

تعیین ابعاد مجرای جریان و قدرت گرداب حلزونی در محل آبگیرهای جانبی

محمود شفاعی بجنستان^۲

سید مرتضی سیدیان^۱

(دریافت ۸۸/۱۲/۱۱ پذیرش ۸۹/۴/۷)

چکیده

در آبگیرهای جانبی بخشی از جریان کانال اصلی از بالا دست به سمت آبگیر جدا می‌شود که این بخش جدا شده را مجرای جریان می‌نامند. میزان دبی و رسوب ورودی به آبگیر و نیز طراحی صفحات مستغرق به منظور کنترل رسوب ورودی به آبگیر مستلزم تعیین ابعاد مجرای جریان است. تاکنون تحقیقات زیادی بر روی ضریب دبی جریان و یا نسبت آبگیری در آبگیرها انجام گردیده ولی توجه کمتری به الگوی جریان سه بعدی و ابعاد مجرای جریان شده است. در این مطالعه ابتدا آزمایش‌های مختلفی در یک فلوم آزمایشگاهی با آبگیر جانبی با زاویه ۹۰ درجه انجام و مؤلفه‌های سه بعدی سرعت اندازه‌گیری شد. از این داده‌ها برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی SSIM2 استفاده و این مدل برای شرایط هیدرولیکی دیگری نیز اجرا گردید تا محدوده قابل قبولی از داده‌ها حاصل شود. با تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل، ابعاد مجرای جریان برای شرایط هیدرولیکی مختلف تعیین و روابطی برای پیش‌بینی این ابعاد ارائه شد. این روابط با نتایج سایر محققان مقایسه گردید. نتایج نشان داد که عرض مجرای جریان در کف و سطح با نسبت آبگیری رابطه مستقیم دارد. همچنین قدرت جریان ثانویه تشکیل شده در ابتدای آبگیر که در انتقال بار کف به آبگیر مؤثر است، محاسبه و مشخص شد که با عدد فرود نسبت عکس و با نسبت آبگیری رابطه مستقیم دارد.

واژه‌های کلیدی: آبگیر جانبی، مجرای جریان، قدرت گردابی، مدل SSIM 2، الگوهای جریان

Determination of Stream Tube Dimensions and the Strength of Secondary Circulation at Lateral Intakes

Seyed Morteza Seyedian¹

Mahmood Shafai Bajestan²

(Received Feb. 30, 2010 Accepted June 28, 2010)

Abstract

In lateral intakes a portion of stream flow which enters the intake is divided from the upstream of the intake and is called stream tube. Past researchers have proved that the amount of flow and sediment discharge entering the intake as well as design of submerged vane to control sediment depends on determination of stream tube dimensions. In this study experimental and numerical investigation of the flow patterns at a 90° open-channel diversion is presented. In the experimental tests three components of velocity data obtained for different flow conditions. Then numerical SSIM 2 model was calibrated and verified using tests data. More flow conditions were run using SSIM 2 model to get enough hydraulic data. From analysis of these data it was found that the dividing stream tube dimensions depends upon directly to the ratio of diversion flow discharge to the main flow discharge. The strength of a secondary circulation was found to vary with inverse value of the main channel Froude number. Relations for predicting the stream tube dimensions and the strength of secondary circulations have been presented in this paper.

Keywords: Lateral Intakes, Stream Tube, Strength of Secondary Circulations, SSIM2 Model, Flow Patterns.

1- Assist. Prof. of Watershed Management, College of Agriculture, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous (Corresponding Author)
09113715023 s.m.seyedian@gmail.com
2- Prof. of Hydraulic Structures, College of Water Sciences, Shahid Chamran University, Ahwaz

۱- استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گنبد کاووس
نویسنده مسئول (۰۹۱۱۳۷۱۵۰۲۳ s.m.seyedian@gmail.com)
۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز

به دلیل انحنای خطوط جریان، بین گرادیان فشار جانبی، نیروی گریز از مرکز و نیروی برشی عدم تعادل ایجاد می‌شود که باعث تشکیل یک جریان ثانویه در جهت عقربه‌های ساعت می‌گردد. این جریان ثانویه همراه با ناحیه جدا شده در طول دیواره داخلی آبگیر (ناحیه A) منجر به یک جریان بسیار پیچیده سه بعدی می‌گردد. [۲]. همانگونه که در شکل ۱ (به ویژه مقطع ۲-۲) مشاهده می‌گردد، اندازه سطح تقسیم شده جریان^۴ در کانال اصلی، میزان دبی انتقالی به کانال انحرافی را تعیین می‌نماید. در حالت معمول، عرض مجرای جریان در سطح، کمتر از کف است. در نتیجه با توجه به اینکه غلظت رسوبات در کف بیشتر از سطح است میزان رسوب ورودی به آبگیر، بیشتر از متوسط رسوب کانال است [۳].

نیروی و ادگارد رابطه ۱ را برای بستر هیدرولیکی صاف و رابطه ۲ را برای بستر هیدرولیکی زبر ارائه کردند

$$\frac{B_s}{W_1} = 0.6 \frac{B_b}{W_1} \quad (1)$$

$$\frac{B_s}{W_1} = 0.46 \frac{B_b}{W_1} \quad (2)$$

که در این روابط

W_1 عرض کانال اصلی، B_s و B_b به ترتیب عرض مجرای جریان در سطح و کف است که در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که رابطه مستقیمی بین قدرت جریان گردابی در آبگیر با نسبت سرعت جریان در آبگیر به کانال اصلی وجود دارد [۳].

اطلاع از ساختار یا الگوی جریان در بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی به خصوص سازه‌های آبگیر بسیار ضروری است زیرا میزان دبی جریان و نیز رسوب ورودی به آبگیر تا حد زیادی به خصوصیات این الگو بستگی دارد. پیش‌بینی شرایط الگوی جریان کمک خواهد کرد تا مهندسان طراح در شرایط بار آبی یکسان، آبگیرها را با بیشترین دبی و کمترین رسوب انحرافی طراحی و یا روشهای مناسب کنترل رسوب ورودی به آبگیرها را در نظر گیرند. مطالعات انجام شده در خصوص الگوی سه بعدی جریان در آبگیرهای جانبی اندک بوده و با پیشرفت مدل‌های ریاضی و توسعه ابزار اندازه‌گیری نیاز است تا این مطالعات با دقت بیشتری انجام شود. لاکشمانا و همکاران^۱ تغییرات خطوط انحرافی جریان به سمت آبگیر (عرض مجرای جریان) را با عمق مشاهده نمودند. همچنین آنها نتیجه گرفتند عرض مجرای جریان در سطح آب نسبت به عرض کانال اصلی در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ قرار دارد [۱].

