

مطالعه هیدرودینامیک لایه اختلاطی محاط بر یک ناحیه جدایی جریان کم عمق با استفاده از روش SPIV - بخش دوم: مشخصات آشفته‌گی، ساختارهای لحظه‌ای و مکانی

اکبر صفرزاده^{1*}، سید علی اکبر صالحی نیشابوری²

1- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

2- استاد سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

* اردبیل، صندوق پستی 179

Safarzadeh@uma.ac.ir

چکیده - در این مقاله الگوی جریان در امتداد لایه اختلاطی محاط بر یک ناحیه چرخشی، با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی (SPIV) در موقعیت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. همچنین از تکنیک تزریق ماده رنگی اورانین در مجاورت نور UV برای آشکارسازی ساختارهای مکانی گردابه‌های آشفته‌گی در طول لایه اختلاطی استفاده شده است. نتایج اندازه‌گیری‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که محدوده وقوع حداکثر مقدار انرژی جنبشی آشفته‌گی و همچنین تنش‌های رینولدز منطبق بر محدوده وقوع تغییر در رفتار لایه اختلاطی می‌باشد. بلافاصله در پایین دست مانع و در امتداد لایه اختلاطی، توزیع طیفی انرژی آشفته‌گی ضمن همخوانی مناسب با توزیع $5/3$ - کولموگروف، مؤید سه بعدی بودن جریان است. با حرکت به سمت پایین دست، توزیع طیفی انرژی آشفته‌گی در محدوده فرکانس‌های پائین، با شیب 3 - تنزل می‌یابد که مشخصه اصلی ساختارهای آشفته‌گی دو بعدی سطحی می‌باشد. در محدوده باز اتصال مجدد و در انتهای لایه اختلاطی، مجدداً شیب $5/3$ - مشخصه غالب توزیع فرکانسی انرژی جنبشی آشفته‌گی است که در این حالت، سه بعدی بودن جریان ناشی از نقش تنش برشی بستر و غلبه آن بر ساختارهای دوبعدی آشفته‌گی می‌باشد. وجود دو ناحیه چرخشی غیر همسو در پایین دست مانع، باعث تغییر در رفتار چرخشی گردابه‌های لحظه‌ای داخل لایه اختلاطی شده و همین پدیده علاوه بر تغییر در مشخصات لحظه‌ای، ساختار مکانی لایه اختلاطی را نیز تغییر می‌دهد.

کلیدواژگان: لایه اختلاطی، SPIV، طیف انرژی آشفته‌گی، شیب انرژی، اورانین.

1- مقدمه

گرادیان سرعت تخفیف می‌یابد (VanProoijen, 2004). بخش عمده روند تبادل مومتم به واسطه حرکت آشفته توده‌های سیال اتفاق می‌افتد که در جهات مختلف بین دو بخش کم سرعت و پرسرعت در نوسان هستند. علاوه بر تغییرات لحظه‌ای ناشی از حرکات آشفته توده‌های سیال،

لایه‌های اختلاطی عمدتاً به واسطه ایجاد گرادیان عرضی جریان متوسط بین دو ناحیه میدان شکل گرفته و با حرکت به سمت پایین دست، به واسطه انتقال مومتم از سمت ناحیه پر سرعت به جریان کندتر، ناحیه اختلاطی توسعه یافته و

که در آنها، مکانیسم شکل‌گیری لایه‌های اختلاطی، متفاوت با لایه‌های اختلاطی کلاسیک است. در چنین مواردی، ناحیه کم سرعت بصورت یک ناحیه چرخشی ظاهر می‌شود که علت آن جدایی جریان ناشی از گرادیان طولی فشار می‌باشد.

شکل‌گیری و توسعه لایه‌های اختلاطی شدیداً تحت تأثیر عمق جریان است، بطوری که در جریان‌های کم عمق، از طرفی اصطکاک بستر در کل عمق تأثیرگذار بوده و از طرف دیگر، به واسطه محدودیت عمق، ساختارهای افقی نظیر ناپایداری‌های کلونین هلمهولتز توانایی گسترش و کشیدگی در عمق را نداشته و عمدتاً در راستای افقی گسترش می‌یابند، بطوری که در این حالت، ابعاد لحظه‌ای آنها می‌تواند بزرگ‌تر از ضخامت لایه اختلاطی باشد (Jirka, 2001).

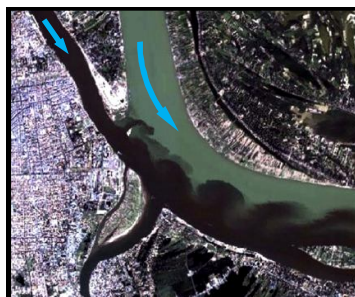
در بخش اول این تحقیق که در مورد ساختار متوسط جریان در لایه اختلاطی بحث شد، جزئیات کامل جریان‌های کم عمق شامل مباحث تئوریک و نحوه تقسیم‌بندی آنها به بر اساس مکانیسم‌های پیشنهادی توسط (Jirka 2001) ارائه شده است. لایه‌های اختلاطی یا برشی محاط بر نواحی جدایی جریان کم عمق، از پدیده‌های مهم هیدرودینامیکی در مطالعات جریان در رودخانه‌ها هستند که مشخصات آشفتگی و به ویژه ساختارهای لحظه‌ای و مکانی آنها هنوز به طور کامل شناخته شده نیست.

وجود گرادیان عرضی سرعت در جریان متوسط نیز باعث ناپایداری جریان و شکل‌گیری ساختارهای لحظه‌ای در داخل لایه اختلاطی می‌شود. ناپایداری‌های مزبور به واسطه وجود نقطه عطف در پروفیل‌های عرضی سرعت شکل گرفته و به ناپایداری کلونین-هلمهولتز معروف می‌باشند. مشخصه اصلی آنها، شکل‌گیری ساختارهای چرخشی افقی در داخل لایه اختلاطی می‌باشد که از نظر مقیاس، ابعاد افقی آنها در حد ضخامت لایه اختلاطی می‌باشد. لایه‌های اختلاطی در موارد متعددی از مسائل مهم هیدرودینامیک رودخانه‌ها شکل می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به لایه اختلاطی بین سیلاب‌دشت و مجرای اصلی رودخانه‌های با مقطع مرکب (شکل 1- الف)، محدوده تلاقی رودخانه‌ها (شکل 1- ب)، جریان عبوری از کناره توده پوشش گیاهی اشاره کرد؛ بطوری که در شکل‌های ارائه شده، شکل‌گیری ناپایداری‌های بزرگ مقیاس به خوبی مشخص است.

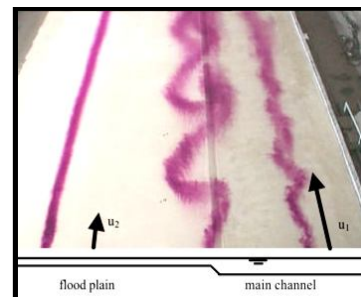
در مواردی که ذکر شد، جریان‌های غیر هم سرعت عمدتاً در یک راستا (راستای طولی) بوده و در واقع، راستای جریان در هر دو ناحیه پر سرعت و کم سرعت در راستای مثبت طولی به سمت پایین‌دست می‌باشد. چنین لایه‌های اختلاطی در مراجع به لایه‌های اختلاطی کلاسیک معروف هستند (Rhoads & Sukhodolov, 2004). موارد دیگری در طبیعت نظیر بازشدگی مقطع رودخانه و یا در اطراف سازه‌های رودخانه‌ای نظیر آبشکن و کوله پل وجود دارد



ج - دماغه تک آبشکن و ساختارهای لحظه‌ای پایین‌دست



ب - تلاقی گاه یک رودخانه فرعی با رودخانه مکنونگ در کشور کامبوج (Google Earth)



الف - فصل مشترک سیلاب‌دشت و مجرای اصلی در یک مقطع مرکب (VanProoijen, 2004)

شکل 1 موارد مختلف شکل‌گیری لایه اختلاطی و تولید و گسترش ناپایداری‌های کلونین-هلمهولتز

فرکانسی انرژی آشفتگی، ویژگیهای لایه‌های اختلاطی تشریح شده است.

