

مطالعه هیدرودینامیک لایه اختلاطی محاط بر یک ناحیه جدایی جریان کم عمق با استفاده از روش SPIV - بخش اول: ساختار جریان متوسط

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

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

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

* اردبیل، صندوق پستی 179

Safarzadeh@uma.ac.ir

چکیده - لایه‌های اختلاطی یا برشی ساختارهای مهم هیدرودینامیکی هستند که در اغلب مسائل مهندسی هیدرولیک نقش مهمی در شکل‌گیری ساختار عمومی جریان داشته و علاوه بر آن پدیده‌هایی مانند انتقال رسوب، پخش آلودگی و تبادل مومتم جریان‌های متوسط و آشفته را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این تحقیق، یک ناحیه چرخشی با استفاده از نصب یک مانع جانبی در کانال شکل گرفته و الگوی جریان در امتداد لایه برشی محاط بر ناحیه چرخشی با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات با فرکانس 37 هرتز و در موقعیت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. نتایج اندازه‌گیری‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که پدیده تشابه پروفیل‌های سرعت بی بعد شده در طول لایه اختلاطی، بر خلاف لایه اختلاطی کلاسیک تنها در فاصله اندکی از شروع ناحیه چرخشی و همچنین در محدوده باز اتصال مجدد حاکم می‌باشد. روند تغییرات ضخامت لایه اختلاطی نشان از وجود رفتار دوگانه در طول میدان دارد، به نحوی که از شروع لایه اختلاطی تا فاصله 3/5 برابر طول مانع جانبی به سمت پایین‌دست، ضخامت لایه بصورت غیرخطی رشد کرده و در ادامه ضمن وقوع افزایش شدید در ضخامت لایه، تا محل اتصال مجدد، ضخامت لایه بصورت خطی افزایش می‌یابد. شکل‌گیری دو ناحیه چرخشی مجزا و اندرکنش شدید آنها، عامل اصلی پدیده‌های هیدرودینامیکی مزبور می‌باشند.

کلیدواژگان: لایه اختلاطی، جریان کم عمق، جدایی جریان، روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات، گردابه‌های بزرگ مقیاس سطحی.

1- مقدمه

جریان‌های کم عمق را به صورت جریان‌های افقی غالب که در آنها ابعاد افقی میدان جریان بسیار وسیع تر از بعد قائم باشد، تعریف کرده است. مشخصه اصلی چنین جریان‌هایی توسعه شدید افقی ساختارهای جریان‌های آشفته به واسطه محدود بودن عمق جریان می‌باشد. به

جریان‌های کم عمق¹ را می‌توان در اغلب محیط‌های هیدرولیکی نظیر رودخانه‌های عریض، تالاب‌ها و دریاچه‌های کم عمق مشاهده کرد. جیرکا (2001)

1. Shallow Flows

شکل می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به جریان آشفته در محل تلاقی رودخانه‌ها⁴ (Rhoads and Sukhodolov, 2000; Uijtewall and Booij, 2004)، فصل مشترک جریان در میدان آبشکن⁵ و جریان پرسرعت بیرونی (Brevis, 2002)، جریان در ورودی بندرگاه یا حفره جانبی⁶، جریان در فصل مشترک سیلاب‌دشت و مجرای اصلی مقاطع مرکب و همچنین جریان کم عمق در حضور پوشش گیاهی (White and Nepf, 2007) اشاره کرد.

مشخصه دیگر جریان در مجاری کم عمق، نقش مهم اصطکاک بستر در شکل‌گیری جریان‌های آشفته و متوسط می‌باشد. در حالتی که جریان عمیق باشد، اثرات اصطکاک بستر محدود به لایه‌های نزدیک بستر بوده و تنش برشی اعمالی از طرف بستر کانال نقش چندانی در شکل‌گیری ساختارهای جریان در لایه‌های فوقانی نخواهد داشت. در مقابل، در جریان‌های کم عمق، آشفتگی ایجاد شده به واسطه حضور مرز صلب بستر و به علت محدودیت عمق به سمت لایه‌های فوقانی نفوذ کرده و کل عمق جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مرور مطالعات قبلی نشان می‌دهد که تحقیقات نسبتاً کاملی در مورد ساختار لایه‌های برشی کلاسیک (لایه‌های برشی ایجاد شده ناشی از عبور دو جریان با سرعت متفاوت از کنار یکدیگر) صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات (Chu and Babarutsi, 1988)، (Uijtewaal and Booij, Uijtewaal and Tukker, 1998)، (Rhoads and Shukhodolov, 2004)، (2000)، بر خلاف لایه‌های برشی کلاسیک، ساختار جریان در لایه‌های اختلاطی در حضور ناحیه چرخشی چندان شناخته شده نیست. مثال بارز شکل‌گیری لایه اختلاطی در

عبارت بهتر به واسطه محدود بودن راستای قائم میدان، گردابه‌های لحظه‌ای¹، شرایط توسعه در عمق بصورت کشیدگی² را نداشته و به همین علت در راستای افقی گسترش می‌یابند. گردابه‌های افقی توسعه یافته تحت این شرایط به ساختارهای منسجم بزرگ مقیاس دوبعدی³ معروف بوده و نقش بسیار مهمی در تبادل مومتم و شکل‌گیری ساختار کلی جریان ایفا می‌کنند. تغییرات قائم میدان در مقایسه با راستای افقی کم اهمیت بوده و می‌توان جریان در چنین حالاتی را بصورت دو بعدی در پلان مطالعه کرد. جیرکا (2001) ساختارهای منسجم دوبعدی (2DCS) را بر اساس مکانیسم‌های شکل‌گیری به سه دسته مختلف تقسیم‌بندی کرده است: الف: تیپ A یا ساختارهای دوبعدی ناشی از اثرات توپوگرافیکی، ب: تیپ B یا ساختارهای دو بعدی ناشی از ناپایداری‌های برشی جانبی و ج: تیپ C یا ناپایداری‌های ثانویه ناشی از انتقال قائم آشفتگی کف به واسطه تنش برشی بستر.

تیپ A، مکانیسم غالب شکل‌گیری جریان‌های منسجم بزرگ مقیاس بوده و معمولاً زمانی رخ می‌دهد که یک عارضه توپوگرافیکی نظیر وجود چاله آبستگگی و یا وجود یک مانع جانبی در رودخانه نظیر سازه آبشکن، کوله پل و یا پایه‌های پل باعث جدایی موضعی جریان و یا وقوع یک گرادیان شدید در مشخصات هیدرودینامیکی جریان شوند. تیپ B در شرایطی رخ می‌دهد که یک گرادیان جانبی سرعت در میدان جریان ایجاد شده و ضمن شکل‌گیری لایه‌های اختلاطی و برشی کم عمق، به واسطه ناپایداری‌های رخ داده، جریان‌های چرخشی لحظه‌ای با محور چرخشی قائم شکل خواهند گرفت. گردابه‌های مزبور به واسطه محدود بودن عمق جریان، بصورت افقی توسعه خواهند یافت. لایه‌های اختلاطی کم عمق در موارد متعددی از مسائل مهندسی هیدرولیک

4. River confluence
5. Groyne field
6. Side cavity

1. Vortices
2. Vertical stretching
3. Large scale coherent structures (2DSC)

2- مبانی تئوریک

1-2- جریان‌های کم عمق

در جریان‌های کم عمق، تنش برشی بستر نقش بسیار مهمی در شکل‌گیری ساختارهای آشفتگی داخل میدان و نحوه رشد و توسعه آنها بازی می‌کند. Babarutsiet et al. (1989) ضمن مطالعه جریان چرخشی در حالت کم عمق، به این نتیجه رسیدند که در چنین جریان‌هایی دو مقیاس طولی متفاوت، بر شکل‌گیری جریان تأثیرگذار هستند: الف: طول انسداد کانال در مقطع مانع جانبی (یا همان طول مانع، L) و مقیاس طولی اصطکاک بستر (H/c_f) . نسبت دو پارامتر مزبور تحت عنوان عدد اصطکاک بستر² نامیده می‌شود:

$$S = \frac{c_f L}{2H} \quad (1)$$

که در آن، c_f ضریب اصطکاک بستر، H عمق جریان و L طول انسداد کانال می‌باشد. ضریب اصطکاک بر اساس مشخصات جریان نزدیک شونده که تحت تأثیر مانع جانبی قرار نگرفته است، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$c_f = \frac{2\tau_b}{\rho U_0^2} \quad (2)$$

که در آن، τ_b تنش برشی بستر، U_0 سرعت متوسط جریان و ρ جرم مخصوص آب است. بر اساس نتایج آزمایش‌های صورت گرفته توسط Babarutsiet et al. (1989)، جریان چرخشی در کانال باز را می‌توان بر اساس عدد اصطکاک بستر بصورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

جریان عمیق³: $S < 0.05$

حالت انتقالی⁴: $S = 0.05 - 0.1$

جریان کم عمق⁵: $S > 0.1$

در این مقاله، جریان آشفتنه مورد نظر از نوع جریان کم عمق بوده و مشخصات جریان با در نظر گرفتن معیارهای فوق تنظیم شده است.