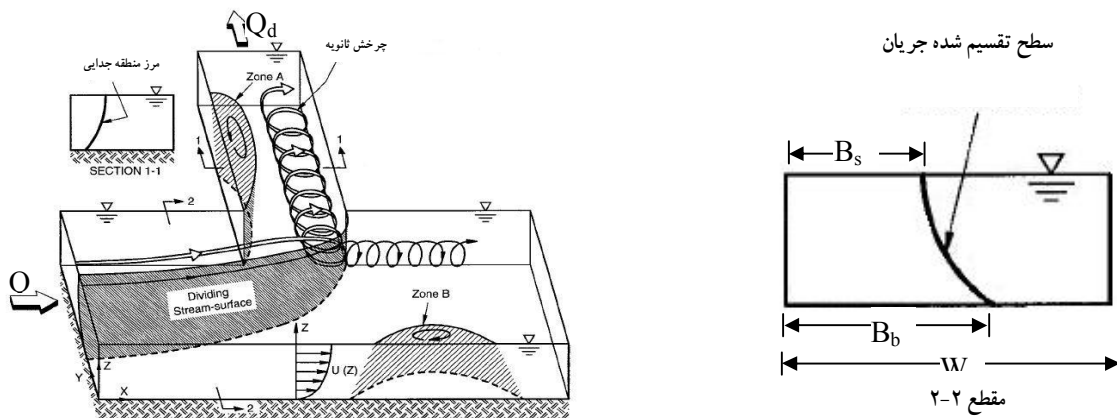
بر طبق مطالعات نیروی^۲ و ادگارد^۳ بر روی آبگیر جانبی ۹۰ درجه در یک کانال مستقیم، الگوی جریان سه بعدی در آبگیر جانبی همانند شکل ۱ به دست آمده است. وقتی جریان به آبگیر نزدیک می‌شود، فشار مکشی انتهایی کانال آبگیر باعث به وجود آمدن شتاب جانبی در جریان می‌گردد. به دلیل این شتاب جانبی، قسمتی از جریان جدا شده و وارد آبگیر می‌شود (مجرای جریان) می‌شود و مابقی جریان به سمت پایین دست کانال اصلی ادامه مسیر می‌دهد.

⁴ Dividing Stream-surface (DSS)

¹ Lakshmana et al.

² Nearg

³ Odgaard



شکل ۱- الگوی جریان سه بعدی در آبگیر جانبی [۳]

عرض رسوبگذاری در دهانه آبرگیر خواهد شد. همچنین میزان تأثیر آستانه در انحرافهای بالا نسبت به انحرافهای پایین مؤثرتر است [۱۰].

ادگار نیز برای طراحی صفحات مستغرق به منظور کنترل رسوب رابطه‌ی زیر را بین نسبت عرض مجرای جریان در سطح به عرض کانال اصلی با نسبت دبی انحرافی ارائه داده است [۱۱]

$$\frac{B_s}{W_1} = \frac{Q_d}{Q} \quad (5)$$

که در این رابطه

Q_d و Q به ترتیب دبی در کانال آبرگیر و کانال اصلی و نسبت $\frac{Q_d}{Q}$ یا Q_r ، نسبت آبرگیری است.

نیروی و همکاران یک مدل سه بعدی با استفاده از معادلات رانز^۷ ارائه نمودند. مقایسه پروفیل سرعت با مدل آزمایشگاهی نشان داد که مدل دارای دقت بالایی است [۲]. رامامورتی و همکاران با ارائه مدل سه بعدی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند تطابق خوبی بین پروفیل‌های سرعت، ناحیه جداشدگی، عمق آب و جریان ثانویه برقرار است. سپس با استفاده از مدل سه بعدی، گردابه حلزونی تشکیل شده در کانال آبرگیر را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت آبرگیری، قدرت گردابه افزایش یافته و به سمت پایین دست آبرگیر قدرت گردابه کاهش می‌یابد [۱۲].

علی رغم مطالعات زیاد بر روی الگوی جریان در آبرگیرها، اکثر مدل‌های ریاضی ارائه شده به منظور بررسی ناحیه جداشدگی و پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف آبرگیر و کانال اصلی صورت گرفته و تحقیقات کمی با استفاده از مدل ریاضی بر روی ابعاد مجرای جریان در کانال اصلی و قدرت گرداب حلزونی در کانال آبرگیر انجام شده است. در این تحقیق ابتدا با به کار بردن سرعت‌های برداشت شده در آزمایشگاه، مدل سه بعدی SSIM 2^۸ و اسنجی و صحت‌سنجی شد. سپس با اجرای مدل برای شرایط هیدرولیکی مختلف، داده‌های بیشتری به دست آمد و با استفاده از آنها ابعاد مجرای جریان و قدرت گرداب حلزونی درون کانال آبرگیر مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

برای رسیدن به اهداف این تحقیق آزمایش‌هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. تجهیزات

⁷ RANS

⁸ Sediment Simulation in Intake with Multiblock option (SSIM2)

رادکیوی^۱ نیز با استفاده از نتایج مطالعات خود روابط ۳ و ۴ را برای عرض مجرای جریان ارائه نموده است [۴]

$$\frac{B_s}{W_2} = a_s \frac{q_d}{q} \quad 0.73 \leq a_s \leq 0.89 \quad (3)$$

$$(4)$$

$$\frac{B_b}{W_2} = a_b + b_b \frac{q_d}{q} \quad 0.37 \leq a_b \leq 0.45 \quad \text{و} \quad 1.08 \leq b_b \leq 1.25$$

که در این روابط q_d و q به ترتیب دبی در واحد عرض کانال آبرگیر و کانال اصلی و W_2 عرض کانال آبرگیر است.

هگر^۲ با یک حل تحلیلی ضریبی از عرض مؤثر (μ) را در ناحیه جداشدگی به دست آورد و رابطه‌ای بین ضریب افت هد با μ و Q ارائه نمود. بر طبق نظر او شرایط بحرانی در بیشینه عرض مقطع انقباض اتفاق می‌افتد و این فرضیات احتیاج به آزمایش‌های بیشتری دارد. همچنین فرض انتقال مومنتم از شاخه فرعی به شاخه اصلی نیاز به دانستن متوسط زاویه جریان در مقاطع عبوری در داخل کانال فرعی دارد [۵]. رامامورتی^۳ و ساتیش^۴ برای جریان در کانال‌های شاخه‌ای و فرعی، معادلات مومنتم جدایی را دنبال کردند. آنها جریان بحرانی در شاخه پایین دست را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که سهم مومنتم کانال فرعی با افزایش نسبت دبی فرعی، افزایش می‌یابد [۶]. اینگل^۵ و ماهانکال^۶ به این مسئله اشاره کردند که پیش‌بینی رامامورتی و ساتیش نمی‌تواند در همه جریان‌های انحرافی برای اعداد فرود کوچک و ضریب انقباض حداکثر در عرض مورد استفاده قرار گیرد [۷].

