌ارائـه نشده‌است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]

واژه نامه

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

مراجع

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 Paring 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 Turbulet Boundary Layer," *Journal of Fluid Mechanics,* Vol 41, p. 283, 1970.
5. Miau, 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. Rajaee, 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. Rajaee, 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. Rajaee, M., "Measurement and Mathematical Analysis of Free Shear Flow," Ph.D. Thesis, Brown University, 1992.
11. Monkewiz, 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.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1374.14.2.3.8]