مطالعات آزمایشگاهی (Babarrutsi & Chu 1998) بر روی ساختار لایه اختلاطی کلاسیک در جریان کم عمق نشان داد که در حالتی که عمق محدود است، می‌توان جریان را بصورت شبه دو بعدی در نظر گرفت، بطوری که در نواحی از میدان که فرکانس آشفتگی زیاد است، جریان سه بعدی بوده، ولی در بخش عمده‌ای از میدان داخل لایه اختلاطی، گردابه‌های بزرگ مقیاس به هم پیوسته¹ که عمدتاً سطحی می‌باشند، ساختار غالب بوده و عمده انرژی آشفتگی توسط آنها تولید و منتقل می‌شود. اندازه‌گیری‌های دقیق صورت گرفته توسط Tukker (1997) با استفاده از ابزار لیزر داپلر نیز به نتیجه مشابهی منتهی شده است. (Uijtewaal and Booij 2000) به بررسی تأثیر عمق جریان بر تغییرات ساختار متوسط و لحظه‌ای لایه اختلاطی کلاسیک پرداختند. بر اساس نتایج محققین مزبور، در جریان‌های کم عمق، اصطکاک بستر کانال ساختارهای لحظه‌ای داخل لایه اختلاطی را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بطوری که ضمن محدود نمودن پدیده جفت شدگی گردابه‌های² لحظه‌ای، باعث کاهش نرخ رشد ضخامت لایه اختلاطی نسبت به جریان‌های عمیق می‌شود. لازم به ذکر است که جفت شدگی گردابه‌ها، روندی است که در آن، گردابه‌های لحظه‌ای ضمن چرخش و حرکت به سمت پایین‌دست، با هم ترکیب شده و منجر به شکل‌گیری گردابه‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر می‌شوند. محققان مزبور با انجام تحلیل طیفی و بررسی منحنی‌های همبستگی خودکار³ نوسانات مؤلفه عرضی سرعت در نقاط مختلف لایه اختلاطی عنوان کرده‌اند که با حرکت به سمت پایین‌دست در طول لایه، ضمن افزایش حداکثر مقدار انرژی آشفتگی (نقطه پیک طیف آشفتگی)، فرکانس نوسانات متناظر با نقطه پیک

نمونه بارز شکل‌گیری چنین جریان‌هایی، نواحی پایین‌دست آبشکن‌ها می‌باشد. در شکل 1- ج ساختار لحظه‌ای نواحی آغازین لایه اختلاطی پایین‌دست یک آبشکن در جریان کم عمق نشان داده شده است. مشخصه جالب و تفاوت مهم لایه اختلاطی پایین‌دست مانع با لایه اختلاطی کلاسیک، همزمانی وقوع دو مکانیسم شکل‌گیری ساختارهای لحظه‌ای در امتداد لایه اختلاطی است؛ بطوری که وجود مانع جانبی به عنوان یک عامل توپوگرافیکی بوده و با محدود نمودن عرض عبوری جریان، باعث از بین رفتن تقارن عرضی جریان نزدیک شونده می‌شود. در این وضعیت به واسطه شکل‌گیری گرادیان فشار معکوس در محل مانع، جریان اصلی از دماغه سازه جدا شده و گروهی از گردابه‌های متناوب با قدرت چرخشی شدید را در پایین‌دست سازه ایجاد می‌کنند (مکانیسم تیپ A طبق تقسیم‌بندی (Jirka, 2001). از طرفی، شکل‌گیری ناحیه چرخشی ضمن ایجاد گرادیان عرضی سرعت باعث ناپایداری‌های جانبی برشی شده و گردابه‌های چرخشی از تیپ B در داخل لایه اختلاطی تولید می‌شوند.

اندرکنش این دو مکانیسم با یکدیگر و همچنین اندرکنش آنها با ناحیه چرخشی باعث پیچیدگی شدید ساختارهای متوسط و لحظه‌ای جریان در امتداد لایه اختلاطی می‌شود. تحقیقات نسبتاً کاملی در مورد ساختارهای لحظه‌ای و مکانی لایه‌های برشی کلاسیک صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات Uijtewaal and Tukker (1998)، (Uijtewaal and Booij 2000) و Rhoads and Shukhodolov (2004) اشاره کرد. در اغلب این تحقیقات، ضمن بررسی ساختار جریان متوسط، ساختارهای لحظه‌ای شامل مشخصات آشفتگی در نقاط مختلف میدان و همچنین ساختارهای لحظه‌ای - مکانی بصورت روند تغییرات شکل گردابه‌های لحظه‌ای بررسی شده و بر اساس مفاهیم آماری و همچنین مفاهیم پایه‌ای آشفتگی نظیر همبستگی نوسانات مؤلفه‌های سرعت، همبستگی نوسانات در نقاط مختلف میدان و توزیع

1. Large Scale Coherent Surface Vortices

2. Vortex Pairing

3. Autocorrelation

کاهش یافته و به سمت نوسانات فرکانس پایین منتقل می‌شود.

جامع‌ترین کار در مورد ساختارهای آشفتگی لایه‌های اختلاطی کم عمق توسط VanProoijen (2004) صورت گرفته است. وی ضمن انجام مطالعه آزمایشگاهی و اندازه‌گیری میدان با استفاده از ابزارهای لیزر داپلر و سرعت سنجی تصویری ذرات سطحی، یک مدل عددی بر اساس روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ¹ توسعه داده و تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر نسبت سرعت دو جریان، زبری بستر و عمق جریان را بر ساختارهای مکانی و زمانی در داخل لایه اختلاطی کم عمق مطالعه نمود. این محقق نیز به غالب بودن الگوی شبه دوبعدی و نقش بسیار مهم گردابه‌های بزرگ مقیاس سطحی بر تولید آشفتگی اشاره نموده و ضمن انجام تحلیل طیفی بر روی سیگنال‌های نوسانات سرعت، به نزول انرژی آشفتگی با شیب 3- برای فرکانس‌های پائین (متناظر با گردابه‌های بزرگ مقیاس) اشاره کرده است. Rhoads and Shukhodolov (2004) با استفاده از سرعت‌سنج ADV و با بهره‌گیری از روش اندازه‌گیری همزمان با دو سرعت‌سنج به بررسی ساختارهای لحظه‌ای و مکانی آشفتگی در لایه اختلاطی شکل گرفته در محل تلاقی دو رودخانه ماسکاسکیا و کوپر پرداختند. نتایج حاصل از کار صحرائی این محققان نشان داد که میزان همبستگی نوسانات سرعت بین یک نقطه ثابت در شروع لایه اختلاطی با نقاط متحرک در امتداد لایه اختلاطی به تدریج و با حرکت به سمت پایین‌دست کاهش می‌یابد. تحلیل طیفی صورت گرفته بر روی سیگنال‌های سرعت در نقاط مختلف لایه اختلاطی نشان داد که با حرکت به سمت پایین‌دست، ضمن افزایش ابعاد گردابه‌های چرخشی، نقطه حداکثر طیف انرژی افزایش می‌یابد، ولی بر خلاف نتایج گزارش شده توسط Uijtewaal and Booij (2000)

فرکانس متناظر با حداکثر انرژی، تغییر چندانی نمی‌کند. بر خلاف لایه‌های اختلاطی کلاسیک، تحقیقات انجام شده بر روی ساختارهای لحظه‌ای و مکانی لایه‌های اختلاطی محاط بر نواحی چرخشی در جریان‌های کم عمق بسیار محدود می‌باشد. بطوری که عمده تحقیقات صورت گرفته، بر روی ساختار متوسط جریان بوده و اغلب آنها در حالت جریان عمیق می‌باشد. همان‌طور که در بخش اول این تحقیق نشان داده شد، ساختار متوسط لایه اختلاطی در این حالت، تفاوت عمده‌ای با لایه‌های کلاسیک و هم چنین لایه‌های اختلاطی محاط بر نواحی چرخشی عمیق دارد. همچنین نشان داده شد که شکل‌گیری دو ناحیه چرخشی غیر هم سو باعث ایجاد ساختار دو مرحله‌ای در لایه اختلاطی پایین‌دست یک مانع جانبی می‌شود.

در این تحقیق ضمن بررسی توزیع پارامترهای آشفتگی، تغییرات سیگنال‌های سرعت در بخش‌های مختلف میدان و همچنین نحوه توزیع انرژی آشفتگی بین فرکانس‌های مختلف، به بررسی نقش ساختارهای لحظه‌ای، یعنی گردابه‌های آشفتگی بر نحوه تغییرات لایه اختلاطی محاط بر یک ناحیه چرخشی کم عمق پرداخته شده و با بررسی فیزیک حاکم بر میدان، علل اختلاف ساختار لایه اختلاطی در جریان‌های کم عمق با لایه‌های اختلاطی کلاسیک از دیدگاه تغییرات لحظه‌ای و مکانی بحث و بررسی شده است.