مطالعه انجام شده توسط نظری و شفافی بجزستان نیز نشان داد که الگوی جریان حلزونی در گوشه دیواره پایین دست کانال آبرگیر نزدیک کف به وجود می‌آید که باعث انتقال شدید ذرات بار کف به درون آبرگیر می‌شود [۸]. منتصری و همکاران با استفاده از الگوی جریان جلوی آبرگیر نشان دادند در یک قوس ۱۸۰ درجه عرض مجرای جریان جلوی آبرگیر که در لایه‌های بالایی بیشتر از لایه‌های پایینی جریان است، در نزدیک سطح، مقداری کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر قدرت جریان ثانویه در مقطع ۴۵ درجه از قوس قرار دارد و یک حداکثر نسبی نیز در مقطع ۱۳۰ درجه وجود دارد [۹]. نتایج تحقیقات عباسی و همکاران بر آبرگیر در مسیر مستقیم رودخانه نشان داد که حضور آستانه باعث کاهش عرض گردابه در ابتدای آبرگیر گردیده و در نتیجه باعث کاهش ورود رسوبات و

¹ Raudkivi

² Hager

³ Ramamurthy

⁴ Satish

⁵ Ingle

⁶ Mahankal

گردید. سپس دو دریچه به گونه‌ای بالا آورده شد که عمق مورد نظر در بالادست تأمین و نسبت آبیگری برابر با حالت آزاد گردید. محدوده متغیرها در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترها

محدوده تغییرات	پارامترهای آزمایش
۱۰،۲۰ و ۲۵	D: عمق (cm)
۵-۴۳/۸	Q: دبی کانال اصلی (l/s)
۱/۱-۳/۴۸	Qd: دبی آبیگری (l/s)
۰/۰۷-۰/۲۲	Qr: نسبت آبیگری
۰/۲-۰/۴۵	Ft: عدد فرود

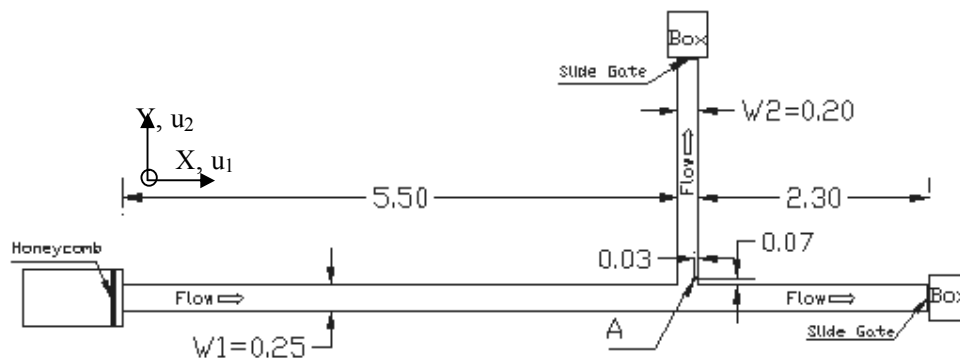
۲-۲- مدل 2 SSIIM

با توجه به اینکه برداشت داده‌های آزمایشگاهی بسیار وقت گیر و مشکل بود، برای رسیدن به تعداد داده‌های مطلوب، از مدل سه بعدی 2 SSIIM برای تأمین بخشی از داده‌ها استفاده گردید. این مدل در سالهای ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۱ نوشته شده و در دانشگاه نروژ توسعه داده شد. SSIIM مختصر شده جمله "شبه‌سازی رسوب در آبیگریها همراه با گزینه چند بلوکی" است. این برنامه برای مهندسی رسوب، هیدرولیک، محیط زیست و رودخانه نوشته شده است. در ابتدا این برنامه برای شبیه‌سازی انتقال رسوب در کانال و رودخانه نوشته شد، سپس استفاده از این برنامه برای موضوعات مهندسی هیدرولیک دیگر مانند مدلسازی سرریز، افت هد در تونل‌ها، رابطه دبی-اشل در رودخانه‌ها، جریانات غلیظ و غیره توسعه داده شد. مدل SSIIM دارای چند نسخه است. در سال ۲۰۰۱ نسخه تحت ویندوز SSIIM توسط زیربرنامه‌های DLL نوشته شد که حاوی الگوریتم‌هایی برای انتقال رسوب و مقاومت جریان در برابر گیاهان بود. تفاوت عمده نسخه ۲ با نسخه‌های دیگر قابلیت شبیه‌سازی ژئومتری‌های پیچیده است.

آزمایشگاهی شامل فلوم اصلی به طول ۸ متر و به عرض ۲۵ سانتی‌متر و کانال آبیگری به طول ۲/۲۵ متر و عرض ۲۰ سانتی‌متر بود که با زاویه ۹۰ درجه به کانال اصلی متصل شده بود. ارتفاع مفید کانال اصلی و آبیگری ۷۰ سانتی‌متر بود. در ابتدای کانال اصلی یک مخزن آرام کننده نصب گردید. در انتهای کانال اصلی و آبیگری، دریچه کشویی به منظور تنظیم سطح آب قرار داده شد. سیستم گردش آب به صورت مدار بسته بود و آب از طریق مخزن زیرزمینی تأمین می‌گردید. در کانال اصلی و فرعی، جریان وارد یک جعبه‌ی آرام کننده شده و دبی به ترتیب توسط سرریز ۵۶ درجه با قاعده ۵۹ و ارتفاع ۵۵ سانتی‌متر و سرریز ۹۰ درجه اندازه‌گیری گردید. شکل ۲ جانمایی تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در عمق ۲۵ سانتی‌متر انجام شده و در طول هر آزمایش از یک سرعت‌سنج ADV مدل نورتک^۱ برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه بعدی سرعت استفاده گردید. صحت کارایی سرعت‌سنج توسط نرم افزار همراه آن مورد بررسی قرار گرفت. مؤلفه‌های سرعت در سه سطح: نزدیک کف (حدود ۱ سانتی‌متر)، ۹ و ۱۸ سانتی‌متری از عمق جریان در یک شبکه ۲cm×۲cm در بازه ۷۰ سانتی‌متر در بالادست، ۲۰ سانتی‌متر در پایین دست و ۲۰ سانتی‌متر درون کانال آبیگری برداشت گردید. سرعت در هر نقطه از شبکه با فرکانس ۶۵ هرتز در مدت زمان ۴۵ ثانیه برای کانال اصلی و یک دقیقه برای ورودی کانال فرعی برداشت گردید. به دلیل تلاطم بیشتر جریان و نوسانات سرعت، مدت زمان برداشت سرعت در محدوده ورودی کانال فرعی افزایش یافت.