حضور ناحیه چرخشی، جریان پشت یک مانع جانبی در رودخانه نظیر آبشکن یا کوله پل می‌باشد، به نحوی که به واسطه شکل‌گیری ناحیه چرخشی در پشت مانع و کاهش سرعت در آن ناحیه، یک گردایان جانبی سرعت بین ناحیه چرخشی و جریان پرسرعت بیرونی شکل گرفته و منجر به شکل‌گیری لایه اختلاطی می‌شود. مشخصه جالب و تفاوت مهم لایه اختلاطی پایین دست مانع با لایه اختلاطی کلاسیک، همزمانی وقوع دو مکانیسم شکل‌گیری جریان‌های منسجم بزرگ مقیاس می‌باشد که قبلاً جزئیات آن ارائه شد؛ 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 گردایان فشار معکوس در محل مانع، جریان اصلی از دماغه سازه جدا شده و گروهی از گردابه‌های متناوب با قدرت چرخشی شدید را در پایین دست سازه ایجاد می‌کنند (مکانیسم تیپ A). از طرفی، شکل‌گیری ناحیه چرخشی ضمن ایجاد گردایان عرضی سرعت باعث ناپایداری‌های جانبی برشی شده و گردابه‌های چرخشی از تیپ B در داخل لایه اختلاطی تولید می‌شوند.

اندرکنش دو مکانیسم با یکدیگر و همچنین اندرکنش آنها با ناحیه چرخشی باعث پیچیدگی شدید ساختارهای متوسط و لحظه‌ای جریان در امتداد لایه اختلاطی می‌شود. نظر به اهمیت شدید لایه‌های اختلاطی در کاربردهای مهندسی نظیر مطالعات سیلاب (بحث اندرکنش سیلاب‌دشت و مجرای اصلی رودخانه)، انتقال رسوب و فرسایش، پخش و انتشار آلاینده و تأثیر آن بر کیفیت آب، در این تحقیق ساختار جریان متوسط در امتداد لایه اختلاطی محاط بر یک ناحیه چرخشی بصورت آزمایشگاهی و با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی¹ مطالعه شده است.

2. Bed Friction Number
3. Deep Water
4. Transitional Flow
5. Shallow Flow

1. Surface Particle Image Velocimetry (SPIV)

2-2- لایه اختلاطی در حضور ناحیه جدایی جریان**1-2-2- نحوه بی بعدسازی پروفیل‌های سرعت**

ساختار لایه اختلاطی با حضور ناحیه جداشدگی جریان بسیار پیچیده‌تر از لایه‌های اختلاطی آزاد می‌باشد که علت آن اندرکنش ناحیه چرخشی با لایه اختلاطی می‌باشد. شکل 1 ناحیه اختلاطی مزبور را نشان می‌دهد. با توجه به وجود سرعت برگشتی در ناحیه چرخشی جریان و تغییرات آن در طول مسیر، لازم است تا مشخصه سرعت متفاوتی نسبت به لایه برشی آزاد در نظر گرفته شود. Rajaratnam & Nwachukwu (1983) روش زیر را برای بی بعدسازی پروفیل‌های سرعت و نیز بررسی تشابه آنها ارائه کرده‌اند:

در این حالت پارامترهای U'/U'_m و $\eta = y'/y'_0$ به ترتیب برای بی بعدسازی مقادیر سرعت و مختصات عرضی میدان استفاده شده است. پارامترهای مزبور که در شکل 1- ب نشان داده شده‌اند، بصورت زیر تعریف می‌شوند:

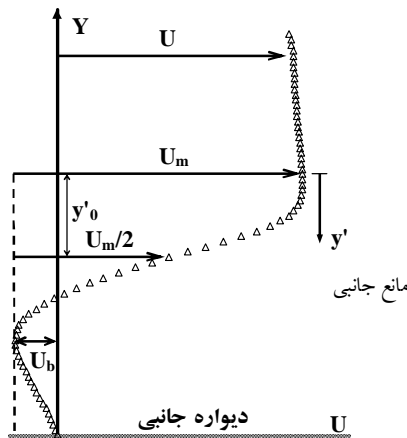
$$U' = U - U_b, \quad U'_m = \max(U'), \quad U_b = \min(U) \quad (3)$$

U ، سرعت متوسط زمانی در هر نقطه می‌باشد. مبدأ

جدیدی (y') که برای مختصات عرضی در نظر گرفته شده است، محل گوشه بیرونی لایه اختلاطی (محل وقوع حداکثر سرعت) بوده و y'_0 محلی است که در آن: $U' = 0.5U'_m$.

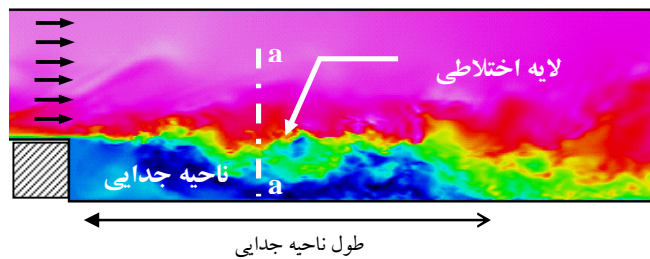
2-2-2- نحوه تعیین ضخامت لایه اختلاطی

در لایه اختلاطی کلاسیک، اگر اختلاف سرعت دو جریان $(\Delta U = U_1 - U_2)$ و سرعت متوسط در مرکز لایه اختلاطی بصورت $(U_c = (U_1 + U_2)/2)$ در نظر گرفته شود، عرض لایه اختلاطی (δ) در هر مقطع بصورت نسبت اختلاف سرعت دو جریان به گرادیان سرعت در محل نقطه عطف پروفیل تعریف می‌شود (Van Prooijen, 2004). در لایه‌های اختلاطی با وجود ناحیه جداشدگی، نحوه تعیین عرض لایه (δ) متفاوت با حالت کلاسیک می‌باشد، چرا که بر خلاف لایه برشی کلاسیک، به علت وجود جریان برگشتی در این حالت نمی‌توان اختلاف سرعت دو سمت لایه برشی را بطور معمول تعریف نمود و در این حالت بایستی تأثیر ناحیه برگشتی جریان در محاسبات تعیین ضخامت لایه لحاظ شود.



ب- پروفیل مؤلفه طولی سرعت معرف در محل لایه اختلاطی مقطع (a-a) و پارامترهای مورد استفاده برای

بی بعد سازی پروفیل‌ها



الف - معرفی نواحی مختلف (Pope, 2000)

شکل 1 لایه اختلاطی در حضور ناحیه چرخشی

سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی، به بررسی ساختار جریان متوسط با تأکید بر نحوه تغییرات مشخصات مزبور پرداخته شده است. در ادامه ضمن معرفی تجهیزات آزمایشگاهی مورد نظر، جزئیات آزمایش، روش اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها تشریح شده است.

3- تجهیزات آزمایشگاهی و مشخصات آزمایش

روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات به عنوان کاراترین روش برای اندازه‌گیری همزمان تغییرات زمانی و مکانی ساختارهای جریان مطرح می‌باشد. در این روش، ذراتی به سیال مورد نظر افزوده می‌شود که اندازه و چگالی آنها به نحوی است که در هر نقطه از میدان، با سرعت موضعی جریان حرکت کرده و در حقیقت، بیانگر حرکت ذرات سیال می‌باشد. در صورتی که دو عکس متوالی (با فاصله زمانی مشخص) از یک صفحه داخل میدان تهیه شده و ضمن ردیابی ذرات، میزان جابجایی آنها بین دو عکس مشخص شود، با تقسیم میزان جابجایی در هر جهت بر فاصله زمانی بین دو عکس، مؤلفه سرعت در راستای مزبور مشخص خواهد شد. جزئیات این روش در مراجع معتبری نظیر (Van der Graaf, 2004) ارائه شده است.

در جریان‌های کم عمق که هدف این تحقیق می‌باشد، بخش عمده میدان جریان بصورت دو بعدی در پلان بوده و ویژگیهای پایه‌ای و اساسی جریان را می‌توان تنها با اندازه‌گیری سرعت سطحی بدست آورد. روشی که توسط محققان رشته هیدرولیک برای سرعت‌سنجی این چنین جریان‌هایی ارائه شده است، به روش سرعت‌سنجی تصویری سطحی معروف بوده و در این روش به جای افزودن مواد ردیاب مستغرق در جریان به کل میدان، ذرات شناوری به سطح آب افزوده شده و نیازی به هیچ منبع نوری نظیر لیزر برای ایجاد صفحه روشن نیست (Uijtewaal & Booij, 2000). همان طور که در بخش

بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که محققان مکانیک سیالات از رابطه زیر برای تعیین ضخامت لایه اختلاطی در هر فاصله x از ابتدای لایه استفاده کرده‌اند (Pope, 2000):

$$\delta(x) = \frac{(U_{\max} - U_b)}{\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)_{\max}} \quad (4)$$

در روابط فوق، $(U_{\max} - U_b)$ معرف مقیاس سرعت در این حالت بوده و در حقیقت به صورت اختلاف میزان حداکثر و حداقل سرعت در هر پروفیل می‌باشد. عبارت $\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)_{\max}$ حداکثر گرادبان سرعت در محل نقطه عطف پروفیل است.

بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته توسط (Rajaratnam & Nwachukwu, 1983) تشابه بین پروفیل‌های سرعت در ناحیه اختلاطی پشت آبشکن به عنوان یک مانع جانبی در جریان عمیق برقرار بوده و عرض ناحیه اختلاطی، مشابه لایه برشی آزاد بصورت خطی در طول جریان افزایش پیدا می‌کند. (Castro and Haque, 1987) مکان هندسی مرکز لایه اختلاطی را بصورت نقاط $y=y_c$ تعریف کرده‌اند که در آن نقاط، اندازه مؤلفه طولی سرعت معادل $(0.67\Delta U + U_{\min})$ می‌باشد. در این رابطه، ΔU بیانگر اختلاف مقادیر حداکثر و حداقل سرعت در هر پروفیل سرعت می‌باشد. این محققان پارامترهای زیر را به عنوان کمیت‌هایی برای تخمین عرض لایه اختلاطی به ترتیب در دو سمت پر سرعت و کم سرعت لایه پیشنهاد داده‌اند:

$$\Delta y_H = (y_{0.95} - y_{0.67}) \quad (5)$$

$$\Delta y_L = (y_{0.67} - y_{0.2}) \quad (6)$$

که در آن y_n نقطه‌ای از هر پروفیل می‌باشد که در آن نقطه، سرعت جریان برابر $(n\Delta U + U_{\min})$ می‌باشد.

الگوی رفتاری پروفیل‌های سرعت و همچنین عرض لایه اختلاطی در حالت جریان کم عمق تابحال گزارش نشده و در این تحقیق ضمن اندازه‌گیری دقیق با روش

می‌باشد. نمای کلی از کانال و تجهیزات جانبی آن در شکل 2 نشان داده شده است.

دبی ورودی به سیستم از طریق یک دبی‌سنج مغناطیسی با دقت 0/01 لیتر بر ثانیه واقع در لوله انتقال آب قبل از تخلیه به مخزن بالادست اندازه‌گیری می‌شود. برای تنظیم جریان ورودی از یک شیر کشویی استفاده شده و کنترل میزان بازشدگی شیر و همچنین دبی سنج مزبور بصورت کامپیوتری می‌باشند.

2-3- سیستم سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی

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. چگالی ذرات مورد استفاده کمتر از چگالی آب بوده و به همین علت در سطح آب شناور می‌شوند. ذرات ردیاب مورد استفاده در این تحقیق بسیار سبک بوده و برای پخش آنها بر روی سطح آب، از سیستم پخش که با استفاده از فشار باد کار می‌کند، استفاده شده است. این سیستم که در این تحقیق طراحی و ساخته شده است، بصورت شماتیک در شکل 2 نشان داده شده و تصویر آن بر روی کانال آزمایشگاهی، در شکل 2-2 د نیز ارائه شده است. سیستم پخش ذرات در بالادست محدوده اندازه‌گیری به نحوی نصب شد که ذرات ردیاب را با نرخ مشخصی و بصورت یکنواخت به سطح آب پخش می‌نمود.

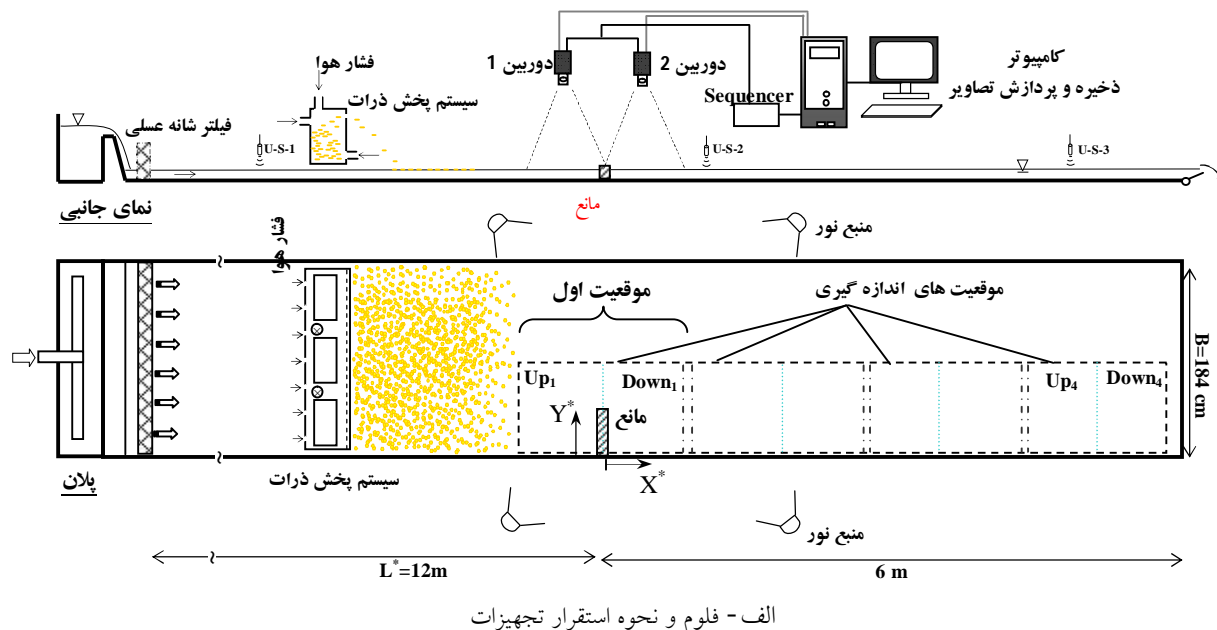
در این روش از سرعت‌سنجی تصویری، برای تأمین نور کافی در محیط به نحوی که ذرات ردیاب به خوبی توسط دوربین قابل تشخیص باشند، چهار عدد منبع نوری هالوژنی در کنار فلوم نصب شد. برای ثبت تصاویر از دو عدد دوربین CCD مدل Procilica GE1910 با فرکانس تصویربرداری 37 فریم بر ثانیه استفاده شد.

مقدمه عنوان شد، مشخصه بارز جریان‌های کم عمق، شکل‌گیری جریان‌های چرخشی بزرگ مقیاس سطحی بوده و لذا لازم است تا سیستم تصویربرداری و محدوده اندازه‌گیری به نحوی باشد که ساختارهای مزبور در تصاویر برداشت شده ثبت شوند. بدین منظور در این تحقیق، یک سیستم سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی (SPIV) شامل بخش سخت‌افزاری، پیش پردازش تصاویر، پردازش تصاویر برای تعیین میدان برداری، فیلتراسیون نتایج و در نهایت پس پردازش میدان برداری برای بررسی ساختارهای لحظه‌ای و نیز مکانی جریان آشفته حول مانع جانبی توسعه داده شده است. به منظور حذف داده‌های نادرست، داده‌های SPIV در چندین مرحله فیلتر شده است. بدین منظور از فیلتر میانه محلی¹ ارائه شده توسط Westerweel (2005) و همچنین الگوریتم تکراری فیلتراسیون پیشنهادی (Brevis (2009) استفاده شده است. همچنین از الگوریتم توسعه داده شده توسط Brevis and Villalba (2011) برای تبدیل تصاویر از مختصات دوربین به مختصات واقعی استفاده شده است. در ادامه ضمن بیان جزئیات فلوم آزمایشگاهی مورد نظر، جزئیات سیستم سرعت‌سنجی تصویری توسعه داده شده برای انجام این تحقیق تشریح شده است.

1-3- فلوم آزمایشگاهی

آزمایش مورد نظر، در یک کانال مستقیم به عرض 1/84 متر و طول 18 متر انجام شده است. این کانال شیب‌پذیر بوده و سیستم تغییر شیب آن بصورت کامپیوتری با دقت 0/1 درجه قابل تنظیم است. کانال مزبور دارای چهارچوب فلزی بوده و بستر و جداره‌های آن از جنس بتن صاف با روکش پلاستیکی می‌باشد. زبری بستر و جداره‌های کانال به نحوی است که قطر اسمی بزرگ‌ترین مصالح سطح بستر و جداره‌ها کوچک‌تر از 0/2 میلی‌متر

1. Median Local Filter



د- سیستم پخش ذرات

ج- ذرات ردیاب

ب- دوربین

شکل 2 فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری به روش SPIV

یافته است، بطوری که در تحقیق اخیر از نسخه 0.6.1 آن استفاده شده است. برای مراحل پیش پردازش تصاویر، کالیبراسیون و هم چنین پس پردازش داده‌ها، برنامه‌های مربوطه در محیط نرم افزار متلب نوشته شده است.

3-3- جزئیات آزمایش

مانع جانبی مورد نظر از جنس فلزی با روکش آلومینیومی بوده و مقطع آن بصورت مربعی با ابعاد 5 سانتی‌متر می‌باشد (شکل 1). طول مانع برابر 25 سانتی‌متر انتخاب شده و عمود بر دیواره سمت راست کانال در فاصله 12 متری از ورودی نصب شد. در فاصله مزبور جریان نزدیک

دو دوربین در بالای کانال و به فاصله 1/5 متری از سطح آب به نحوی نصب شده‌اند که بصورت دید به پائین و عمود بر سطح آب بوده و در مجموع یک ناحیه با ابعاد 150×45 سانتی‌متر مربع را پوشش می‌دهند. تصاویر ثبت شده توسط هر دوربین 5 سانتی‌متر باهم همپوشانی دارند. برای پردازش تصاویر از مجموعه برنامه‌هایی که در محیط متلب نوشته شده و همچنین نرم افزار GPIV در محیط سیستم عامل لینوکس استفاده شده است. برنامه GPIV که یک برنامه متن آزاد و رایگان می‌باشد، در سال 2003 توسط G. Van der Graaf در گروه تحقیقاتی Multiscale Physics دانشگاه دلفت هلند تهیه شده و به مرور توسعه

متوالی به اندازه 10 درصد طول هر موقعیت می باشد. مشخصه بارز جریان های آشفته کم عمق، شکل گیری گردابه های بزرگ مقیاس سطحی می باشد که فرکانس شکل گیری و حرکت آنها به مراتب کوچک تر از فرکانس گردابه های ریز آشفتگی می باشد. بدین علت، طول زمان اندازه گیری در هر موقعیت، بایستی به نحوی باشد که برای ارضای شرط ایستایی سری های زمانی²، تعداد کافی از این گردابه ها حین اندازه گیری ثبت شوند. بدین منظور، ابتدا بصورت مشاهداتی، فرکانس گردابه های بزرگ مقیاس در طول میدان تخمین زده شده و زمان اندازه گیری در هر صفحه 10 دقیقه تنظیم شد. لذا با توجه به فرکانس تصویربرداری (37 هرتز) در هر صفحه 22200 عکس ذخیره شده است.