2- مبانی تئوریک

با این که جزئیات آشفتگی را نمی‌توان بر حسب زمان و مکان دقیقاً پیش‌بینی کرد، ولی پدیده آشفتگی را می‌توان از طریق عوارض و مشخصه‌های آن شناخت و آن را در قالب همین مشخصه‌ها توصیف نمود. اغلب مطالعات آشفتگی نیازمند توصیف آماری آشفتگی و استفاده از مفاهیم احتمالات می‌باشند، چرا که فهم ساختار لحظه‌ای

1. Large Eddy Simulation (LES)

در مطالعات آشفتگی، معمولاً مبدا زمانی سری مزبور را به اندازه دلخواه (τ) جابجا نموده و از مقدار نرمال شده تابع خود همبستگی بصورت زیر استفاده می‌شود (Davidson, 2004):

$$r_i(\tau) \equiv \frac{\langle u_i'(t)u_i'(t+\tau) \rangle}{\langle u_i'^2 \rangle} = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_i'(x,t)u_i'(x,t+\tau)dt}{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_i'^2(x,t)} = \frac{R_i(x)}{\langle u_i'^2 \rangle} \quad (4)$$

تابع خود همبستگی برای تشخیص وجود الگوهای تکراری نظیر حرکات هارمونیک در یک سری زمانی که به واسطه وجود نویز و یا نوسانات با الگوهای دیگر بطور عادی قابل تشخیص نیستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همبستگی متقاطع مؤلفه‌های نوسانی سرعت مفهوم بسیار مهمی در مطالعات آشفتگی می‌باشد که از دیدگاه هیدرودینامیکی به تنش‌های رینولدز معروف می‌باشند. با در نظر گرفتن حرکت آشفته توده‌های سیال و امکان جابجایی توده‌ها بین لایه‌های مختلف میدان، تنش‌های رینولدز به مفهوم تبادل مومتم جریان متوسط ناشی از نوسانات سرعت می‌باشد (Davidson, 2004):

$$\tau_{ij} = -\rho \langle u_i' u_j' \rangle \quad (5)$$

تنش‌های قائم آشفتگی برای بیان میزان انرژی جنبشی ناشی از نوسانات سرعت استفاده شده و میزان انرژی جنبشی کل جریان آشفته در هر نقطه از میدان به ازای جرم واحد بصورت زیر بیان می‌شود (Davidson, 2004):

$$TKE = \frac{1}{2} \langle u_i' u_i' \rangle \quad (6)$$

2-2- تحلیل در حوزه فرکانس

همان‌طور که عنوان شد، آشفتگی متشکل از گردابه‌های مختلف با ابعاد متفاوت و نیز الگوهای نوسانی مختلف می‌باشد. روش دیگری که در مطالعات ساختار آشفتگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، تبدیل مشخصه‌های مزبور با

جریان پیچیده می‌باشد.

تحلیل سری‌های زمانی در دو حوزه زمانی و فرکانسی انجام می‌شود که جزئیات موارد استفاده شده در این تحقیق در ادامه تشریح شده است.

1-2- تحلیل آماری در حوزه زمان

در صورتی که در یک نقطه مشخص از میدان جریان آشفته، تغییرات زمانی کمیتی نظیر مؤلفه‌های سرعت ثبت شوند، می‌توان برای سری مزبور یک مقدار متوسط زمانی (U_i) و مقادیر لحظه‌ای ($u_i'(t)$) تعریف کرد (Davidson, 2004):

$$u_i(t) = U_i + u_i'(t), \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

بطوری که مقدار متوسط زمانی در طول یک بازه زمانی کافی (T) برای ارضای شرط پایداری سری زمانی سرعت، بصورت زیر تعریف می‌شود (Davidson, 2004):

$$U_i = \langle u_i(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_i(t) dt \quad (2)$$

مفهوم مهمی که برای شناخت ساختار درونی (زمانی و مکانی) آشفتگی استفاده می‌شود، بررسی میزان همبستگی مؤلفه‌های سرعت در یک نقطه خاص و نیز همبستگی در نقاط مختلف میدان می‌باشد. بطور کیفی، آشفتگی اندرکنش ابعاد مختلفی از گردابه‌هاست و یک گردابه همانند یک ساختاری تعریف می‌شود که مؤلفه‌های سرعت نوسانی آن با هم همبسته باشند.

از نظر مفهومی، همبستگی خودکار یک سری زمانی بیانگر میزان تشابه یک سری زمانی با خودش با در نظر گرفتن تأخیر زمانی‌های مختلف می‌باشد. به عبارت بهتر، همبستگی خودکار بیانگر تشابه بین رخداد‌های موجود در یک سری زمانی به صورت تابعی از فاصله زمانی بین رخداد‌های مزبور می‌باشد. خود همبستگی نوسانات یک متغیر زمانی نظیر $u_i(t)$ در دو زمان مختلف t_1 و t_2 بصورت زیر بیان می‌شود (Davidson, 2004):

$$R(t_1, t_2) \equiv \langle u_i'(t_1)u_i'(t_2) \rangle \quad (3)$$

$$S_i(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{t_0}^{t_0+T} u_i'(t) e^{-2\pi i f t} dt \right|^2 \quad (9)$$

در روابط فوق f بیانگر فرکانس است. با استفاده از رابطه فوق، تغییرات میزان انرژی متناظر با هر فرکانس را می‌توان ترسیم کرد. در بخش ارائه نتایج نحوه محاسبه انتگرال فوق و جزئیات مربوط به محاسبه طیف انرژی ارائه شده و از نتایج حاصل، برای تشخیص ساختارهای دو بعدی و سه بعدی موجود در میدان استفاده شده است.

3- جزئیات آزمایش

در مقاله بخش اول، جزئیات فلوم آزمایشگاهی به همراه روش سرعت‌سنجی ذرات سطحی که برای اندازه‌گیری میدان جریان استفاده شده است، تشریح شده و مشخصات هیدرولیکی آزمایش ارائه گردیده است. برای اندازه‌گیری میدان جریان، از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی استفاده شده است. ذرات مورد استفاده برای ردیابی، قطعات ورقه‌ای شش گوشه پلی استر طلایی رنگ با قطر 2/5 میلی‌متر و ضخامت 0/025 میلی‌متر می‌باشند. برای ثبت تصاویر از دو عدد دوربین CCD مدل Procilica GE1910 با فرکانس تصویربرداری 37 فریم بر ثانیه استفاده شد. برای پردازش تصاویر از مجموعه برنامه‌هایی که در محیط مت‌لب نوشته شده و همچنین نرم‌افزار GPIV در محیط سیستم عامل لینوکس استفاده شده است. در این بخش از تحقیق برای مطالعه ساختارهای لحظه‌ای و مکانی آشفتگی، علاوه بر روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی، از روش آشکارسازی با استفاده از ماده رنگی نیز استفاده شده است. ماده رنگی مورد استفاده، اورانین می‌باشد.

علت استفاده از این ماده خاصیت فلورسنت آن است بطوری که محیط مورد مطالعه در صورتی که در مجاورت نور ماوراءبنفش (UV) قرار گیرد به واسطه خاصیت فلورسنت ماده رنگی، مسیر تزریق ماده روشن شده و به خوبی می‌توان ساختارهای لحظه‌ای جریان را تشخیص

استفاده از تبدیل‌های انتگرالی به پارامترهای متناظر در حوزه فرکانسی می‌باشد. الگوی نوسانات کل یک پارامتر را می‌توان در قالب طیفی از نوسانات آشفتگی با فرکانس‌های مختلف بیان کرد. این دیدگاه به تحلیل طیفی آشفتگی معروف است.

قسمت عمده انرژی جنبشی جریان‌های آشفتخته توسط گردابه‌های بزرگ مقیاس، با فرکانس نوسانی پایین حمل شده و در حقیقت، پارامتر انرژی جنبشی آشفتگی که در رابطه (6) معرفی شد، بیانگر سهم کل فرکانس‌های آشفتگی است. سؤالی که مطرح می‌شود این است که سهم فرکانس‌های مختلف نوسانات در حمل انرژی جنبشی چقدر بوده و الگوی تغییرات انرژی یک جریان برای فرکانس‌های مختلف به چه نحوی است و مهم‌تر این که فرکانس غالب در هر نقطه از میدان که بیشترین انرژی را دارد، کدام است؟ برای بررسی این مباحث، سری‌های زمانی را می‌توان با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانسی تبدیل نموده و ضمن استخراج فرکانس‌های نوسانی موجود در هر سری زمانی، با استفاده از مفاهیمی که ذکر خواهد شد، طیف انرژی مربوط به این فرکانس‌ها را مشخص نمود. برای سری زمانی $u'(t)$ ، تبدیل فوریه آن بصورت زیر تعریف می‌شود (Davidson, 2004):

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} u'(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (7)$$

با استفاده از تابع فوق، سری زمانی را می‌توان به صورت مجموعی از توابع سینوسی با فرکانس‌های مختلف و یا به عبارت بهتر، در حوزه فرکانسی، بصورت زیر بیان کرد (Davidson, 2004):

$$u'(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(f) e^{2\pi i f t} df \quad (8)$$

در روابط فوق، $i = \sqrt{-1}$ بوده و طیف انرژی هر مؤلفه نوسانی سرعت که به چگالی انرژی طیفی¹ موسوم است، به صورت زیر تعریف می‌شود (Tennekes & Lumley, 1972):

1. Power Spectral Density (PSD)

اختلاطی ناشی از جریان‌های موازی توسط Prooijen (2004) و جریان در فصل مشترک مقاطع مرکب در کار Knight & Shiono (1990) نیز گزارش شده، لیکن دلیل مشخصی برای آن تا به حال ارائه نشده است. به سمت پایین‌دست، تنش‌های رینولدز و انرژی جنبشی آشفتگی افزایش یافته و در محدوده $3 < X^* < 4$ این افزایش به صورت ناگهانی بوده و در این محدوده به حداکثر مقدار خود می‌رسند. این پدیده نشان از آشفتگی شدید جریان در این ناحیه دارد. علاوه بر محدوده لایه اختلاطی، نگاهی به پروفیل‌های تنش رینولدز و انرژی جنبشی آشفتگی نشان می‌دهد که در کنار دیواره سمت راست (ناحیه‌ای که با محدوده خط‌چین در شکل نشان داده شده است) نیز آشفتگی جریان بصورت موضعی شدید می‌باشد. این ناحیه منطبق بر فصل مشترک نواحی چرخشی اصلی و فرعی پشت آبشکن می‌باشند.