آزمایش‌ها به این صورت انجام گرفت که ابتدا در هر عمق، دبی برای اعداد فرود در محدوده بین ۰/۲ تا ۰/۴۵ تعیین گردید و هنگامی که دریچه‌های کانال اصلی و فرعی پایین بود، دبی مورد نظر در کانال جریان یافت. پس از ماندگار شدن جریان با استفاده از سرریزهای انتهای کانال اصلی و فرعی، نسبت آبیگری محاسبه

^۱ Nortek



شکل ۲- پلان تجهیزات آزمایشگاهی در این مطالعه

که در این دو رابطه مقادیر ضرایب ثابت برابر با $c_{\mu}=0.09$ ، $C_{\varepsilon 1}=1/44$ ، $C_{\varepsilon 2}=1/92$ ، $\sigma_k=1/0$ و $\sigma_{\varepsilon}=1/3$ می باشد. برای مرزهای زبر از قانون دیوار که توسط اشلیختینگ^۱ ارائه شده است، استفاده می شود

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right) \quad (12)$$

که در این رابطه

U سرعت در جهت جریان، u_* سرعت برشی، κ ضریب فان کارمن، y فاصله مرکز سلول از دیواره و k_s اندازه زبری بستر است. در این مطالعه برای سرعتها در جریان ورودی، شرایط مرزی دیریکله^۲ که معمولاً استفاده از آن برای مدل تلاطمی مشکل است، مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین لزجت گردابی در مقطع ورودی معمولاً از یک مدل تلاطمی ساده استفاده می شود. برای تمامی پارامترها در مرزهای خروجی شرایط مرزی گردایان صفر در نظر گرفته شد.

به دلیل جریان کاملاً سه بعدی و پیچیده در آبگیرها ابتدا باید مدل برای شرایط مطابق با شرایط آزمایشگاهی و انسجی گردد. در این تحقیق با توجه به اهداف مطالعه از ابعاد مجرای جریان برای و انسجی استفاده شد. به این ترتیب که با تغییر دادن ضرایب و پارامترهایی مانند روش منفصل سازی، ضرایب انعطاف پذیری، گام زمانی، مدل تلاطمی مورد استفاده و غیره، مقادیر عرض مجرای جریان در مدل ریاضی تعیین و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. وجود تطابق قابل قبول بین آنها نشان داد که پروفیل های سرعت در جهت جریان کانال اصلی (U_1) و فرعی (U_2) بین مدل ریاضی و آزمایشگاهی همپوشانی مناسبی دارند. همچنین مش بندی منطقه مورد مطالعه بسیار حائز اهمیت است زیرا سرعت در همگرا شدن معادلات و دقت نتایج با توجه به فیزیک مسئله تحت تأثیر این موضوع است

همانگونه که ذکر گردید اطلاعات سرعت در ۶ آزمایش به منظور و انسجی و صحت سنجی مدل برداشت گردید. با استفاده از داده های برداشت شده خطوط جریان ترسیم گردید و عرض مجرای جریان در سه سطح تعیین شد. شکل ۳ نمونه ای از خطوط جریان رسم شده حاصل از نتایج مدل به ترتیب برای کف و اعماق ۹، ۱۸ و ۲۵ سانتی متر است که به ترتیب با B_9 ، B_{18} ، B_s برای عدد فرود ۲۵ و نسبت آبیگری ۰/۱۶ برای جریان با عمق ۲۵ سانتی متر نشان داده شده است. با توجه به داده های آزمایشگاهی از عرض مجرای جریان در کف و اعماق ۹ و ۱۸ سانتی متر برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی استفاده گردید.

¹ Schlichting
² Drihlet

این مدل سه بعدی به صورت رایگان در اختیار می باشد. این مدل معادلات ناویر-استوکس را با استفاده از روش حجم کنترل با الگوریتم SIMPLE و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ (به صورت پیش فرض) حل می نماید.

در یک هندسه سه بعدی معادلات ناویر-استوکس برای محاسبه سرعت جریان حل می شوند. معادله ناویر-استوکس برای سیال تراکم ناپذیر به صورت زیر است

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-P\delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (6)$$

که در این رابطه

U سرعت جریان، P فشار و δ_{ij} دلتای کرونکر است که در صورتی که $i = j$ مقدار آن ۱ و در صورتی که $i \neq j$ باشد مقدار آن صفر است. همچنین ترم اول سمت چپ شتاب محلی و ترم دوم شتاب جابجایی است. ترم اول و دوم در سمت راست معادله به ترتیب ترم فشار و تنش رینولدزی است. برای محاسبه تنش رینولدزی ابتدا با استفاده از تقریب بوزینسک رابطه ۷ ایجاد می گردد

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_T \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (7)$$

که در این رابطه

ν_T لزجت گردابی است و به نوسانات سرعت جریان بستگی دارد و k انرژی جنبشی اغتشاش است. لزجت گردابی در مدل SSIIM 2 به صورت پیش فرض توسط مدل $k-\varepsilon$ محاسبه می گردد. در این مدل لزجت گردابی توسط رابطه ۸ محاسبه می شود

$$\nu_T = c_{\mu} \frac{k}{\varepsilon} \quad (8)$$

k و ε توسط روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می شوند

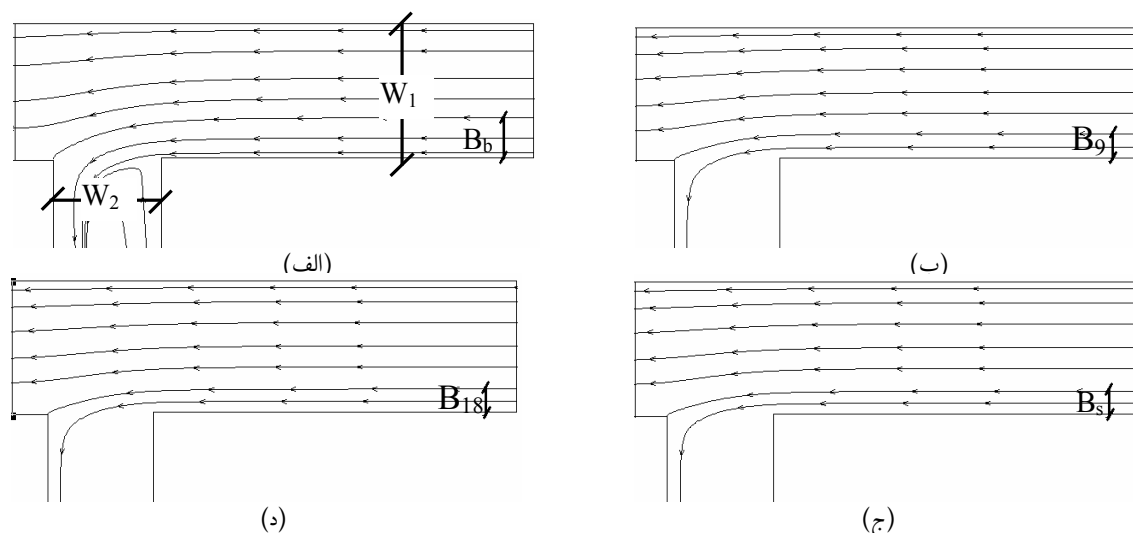
$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (9)$$

