مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف
خرداد ۱۳۸۸، شماره‌ی چهل و هشتم، ص. ۱-۶۴ (یادداشت فنی)

برآورد سرعت سیال با استفاده از نوار خطوط رنگی

مریم اخوان (دانشجوی کارشناسی ارشد)
میرمصدق جمالی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

استفاده از مواد رنگی ــ نظیر فلوئورسین[1] و نیگروسین[2] ــ که می‌توانند در آب خطوط رنگی[3] تولید کنند، یکی از روش‌های به‌دست آوردن سرعت سیال است. در این تحقیق ضمن بررسی آزمایشگاهی تأثیر یک ناهمواری بلند بر تغییرات سرعت در یک سیال دولایه، سرعت سیال در بالادست ناهمواری با استفاده از روش خطوط رنگی به دست می‌آید. سپس سرعت به‌دست آمده از این روش با یک مدل عددیِ تعمیم یافته[1] مقایسه می‌شود. این مدل عددی از حل عددی معادلات حاکم بر حرکت سیال برای بستری ناهموار و در دستگاه مختصات منحنی‌الخط[4] حاصل شده است.
توزیع سرعت و دبی لایه ها با استفاده از روش خطوط رنگی محاسبه شده و با نتایج عددی مقایسه می شوند. نتایج این مقایسه حاکی از قابلیت‌های این روش برای برآورد سرعت سیال است.

واژگان کلیدی: خطوط رنگی، سیال دولایه، برآمدگی بلند.

mar_akhavan@yahoo.com
jamali@sharif.edu

مقدمه

وجود یک برآمدگی در کف مخزن سد ممکن است بر جریان سیال دولایه تأثیر به‌سزایی داشته باشد. برخلاف هیدرولیک سیال تک‌لایه، جریان سیال دولایه از روی برآمدگی اندکی متفاوت است با چگونگی جریان آن از داخل تنگ‌شدگی. پروفیل سرعت یک سیال دولایه ممکن است به‌شدت متأثر از توپوگرافی مخزن سد باشد. مطالعه‌ی حرکت سیال در تخلیه‌ی آب از یک مخزن، با هدف دستیابی به آب با کیفیتی مشخص، در حضور یک برآمدگی در بستر حائز اهمیت است. همچنین در طبیعت مواردی یافت می‌شوند که در آن ارتفاع سیال زیرین پایین‌تر از ارتفاع تاج برآمدگی است. بررسی نحوه‌ی حرکت جریان در این حالت نیز از لحاظ زیست‌محیطی مهم است. ازجمله وجود برآمدگی در کف بعضی خورها[5] سبب محصورشدن آب شور در زیر آب شیرین و در پشت آن، به‌هنگام جزر و مد دریا می‌شود. آب شورِ محصورشده هنگامی که شدت جریان رودخانه زیاد می‌شود از روی برآمدگی عبور می‌کند. تنگه‌ی بوراد[6] واقع در بندر ونکوور نمونه‌یی از این مورد است.

در این تحقیق رفتار یک سیال دولایه، هنگام عبور از یک برآمدگی بلند با استفاده از روش خطوط رنگی بررسی می‌شود. هدف این مطالعه مقایسه‌ی نتایج این روش آزمایشگاهی با نتایج عددی و بررسی صحت این روش است.

استفاده از مواد رنگی که در آب تولید خطوط رنگی می‌کنند یکی از روش‌های ساده و دقیق در به‌دست آوردن سرعت سیال است. این روش فقط زمانی که سرعت سیال زیاد است به‌علت تغییرات شدیدی که در شکل نوار رنگی ایجاد می‌شود برای محاسبه‌ی سرعت قابل استفاده نیست. روش خطوط رنگی نخستین‌بار در سال ۱۹۵۹، برای مشاهده‌ی چگونگی حرکت سیالِ لایه‌بندی شده به‌هنگام تخلیه‌ی جریان از یک خروجی نواری[7] مورد استفاده قرار گرفت.[2] در آن آزمایش از بلور پرمنگنات پتاسیم برای تولید نوارهای رنگی استفاده شد. در سال ۱۹۷۴ نیز برای بررسی سازوکار تخلیه‌ی گزینشی[8] سیال با لایه‌بندی خطی[9]، یک خروجی نواری از دانه‌های نیگروسین مورد استفاده قرار گرفت.[3] پس از آن در سال ۱۹۷۹، سرعت سیال در تخلیه‌ی گزینشی سیال با لایه‌بندی خطی از یک خروجی نقطه‌یی[10]، با استفاده از نیگروسین و رودامین تعیین شد.[4] در سال ۱۹۹۲، سرعت سیال به‌هنگام تخلیه‌ی گزینشی و عبور از یک تنگ‌شدگی، با استفاده از بلور پرمنگنات پتاسیم به دست آمد.[5]

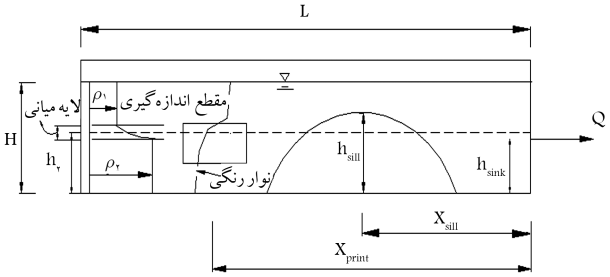
در ادامه، در سال ۱۳۸۳، یک پژوهشگر ایرانی به بررسی نظری و تجربی پدیده‌ی تخلیه‌ی گزینشی و هیدرولیک سیال دولایه در مخزنی که در بستر آن یک برآمدگی وجود داشت پرداخت.[6] او در این تحقیق برای به‌دست آوردن پروفیل سرعت جریان از روش PIV استفاده کرد. ارتفاع برآمدگی مورد استفاده در آن مطالعه کمتر از ارتفاع سیال لایه‌ی زیرین بود. مطالعه‌ی جریان سیال دولایه هنگامی که ارتفاع سیال زیرین از ارتفاع برآمدگی کمتر باشد یکی از زمینه‌هایی است که مطالعه‌ی چندانی پیرامون آن صورت نگرفته است.

یکی از اهداف مطالعه‌ی حاضر، بررسی تغییرات سرعت و امکان ردشدن سیال زیرین از روی برآمدگی است. در این تحقیق برای به‌دست آوردن سرعت از روش خطوط رنگی استفاده می‌شود. ماده‌ی رنگیِ مورد استفاده در این آزمایش پودر فلوئورسین است. در انتها نتایج حاصله با یک مدل عددی تعمیم‌یافته[1] مقایسه می‌شود. صحت نتایج این مدل عددی در تحقیقات پیشین آمده است.