4- نتایج

4-1- ساختار عمومی جریان متوسط

تصاویر برداشت شده در هر موقعیت با روش سرعت سنجی تصویری (PIV) پردازش شده و میدان سرعت لحظه ای در هر صفحه از 4 موقعیت مورد نظر تعیین شده است. نمونه ای از میدان برداری سرعت های لحظه ای در صفحه پایین دست مانع جانبی واقع در موقعیت اول و در دو لحظه زمانی پشت سرهم در شکل 3 نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که در این شکل و شکل های آتی، هر دو محور طولی و عرضی میدان نسبت به طول مانع (L) بی بعد شده اند و به عبارت بهتر: $X^*=X/L$, $Y^*=Y/L$. با توجه به شکل های مزبور ساختار مکانی گردابه های آشفتگی سطحی در پایین دست دماغه مانع و در امتداد لایه اختلاطی به وضوح قابل مشاهده بوده و نحوه انتقال آنها به سمت پایین دست با مقایسه دو تصویر قابل رویت است.

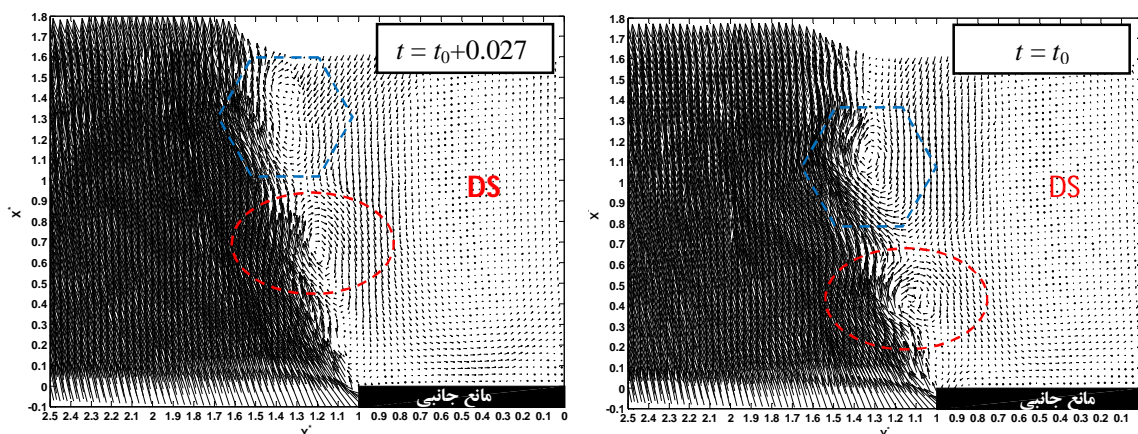
شونده توسعه یافته بوده و به حالت یکنواخت رسیده است. لازم به ذکر است که مانع در حالت غیر مستغرق می باشد. مشخصات هیدرولیکی آزمایش در جدول 1 ارائه شده است. با توجه به جدول، جریان ورودی آشفته بوده و شرایط جریان بصورت زیر بحرانی می باشد. علاوه بر آن، با توجه به معیار ارائه شده در بخش 2-1 و بر اساس عدد اصطکاک بستر، $S=0.66 > 0.1$ جریان در حالت کم عمق می باشد.

جدول 1 مشخصات هیدرولیکی آزمایش جریان کم عمق حول مانع

Q	h	S_0	U_0	B/h	Re	Fr	c_F	S
(lit/s)	(mm)	(degree)	(m/s)	-	-	-	-	-
13/5	40	0/01	0/18	0/046	28800	0/29	0/072	0/66

در جدول 1، Q و h به ترتیب بیانگر دبی و عمق جریان ورودی، S_0 شیب طولی کانال، U_0 سرعت متوسط جریان ورودی، B/h ضریب نمود مقطع¹ که B عرض کانال می باشد. Re عدد رینولدز جریان ورودی بوده و بر اساس سرعت متوسط جریان و چهار برابر عمق ورودی محاسبه شده است. Fr عدد فرود جریان بر مبنای سرعت متوسط و عمق جریان ورودی می باشد. بقیه پارامترها در بخش 2-1 معرفی شده اند.

با توجه به جدایی جریان در ناحیه بالادست مانع و نیز تشکیل یک ناحیه چرخشی وسیع در پایین دست آن، میدان جریان در 4 موقعیت اندازه گیری متوالی که کل ناحیه تحت تأثیر مانع را پوشش دهد، اندازه گیری شد (شکل 2- الف). در هر موقعیت از دو عدد دوربین استفاده شده و در حقیقت هر موقعیت شامل 2 صفحه اندازه گیری بالادست (Up) و پایین دست (Down) می باشد. لذا در مجموع، 8 صفحه اندازه گیری در کل میدان وجود داشت که میزان هم پوشانی موقعیت های



شکل 3 میدان سرعت لحظه‌ای در صفحه پایین دست مانع جانبی

که ناحیه چرخشی بزرگ متناظر با ناحیه جدایی جریان در پشت مانع بوده و ناحیه چرخشی ثانویه مختص حالت جریان کم عمق می‌باشد. علت شکل‌گیری این ناحیه را می‌توان دو عامل مهم ذکر کرد: الف: نقش جریان چرخشی اصلی در شکل‌گیری آن و ب: تأثیر گردابه‌های چرخشی با قدرت چرخشی بالا که از دماغه مانع جانبی کنده شده و به سمت پایین دست حرکت می‌کنند.

جریان برگشتی ناحیه جدایی اصلی، در امتداد دیواره جانبی کانال به واسطه کم عمق بودن جریان و نقش اصطکاک بستر در اتلاف مومنتم طولی آن، با حرکت به سمت مانع به تدریج مومنتم طولی خود را از دست داده و در نزدیکی موقعیت $X^*=3.2$ جریان مزبور به واسطه دارا نبودن مومنتم کافی برای نفوذ به ناحیه مرده پشت مانع (بخشی از سیال که بین وجه پایین دست مانع و دیواره جانبی کانال محبوس شده است) و همچنین وجود گردایان معکوس فشار در راستای طولی به واسطه وجود ناحیه مرده، از دیواره کانال جدا و به سمت بخش مرکزی کانال منحرف می‌شود. به عبارت بهتر جریان برگشتی از ناحیه چرخشی اصلی به واسطه اینرسی خود توانایی نفوذ کامل تا وجه پایین دست مانع را ندارد. در نتیجه جریان منحرف شده به سمت میانه کانال باعث شکل‌گیری یک فصل مشترک مورب بین ناحیه مرده و ناحیه چرخشی

در هر صفحه‌ای از 4 موقعیت اندازه‌گیری، متوسط زمانی 22200 میدان لحظه‌ای سرعت محاسبه شده و بر اساس مقادیر متوسط زمانی دو مؤلفه سرعت (مؤلفه‌های طولی و عرضی)، خطوط جریان در کل محدوده اندازه‌گیری ترسیم و در شکل (4- الف) نشان داده شده است. در این شکل توزیع مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت نیز در کل محدوده مطالعاتی نشان داده شده است. با توجه به الگوی خطوط جریان، یک ناحیه جدایی در بالادست مانع و دو ناحیه جدایی و چرخشی در خلاف جهت هم در پایین دست مانع شکل گرفته است. ناحیه جدایی در بالادست مانع تحت عنوان (UR) و نواحی چرخشی اصلی و ثانویه به ترتیب تحت عنوان (DP) و (DS) نامگذاری می‌شوند. طول متوسط ناحیه چرخشی اصلی $L_m=11L$ و ناحیه چرخشی ثانویه $L_s=3L$ می‌باشد. مقایسه ساختار جریان شکل گرفته در پشت مانع در حالت اخیر (جریان کم عمق) با ساختار جریان در حالت جریان عمیق نظیر مطالعات انجام شده توسط محققانی مانند Tingsanchali & Rajaratnam & Nwachukwu (1983) Duan, Haltingen et al. (2007) Maheswaran (1990) (2009) و Duan et al. (2009) نشان می‌دهد که بر خلاف جریان عمیق، در حالت اخیر، دو ناحیه چرخشی مجزا با جهات چرخشی در خلاف هم شکل گرفته است؛ بطوری

به منظور مطالعه دقیق تر روند تغییرات جریان متوسط در طول میدان، دو نکته مهم مورد بررسی قرار گرفته و سعی می‌شود به سئوالات زیر پاسخ داده شود:

- 1- آیا پروفیل‌های سرعت در طول میدان مشابه بوده و به عبارت بهتر، پدیده خود تشابهی¹ در لایه برشی جریان‌های کم عمق محاط بر ناحیه چرخشی برقرار می‌باشد؟ تشابه و تفاوت‌های آن با جریان چرخشی پشت مانع در حالت جریان عمیق چیست؟
 - 2- روند تغییرات ضخامت لایه برشی در طول ناحیه چرخشی به چه نحوی بوده و تشابه و تفاوت‌های آن با تغییرات عرض لایه برشی موجود در جریان چرخشی پشت مانع در حالت جریان عمیق چیست؟
- در ادامه به بررسی نکات فوق پرداخته شده و مشخصات هیدرودینامیکی لایه اختلاطی محاط بر یک ناحیه چرخشی بررسی شده است.