(۱۰)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

که در این روابط P_k از رابطه ۱۱ به دست می آید

$$P_k = \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$



شکل ۳- عرض سطح جدا شده جریان در الف) نزدیک کف، ب) عمق ۹ سانتی متر، ج) عمق ۱۸ سانتی متر و د) عمق ۲۵ سانتی متر

نتایج بیانگر توانایی قابل قبول مدل 2 SSIIM در شبیه سازی شرایط جریان آبگیر است. به منظور اطمینان، مؤلفه های سرعت U_1 و U_2 بین سرعت های برداشت شده و سرعت های مدل مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه پروفیل های سرعت در شکل های ۴ و ۵ آورده شده است. محل اتصال دیواره بالادست کانال آبگیر به کانال اصلی مبدأ مختصات است که در شکل ۲ با O نمایش داده شده است. U_1^* و U_2^* مؤلفه های سرعت در کانال اصلی و کانال فرعی هستند که با استفاده از سرعت بحرانی دبی بالادست جریان

بحرانی است، بی بعد شده اند. محل برداشت سرعتها در عمق (D^*) با استفاده از عمق جریان 0.25 متر بی بعد شده است.

در این مطالعه ابعاد مشها $1/25 \times 1/25$ سانتی متر و در جهت قائم خطوط شبکه در ۱۰ درصد، ۲۰ درصد، تا ۹۰ درصد عمق جریان انتخاب شدند و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG مورد استفاده قرار گرفت. در شبکه سه بعدی، محاسبات برای تعداد 132480 سلول صورت گرفت. گام زمانی یک ثانیه برای اجرای مدل در نظر گرفته شد و محاسبات تا کاهش مقدار خطای مدل به مقدار کافی ادامه پیدا نمود.

در جدول ۳ عرض مجرای جریان پس از تعیین بهترین ضرایب و پارامترهای مدل در کف و اعماق ۹ و ۱۸ سانتی متر برای مدل فیزیکی و 2 SSIIM به ترتیب با (O) و (S) نشان داده شده است. با استفاده از ضرایب و پارامترهای واسنجی شده، مدل برای ۱۲ سری داده که شش سری با عمق ۱۰ سانتی متر و شش سری با عمق

از ۱۸ عرض مجرای جریان به صورت تصادفی تعداد ۱۳ عدد به منظور واسنجی و تعداد ۵ عدد به منظور صحت سنجی انتخاب گردید. پارامترهای ذکر شده در مدل به نحوی تغییر داده شد که میزان اختلاف ۱۳ عرض مجرای جریان بین مدل ریاضی و آزمایشگاهی حداقل گردد. در مرحله صحت سنجی میزان اختلاف بین ۵ عرض مجرای جریان باقیمانده و مدل ریاضی مقایسه گردید. به منظور ارزیابی نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی از ضریب همبستگی و تابع خطای $RMSE^1$ استفاده گردید

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i - B_i)^2}{n}} \quad (13)$$

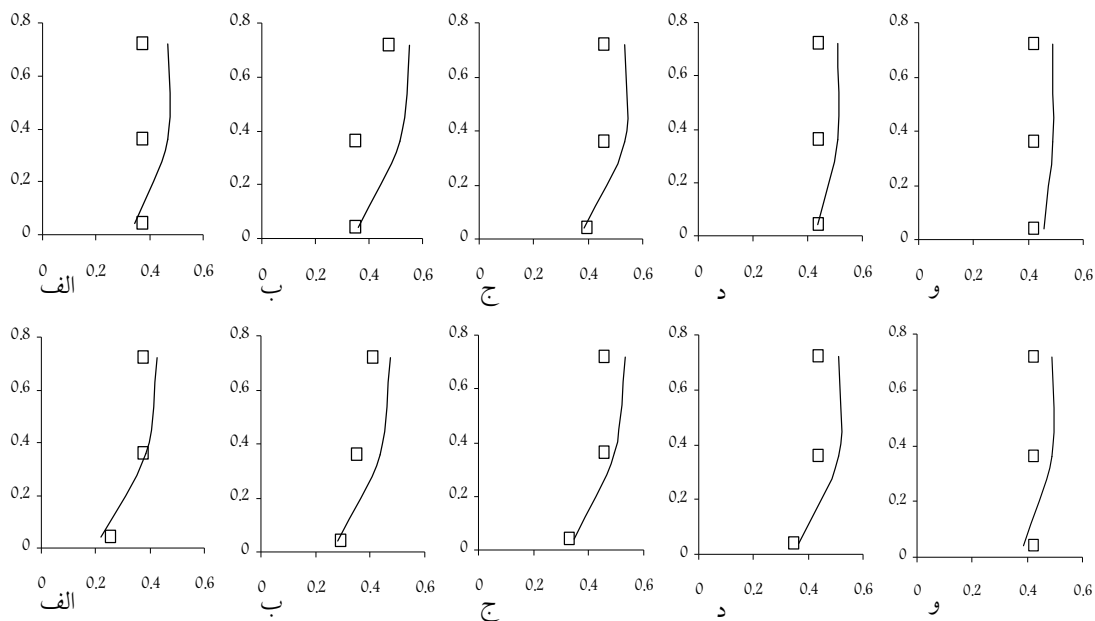
که در این رابطه

A_i عرض مجرای جریان در مدل 2 SSIIM، B_i عرض مجرای جریان در مدل فیزیکی و n تعداد پارامتر A یا B است. مقدار ضریب همبستگی و خطای RMSE در مرحله واسنجی و صحت سنجی در جدول ۲ آورده شده است.