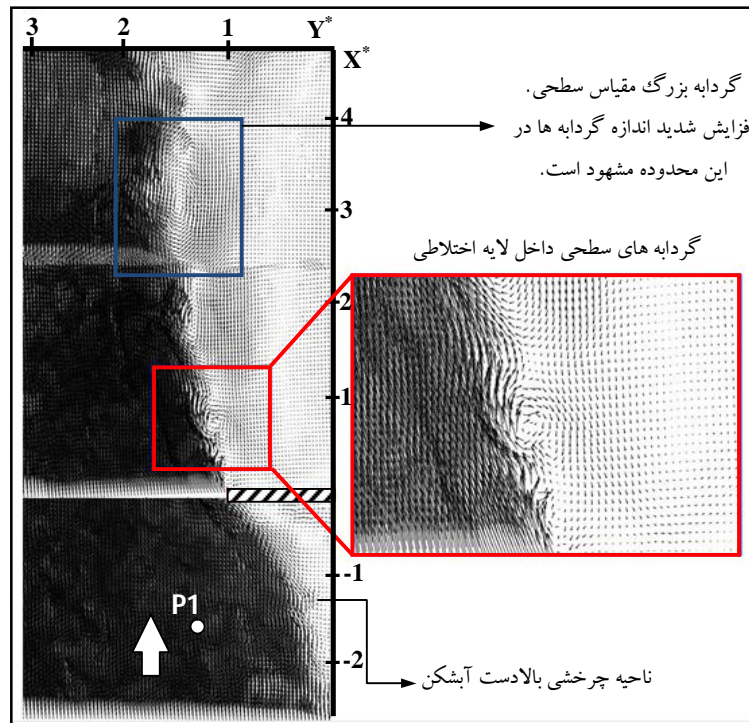
همان‌طور که در مقاله قبل و در بررسی مشخصات جریان متوسط ذکر شد، ضخامت لایه اختلاطی در محدوده $3 < X^* < 4$ بصورت ناگهانی رشد کرده و علاوه بر آن، روند تغییرات ضخامت لایه نیز از حالت غیرخطی به حالت خطی تبدیل می‌شود. انطباق ناحیه تغییر رفتار لایه اختلاطی با محدوده پر انرژی نشان از نقش ساختارهای آشفتگی در ایجاد تغییرات مهم در الگوی جریان متوسط دارد. به عبارت بهتر با توجه به این که ناحیه مزبور منطبق بر فصل مشترک و محل تلاقی دو ناحیه چرخشی می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که اندرکنش دو ناحیه و تولید آشفتگی، مستقیماً در ساختار مکانی لایه اختلاطی تأثیرگذار است. به سمت پایین‌دست و با عبور از محدوده تلاقی دو ناحیه چرخشی، فعالیت جریان‌های آشفته کاهش یافته و به تدریج با نزدیک شدن به محدوده اتصال مجدد، انرژی آشفتگی مستهلک می‌شود. این پدیده ناشی از اضمحلال ساختارهای بزرگ مقیاس سطحی به واسطه اصطکاک بستر بوده و در بخش‌های آتی بطور کمی تشریح شده است.

داده و علاوه بر آن نحوه تغییرات مکانی ساختار لایه اختلاطی را با ردیابی ماده در طول مسیر نیز بررسی کرد. در این تحقیق، محلول اورانین با استفاده از یک پمپ دودی¹ از دماغه آبشکن با نرخ ثابت تزریق شده و مسیر وقوع گردابه‌های آشفتگی با استفاده از دو عدد مهتابی ماوراءبنفش آشکار سازی شده است. از یک دوربین فیلم برداری برای ثبت الگوهای لحظه‌ای شکل گرفته در داخل لایه اختلاطی استفاده شده است.

4- نتایج

در شکل 2 الگوی عمومی جریان‌های لحظه‌ای شکل گرفته در نواحی بالادست و پایین‌دست مانع جانبی نشان داده شده است. در این شکل، $X^* = X/L$ و $Y^* = Y/L$ به ترتیب بیانگر مختصات طولی و عرضی بی بعد شده نسبت به طول مانع جانبی (L) می‌باشد. در این شکل به خوبی جدایی جریان در بالادست مانع مشهود بوده و علاوه بر آن، شکل‌گیری لایه اختلاطی در پایین‌دست مانع بصورت محاط بر ناحیه چرخشی مشخص است. با توجه به شکل، تغییرات مکانی لایه اختلاطی به سمت پایین‌دست قابل مشاهده است، بطوری که ابعاد و فرم گردابه‌های شکل گرفته در داخل لایه تغییر می‌کند. برای بررسی ساختار آشفتگی در داخل لایه اختلاطی و همچنین پاسخ به سئوالات مطرح شده در مقاله قبل در مورد علل رفتار دو مرحله تغییرات ضخامت لایه، ابتدا به بررسی مشخصات متوسط زمانی پارامترهای آشفتگی پرداخته شده است. در شکل 3 توزیع پارامترهای بی بعد شده تنش رینولدز و هم چنین انرژی جنبشی آشفتگی در محدوده اندازه گیری نشان داده شده است. با توجه به شکل، بلافاصله پایین‌دست آبشکن، تنش‌های رینولدزی تا فاصله‌ای حدود نصف طول آبشکن به سمت پایین‌دست دارای مقدار منفی در سمت کم سرعت لایه اختلاطی می‌باشند. وقوع این پدیده در موارد دیگری نظیر لایه

1. Peristaltic Pump



شکل 2 ساختار کلی گردابه‌های لحظه‌ای در امتداد لایه اختلاطی پشت مانع جانبی

انتخاب شده و سری‌های زمانی آنها استخراج گردید. این نقاط به نحوی انتخاب شدند که نماینده بخش‌های مختلف باشند. نقطه P_1 ($X^* = -1.5, Y^* = 1.5$) در ناحیه دور از تأثیر مانع جانبی قرار داشته و آشفتگی ایجاد شده در آن به صورت آشفتگی ایزوتروپ ناشی از جریان یکنواخت نزدیک شونده و همچنین آشفتگی تولید شده توسط زبری‌های بستر کانال می‌باشد. بقیه نقاط (P_2 تا P_9) در امتداد لایه اختلاطی قرار گرفته و تمامی بخش‌های آن را در طول میدان پوشش می‌دهند. در شکل‌های 2 و 3 موقعیت نقاط نشان داده شده است. در شکل 4 سری‌های زمانی مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت در نقاط مختلف نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای وضوح بهتر الگوی تغییرات زمانی، تنها 60 ثانیه اول از سری‌ها ارائه شده است. در جریان نزدیک شونده (نقطه P_1) نوسانات هر دو مؤلفه

مشخصات متوسط زمانی جریان آشفته نظیر تنش‌های رینولدز و انرژی جنبشی آشفتگی، هیچ اطلاعاتی در مورد ساختارهای زمانی و مکانی لایه اختلاطی، از جمله الگوی تولید، انتقال و توسعه گردابه‌های آشفتگی و به ویژه گردابه‌های بزرگ مقیاس سطحی که در داخل لایه اختلاطی شکل می‌گیرند، ارائه نمی‌کنند.