2-4- بررسی میزان تشابه پروفیل‌های طولی سرعت در امتداد لایه اختلاطی

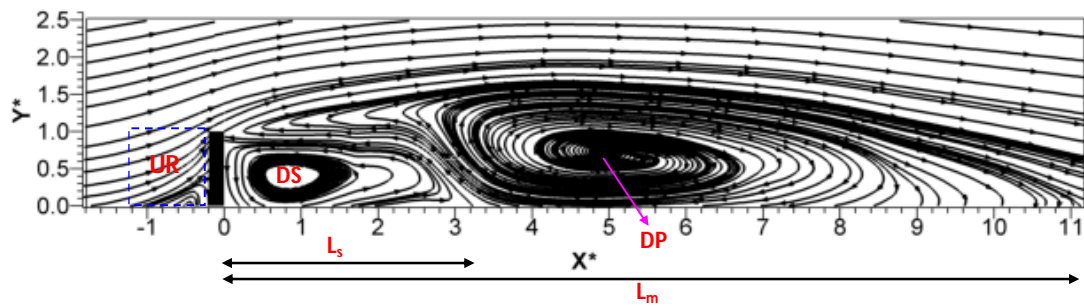
شکل 5 پروفیل‌های بی بعد شده سرعت را که مطابق شکل 2 در صفحات مختلف اندازه‌گیری شده‌اند را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تشابه پروفیل‌های سرعت در اولین صفحه پایین دست مانع برقرار می‌باشد. در این محدوده از میدان، تنها ناحیه چرخشی ثانویه وجود داشته و هنوز ناحیه چرخشی دوم شکل نگرفته است. در دو صفحه بعدی (Up_2 و $Down_2$) با توجه به این که ناحیه چرخشی اصلی نیز شکل گرفته است، به واسطه اندرکنش شدید دو ناحیه چرخشی، پدیده تشابه پروفیل‌ها در ناحیه نزدیک جداره سمت راست کانال (محدوده وقوع جریان برگشتی) مشاهده نمی‌شود. به تدریج و با حرکت به سمت پایین دست، گردابه اصلی کاملاً غالب شده و بر میزان تشابه پروفیل‌های سرعت در هر صفحه افزوده می‌شود.

اصلی می‌شود. به واسطه وجود اختلاف سرعت بین دو ناحیه، تبادل مومنتی بین دو ناحیه بصورت برشی شکل گرفته و در حقیقت ناحیه چرخشی اصلی از طریق فصل مشترک مورب، مومنتم چرخشی ناحیه ثانویه را تامین می‌کند.

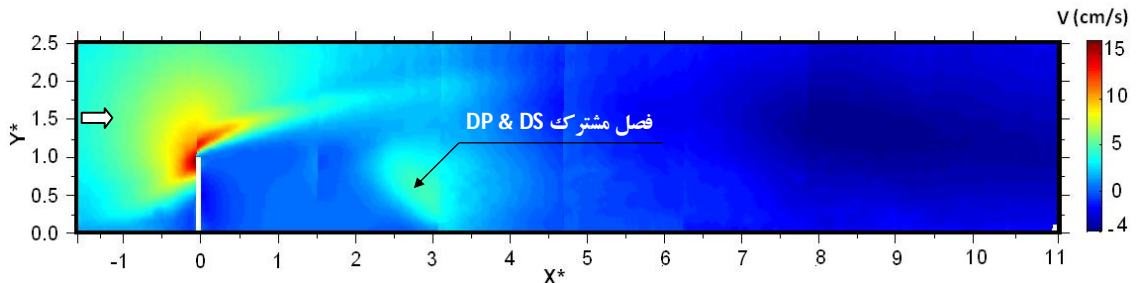
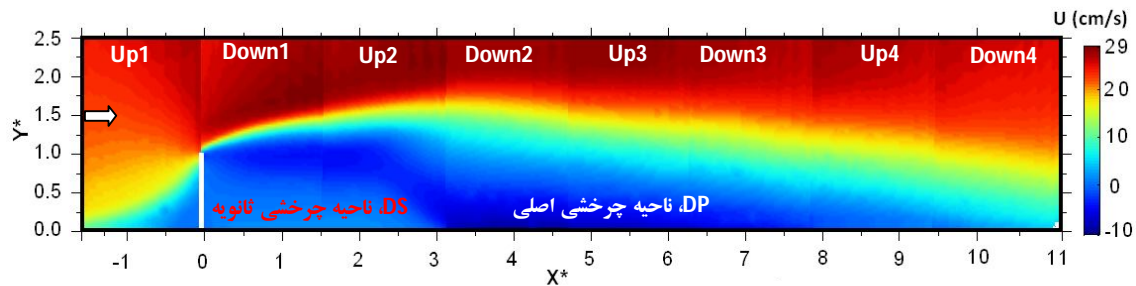
علاوه بر نقش مومنتم ناحیه مورب در شکل‌گیری جریان چرخشی ثانویه، جریان‌های چرخشی لحظه‌ای که از دماغه مانع کنده شده و به سمت پایین دست منتقل می‌شوند (شکل 3)، مومنتم‌های زاویه‌ای شدیدی را در محل فصل مشترک خود با ناحیه مرده پایین دست مانع که در حقیقت شروع لایه اختلاطی می‌باشد، اعمال می‌کنند. مومنتم خطی اعمالی از طرف ناحیه چرخشی اصلی و مومنتم زاویه‌ای اعمالی از طرف جریان‌های چرخشی لحظه‌ای در کل باعث چرخش پاد ساعت‌گرد ناحیه مرده مقابل مانع شده و در نهایت منجر به شکل‌گیری ناحیه چرخشی ثانویه می‌شوند.

با توجه به توزیع مؤلفه طولی سرعت (شکل 4- ب) شکل‌گیری لایه اختلاطی محاط بر ناحیه چرخشی و هم چنین وقوع جریان برگشتی شدید در محل تلاقی دو ناحیه چرخشی مشهود است؛ بطوری که حداکثر سرعت برگشتی معادل $-0.55U_0$ در محل تلاقی دو ناحیه ($X^*=3$) رخ داده و حداکثر تشدید مثبت سرعت در محل دماغه مانع معادل با $1.61U_0$ می‌باشد.

توزیع سرعت عرضی شکل 4- ج نشان از تشدید شدید سرعت در بالادست دماغه مانع داشته، بطوری که در این محدوده، مقدار مؤلفه عرضی سرعت معادل با سرعت متوسط جریان ورودی به سیستم (U_0) می‌باشد. ناحیه تشدید عرضی سرعت از محل دماغه تا فاصله‌ای معادل $2/5$ برابر طول مانع به سمت پایین دست ادامه دارد. نکته دیگر این که، شکل‌گیری فصل مشترک مورب بین دو ناحیه چرخشی بصورت تشدید مؤلفه عرضی سرعت در محدوده $X^*=3$ مشهود است.