تاریخ: دریافت ۱۳۸۵/۴/۲۴، داوری ۱۳۸۵/۱۱/۱۶، پذیرش ۱۳۸۶/۹/۱۹.

شرح آزمایش

در شکل ۱ تصویری شماتیک از سیال دولایه و برآمدگی موجود نشان داده شده است که در آن: h_2 ارتفاع سیال زیرین، H ارتفاع کل، L طول فلوم، Qدبی خروجی، X_{print} فاصله‌ی محل برآورد سرعت سیال از خروجی، X_{sill} فاصله‌ی مرکز برآمدگی از خروجی، h_{sink} ارتفاع خروجی از کف، h_{sill}ارتفاع برآمدگی، ρ_1 چگالی سیال بالا و ρ_2 چگالی سیال پایین است. محل برآورد سرعت سیال جایی در نظر گرفته شده که در آن از نوار رنگی برای محاسبه‌ی سرعت استفاده می‌شود. مشخصات این آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده‌ی عمران دانشگاه صنعتی شریف در داخل فلومی از جنس پلکسی‌گلاس به‌طول ۴٫۵ متر، ارتفاع ۶۰سانتی‌متر و عرض ۳۰سانتی‌متر انجام پذیرفتند. شیرهای خروجی این فلوم در ترازهای ۰، ۱۰، ۲۰، و ۳۰سانتی‌متری از کف بستر قرار داشتند و برای آزمایش در هر تراز دلخواه، فقط شیرهای خروجیِ مربوط به آن تراز باز می‌شد. برای ایجاد برآمدگی در فلوم در قسمتی از کف آن از یک قوس شیشه‌یی به‌طول ۶۸٫۵سانتی‌متر، عرض ۳۰سانتی‌متر و ارتفاع ۱۳٫۵سانتی‌متر استفاده شد. این برآمدگی در فاصله‌ی ۱۴۷سانتی‌متری از خروجی قرار داده شد. در این آزمایش‌ها ابتدا برای درست‌کردن سیال زیرین، آب نمکی با غلظت مورد نظر (چگالی سیال پایینی) در یک مخزن پلی‌اتیلنی تهیه، و سپس توسط پمپی به فلوم آزمایش منتقل شد. برای مشخص و متمایزکردن سطح تماس دو لایه از یک ماده‌ی رنگی در لایه‌ی زیرین استفاده شد که در اکثر آزمایش‌ها ردامین بود. برای درست‌کردن سیال بالایی بار دیگر آب نمکی با غلظتی مشخص (چگالی سیال بالایی) در مخزن پلی‌اتیلنی تهیه، و توسط پمپ به فلوم و بر روی لایه‌ی اول منتقل شد. برای جلوگیری از اختلاط دو لایه، لایه‌ی بالایی به‌آرامی و توسط ظرفی پهن و شناور که به عنوان یک آرام‌ساز عمل می‌کرد بر روی لایه‌ی زیرین قرار گرفت. بعد از تکمیل لایه‌ی بالایی و با توجه به هدف این تحقیق (بررسی تغییرات سرعت در یک سیال دولایه)، لایه‌ی نفوذی[11] که در سطح تماس دو لایه تشکیل شده بود به‌وسیله‌ی شیلنگی از آن خارج شد. در این مرحله علاوه بر خارج‌کردن لایه‌ی نفوذ، عمق لایه‌ی پایینی نیز در اندازه‌ی دلخواه تنظیم شد. پس از خروج لایه‌ی نفوذ از محل تماس دو لایه و به‌منظور مشخص‌کردن محل دقیق سطح تماس دو لایه، چگالی آب در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری شد. برای انجام این کار، آب از اعماق مختلف سیال و با فواصل ۰٫۵سانتی‌متری خارج شد و سپس با استفاده از چگالی‌سنج، چگالی آن‌ها به‌دست آمد. سطح تماس دو لایه در وسط ارتفاعی که در آن چگالی سیال بین چگالیِ سیال پایینی و بالایی تغییر می‌کند واقع شده است. این محل با تقریب خوبی بر محل تغییر رنگ دو لایه منطبق است. لذا در این آزمایش‌ها، سطح تماس در قسمت تغییر رنگ دو لایه در نظر گرفته شد. خارج‌کردن آب از ارتفاع‌های متفاوت سیال و با استفاده از یک شیلنگ نازک صورت گرفت. این شیلنگ به پایه‌ی متحرکی که قابلیت حرکت در جهت قائم را داشت متصل بود.



شکل ۱. شمایی از مخزنی با برآمدگی حاوی یک سیال دولایه.

جدول ۱. مشخصات آزمایش‌های انجام شده.

	ارتفاع کل (cm)	ارتفاع سیال زیرین (cm)	دبی خروجی (m^3/s)	ارتفاع خروجی (cm)	ρ_1 (kg/m^3)	ρ_2 (kg/m^3)
آزمایش ۱	۲۰٫۲۵	۱۱٫۳۵	۰٫۰۰۰۹۴	۱۰	۱۰۲۳	۱۰۲۶٫۵
آزمایش ۲	۲۰٫۸۵	۱۱٫۴۷	۰٫۰۰۰۶۲۵	۰	۱۰۲۱	۱۰۲۸
آزمایش ۳	۲۱٫۸۷	۱۰٫۳۱	۰٫۰۰۰۴۷	۱۰	۱۰۲۱٫۲۵	۱۰۲۶
آزمایش ۴	۲۱٫۷	۱۲٫۵	۰٫۰۰۰۹	۱۰	۱۰۲۰٫۳	۱۰۲۷٫۵
آزمایش ۵	۲۱٫۵۸	۱۱٫۸۴	۰٫۰۰۰۹	۲۰	۱۰۲۲٫۵	۱۰۲۷

چنان که پیشتر مطرح شد، در این آزمایش‌ها برای به‌دست آوردن سرعت از نوار رنگی استفاده شد. پیش از انجام این آزمایش مواد رنگی مختلفی مورد بررسی قرار گرفتند و از میان آن‌ها پودر فلوئورسین و بلور نیگروسین به‌عنوان دوگزینه‌ی مناسب‌تر انتخاب شدند. بلور این دو ماده‌ی رنگی وقتی به‌آرامی بر روی سطح آب قرارگیرند در حین حرکت به سمت پایین نواری رنگی تشکیل می‌دهند که تا لایه‌ی زیرین ادامه می‌یابد. با حرکت آب این خطوط در جهت جریان حرکت می‌کنند. گرفتن عکس‌های متوالی از حرکت جریان و محاسبه‌ی مقدار حرکت نقاط مختلف روی این نوار ما را در محاسبه‌ی سرعت سیال در زمان‌های مختلف یاری کرد. در انتها، برای اطمینان از صحت این روش جواب‌های آن با یک مدل عددی مناسب مقایسه می‌شود.