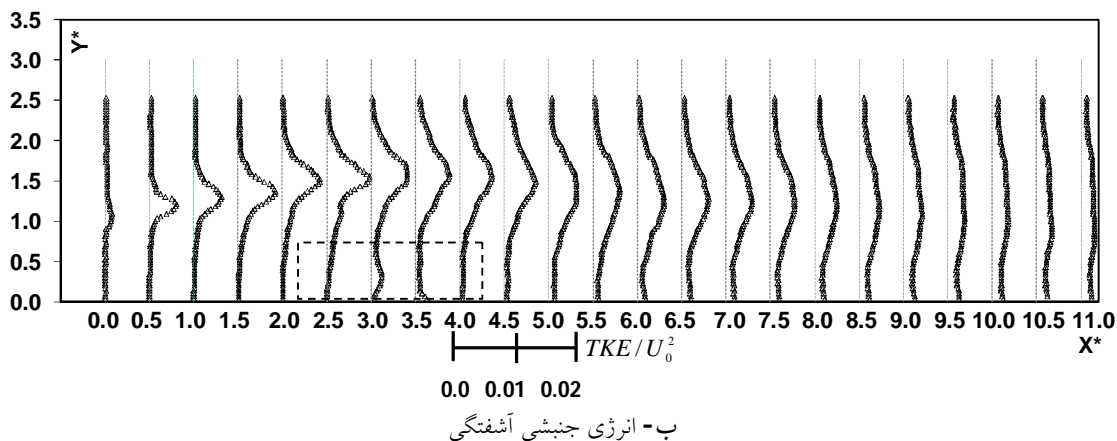
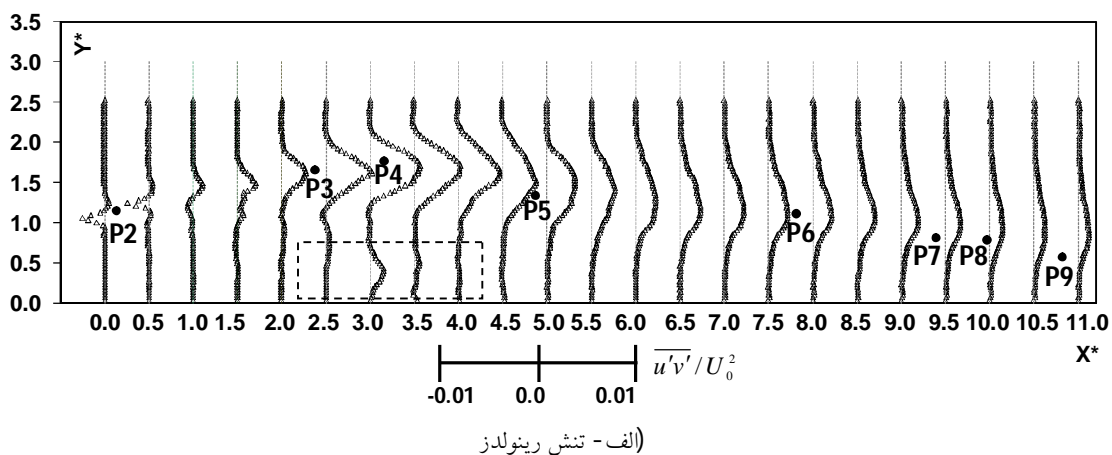
1-4- ساختارهای زمانی و مکانی لایه اختلاطی

نظر به اندازه‌گیری یکپارچه میدان باروش سرعت‌سنجی تصویری در بخش وسیعی از محدوده مطالعاتی، می‌توان ضمن مشاهده الگوهای مکانی شکل گرفته در هر لحظه، سری زمانی نقاط مختلف که بصورت همزمان برداشت شده‌اند را نیز استخراج نموده و بر اساس بررسی نحوه همبستگی آنها، ساختارهای لحظه‌ای را نیز تحلیل کرد. بدین منظور ابتدا تعداد 9 نقطه در نواحی مختلف میدان

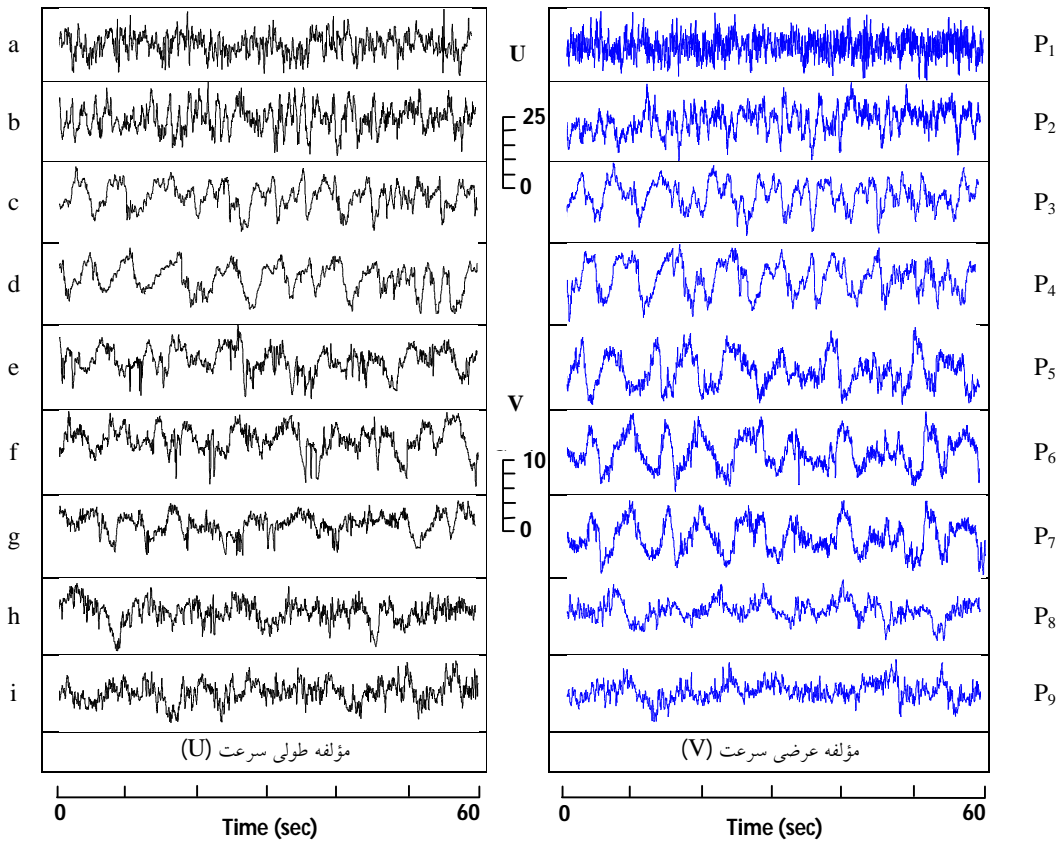
محدوده نشان دهنده تغییر الگوی نوسانی نسبت به نقاط بالادست می‌باشد، بطوریکه مجدداً نظم خاصی در نوسانات سرعت مشاهده نمی‌شود. این پدیده نشان دهنده حذف اثرات گردابه‌های بزرگ مقیاس شکل گرفته داخل لایه اختلاطی و غالب شدن نوسانات ناشی از آشفتگی بستر کانال می‌باشد.

منحنی تغییرات تابع همبستگی خودکار نوسانات مؤلفه طولی سرعت تعدادی از نقاط شاخص در طول لایه برشی با استفاده از رابطه (4) تعیین شده و در شکل 5 نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای محاسبه توابع مزبور از سری‌های زمانی با طول 10 دقیقه استفاده شده است.

سرعت به نحوی است که الگوی نوسانی خاصی که نشان از وجود یک ساختار جریان مشخص باشد، مشاهده نمی‌شود. با عبور از مانع و به سمت پایین‌دست، به واسطه شکل‌گیری جریان‌های چرخشی لحظه‌ای در داخل لایه برشی، الگوی نوسانی منظمی در سری‌های زمانی هر دو مؤلفه سرعت ایجاد شده و به خوبی اثرات عبور گردابه‌های سطحی در نقاط مختلف بر روی سری‌های زمانی مشخص است، بطوری که تفاوت الگوی نوسانی در سری‌های زمانی نقاط P_1 ، P_2 و P_3 کاملاً مشهود است. نقاط P_8 و P_9 در بخش انتهایی ناحیه چرخشی و مقابل نقطه باز اتصال مجدد قرار دارند. سری‌های زمانی این

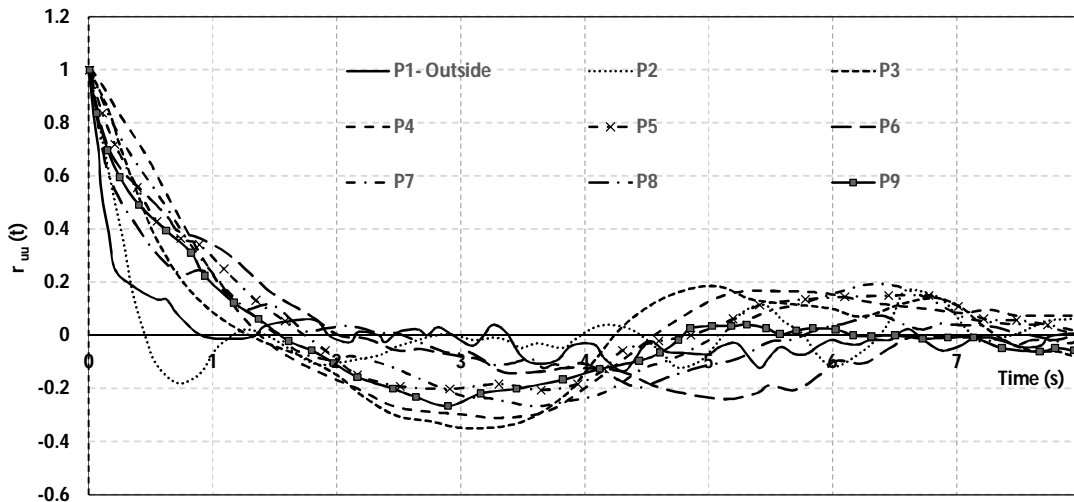


شکل 3 روند تغییرات پارامترهای آشفتگی در پایین‌دست مانع جانبی



شکل 4 سیگنال‌های سرعت در نقاط مختلف واقع در امتداد لایه اختلاطی:

(a): بیرون لایه , $P_1 (X^*=-1.5, Y^*=1.5)$, (b): $P_2(0.2,1.1)$, (c): $P_3(2.4,1.6)$, (d): $P_4(3.1,1.7)$, (e): $P_5(4.7,1.5)$, (f): $P_6(7.8,1.3)$, (g): $P_7(9.4,0.8)$, (h): $P_8 (10,0.8)$ and (i): $P_9 (10.8,0.6)$.