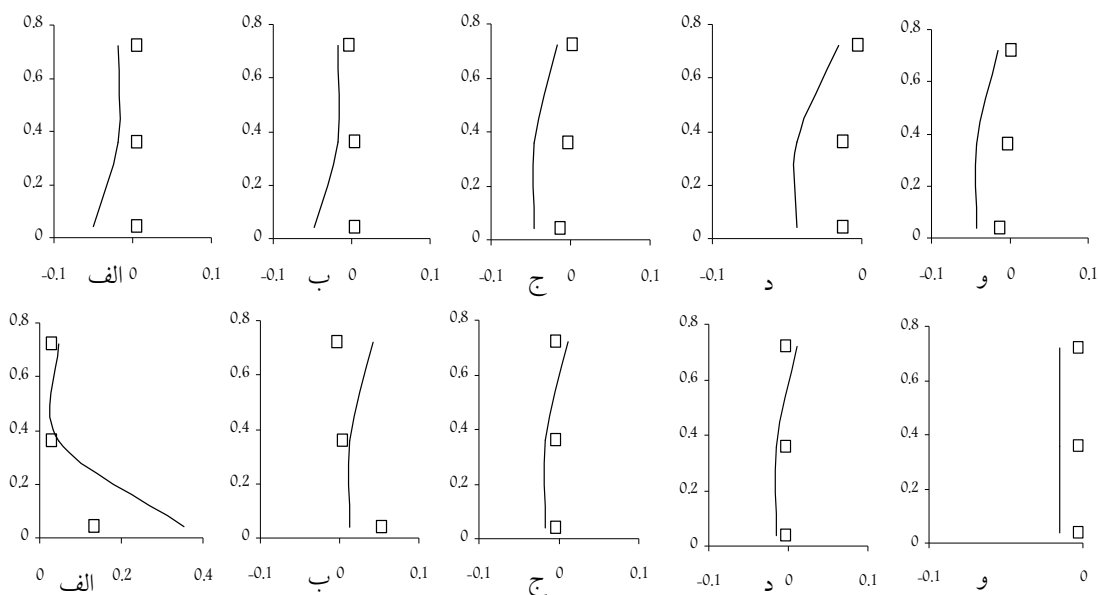
جدول ۲- مقدار ضریب همبستگی و خطای RMSE در مرحله واسنجی

	و صحت سنجی	
	واسنجی	صحت سنجی
R^2	۰/۸۸	۰/۸۴
RMSE	۰/۸۶	۰/۷۸

¹ Root Mean Square Error (RMSE)



شکل ۴- مقایسه سرعت U_1^* در کانال اصلی (□ = داده‌های آزمایشگاهی، — = مدل 2 SSIIM)



شکل ۵- مقایسه سرعت U_2^* در کانال فرعی (□ = داده‌های آزمایشگاهی، — = مدل 2 SSIIM)

جدول ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل 2 SSIIM در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

$B_{18} (O)$ (cm)	$B_{18} (S)$ (cm)	$B_9 (O)$ (cm)	$B_9 (S)$ (cm)	$B_b (O)$ (cm)	$B_b (S)$ (cm)	Fr	$Q_d (l/s)$	$Q (l/s)$	D (cm)
۴/۳	۴/۵	۴/۴	۵/۴	۶/۸	۶/۸	۰/۲۱	۲/۹۲	۲۰/۶۵	۲۵
۴/۵	۴/۸	۴/۸	۶	۷/۵	۹/۶	۰/۲۵	۳/۹۲	۲۴/۸۸	۲۵
۴	۳/۸	۴/۴	۵/۷	۶/۵	۶/۳	۰/۳۱	۳/۹۸	۳۰/۳۲	۲۵
۳	۲/۴	۳/۱	۳/۳	۴/۵	۴/۸	۰/۳۵	۲/۹۵	۳۴	۲۵
۲/۸	۳/۳	۳	۴	۴/۲	۴/۸	۰/۴۰	۳/۰۹	۳۸/۹	۲۵
۲/۶	۳	۲/۹	۳/۸	۴/۱	۵	۰/۴۵	۳/۲۸	۴۳/۸	۲۵

مقادیر بی بعد شده ابعاد مجرای جریان در مقابل نسبت آبیگری ترسیم گردید (شکل ۶). همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، رابطه ای بین نسبت q_d (دبی در واحد عرض کانال منشعب) به q (دبی در واحد عرض کانال اصلی با عرض مجرای جریان در سطح و کف) که با W_2 (عرض کانال آبیگری) بی بعد شده است، وجود دارد. این رابطه برای عرض مجرای جریان در سطح به صورت زیر است

$$\frac{B_s}{W_2} = 1.06 \frac{q_d}{q} \quad R^2 = 0.74 \quad (15)$$

جدول ۴- مشخصات هیدرولیکی آبیگر و مشخصات هندسی مجرای جریان

B_s (cm)	B_b (cm)	Fr	Q_d (ℓ/s)	Q (ℓ/s)	D (cm)
۵/۴	۱۰/۵	۰/۲	۱/۱	۵	۱۰
۴/۹	۱۰/۳	۰/۲۵	۱/۳۲	۶/۳	۱۰
۵/۳	۱۰/۷	۰/۳	۱/۶۲	۷/۵	۱۰
۵/۳	۱۰/۲	۰/۳۵	۱/۸۳	۸/۷	۱۰
۴/۹	۹/۹	۰/۴۱	۲/۰۷	۱۰/۲۶	۱۰
۳/۹	۸/۳	۰/۴۵	۱/۹۱	۱۱/۱۵	۱۰
۴/۵	۸/۳	۰/۲۱	۲/۵۲	۱۴/۷۳	۲۰
۴/۲	۷/۵	۰/۲۵	۲/۶۷	۱۷/۷۵	۲۰
۳/۷	۶/۴	۰/۳	۲/۶۷	۲۰/۸۱	۲۰
۳/۹	۶/۸	۰/۳۶	۳/۳۸	۲۵/۲۱	۲۰
۳/۹	۶/۹	۰/۴۲	۳/۹۲	۲۹/۴	۲۰
۳	۴/۹	۰/۴۵	۲/۸۳	۳۱/۵	۲۰
۴/۳	۶/۸	۰/۲۱	۲/۹۲	۲۰/۶۵	۲۵
۴/۵	۷/۵	۰/۲۵	۳/۹۲	۲۴/۸۸	۲۵
۴	۶/۵	۰/۳۱	۳/۹۸	۳۰/۳۲	۲۵
۳	۴/۵	۰/۳۵	۲/۹۵	۳۴	۲۵
۲/۸	۴/۲	۰/۴	۳/۰۹	۳۸/۹	۲۵
۲/۶	۴/۱	۰/۴۵	۳/۲۸	۴۳/۸	۲۵

و برای عرض مجرای جریان در کف، رابطه ی زیر به دست می آید

$$\frac{B_b}{W_2} = 1.97 \frac{q_d}{q} \quad R^2 = 0.99 \quad (16)$$

دقت رابطه ۱۵ از ۱۶ کمتر است. یکی از دلایل کاهش دقت رابطه ۱۵ وجود اختلاف عمق جریان در محل آبیگر در نسبت های مختلف آبیگری، با عمق بالادست است. به دلیل این اختلاف عمق، تعیین عمقی یکسان برای تمامی نسبت های آبیگری به منظور تعیین عرض لوله جریان در سطح آب امکان پذیر نیست. همچنین به دلیل تغییرات کم مقدار عرض مجرای جریان در سطح نسبت به کف، تفاوت اندک مقادیر در سطح به دلیل اختلاف عمق، دقت رابطه را

۲۰ سانتی متر بودند، اجرا گردید. سپس عرض مجرای جریان در سطح و کف تعیین شد. در آزمایش با عمق ۲۵ سانتی متر عرض جدا شده جریان در نزدیک کف با استفاده از داده های مدل فیزیکی تعیین گردید اما به دلیل محدودیت دستگاه سرعت سنج و عدم امکان برداشت سرعت در سطح جریان، برای تعیین عرض مجرای جریان در این آزمایش ها از نتایج مدل ریاضی استفاده گردید.