بعد از قرارگرفتن پودر فلوئورسین بر سطح آب، خطوطی به‌رنگ سبز شبرنگی تشکیل می‌شود. وقتی به این خطوط نور تابانده شود این خطوط می‌درخشند و به‌روشنی مسیر حرکت آب را نمایش می‌دهند. ماندگاری و پایداری این خطوط از خطوط تشکیل‌شده توسط نیگروسین بیشتر است. از این رو در بیشتر آزمایش‌ها از پودر فلوئورسین برای تشکیل خطوط رنگی استفاده شد. بعد از مشخص‌کردن محل لایه‌ی نفوذی، دانه‌های فلوئورسین در وسط فاصله‌ی دو دیواره و در بالادست برآمدگی ــ در فواصل ۵ تا ۱۰سانتی‌متر از یکدیگر ــ به‌آرامی قرار داده شدند. پس از مدت‌زمان کوتاهی، خطوط رنگی تشکیل شدند. این خطوط به‌علت جریانات موجود در فلوم ساکن از فرم قائم خارج و به‌صورت منحنی تبدیل شدند. بعضی از این خطوط نیز با گذشت زمان چندشاخه شدند که موجب بروز مشکلاتی شد. از این رو آزمایش بلافاصله بعد از گذاشتن دانه‌ها بر سطح آب آغاز شد. از سوی دیگر، گاهی خطوط تشکیل‌شده توسط این دانه‌ها فقط تا محل سطح تماس دو لایه پایین می‌آمدند که در این حالت محاسبه‌ی سرعت لایه‌ی پایینی ممکن نبود.

بلافاصله بعد از قرار دادن دانه‌های رنگی، خروجی فلوم باز شد و آب موجود در آن به‌وسیله‌ی پمپی تخلیه شد. برای عکس‌برداری از جریان از دوربین عکس‌برداری $Canon$ مدل $A95$ با قدرت ۵مگاپیکسل استفاده شد. این دوربین در فاصله‌ی حدود ۸۰سانتی‌متر از دیواره‌ی فلوم و در بالادست برآمدگی قرار داده شده بود. از حرکت جریان در قبل از برآمدگی و بر روی آن عکس گرفته شد. فاصله‌ی زمانی بین هر دو عکس متوالی در حدود ۴ تا ۶ثانیه بود. برخلاف روش اندازه گیری سرعت

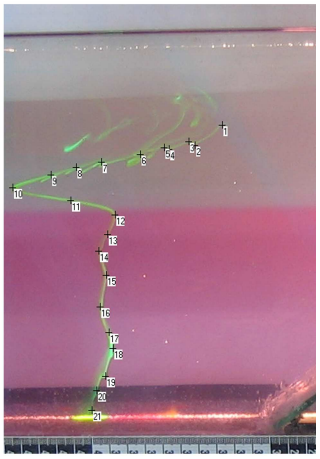
توسط تصاویر ذرات (PIV)[۱۲] ، در این روش برای عکس‌برداری نیاز به استفاده از اتاق تاریک نبود. در پایان آزمایش با استفاده از یک خط‌کش، مقیاسی تعیین شد که بعد از خروج کامل آب از فلوم در وسط فاصله‌ی دو دیواره‌ی فلوم و در محل عکس‌برداری گذاشته شد. سپس با دوربین و با همان بزرگ‌نمایی در تهیه‌ی عکس‌های قبلی، از آن عکس گرفته شد.

در این آزمایش‌ها برای به‌دست آوردن دبی از روش اندازه‌گیری وزنی استفاده شد؛ به این ترتیب که در طول آزمایش سیال خروجی از مخزن در یک فاصله‌ی زمانی مشخص، در داخل ظرفی تخلیه می‌شد که پیش‌تر وزن خالی آن اندازه‌گیری شده بود. با استفاده از تخمین چگالی سیال به‌وسیله‌ی چگالی‌سنج، اندازه‌گیری وزن سیال جمع‌آوری شده و نیز زمان مورد بررسی، میزان دبی خروجی قابل محاسبه بود.

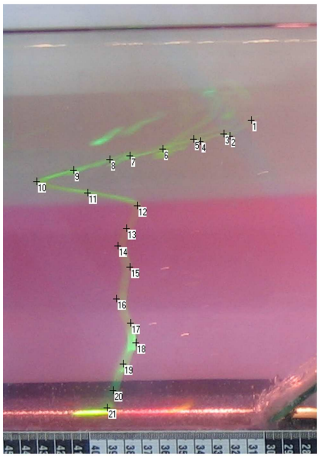
نتایج و بحث

پس از انتقال عکس‌های تهیه‌شده به رایانه، فاصله‌ی زمانی بین هر دو عکس از داده‌های تصاویر به‌دست می‌آید. اولین عکس که هم‌زمان با روشن‌کردن پمپ تهیه‌شده، در زمان صفر در نظر گرفته می‌شود. زمان عکس‌های بعدی از جمع‌کردن فاصله‌ی زمانی بین عکس‌ها به‌دست می‌آیند. در این آزمایش برای محاسبه‌ی تغییر مکان هر نقطه از خطوط رنگی از نسخه‌ی ۱٫۲ نرم‌افزار $Plot\ Digitizer$ استفاده شد. با استفاده از این برنامه، مختصات هر نقطه از عکس یا هر نمودار دلخواه با دادن مقیاس مورد نظر به آن تعیین و فایل خروجی آن با فرمت $Excel$ ضبط می‌شود. برای تهیه‌ی مقیاس، از عکسی که در پایان آزمایش پس از قرار دادن خط‌کش گرفته شده است استفاده می‌شود. برای این کار ابتدا سه نقطه روی مقیاس انتخاب، و مقادیر مؤلفه‌های x, y آن‌ها وارد می‌شود. سپس مؤلفه‌های x, y نقاط توسط برنامه روی خطوط رنگی در هر زمان محاسبه می‌شود. باید توجه داشت که تعداد نقاط مشخص‌شده روی هر خط رنگی در هر دو عکس متوالی برابر گرفته شوند، و نیز تلاش شود که مؤلفه‌ی y آن‌ها حتی‌الامکان بر هم منطبق باشند. این موضوع برای آزمایش ۱ در شکل ۲ نمایش داده شده است. سرعت سیال در هر زمان از کم کردن مقادیر مؤلفه‌ی x متناظر آن در زمان قبلی، و تقسیم نتیجه‌ی حاصله به زمان دو عکس متوالی به دست می‌آید. باید توجه شود که فاصله‌ی دو نقطه همان مسافت طی‌شده توسط یک ذره است؛ در حقیقت با این روش سرعت ذره محاسبه می‌شود که می‌توان آن را با سرعت سیال برابر فرض کرد.