الف - خطوط جریان



ب- توزیع مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت

شکل 4 میدان جریان متوسط در محدوده مطالعاتی حول مانع جانبی

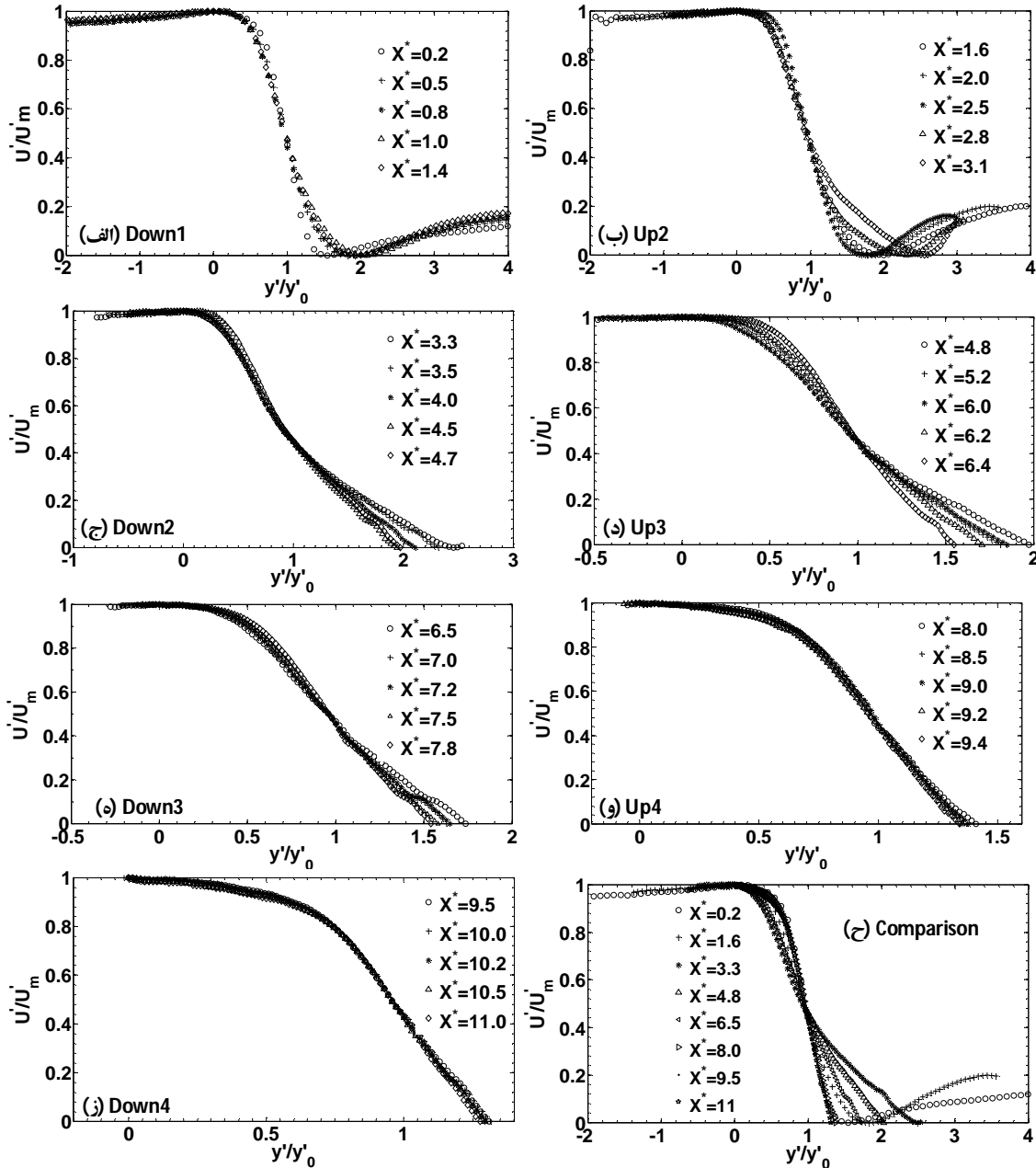
شکل‌گیری گردابه‌های بزرگ مقیاس سطحی و گسترش ابعاد آنها به سمت پایین‌دست می‌باشد که تغییرات شدیدی در عرض لایه برشی ایجاد کرده و در نتیجه، تشابه عمومی پروفیل‌های سرعت در کل طول ناحیه چرخشی را از بین می‌برد. در جریان عمیق با توجه به این که گردابه‌های آشفتگی داخل لایه برشی امکان توسعه در عمق جریان را نیز دارا هستند، تغییرات شدیدی در ابعاد افقی گردابه‌ها و در نتیجه تغییرات عرض لایه برشی ایجاد نمی‌شود که همین پدیده باعث تشابه پروفیل‌های عرضی سرعت می‌شود (Uijtewaal & Booij, 2000).

به تدریج و با حرکت به سمت پایین‌دست، گردابه اصلی کاملاً غالب شده و بر میزان تشابه پروفیل‌های سرعت در هر صفحه افزوده می‌شود. در دو صفحه انتهایی (Up4 و Down4) حالت تشابه بین پروفیل‌های سرعت کاملاً برقرار می‌باشد. در شکل 5- ح پروفیل‌های بی بعد شده سرعت در کل طول ناحیه اختلاطی با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به این شکل و همچنین شکل‌های 5- الف تا 5- ز با وجود برقراری تشابه موضعی بین پروفیل‌های سرعت در صفحات دور از محل تلاقی دو ناحیه چرخشی، تشابه چندانی بین پروفیل‌های بی بعد سرعت در کل طول میدان در حالت جریان کم عمق برقرار نیست. علت این امر

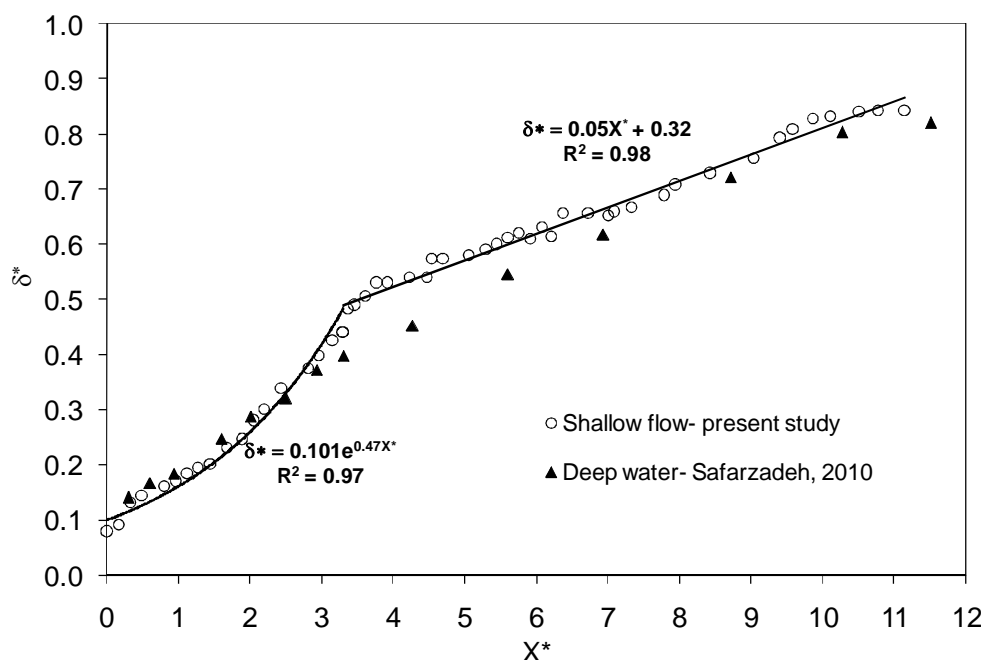
3-4- روند تغییرات ضخامت لایه اختلاطی

برای بررسی کمی روند تغییرات عرض لایه برشی در طول ناحیه چرخشی، از رابطه (4) استفاده شده و تغییرات طولی ضخامت لایه برشی در هر دو حالت جریان کم عمق و جریان عمیق محاسبه شده است.

شکل 6 توزیع طولی ضخامت لایه برشی را در دو حالت مورد نظر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای حالت جریان عمیق از داده‌های آزمایشگاهی صفرزاده (1389) استفاده شده است.



شکل 5 پروفیل‌های عرضی سرعت بی بعد شده در امتداد لایه اختلاطی محاط بر ناحیه چرخشی در جریان کم عمق



شکل 6 روند تغییرات ضخامت در طول لایه‌های اختلاطی محاط بر نواحی چرخشی در جریان‌های عمیق و کم عمق

مزبور مشاهده نمی‌شود.

علت ایجاد تغییر در روند رشد ضخامت لایه برشی در جریان کم عمق، اندرکنش دو ناحیه چرخشی می‌باشد، بطوری که موقعیت وقوع پرش در ضخامت لایه برشی و تغییر در روند رشد آن در شکل 6 کاملاً با محدوده تلاقی دو ناحیه چرخشی در شکل 4 همخوانی دارد. علت وجود دو رفتار متفاوت نمایی و خطی در روند رشد ضخامت لایه برشی، شکل‌گیری دو نوع ناحیه چرخشی در پایین‌دست آبشکن و اندرکنش آنها می‌باشد؛ بطوری که لایه اختلاطی واقع در کنار ناحیه چرخشی ثانویه توسط جریان‌های چرخشی لحظه‌ای با ابعاد کوچک اشغال شده و همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است، گردابه‌های مزبور به صورت مکانیسم جفت‌شدگی¹ و اندرکنش غیرخطی رشد می‌کنند، در حالی که با گذر از فصل مشترک دو ناحیه و در کنار ناحیه چرخشی اصلی، گردابه‌های بزرگ مقیاس سطحی شکل می‌گیرند که مکانیسم غالب توسعه آنها به صورت کشیدگی طولی بوده

در این آزمایش از یک مانع جانبی به طول 15 سانتی‌متر و عمق جریان 143 میلی‌متر برای ایجاد لایه اختلاطی محاط بر ناحیه چرخشی عمیق استفاده شده است؛ بطوری که دبی جریان ورودی 60 لیتر بر ثانیه بوده و عدد اصطکاک بستر طبق تقسیم‌بندی انجام شده توسط Babarutsi et al. (1989) (روابط (1) و (2)) بصورت $S=0.021 < 0.05$ می‌باشد و لذا جزو جریان‌های چرخشی عمیق قرار می‌گیرد. ضخامت محاسبه شده در شکل مزبور نسبت به طول مانع جانبی بی بعد شده است ($\delta^* = \delta L$).

با توجه به شکل 6، در جریان کم عمق، روند تغییرات ضخامت لایه برشی ثابت نبوده و دارای دو بخش مختلف است. در قسمت اول، ضخامت لایه برشی بصورت نمایی به سمت پایین‌دست رشد کرده و در محدوده $X^* = 3.3$ ضمن وقوع یک پرش در ضخامت لایه برشی، روند تغییرات طولی آن تغییر کرده و تا انتهای میدان می‌توان از یک رابطه خطی برای بیان رفتار آن استفاده کرد. بر خلاف جریان کم عمق، روند تغییرات عرض لایه برشی در جریان عمیق، بصورت خطی بوده و تغییر خاصی در روند

1. Vortex Pairing

دیواره کانال جابجا شده و پس از آن، مشابه خط سرعت صفر، تا انتهای ناحیه چرخشی اصلی، بصورت خطی تغییر می‌کند. ولی مقایسه این دو منحنی نشان می‌دهد که بر خلاف منحنی خط مرکزی لایه اختلاطی، منحنی سرعت صفر به شدت به سمت دیواره راست کانال منحرف شده است.

این پدیده نشانگر این نکته مهم است که در این ناحیه از لایه اختلاطی، بخش کم سرعت لایه به طور ناگهانی فشرده شده و در مقابل، بخش پر سرعت، ضمن نفوذ به داخل ناحیه چرخشی، به سمت دیواره راست کانال گسترش می‌یابد.