۳- آنالیز ابعادی

با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامترهای مؤثر در پدیده مورد مطالعه شناخته شده و نسبت های بدون بعد تعیین می گردد.

پارامترهای مؤثر بر پدیده عبارت اند از: دبی جریان در بالادست کانال اصلی (Q)، دبی جریان در آبیگر (Q_d)، سرعت جریان در کانال اصلی (U_1)، سرعت جریان در کانال فرعی (U_2)، عمق جریان در بالادست کانال اصلی (D)، عمق جریان در کانال آبیگر (D_d)، دانسیته آب (ρ)، شتاب ثقل (g)، ویسکوزیته (ν)، عرض کانال اصلی (W_1)، عرض کانال آبیگر (W_2)، عرض مجرای جریان در سطح آب (B_s)، عرض مجرای جریان در کف (B_b)، سرعت جریان در سطح آب (U_s) و سرعت جریان در نزدیک کف (حدود یک سانتی متری کف) (U_b)، بر اساس روش باکینگهام و حذف پارامترهای ثابت و حذف عدد رینولدز (Re) به دلیل آشفتگی کامل جریان رابطه بدون بعد به صورت زیر قابل ارائه است

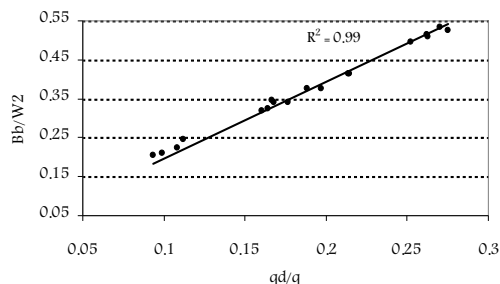
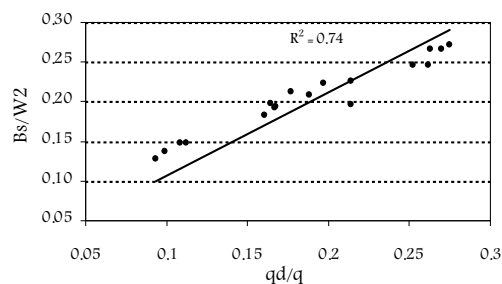
$$f\left(\frac{U_s - U_b}{U_1}, \frac{U_2}{U_1}, \frac{Q_d}{Q}, \frac{W_1}{W_2}, \frac{B_s}{W_1}, \frac{B_b}{W_1}, F_r\right) = 0$$

که F_r عدد فروود $= \frac{Q_d}{Q}$ نسبت آبیگری است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- ابعاد مجرای جریان

هدف اصلی این تحقیق تعیین ابعاد مجرای جریان در آبیگرهای جانبی در کانال مستقیم با زاویه ۹۰ درجه بود. برای این منظور با بررسی داده های آزمایشگاهی و نتایج مدل و پس از ترسیم خطوط جریان و مشخص شدن مجرای جریان، فاصله بین دیواره ی چپ کانال اصلی و نقطه تماس خط جریانی که به دیواره پایین دست آبیگر برخورد می نماید، به عنوان عرض مجرای جریان در نظر گرفته شد. مجرای جریان به شکل دوزنقه بود که قاعده بزرگ تر در کف با B_b و یا قاعده کوچک تر در سطح با B_s نشان داده شد (شکل ۱). جدول ۴ نتایج حاصل از این مطالعه را نشان می دهد. نتایج این تحقیق و همچنین نتایج محققان دیگر نشان داده است که ابعاد مجرای جریان به نسبت آبیگری بستگی دارد. از این رو

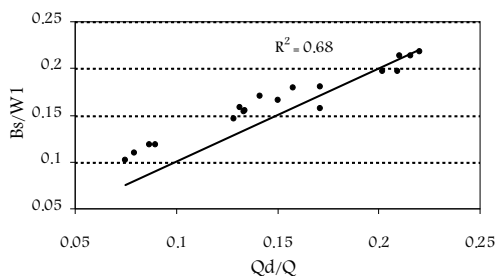


شکل ۶- تأثیر نسبت آبیگری در واحد عرض بر عرض مجرای جریان: الف) سطح و ب) کف

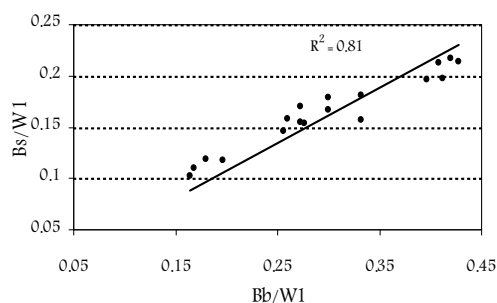
که مقدار آن با توجه به شرایط مختلف، متفاوت است در صورتی که رابطه ادگارد بدون ضریب بود، در نتیجه رابطه ادگارد به دلیل نداشتن ضریب در مقایسه با رابطه رادکیوی کاربردی تر است. با توجه به شکل ۸ رابطه ای بین عرض مجرای جریان در کف و سطح وجود دارد. این رابطه به صورت زیر است

$$\frac{B_s}{W_1} = 0.54 \frac{B_b}{W_1} \quad (17)$$

که در این رابطه B_s و B_b توسط W_1 عرض کانال اصلی بی بعد شده اند. این رابطه برای تمامی اعماق، دبی ها و نسبت های آبیگری مختلف برقرار است. با استفاده از این رابطه با توجه به محدودیت های ابزار و شرایط آزمایشگاهی می توان عرض مجرای جریان در سطح یا کف را اندازه گیری و پارامتر دیگر را محاسبه نمود. در این تحقیق نسبت B_s/B_b برابر ۰/۵۴ به دست آمد. در



شکل ۷- تأثیر نسبت آبیگری بر عرض مجرای جریان در سطح



شکل ۸- رابطه بین عرض مجرای جریان در سطح و کف

تحت تأثیر قرار می دهد.