مدل عددی که در این تحقیق برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، یک مدل عددی تعمیم یافته است.[۱] کاربرد مدل برای جریان غیردائمی لایه‌یی دوبعدی از مخزن است. در این مدل جریان یکنواخت[۱۳] در نظر گرفته می‌شود. لایه‌ی مرزی[۱۴] بستر در مدل مدنظر قرار می‌گیرد اما لایه‌ی مرزی سطح آزاد در نظر گرفته نمی‌شود. در مدل عددی فرض شده است مخزن دارای سیالی دولایه، تراکم‌ناپذیر و لزج است. عمق مخزن H و دبی واحد عرض q و در حالت کلی بستر مخزن ناهموار است. فرکانس طبیعی نوسانات (N) در یک سیال لایه‌یی به فرکانس $Brunt-Vaisala$ مشهور است و از رابطه‌ی $N=\left(\frac{g}{\rho_2}\frac{\rho_2-\rho_1}{H}\right)^{1/2}$ به‌دست می‌آید که در آن t زمان، (u^*, w^*) سرعت، و ρ تابع چگالی سیال است. معادلات حاکم بر مسئله عبارت‌اند از: معادلات گشتاور، پیوستگی و تراکم‌ناپذیری، که در فرم بی‌بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند. از پارامترهای H، $N^{-1}F^{-1}$ و $U=q/H$ به‌ترتیب برای بی‌بعدسازی متغیرهای طولی، زمانی و سرعت در مسئله استفاده شده است، که $F=q/NH^2$ و دبی در واحد عرض است. سرعت با رابطه‌ی



الف) t=۹ s؛



ب) t=۱۴ s.

شکل ۲. نقاط مشخص شده در دوعکس متوالی در آزمایش ۱. (جریان از سمت چپ به راست)

$(u, w)=(u^*/U, w^*/U)$، زمان براساس رابطه‌ی $\tau=t\ NF$، و مختصات بی‌بعد به‌صورت $(x, z)=(X/H, Z/H)$ تعریف می‌شوند. در فرم بی‌بعد شکل بستر توسط تابع $z=f(x)$ تعیین می‌شود. با فرض تراکم ناپذیر بودن سیال، رابطه‌ی تراکم‌ناپذیری چنین بیان می‌شود:

$$\frac{\partial\gamma}{\partial\tau}+u\frac{\partial\gamma}{\partial x}+w\frac{\partial\gamma}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

که در آن γ متغیر بی‌بعد شده‌ی چگالی و مقدار آن برابر است با: $\gamma=(\rho-\rho_2)/(\rho_2-\rho_1)$. با انجام عملیات روی معادلات گشتاور، و با استفاده از معادله‌ی پیوستگی، معادله‌ی چرخش[۱۵] به‌صورت بی‌بعد به‌دست می‌آید:

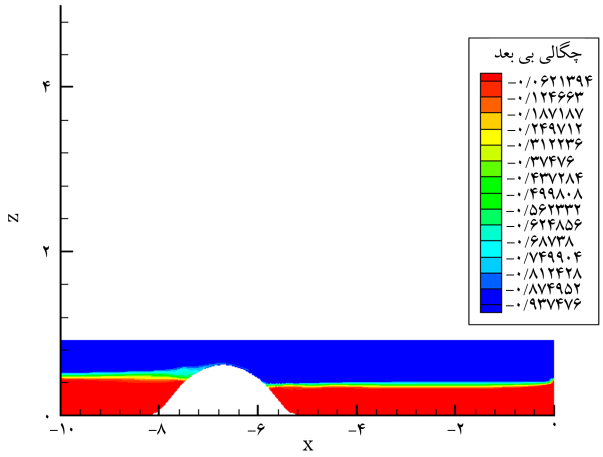
$$\frac{\partial\zeta}{\partial\tau}+u\frac{\partial\zeta}{\partial x}+w\frac{\partial\zeta}{\partial z}=F^{-2}\frac{\partial\gamma}{\partial x} \qquad (۲)$$

که در آن:

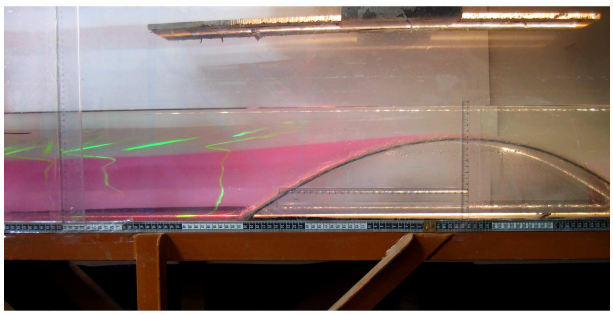
$$\zeta=\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x} \qquad (۳)$$

در استخراج رابطه‌ی ۳ از فرض بوزینسک[۱۶] استفاده شده است و با فرض $(\rho_0-\rho_s)/\rho_0<<1$ از تغییرات چگالی در عبارت اینرسی (در معادله‌ی گشتاور) صرف نظر شده است. با استفاده از تعریف تابع جریان، و نیز با استفاده از شرایط مرزی و تبدیل محیط فیزیکی به محیط محاسباتی مستطیل‌شکل رابطه‌های ۲ و ۳ به‌روش تفاضل محدود[۱۷] حل می‌شوند.[۱]