به عبارت دیگر، همانطور که در شکل 8 و توزیع مؤلفه طولی سرعت در محدوده فصل مشترک دو ناحیه چرخشی نیز می‌توان مشاهده نمود، این پدیده ناشی از نفوذ بخش پر سرعت لایه اختلاطی به داخل ناحیه چرخشی اصلی در پایین دست محل فصل مشترک نواحی چرخشی اصلی و ثانویه می‌باشد.

مقایسه شکل‌های 6 و 7 نشان می‌دهد که نقطه‌ای که روند توسعه ضخامت لایه اختلاطی از حالت نمایی به حالت خطی تغییر می‌کند (محدوده $X^*=3.2$ در شکل 6) منطبق بر نقطه‌ای است که در آن حداکثر مقدار نسبت ضخامت با توجه به شکل 7 رخ می‌دهد.

5- نقش عمق جریان در تغییر ساختار لایه

اختلاطی

با توجه به مطالب ذکر شده در بخش‌های قبل، علت اصلی اختلاف ساختار لایه اختلاطی در جریان کم عمق نسبت به جریان عمیق را می‌توان در سه نکته زیر جمع‌بندی کرد:

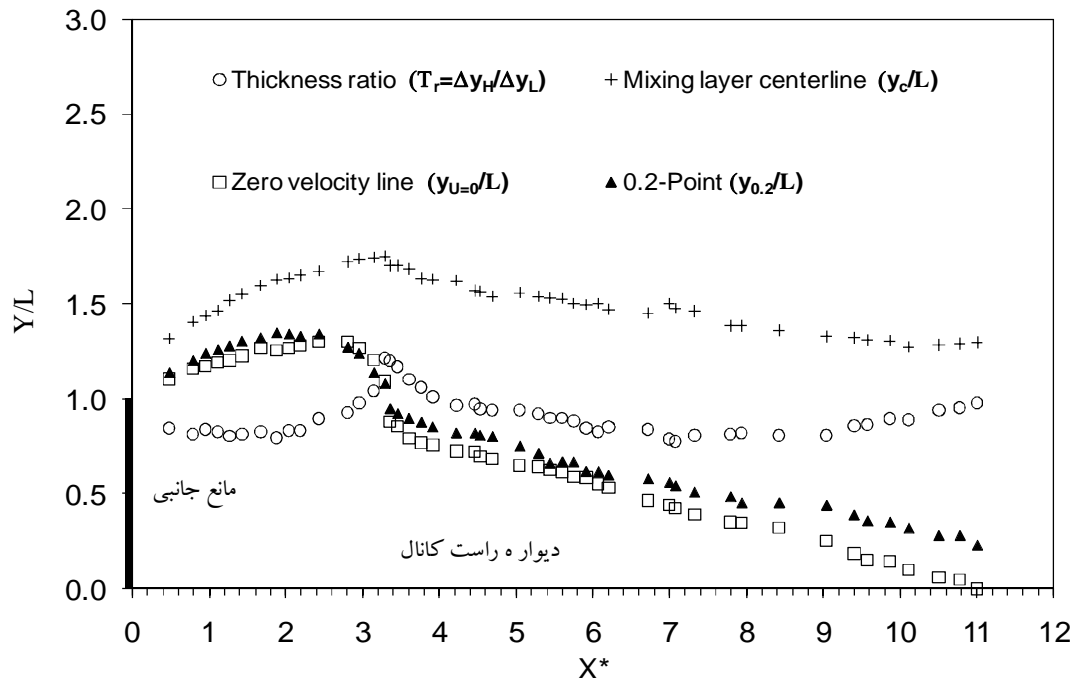
1- شکل‌گیری ناحیه چرخشی دوم و عملکرد مهم آن در محدود فصل مشترک با ناحیه چرخشی اصلی، بطوری که در جریان عمیق ناحیه مزبور شکل نمی‌گیرد.

و لذا عرض لایه برشی بصورت خطی افزایش می‌یابد. در شکل 7 نحوه تغییرات نقطه مرکزی لایه اختلاطی، خط سرعت صفر ($U=0$)، خط $y_{0.2}$ و نسبت ضخامت لایه اختلاطی در دو طرف پر سرعت (سمت میانی کانال) و کم سرعت (سمت ناحیه چرخشی) بصورت $T_r = \Delta y_H / \Delta y_L$ در طول لایه اختلاطی ترسیم و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مهم‌ترین مشخصه این منحنی‌ها، تغییر ناگهانی در روند تغییرات پارامترهای مزبور در محدوده $X^*=3.2$ می‌باشد. با توجه به منحنی تغییرات خط سرعت صفر، می‌توان مشاهده کرد که در پایین دست مانع، محل وقوع سرعت صفر ابتدا بتدریج به سمت ناحیه میانی کانال متمایل شده و تا محدوده $X^*=3.0$ رفتار غیرخطی دارد. با عبور از محدوده مزبور، خط سرعت صفر بطور ناگهانی به سمت دیواره راست کانال جابجا شده و در محدوده $X^*=3.2$ از یک نقطه عطف عبور می‌کند. در ادامه، منحنی مزبور به صورت خطی به نقطه باز اتصال مجدد¹ ناحیه چرخشی اصلی میل می‌کند.

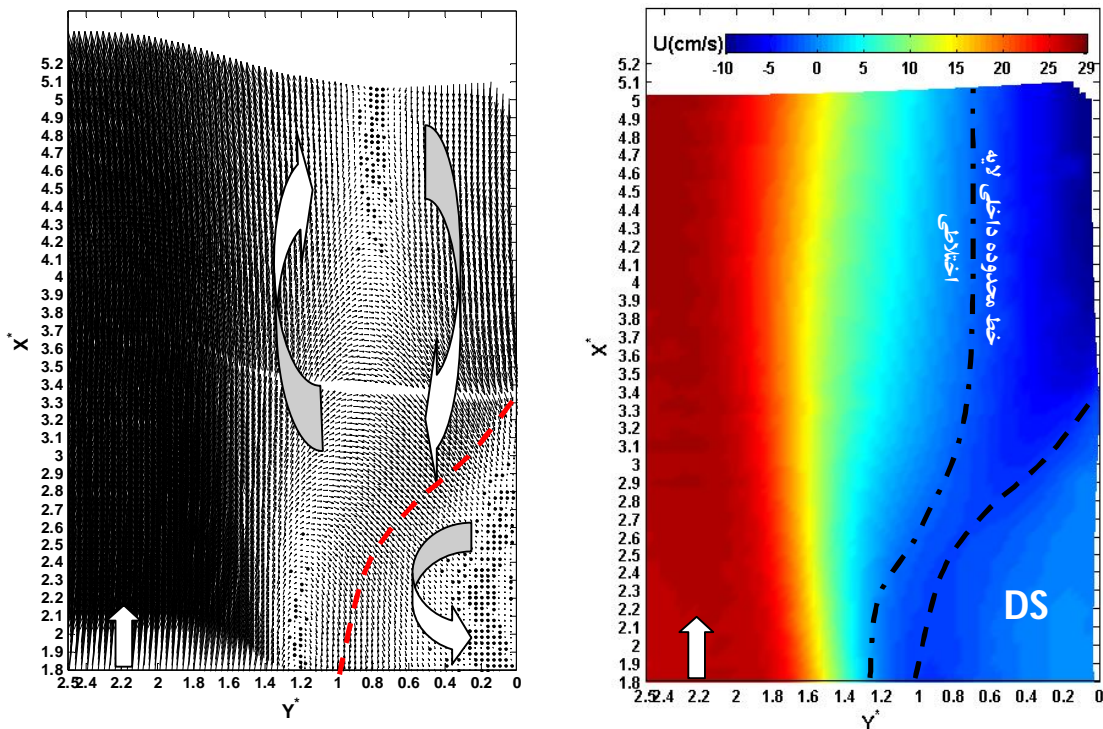
مقایسه منحنی‌ها نشان می‌دهد که منحنی $y_{0.2}$ در بخش عمده‌ای از طول لایه اختلاطی، منطبق بر خط سرعت صفر می‌باشد؛ لیکن در محدوده باز اتصال مجدد، این منحنی‌ها از هم دور شده و انطباق چندانی با هم ندارند. در مطالعات آزمایشگاهی (Castro and Haque (1988) در مورد ساختار لایه اختلاطی پشت یک صفحه که بصورت عمود بر جریان آشفته در تونل باد قرار گرفته بود، نتایج مشابهی گزارش شده، لیکن در تحقیق مزبور، عدم انطباق دو منحنی در بخش انتهایی لایه اختلاطی به واسطه عدم اندازه‌گیری دقیق این ناحیه گزارش نشده است.

منحنی تغییرات نسبت ضخامت، نشانگر وجود حداکثر محلی در موقعیت ($X^*=3.2$) می‌باشد که این محدوده منطبق بر محل وقوع نقطه عطف در منحنی تغییرات نقطه سرعت صفر در طول لایه اختلاطی است. در این محدوده، نقطه مرکزی لایه اختلاطی تا حدودی به سمت

1. Reattachment Point



شکل 7 روند تغییرات نسبت ضخامت طرفین لایه اختلاطی، خط مرکزی، خط سرعت صفر و خط $y_{0.2}$ در طول لایه اختلاطی.