شکل 5 توابع همبستگی خودکار در نقاط مختلف واقع در امتداد لایه اختلاطی

شکل مزبور نشانگر وجود و رشد گردابه‌های بزرگ مقیاس سطحی است که منجر به افزایش شدید در دامنه

در این رابطه، صورت کسر بیانگر انتگرال زیر منحنی طیف انرژی بوده و مخرج بیانگر مجموع مربعات نوسانات هر مؤلفه سرعت است بطوری که هر دو بیانگر انرژی آشفتگی کل حاصل از مؤلفه نوسانی مورد نظر می‌باشند. f_R فرکانس اندازه‌گیری (37 هرتز) می‌باشد.

به منظور بررسی اعتبار سری‌های زمانی ثبت شده و بررسی میزان قابلیت روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی در ثبت نوسانات با فرکانس‌های مختلف، یک آزمایش با مشخصات مشابه با آزمایش اصلی، بدون وجود مانع جانبی انجام شده و تغییرات زمانی جریان آزاد¹ ثبت شد. بدین منظور از یک دوربین استفاده شده و در بخش مرکزی کانال که دور از تأثیر دیواره‌ها بود، میدان جریان به مدت 10 دقیقه اندازه‌گیری شده و تحلیل فرکانسی بر روی مؤلفه طولی سرعت انجام و توزیع طیفی حاصل با رابطه فون‌کارمن، رابطه (11)، (Tukker, J. 1997) در شکل 6 مقایسه شده است:

$$S_i(f) = \frac{4f_i}{[(1 + 70.8f^2)^{5/6}]} \quad (11)$$

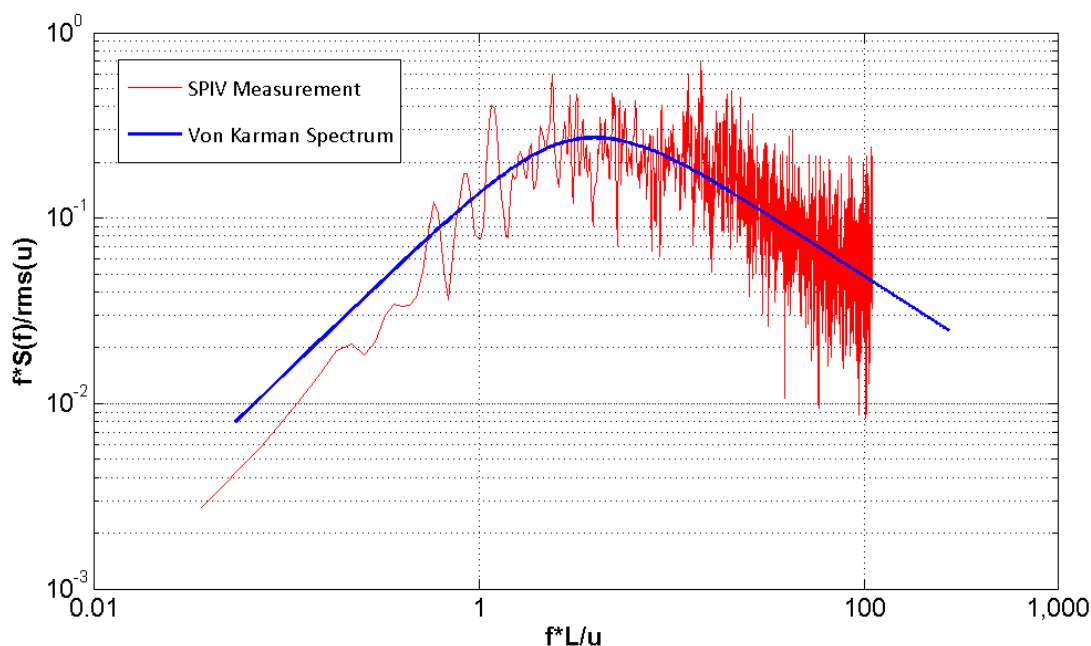
لازم به ذکر است در شکل 6، $rms(u)$ بیانگر ریشه میانگین مربعات نوسانات مؤلفه طولی سرعت در نقطه مورد نظر می‌باشد. با توجه به شکل مزبور، همخوانی بسیار خوبی بین نتایج حاصل از روش SPIV و توزیع طیفی فون‌کارمن در تمامی فرکانس‌های آشفتگی برقرار است. لذا می‌توان گفت این روش توانایی ثبت نوسانات سرعت در تمام محدوده فرکانسی موجود در این آزمایش را دارد.

شکل 7 نشانگر توابع طیف انرژی در نقاط مختلف برای دو مؤلفه u' و v' می‌باشد. با توجه به شکل، توزیع انرژی در نقطه P_1 به نحوی است که انرژی جریان‌های با فرکانس کوچک (ساختارهای بزرگ آشفتگی) تقریباً یکسان بوده و نقطه شاخصی که تراز انرژی آن بطور مطلق بالاتر از سایر فرکانس‌ها باشد، مشاهده نمی‌شود.

نوسانات توابع همبستگی خودکار در پایین‌دست آبشکن شده است. مقایسه توابع همبستگی در بیرون ناحیه چرخشی (منحنی Outside) با سایر منحنی‌ها نشان می‌دهد که در فاصله کوتاهی از آبشکن (منحنی P_2) منحنی همبستگی بسیار سریع‌تر از منحنی جریان بیرون ناحیه چرخشی افت می‌کند و به عبارت بهتر، زمان همبسته بودن نوسانات سرعت کوتاه‌تر از جریان بیرونی می‌باشد. در این محدوده از میدان، ضخامت لایه برشی 0/11 طول آبشکن و یا 2/75 سانتی‌متر می‌باشد که کمتر از عمق جریان (4 سانتی‌متر) می‌باشد. پدیده مزبور نشان می‌دهد که در بخش‌های اولیه لایه برشی، ابعاد گردابه‌های آشفتگی بسیار کوچک‌تر از ابعاد ساختارهای آشفتگی بیرون لایه برشی است. در ادامه نشان داده خواهد شد که در این بخش از میدان، جریان کاملاً سه بعدی است. با دور شدن از آبشکن و با حرکت به سمت پایین‌دست، به تدریج مختصات محل تلاقی توابع همبستگی با محور افقی افزایش می‌یابد.

این نکته حاکی از کاهش اثرات جریان‌های گردابه‌ای کوچک با نوسانات شدید و در مقابل افزایش مشارکت جریان‌های چرخشی بزرگ مقیاس در روند نوسانات مؤلفه طولی سرعت می‌باشد، بطوری که زمان همبستگی بین نوسانات وقایع مشابه (گردابه‌های سطحی) افزایش می‌یابد. به منظور بررسی دقیق الگوی نوسانی سری‌های زمانی، تحلیل طیفی بر روی سری‌های مزبور انجام شده و توابع طیف انرژی بخش نوسانی مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت در نقاط مختلف با استفاده از رابطه 9 تعیین شد. بدین منظور از نرم‌افزار متلب استفاده شده و با استفاده از تابع Pwelch توزیع طیفی انرژی آشفتگی در نقاط مختلف تعیین شد. برای آنالیز فوریه در این روش، پارامترهای مورد نیاز تابع به نحوی تعیین شد که رابطه (10) برقرار باشد:

$$\frac{\int_0^{f_R/2} S_i(f) df}{u_i'^2} \cong 1 \quad (10)$$



شکل 6 مقایسه توزیع طیفی انرژی آشفتگی جریان آزاد حاصل از روش SPIV با توزیع طیفی فون کارمن