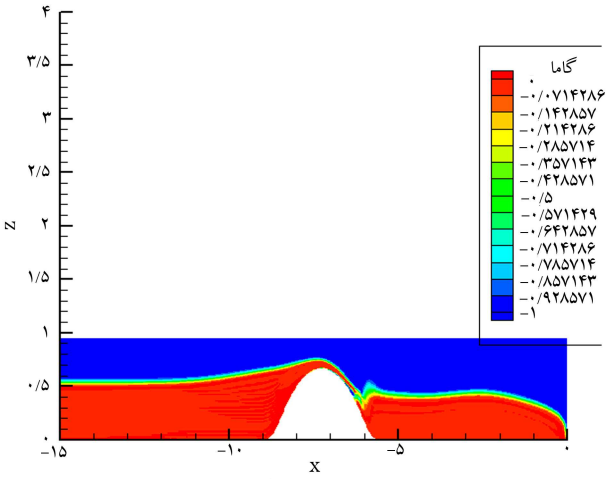
از تحلیل تصاویر برای آزمایش‌های مختلف در زمان‌های متفاوت درمی‌یابیم که در آزمایش‌های ۲ و ۳ (به‌دلیل دبی پایین جریان) و در آزمایش ۵، سیال زیرین قادر به عبور از روی برآمدگی نبوده و مدل عددی نیز این روند را پیش‌بینی می‌کند. این موضوع در شکل ۳ برای آزمایش ۳ نشان داده شده است. در شکل ۴ تصویر گرفته شده از حرکت جریان و نتیجه‌ی متناظر عددی آن در ثانیه‌ی ۲۱ برای آزمایش ۱ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود در این حالت جریان از هر دو لایه وجود دارد و مدل عددی نیز خروج جریان و سطح تماس مشابه‌یی را پیش‌بینی می‌کند. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل در فاصله‌ی ۱۹۰ سانتی‌متری از خروجی (در فاصله‌ی ۴۳ سانتی‌متری از مرکز برآمدگی) و در زمان‌های ۱۴، ۳۴، ۴۲ و ۵۲ ثانیه برای آزمایش ۱ در شکل ۵ آورده شده است. چنان که مشهود است، مدل و نتایج



شکل ۳. نتایج مدل عددی در زمان $t = 58s$ (آزمایش ۳).

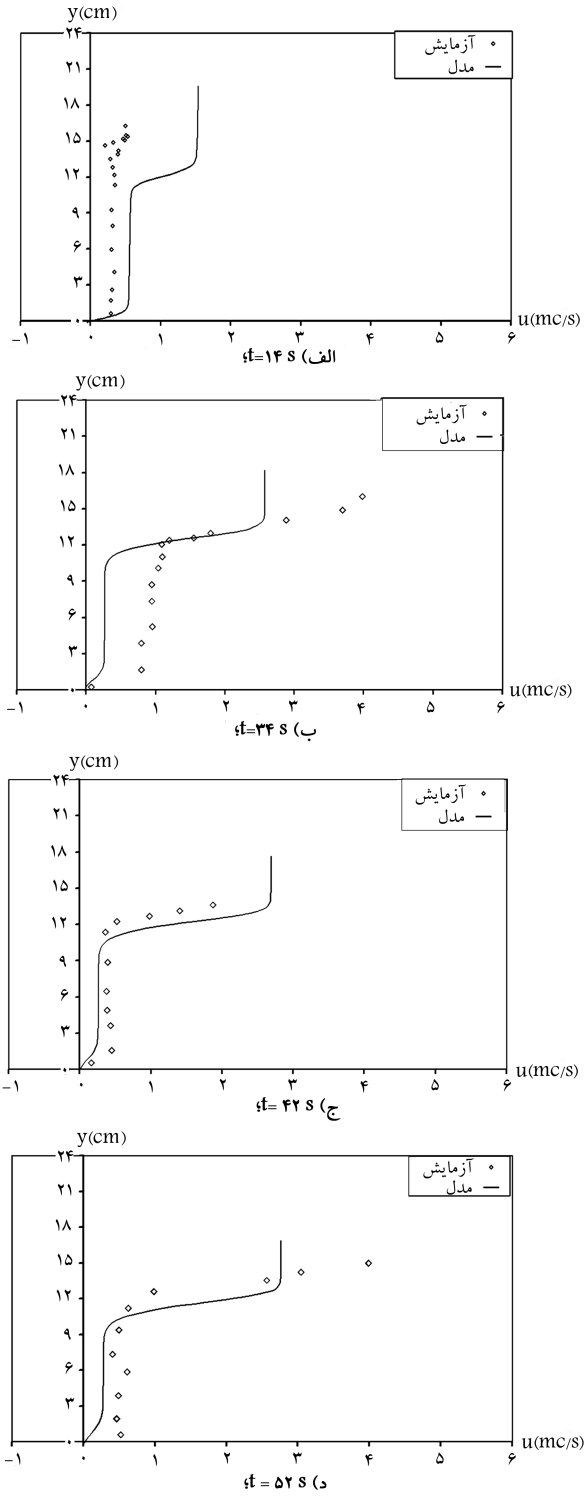


الف) تصویر گرفته شده از حرکت جریان؛



ب) نتایج مدل عددی(f=۲۱ s و آزمایش۱).

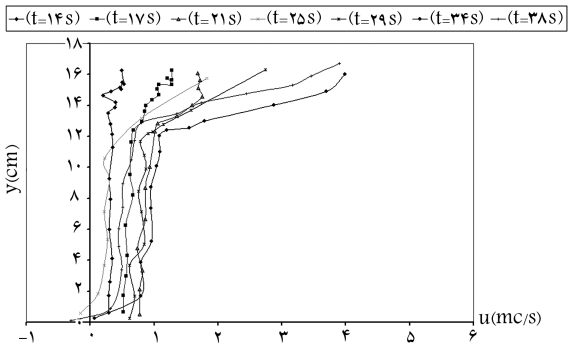
شکل ۴. نمونه‌یی از نتایج آزمایشگاهی و عددی.



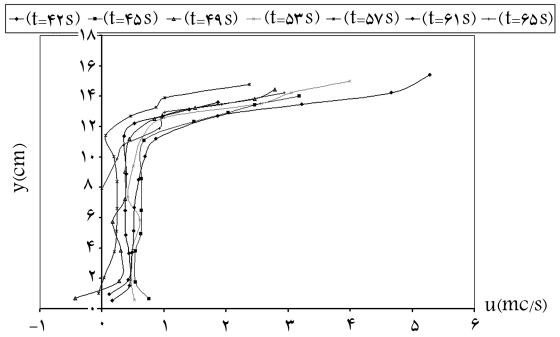
شکل ۵. مقایسه‌ی مدل و نتایج آزمایشگاهی در آزمایش ۱.

آزمایشگاهی در زمان $t = ۱۴\,s$ چندان بر هم منطبق نیستند، که علت آن جریان موج (خیزاب) سطحی در داخل فلوم است. در زمان بازکردن دریچه‌ی خروجی به‌علت به‌وجود آمدن امواج سطحی وکوتاه بودن طول فلوم، این امواج به‌صورت رفت و برگشتی ایجاد می‌شوند و به‌علت پایین بودن محدوده‌ی سرعت آزمایش‌ها ممکن است در نتایج آزمایش موثر باشند، و به‌کم و زیاد شدن سرعت جریان و دبی عبوری از یک مقطع بینجامند. لذا در آزمایش‌ها تلاش شد که شیر خروجی به‌صورت آرام و در فاصله‌ی زمانی در حدود ۱۰ تا ۲۰ثانیه بازشوند، اگرچه امواج سطحی کاملاً حذف نشدند. از ثانیه‌ی ۳۴ ($t = ۳۴\,s$) نتایج مدل و آزمایش به‌تدریج به یکدیگر نزدیک می‌شوند. به‌طوری که از ثانیه‌ی ۴۲ به بعد با تقریب خوبی برهم منطبق‌اند.