ب- بردارهای سرعت در حد فاصل دو ناحیه

الف- توزیع مؤلفه طولی سرعت در محل فصل مشترک دو ناحیه

شکل 8 نفوذ بخش پر سرعت لایه اختلاطی به داخل ناحیه چرخشی (بخش کم سرعت) در محل تلاقی دو ناحیه چرخشی اصلی و ثانویه

صفرزاده، (1389) طول ناحیه چرخشی پشت مانع در جریان عمیق را 12 برابر طول مانع گزارش کرده است، در حالی که در جریان‌های کم عمق، طول ناحیه چرخشی اصلی، 11 برابر طول مانع می‌باشد. علت این اختلاف نقش ناحیه چرخشی دوم در اتلاف انرژی چرخشی ناحیه اصلی می‌باشد، بطوری که باعث می‌شود تا این ناحیه زودتر از جریان عمیق بسته شود.

2- همان طور که در بخش مقدمه ذکر شد، مهمترین مشخصه جریان‌های کم عمق، شکل‌گیری جریان‌های بزرگ مقیاس سطحی می‌باشد، بطوری که در جریان‌های عمیق گردابه‌های لحظه‌ای عمدتاً در عمق جریان گسترش پیدا می‌کنند. همین تفاوت در ساختار گردابه‌ها منجر به تغییر رفتار لایه اختلاطی در طول میدان می‌شود.

3- اصطکاک و مقاومت برشی بستر و دیواره سمت راست کانال نقش مهمی در شکل‌گیری جریان چرخشی در حالت کم عمق دارد، به نحوی که باعث اتلاف مومتم جریان برگشتی ناحیه چرخشی اصلی می‌شود. این دو عامل در لایه‌های اختلاطی کلاسیک و جریان در لایه اختلاطی محاط بر ناحیه چرخشی جریان عمیق تأثیر چندانی ندارند، به نحوی که در مورد اول، جداره‌های کانال عملاً تأثیری بر اتلاف مومتم نداشته و در صورت کم عمق بودن جریان، فقط از بستر کانال تأثیر می‌گیرند. در مورد دوم همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، مقاومت بستر به عنوان پارامتر بسیار مهم، فقط محدود به لایه‌های تحتانی بوده و شکل‌گیری لایه اختلاطی سطحی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ضمن توسعه ابزار آزمایشگاهی سرعت‌سنجی تصویری ذرات که در آن برای اولین بار از روش بادی برای پخش ذرات استفاده شده است و همچنین تهیه برنامه‌های کامپیوتری مورد نیاز برای پیش پردازش و پس پردازش تصاویر PIV، ساختار متوسط

جریان در یک لایه اختلاطی محاط بر ناحیه چرخشی در جریان کم عمق به طور دقیق و با کیفیت بالا اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها نشان از اختلاف شدید ساختار لایه اختلاطی در این حالت نسبت به لایه اختلاطی کلاسیک و همچنین لایه اختلاطی محاط بر ناحیه چرخشی در جریان عمیق دارد.

پروفیل‌های مؤلفه طولی سرعت بر خلاف لایه اختلاطی کلاسیک و همچنین لایه اختلاطی محاط بر ناحیه چرخشی در جریان عمیق، در طول لایه مشابه نبوده و پدیده خود تشابهی آنها فقط در نواحی پایین دست مانع و همچنین در انتهای ناحیه چرخشی حاکم است.

در جریان کم عمق، بر خلاف جریان پشت مانع در حالت عمیق، دو ناحیه چرخشی مجزا و در خلاف جهت هم تحت عنوان نواحی چرخشی اصلی و ثانویه شکل می‌گیرد. علت شکل‌گیری ناحیه چرخشی ثانویه در پشت مانع، ناشی از دو پدیده مهم هیدرودینامیکی می‌باشد: الف: کاهش مومتم طولی جریان برگشتی ناحیه چرخشی اصلی در امتداد دیواره کانال و شکل‌گیری ناحیه مورب بصورت فصل مشترک بین ناحیه چرخشی اصلی و ناحیه مرده پشت آبشکن که باعث اعمال مومتم خطی به ناحیه مرده و در نهایت منجر به چرخش ناحیه مزبور می‌شود. و ب: تأثیر گردابه‌های چرخشی با قدرت چرخشی بالا که از دماغه مانع جانبی کنده شده و ضمن حرکت به سمت پایین دست، مومتم زاویه‌ای به ناحیه مرده پشت آبشکن اعمال می‌کنند.

تغییرات ضخامت لایه اختلاطی در طول میدان ثابت نبوده و دارای دو ناحیه با رفتارهای متفاوت می‌باشد. از ابتدای پایین دست مانع تا فاصله‌ای به طول $3/5$ برابر طول مانع، ضخامت لایه اختلاطی بصورت نمایی افزایش یافته و با گذار از این ناحیه ضمن وقوع یک پرش ناگهانی در رفتار لایه اختلاطی، ضخامت آن بصورت خطی تا انتهای ناحیه چرخشی افزایش می‌یابد.

بررسی نحوه تغییرات عرض لایه اختلاطی در دو سمت

	حداکثر لایه اختلاطی می باشد.
δ	ضخامت لایه اختلاطی
ΔU	اختلاف سرعت بین دو نقطه در لایه اختلاطی
Δy_H	حد بالای لایه اختلاطی
Δy_L	حد پائین لایه اختلاطی
η	نسبت بی بعد y' به y_0'
ρ	جرم مخصوص سیال
τ_b	تنش برشی بستر

پر سرعت (سمت میانی کانال) و کم سرعت (سمت ناحیه چرخشی) نشان می دهد که ضخامت ناحیه کم سرعت در محل فصل مشترک دو ناحیه چرخشی به طور ناگهانی افزایش پیدا می کند. این ناحیه منطبق بر تغییر رفتار نحوه رشد ضخامت لایه اختلاطی می باشد. لذا می توان گفت اندرکنش دو ناحیه چرخشی در محل فصل مشترک آنها نقش بسیار مهمی در شکل گیری و روند تغییرات مشخصات متوسط لایه اختلاطی محاط بر ناحیه چرخشی در جریان های کم عمق دارد.

8- منابع

صفرزاده، اکبر (1389). مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان آشفته حول آبشکن با شکل های مختلف دماغه، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

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

Brevis W. (2009). Experimental investigation of the flow hydrodynamics in open channel dead zones, PhD Thesis, Universidad de Chile.

Brevis W., and Garcia-Villalba M. (2011). Shallow-flow visualization analysis by proper orthogonal decomposition, J. Hydraulic Res. 49 (5), pp. 586-594.

Castro I.P., and Haque A. (1987). The structure of a turbulent shear layer bounding a separation zone, J. Fluid. Mech., 179(2), pp. 439-468.

Duan J. (2009). Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike, J. Hydraul. Eng., 135(10), pp. 803-811.

Duan J., He L., Fu X., and Wang Q. (2009). Mean flow and turbulence around an experimental spur dike, Adv. Water Resour., 132(12), pp. 1717-1725.

G. Van der Graaf. (2004). Gpiv: An open source project for PIV. PIVNET/ERCOFTAC workshop, Lisbon, Portugal.

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

Haltingen W. T., Biron M. P. and Lapointe F. M. (2007). Predicting equilibrium scour-hole geometry near angled stream deflectors using a three-dimensional numerical flow model, J. Hydraul. Eng., 133(8), pp. 983-988.

7- فهرست علائم

c_f	ضریب اصطکاک بستر
Fr	عدد فرود جریان نزدیک شونده
H	عمق جریان
L	طول مانع جانبی
L_m	طول ناحیه چرخشی اصلی
L_s	طول ناحیه چرخشی ثانویه
Q	دبی جریان ورودی
Re	عدد رینولدز جریان نزدیک شونده
S	عدد اصطکاک بستر
S_0	شیب طولی کانال
U	مؤلفه طولی سرعت جریان در هر نقطه
U_0	سرعت متوسط جریان نزدیک شونده
U_c	مؤلفه طولی سرعت در مرکز لایه اختلاطی
U'	اختلاف سرعت در هر نقطه لایه اختلاطی با سرعت حداقل لایه در آن امتداد عرضی
U_m'	حداکثر مقدار U' در هر امتداد عرضی از لایه اختلاطی
X	مختصات طولی میدان
X^*	مختصات طولی بی بعد شده میدان
Y	مختصات عرضی میدان
Y^*	مختصات عرضی بی بعد شده میدان
y'	مختصات عرضی لایه اختلاطی از محل وقوع حداکثر سرعت
y_0'	محلی از لایه اختلاطی که سرعت آن نصف سرعت

- Uijtewaal 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 Uijtewaal 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)*.
- Westerweel J. and Scarano F. (2005). Universal outlier detection for PIV data, *Exp. Fluids*. 39(6), pp. 1096-1100.
- White B. and Nepf H. (2007). Shear instability and coherent structures in shallow flow adjacent to a porous layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 593, pp. 1-32.
- Pope S. B. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge University Press.
- Rajaratnam N., Nwachukwu B. (1983). Erosion near groyne-like structures, *J. Hydraul. Res.* 21(4), pp. 277-287.
- Rhoads B. L. and Sukhodolov A. N. (2004). Spatial and temporal structure of a shear layer turbulence at a stream confluence, *Water Resour. Res.* 40, W06304, doi: 10.1029/2003WR002811.
- Tingsanchali T. and Maheswaran S. (1990). 2-D depth averaged flow computation near groyne. *J. Hydraul. Eng.*, 116(1), pp. 71-86.
- Tukker J. (1997). *Turbulence structures in shallow free-surface mixing layers*, PhD Thesis, TU Delft.