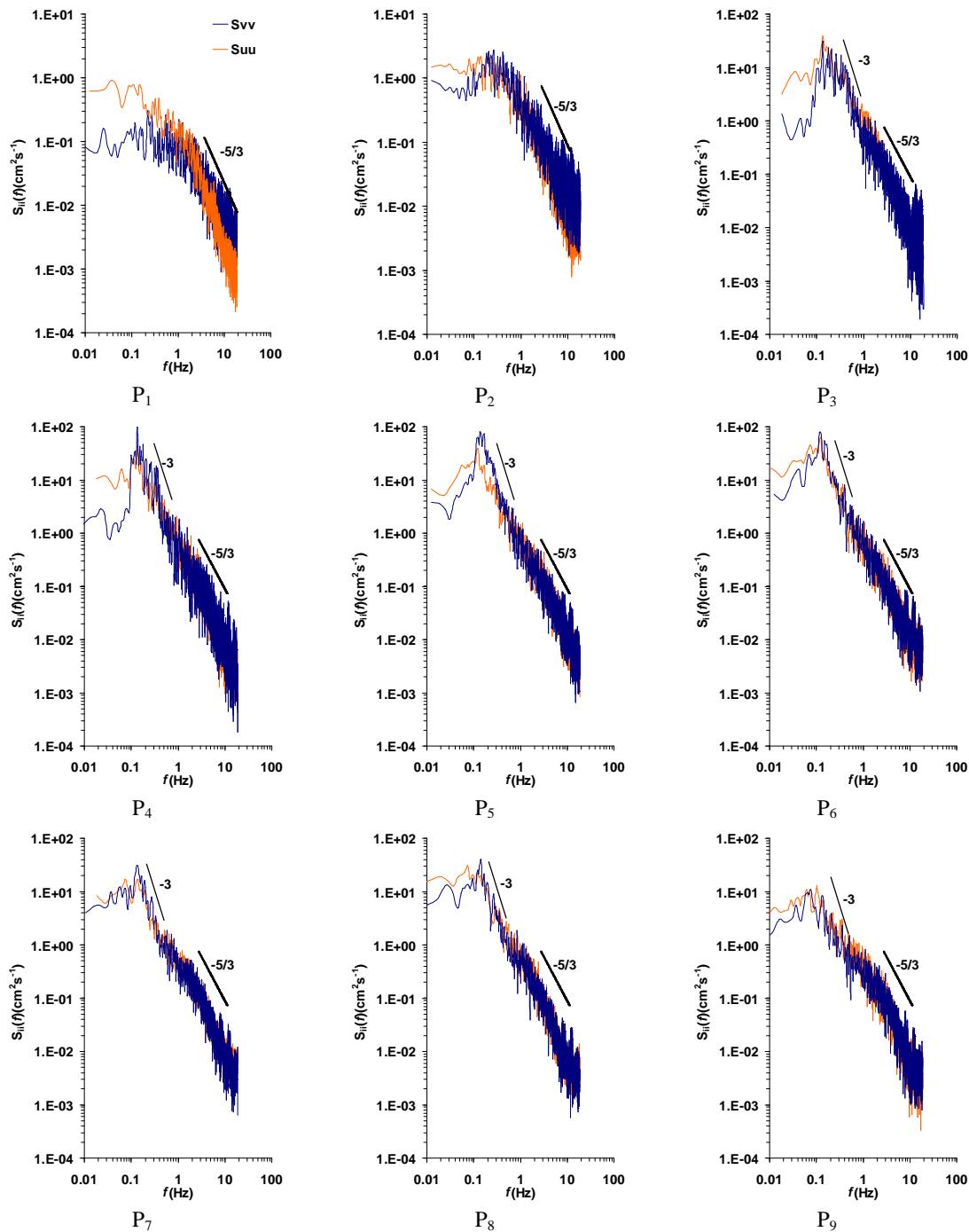
سمت پایین دست با فرکانس مشخصی حرکت می کنند. از لحاظ کمی نیز مقدار انرژی آشفتگی محدوده فرکانسی مزبور حدود سه برابر حداکثر انرژی جریان نزدیک شونده می باشد. در این محدوده نیز پس از نقطه پیک، انرژی با شیب $-5/3$ تنزل می یابد که بر اساس تقسیم بندی ارائه شده توسط کلموگروف، حاکی از سه بعدی بودن ساختار آشفتگی در این محدوده می باشد. لازم به ذکر است که طبیعت سه بعدی جریان در این محدوده بر خلاف جریان نزدیک شونده، ناشی از ساختار سه بعدی لایه اختلاطی و گردابه های کنده شده از دماغه مانع جانبی می باشد.

با حرکت به سمت پایین دست با توجه به طیف انرژی نقطه P_3 بر خلاف نقاط قبلی نقطه وقوع پیک انرژی کاملاً مشخص بوده و علاوه بر آن، انرژی فرکانس غالب نیز شدیداً افزایش پیدا کرده است. توزیع انرژی برای نوسانات با فرکانس بالاتر از فرکانس غالب به نحوی است که شیب تنزل انرژی برای بخش ابتدایی از مقدار $-5/3$ دور می شود، ولی برای بخش انتهایی که مجدداً مربوط به محدوده اینرسیال و گردابه های ریزمقیاس

علاوه بر آن، در فرکانس های بالا که شاخص رفتار گردابه های ریز می باشد، انرژی با توان $-5/3$ تنزل می کند. هر دو پدیده فوق رفتار شاخص جریان های سه بعدی و به ویژه آشفتگی ایجاد شده ناشی از جریان های هموزن می باشد، بطوری که با توجه به عدم تأثیرپذیری این نقطه از وجود مانع جانبی، می توان چنین استدلال کرد که تمامی محتوی فرکانسی این نقطه تنها ناشی از جریان های آشفته نزدیک شونده است که منبع تولید آنها زبری بستر است. برای فرکانس های پایین که بخش عمده انرژی آشفتگی را ایجاد می کنند، سهم مؤلفه طولی در تولید انرژی بیشتر از مؤلفه عرضی است که با توجه به یکسویه بودن جریان نزدیک شونده، کاملاً منطقی است. تفاوت عمده توزیع انرژی در نقطه P_2 که درست در پایین دست آبشکن واقع شده است، با نقطه P_1 وجود پیک در توزیع انرژی است، بطوری که مشخصاً محدوده معینی از فرکانس های آشفتگی حامل حداکثر انرژی جریان آشفته می باشد که این پدیده ناشی از شکل گیری و انتشار گردابه هایی است که از نوک دماغه مانع کنده شده و به

انرژی فرکانس غالب کاسته شده و در نقطه P₉ نحوه توزیع انرژی در محدوده فرکانسی پر انرژی، مشابه نقاط ابتدایی لایه اختلاطی می‌باشد، به نحوی که پیک منحنی حالت قله‌ای ندارد.

می‌باشد، انرژی با شیب $-5/3$ تنزل می‌کند. از نقطه P₂ تا P₄ محتوی انرژی نقاط پیک افزایش یافته و بین تمامی نقاط، حداکثر مقدار انرژی در نقطه P₄ رخ می‌دهد. از نقطه P₄ به سمت پایین دست مجدداً از مقدار



شکل 7 توزیع طیفی انرژی نقاط مختلف واقع در امتداد لایه اختلاطی

جریان‌های سه بعدی است، به نحوی که در این نقطه، حداکثر انرژی در محدوده فرکانس غالب بطور مشخص کاهش یافته و علاوه بر آن، بخش عمده‌ای از منحنی مجدداً همخوان با شیب $5/3$ - می باشد.

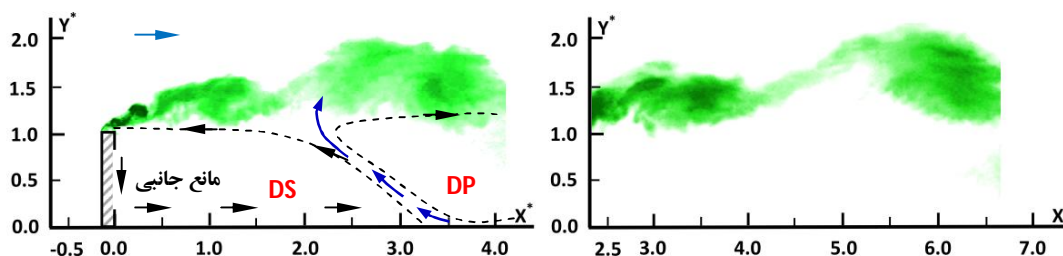
در این بخش از جریان، شکسته شدن پیوستگی گردابه‌های بزرگ مقیاس سطحی به واسطه اصطکاک بستر و غالب شدن آشفتگی تولید شده از بستر کانال عامل تمایل جریان آشفته به حالت سه بعدی می باشد.