باید توجه داشت که چون در مدل عددی لایه‌ی مرزی سطح آزاد آب در نظر گرفته نمی‌شود، نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی در محل سطح آزاد آب متفاوت است. در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج سرعت حاصله از روش خطوط رنگیِ این



شکل ۶. نتایج آزمایشگاهی از $t = 14\,s$ تا $t = 38\,s$ (آزمایش ۱).

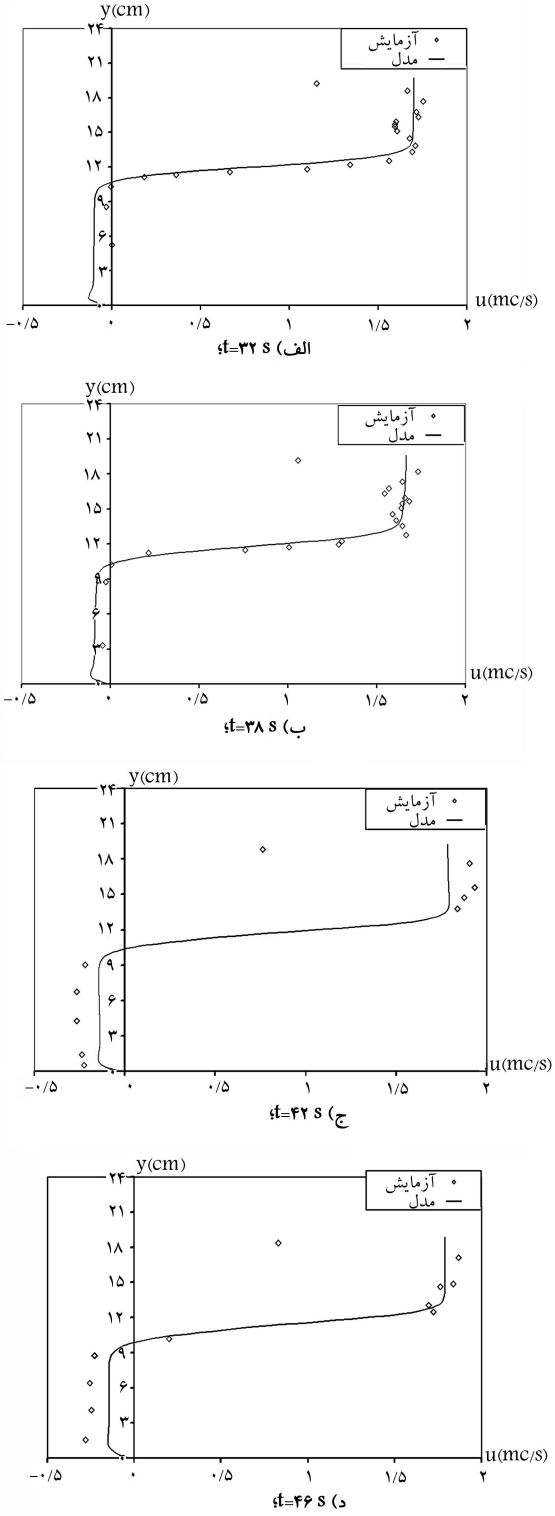


شکل ۷. نتایج آزمایشگاهی از $t = 42\,s$ تا $t = 65\,s$ (آزمایش ۱).

آزمایش در زمان‌های متوالی نشان داده شده است. همانطورکه از شکل‌ها مشخص است به‌تدریج با گذشت زمان سرعت لایه‌ی پایینی افزایش می‌یابد و لایه‌ی زیرین نیز در جریان خروجی مشارکت می‌کند. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل در آزمایش‌های ۲ تا ۵ به‌ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۱ آورده شده است. مشاهده می‌شود که روش عددی سرعت مشابهی راپیش‌بینی می‌کند. مقایسه‌ی پروفیل سرعت سیال در آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد که دبی بالاتر و اختلاف چگالی کمتر بین دو لایه در آزمایش ۱ باعث عبور لایه‌ی زیرین از روی برآمدگی می‌شود.

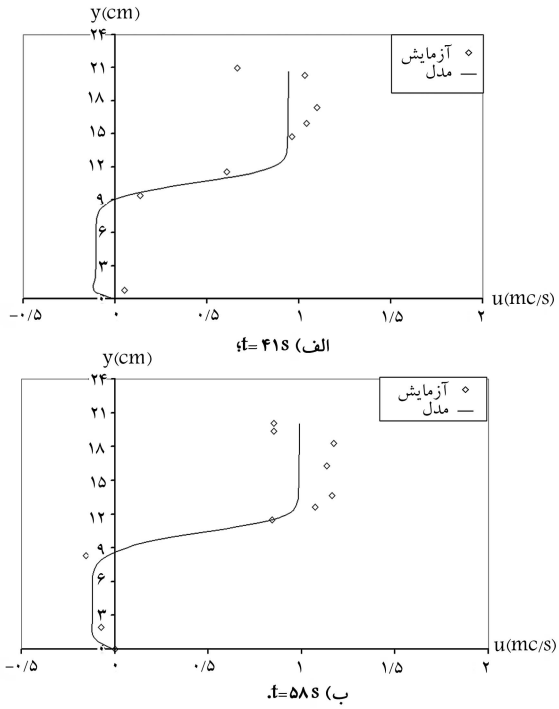
در آزمایش‌های ۲، ۳ و ۵ که در آن سیال قادر به عبور از روی برآمدگی نبود، مقدار سرعت سیال در لایه‌ی بالایی اندک و در ارتفاعات پایین (لایه‌ی زیرین) منفی بود. در این آزمایش‌ها، سیال زیرین چون قادر به عبور از روی برآمدگی نبود، مدام به سمت برآمدگی حرکت می‌کرد و دوباره به عقب برمی‌گشت که این موضوع سبب پیدایش سرعت منفی در لایه‌ی زیرین شد. در آزمایش ۴ جریان اندکی از لایه‌ی زیرین خارج شد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با این که در ارتفاعات پایین سیال زیرین، مقدار سرعت سیال ناچیز است ولی در ارتفاعات بالاتر از ۱۱سانتی‌متر که شامل لایه‌ی زیرین نیز می‌شود سرعت نسبتاً زیادی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی عبور سیال زیرین در آن ارتفاع است. در شکل ۱۲، این موضوع برای ثانیه‌ی ۴۵ نشان داده شده است.

یکی از نکات مهمی که باید در استفاده از روش خطوط رنگی مورد توجه قرار گیرد این است که در این روش توزیع سرعت سیال روی نوار رنگی به دست می‌آید و به‌علت تغییر محل نوار با گذشت زمان، پروفیل سرعتِ محاسبه‌شده تغییر می‌کند اما مدلِ سرعت را در یک مقطع محاسبه می‌کند. لذا با گذشت زمان و با حرکت نوار رنگی به سمت برآمدگی مقدار سرعت افزایش می‌یابد و درنتیجه تفاوت مقدار آزمایشگاهی با مقدار محاسبه شده توسط مدل در مقطع اولیه افزایش می‌یابد. برای

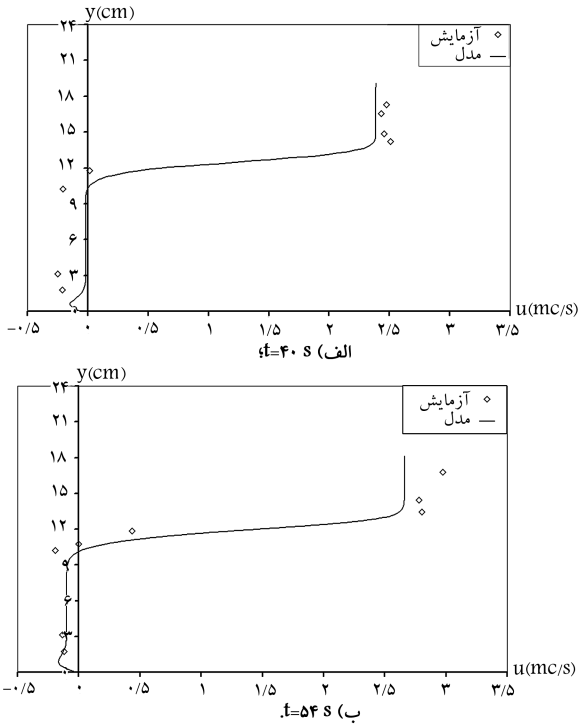


شکل ۸. مقایسه مدل و نتایج آزمایشگاهی در آزمایش ۲.

حل این مشکل و به‌دست آوردن تقریب خوبی از نتایج مدل و آزمایشگاهی، بهتر است محاسبه‌ی سرعت در فاصله دورتری از محل برآمدگی انجام شود. زیرا در فواصل دور از برآمدگی به‌علت کاهش تأثیر برآمدگی بر سرعت جریان می‌توان از تغییرات سرعت صرف‌نظر کرد. در آزمایش‌های ۴ و ۵ سرعت بدین‌گونه محاسبه شد. در آزمایش ۱ که سرعت در فاصله‌یی نسبتاً نزدیک به برآمدگی محاسبه شده

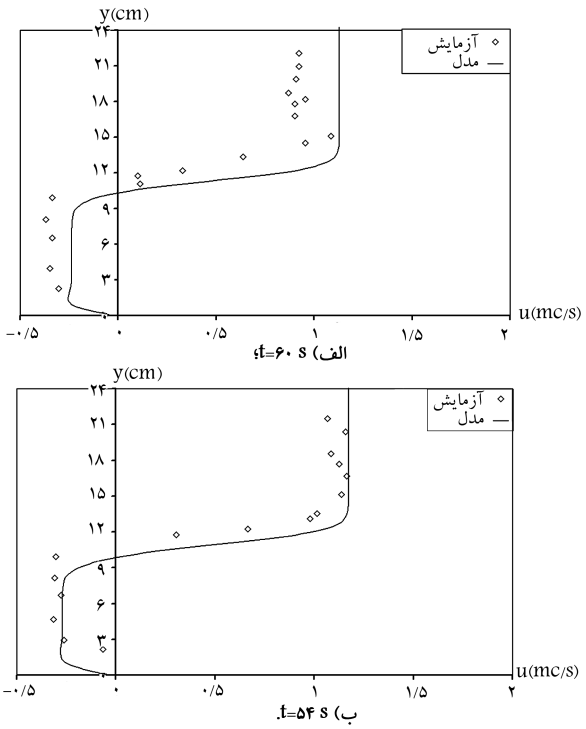


شکل ۹. مقایسه مدل و نتایج آزمایشگاهی در آزمایش ۳.

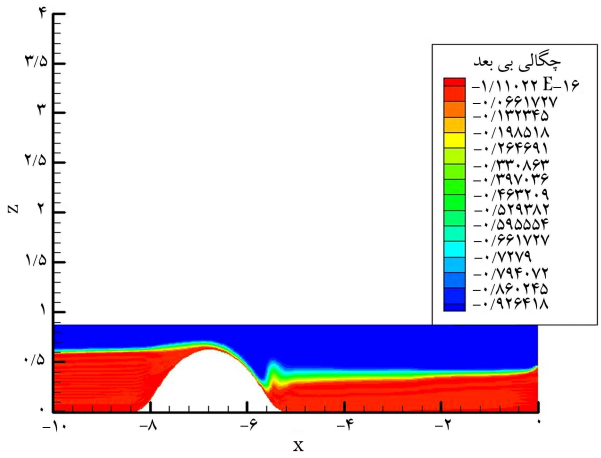


شکل ۱۰. مقایسه مدل و نتایج آزمایشگاهی در آزمایش۴.

بود برای حل این مشکل نتایج مدل هربار در مقطع جدیدی که سرعت در آن مقطع توسط نوار رنگی به دست آمده بود مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از این روش نیز خوب و قابل اعتمادند. از سوی دیگر، چون نوارهای رنگی در فواصلی در حدود ۵ تا ۱۰ سانتیمتر موجودند و برای به‌دست آوردن سرعت در هر زمان فقط از یک نوار رنگی استفاده می‌شود، می‌توان با گذشت زمان و حرکت این نوار رنگی از



شکل ۱۱. مقایسه مدل و نتایج آزمایشگاهی در آزمایش۵.



شکل ۱۲. تصویر گرفته‌شده از حرکت جریان توسط مدل عددی ($t = 45s$ و آزمایش ۴).

نوار رنگی جدیدی که در بالادست آن قرار دارد و به مقطع مورد نظر رسیده، استفاده کرد؛ در آزمایش ۲ و ۳ سرعت بدین‌گونه محاسبه شد.