2-4- تحلیل تغییرات مکانی و زمانی لایه اختلاطی با آزمایش اورانین

برای روشن شدن این نکته، آزمایش آشکارسازی ساختارهای لحظه‌ای داخل لایه اختلاطی با استفاده از ماده رنگی اورانین انجام شد. شکل 8 الگوی ساختارهای لحظه‌ای داخل لایه اختلاطی را برای محدوده پایین دست آبشکن نشان می دهد. تصاویر مزبور به خوبی گویای تغییرات مکانی ساختارهای آشفتگی در داخل لایه اختلاطی است، به نحوی که درست در پایین دست مانع جانبی، گردابه‌های ریز تشکیل شده، ولی با حرکت به سمت پایین دست در محدوده $3 < X^* < 4$ ابعاد گردابه‌ها بصورت ناگهانی افزایش یافته است. با توجه به شکل سمت راست، با گذر از محدوده مزبور، ساختار غالب بصورت گردابه‌های بزرگ مقیاس است.

نکته حائز اهمیت در روند تغییرات منحنی طیف انرژی نقاط داخل لایه اختلاطی، شکل‌گیری شیب 3- در محدوده فرکانسی پایین دست فرکانس غالب می باشد، به نحوی که از نقطه P_4 تا P_7 میزان همخوانی تنزل انرژی در این بخش با شیب 3- افزایش می یابد. وقوع شیب 3- در مطالعات محققان قبلی نظیر (Jirka و Uijttewaal (2001) and Booij (2000) نیز گزارش شده است. این محققان، تنزل انرژی با شیب 3- را نشانه شکل‌گیری ساختارهای بزرگ مقیاس سطحی عنوان کرده اند، به نحوی که جریان‌های مزبور ساختار دو بعدی دارند. لذا با استناد به این نکته می توان نتیجه گرفت که در بخش عمده‌ای از لایه اختلاطی محاط بر ناحیه جدایی کم عمق، جریان ساختار دو بعدی داشته و مکانیسم غالب بر میدان آشفته، ناپایداری‌های ایجاد شده در داخل لایه اختلاطی می باشد. به عبارت دیگر در بخش‌هایی از میدان که طیف انرژی در محدوده فرکانس‌های پائین، با شیب 3- تنزل می یابد، آشفتگی ایجاد شده از بستر کانال نقش چندانی در شکل‌گیری میدان ندارند.

وقوع حداکثر انرژی و همچنین شروع همخوانی تنزل انرژی با شیب 3- در نقطه P_4 نشان از وقوع تغییر در ساختارهای لحظه‌ای شکل گرفته در این نقطه نسبت به نقاط بالادست دارد. این نکته در بخش بعد بحث شده است. نحوه تغییرات طیف انرژی در نقطه P_9 حاکی از کاهش اثرات جریان‌های دوبعدی و غالب شدن مجدد



شکل 8 الگوی گردابه‌های داخل لایه اختلاطی حاصل از آزمایش ماده رنگی اورانین

5- نتیجه گیری

در این تحقیق ساختارهای لحظه‌ای و مکانی لایه اختلاطی محاط بر یک ناحیه جدایی کم عمق بصورت آزمایشگاهی و با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی مطالعه شد.

نتایج اندازه‌گیری‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که محدوده وقوع حداکثر مقدار انرژی جنبشی آشفتگی و همچنین تنش‌های رینولدز منطبق بر محدوده وقوع تغییر در رفتار لایه اختلاطی می‌باشد. بلافاصله در پایین‌دست مانع و در امتداد لایه اختلاطی، توزیع طیفی انرژی آشفتگی ضمن همخوانی مناسب با توزیع $5/3$ - کولموگروف، مؤید سه بعدی بودن جریان است. با حرکت به سمت پایین‌دست، توزیع طیفی انرژی آشفتگی در محدوده فرکانس‌های پایین، با شیب 3 - تنزل می‌یابد که مشخصه اصلی ساختارهای آشفتگی دو بعدی سطحی می‌باشد. در محدوده باز اتصال مجدد و در انتهای لایه اختلاطی، مجدداً شیب $5/3$ - مشخصه غالب توزیع فرکانسی انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد که در این حالت، سه بعدی بودن جریان ناشی از نقش تنش برشی بستر و غلبه آن بر ساختارهای دوبعدی آشفتگی می‌باشد. وجود دو ناحیه چرخشی غیر همسو در پایین‌دست مانع، باعث تغییر در رفتار چرخشی گردابه‌های لحظه‌ای داخل لایه اختلاطی شده و همین پدیده علاوه بر تغییر در مشخصات لحظه‌ای، ساختار مکانی لایه اختلاطی را نیز تغییر می‌دهد.

6- فهرست علائم

f_R	فرکانس نمونه برداری
$F(f)$	تبدیل فوریه تابع f
$r_i(\tau)$	تابع نرمال شده خود همبستگی
$R(t_1, t_2)$	تابع خود همبستگی
$S_i(f)$	تابع چگالی انرژی طیفی

وقوع تغییر ناگهانی در ابعاد گردابه‌ها در محدوده $3 < X^* < 4$ تأییدی بر تغییر رفتار ضخامت لایه اختلاطی است که در مقاله بخش اول (جریان متوسط) بحث شد. علاوه بر آن همان‌طور که در بخش‌های قبل نشان داده شد، حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی و نیز تنش‌های رینولدز نیز در این محدوده رخ می‌دهند. انطباق پدیده‌های مزبور همگی ناشی از تغییر در ساختار و ابعاد گردابه‌های داخل لایه اختلاطی در این محدوده می‌باشد. علت تغییر ناگهانی در ابعاد گردابه‌های آشفتگی در این محدوده ناشی از اندرکنش دو ناحیه چرخشی با یکدیگر و همچنین اندرکنش آنها با ساختارهای لحظه‌ای داخل لایه اختلاطی می‌باشد. گردابه‌های لحظه‌ای که از دماغه مانع جانبی کنده می‌شوند، دارای حرکت چرخشی ساعت‌گرد بوده و به سمت پایین منتقل می‌شوند، در حالی که ناحیه چرخشی DS حرکت پاد ساعت‌گرد دارد. این پدیده باعث شده تا به واسطه هم علامت نبودن ورتیسیتی دو ناحیه مزبور، گردابه‌های لحظه‌ای رشد چندانی نکنند.

بر خلاف بخش ابتدایی لایه اختلاطی، از محل تلاقی دو ناحیه چرخشی به سمت پایین‌دست، دو مکانیسم مهم باعث رشد ابعاد گردابه‌های لحظه‌ای می‌شوند: 1- جریان مورب ایجاد شده در فصل مشترک دو ناحیه (شکل 4- ب مقاله قبل) یک مومنتم جانبی بر گردابه‌های لحظه‌ای وارد کرده و باعث می‌شود تا این گردابه‌ها ضمن حرکت به سمت پایین، سیال بیشتری را از اطراف به داخل خود بکشند و در نتیجه ابعادشان رشد کند. 2- بر خلاف ناحیه چرخشی DS (ناحیه چرخشی ثانویه درست بعد از آبشکن)، جهت چرخش ناحیه DP (ناحیه چرخشی اصلی) هم جهت با جهت چرخش گردابه‌های لحظه‌ای داخل لایه اختلاطی بوده و به واسطه هم علامت بودن ورتیسیتی دو جریان، شدت چرخش و ابعاد گردابه‌های لحظه‌ای توسط ناحیه چرخشی DP تقویت می‌شود.

Jirka, G.H. (2001). Large scale flow structures and mixing processes in shallow flows, J. Hydraul. Res., 39(6), pp. 567-574.

Rhoads, B. L. and Sukhodolov, A. N., (2004). Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence, Water Resour. Res. 40, W06304, doi: 10.1029/2003WR002811.

Tennekes, H. and Lumley J.L. (1972). A first course in turbulence, MIT Press.

Tukker, J. 1997. Turbulence structures in shallow free-surface mixing layers, PhD Thesis, TU Delft.

Uijttewaal, W. S. J. and Booij, R. (2000). Effects of shallowness on the development of free-surface mixing layers. Phys. Fluids, 12(2), pp. 392-420.

Van Prooijen, B. and Uijttewaal W., (2001). Development of large turbulent structures in shallow mixing layers, Proceeding of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics, Arizona: 1-6 (CD-Rom).

TKE

انرژی جنبشی آشفتگی

$u_i(t)$

مقدار لحظه‌ای مؤلفه‌ام سرعت

u'

ترم نوسانی مؤلفه طولی سرعت

v'

ترم نوسانی مؤلفه عرضی سرعت

X^*

مختصات طولی به بعد شده میدان

Y^*

مختصات عرضی بی بعد شده میدان

τ_{ij}

تنش رینولدز

7- منابع

Barbarutsi S., Ganoulis J., and Chu V.H. (1989). Experimental investigation of shallow recirculating flows, J. Hydraul. Eng., 128(10), pp. 891-900.

Davidson, P.A. (2004). Turbulence: An introduction for scientists and engineers, Oxford University Press.