مقایسه‌ی نتایج مدل و آزمایشگاهی از طریق مقایسه‌ی دبی جریان محاسبه‌شده از این دو روش، با استفاده از سطح زیر منحنی سرعت و روش وزنی نیز امکان‌پذیر است. اما توجه به این نکته ضروری است که محاسبه‌ی دبی جریان در روش خطوط رنگی نیازمند دسترسی به مقادیر سرعت در کل ارتفاع سیال و در طول نوار رنگی است. در آزمایش‌هایی که خطوط رنگی فقط در بخشی از ارتفاع سیال کشیده شده‌اند محاسبه‌ی دبی جریان امکان‌پذیر نیست. در جدول ۲ مقایسه‌ی دبی برای آزمایش‌های ۲، ۳ و ۴ که در آن خطوط رنگی در تمام ارتفاع سیال کشیده شده، نشان داده شده است. مقادیر ارائه‌شده در جدول نشان‌گر مقادیر دبی جریان در محل

جدول ۲. مقایسه‌ی دبی روش عددی و آزمایشگاهی در مکان خطوط رنگی.

روش محاسبه دبی (m^3/s)	آزمایش ۲ $t = ۳۸\ s$	آزمایش ۳ $t = ۵۸\ s$	آزمایش ۴ $t = ۵۴\ s$
خطوط رنگی	۰٫۰۰۰۳۶۸	۰٫۰۰۰۲۷۵	۰٫۰۰۰۴۶۶
مدل عددی	۰٫۰۰۰۳۶	۰٫۰۰۰۲۶۱	۰٫۰۰۰۴۷۱
روش وزنی	۰٫۰۰۰۳۳۳	۰٫۰۰۰۲۵۱	۰٫۰۰۰۵۲

خطوط رنگی است. با توجه به این که در این آزمایش‌ها طول فلوم محدود است برای محاسبه‌ی دبی در مقطع مورد تحلیل باید اثر پایین‌آمدن سطح آب لحاظ شود. از این‌رو، دبی کل اندازه‌گیری‌شده در خروجی فلوم مجموع دبی عبوری از یک مقطع به‌اضافه‌ی میزان کاهش سطح آب در پایین‌دست مقطع است، و برای محاسبه‌ی آن از رابطه‌ی ۴ استفاده شد.

$$Q_{measured-Dye\,Streak} = Q_{measured-exit}\left(\frac{L - X_{print}}{L}\right) \qquad (۴)$$

که در آن $Q_{measured-exit}$ دبی خروجی و $Q_{measured-Dye\,Streak}$ دبی جریان در محل خطوط رنگی است.

در آزمایش‌های ۱ و ۵ به‌علت عدم دسترسی به مقادیر سرعت سیال در ارتفاعات بالا توسط روش خطوط رنگی، امکان محاسبه‌ی دبی سیال از این روش وجود نداشت. عدم تطابق مقادیر دبی به‌دست آمده از روش وزنی و خطوط رنگی، به‌دلیل وجود خطا در محاسبه‌ی مدت‌زمان دقیق تخلیه‌ی سیال در داخل ظرف، و وزن دقیق سیال است.

از نکات مهمی که باید در این روش مد نظر قرارگیرد، توجه به این نکته است که به‌دست آوردن سرعت سیال در این روش فقط تا زمان‌های اولیه و تا حدود ۷۰ ثانیه‌ی نخست امکان‌پذیر است. زیرا با گذشت زمان این خطوط رنگی به‌شدت تغییر شکل می‌یابند و دیگر برای به دست آوردن سرعت سیال قابل استفاده نیستند. انتخاب خطوط رنگی مناسب برای این آزمایش به‌علت این که بعضی از این خطوط در زمان پایین رفتن از لایه‌ها چندشاخه می‌شوند و بعضی دیگر فقط تا سطح تماس دو لایه ادامه می‌یابند محدود است.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق بررسی روش خطوط رنگی به‌عنوان روشی برای به‌دست آوردن سرعت سیال دولایه از روی برآمدگی است. با استفاده از این روش و مدل عددی که صحت آن قبلاً بررسی شده بود، سرعت سیال به‌هنگام عبور از یک برآمدگی بلند به دست آمد و نتایج آن دو مقایسه شد. نتایج حاصله حاکی از آن است که از روش خطوط رنگی می‌توان به‌عنوان روشی مناسب برای اندازه‌گیری سرعت سیال استفاده کرد. این روش فقط هنگامی که سرعت سیال چندان بالا باشد که سبب ایجاد تغییرات شدید در شکل نوار رنگی شود، برای محاسبه‌ی سرعت قابل استفاده نیست. از سوی دیگر، محاسبه‌ی سرعت در این روش فقط تا زمان‌های اولیه و حدوداً تا ۷۰ثانیه‌ی نخست امکان‌پذیر است. در بخشی دیگر از این تحقیق، رفتار یک سیال دولایه به‌هنگام عبور از یک برآمدگی بلند بررسی شد.[۷] برای این کار نیز با کمک روش خطوط رنگی سرعت سیال در بالادست برآمدگی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد؛ و بدین‌ترتیب نحوه‌ی تغییرات سرعت دو لایه‌ی بالایی و پایینی سیال در مقطع مورد نظر و در زمان‌های مختلف به‌دست آمد.

پانوشت

1. fluorescent
2. nigrosine crystals
3. dye streaks
4. curvilinear
5. estuaries
6. burrard inlet
7. line sink
8. selective withdrawal
9. linear stratification
10. point sink
11. diffusion layer
12. particle image velocimetry
13. laminar
14. boundary layer
15. vorticity
16. boussinesq approximation
17. finite difference

منابع

1. Jamali, M.; Seymour, B., and Kasaiian, R."Numerical and experimental study of flow of a stratified fluid over a sill towards a sink", *j. Physics of Fluid,* **17**(1) (2005).
2. Debler, W.R."Stratified flow into a line sink",*J. Eng. Mech. Div.***85,** 51 (1959).
3. Kao, T.W.; Pao, H.S., and Wei, S.N."Dynamics of establishment of selective withdrawal of a stratified fluids from a line sink, part2-exprimental",*J. Fluid Mech.***65,** 689 (1974).
4. Lawrence, G.A., and Imberger, J."Selective withdrawal through a point sink in a continuously stratified fluid with a pycnocline", Department of civil engineering, University of Western Australia, Report NO. ED-79-002 (1979).
5. Day, J."Selective withdrawal through a contraction",Ph.D. Thesis, University of Western Australia (1992).
6. Kordi, B. "Effects of reservoir topography on two-layer flow", M.SC. Thesis, Dept. Civel Eng./ Sharif University Technology (2004).
7. Akhavan, M. "Topographic effects on stratified flows", M.Sc. Thesis, Dept. Civil Eng. Sharif University Technology (2006).