با مقایسه رابطه ۱۵ با رابطه ۳ ارائه شده توسط رادکیوی ملاحظه می شود که مقدار ضریب رابطه به محدوده ارائه شده توسط رادکیوی نزدیک است. همچنین مقایسه رابطه ۱۶ با رابطه ۴ ارائه شده توسط رادکیوی، نشان می دهد که شیب و عرض از مبدأ این معادله با معادله رادکیوی (۱۰/۴) متفاوت است. ضرایب معادله رادکیوی بر اساس نسبت دبی انحرافی $0.25 \left(\frac{q_d}{q}\right)$ یعنی شرایط انحراف غیر آزاد تعیین شده است. به همین دلیل در صورتی که مقدار $\frac{q_d}{q}$ برابر صفر باشد، عرض مجرای جریان در کف برابر صفر نمی شود در صورتی که در این تحقیق این رابطه اصلاح گردید. به علت تفاوت شرایط آزمایشگاهی، ضرایب روابط ارائه شده متفاوت است. روابط رادکیوی برای شرایط نسبت عمق به عرض زیاد تعیین گردیده در صورتی که نسبت عمق به عرض در این تحقیق زیاد نبود.

با مقایسه دو رابطه ارائه شده برای عرض مجرای جریان در سطح و کف، مشاهده شد که شیب خط معادله ارائه شده برای عرض مجرای جریان در کف بیشتر است. بر این اساس می توان گفت با افزایش $\frac{q_d}{q}$ نرخ افزایش عرض مجرای جریان در کف بیشتر از سطح بوده و مقدار دبی که از کف وارد آبیگر می شود بیشتر از سطح است.

به منظور بررسی رابطه ۵ ارائه شده توسط ادگارد با استفاده از داده های این تحقیق، شکل ۷ رسم گردید. همانگونه که مشاهده می گردد همانند رابطه ۱۵ که برای تعیین عرض مجرای جریان در سطح است، دقت این رابطه نیز کم است که دلیل آن توضیح داده شد. در مقایسه با رابطه ۳ ارائه شده توسط رادکیوی برای عرض مجرای جریان در سطح نسبت به دبی انحرافی، مقدار ضریب همستگی این رابطه از رابطه رادکیوی کمی پایین تر است. در معادله رادکیوی یک محدوده برای ضریب ثابت a_s ارائه شده است

تمامی اعماق با افزایش $\frac{U_2}{U_1}$ مقدار $\frac{\delta}{U_1}$ افزایش می‌یابد که این نتایج مشابه نتایج نیروی و ادگارد است [۳].
روابط ۱۹ تا ۲۱ به ترتیب برای اعماق ۱۰، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر قابل برآزش است

$$\frac{\delta}{U_1} = 0.34 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^{0.55} \quad R^2 = 0.89 \quad (19)$$

$$\frac{\delta}{U_1} = 0.81 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^{0.48} \quad R^2 = 0.90 \quad (20)$$

$$\frac{\delta}{U_1} = 0.85 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^{0.83} \quad R^2 = 0.96 \quad (21)$$

این روابط به این دلیل اهمیت دارند که U_2/U_1 معرف نسبت آبیگری است. با افزایش آبیگری، عرض مجرای جریان افزایش یافته و نیروی گریز از مرکز به دلیل انتقال مومنتم بیشتر به کانال آبیگری، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین گرادیان فشار جانبی نیز که با اختلاف عمق آب در دهانه آبیگری ارتباط دارد، تحت تأثیر قرار می‌گیرد زیرا با افزایش آبیگری، فشار در نقطه سکون یعنی محل اتصال دهانه پایین دست آبیگری به کانال اصلی افزایش می‌یابد و در مجموع نیروهای مؤثر در به وجود آمدن جریان حلزونی به گونه‌ای اثر می‌کنند که قدرت این جریان افزایش می‌یابد.

به دلیل اینکه عدد فرود بر روی توزیع عرضی در دهانه آبیگری تأثیر می‌گذارد باعث تغییر قدرت جریان حلزونی می‌گردد. با توجه به اهمیت گردابه حلزونی در انتقال رسوبات بستر و اهمیت مقدار رسوب ورودی به آبیگری، تأثیر عدد فرود بر قدرت گردابه حلزونی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی این رابطه، ابتدا از رابطه ۱۸ قدرت جریان حلزونی محاسبه گردید. به دلیل اینکه در صورت کسر عدد فرود، پارامتر U_1 قرار دارد، برای مقایسه با قدرت جریان ثانویه از پارامتر بی بعد U_1/δ استفاده شد. نتایج در

مقایسه با روابط ۱ و ۲ ارائه شده توسط نیروی و ادگارد، این ضریب مابین ضرایب ارائه شده برای بستر صاف و زبر است. لازم به ذکر است که در آزمایش‌های نیروی و ادگارد که در آن U_1 و U_2 به ترتیب سرعت متوسط در آبیگری و کانال اصلی بود نسبت $\frac{U_2}{U_1}$ در محدوده ۰/۲ تا ۰/۹ قرار داشت اما در این تحقیق این نسبت در محدوده ۰/۰۹ تا ۰/۲۸ بود.

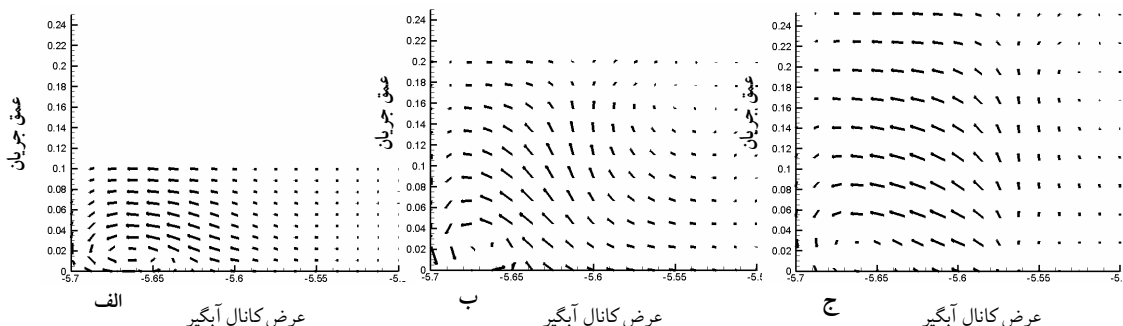
۵- جریان گردابی حلزونی کانال آبیگری

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده در گوشه دیواره پایین دست کانال آبیگری به دلیل عدم تعادل بین گرادیان فشار جانبی، نیروی گریز از مرکز و نیروی برشی ناشی از انحنای خطوط جریان، جریان حلزونی به وجود می‌آید. این جریان باعث انتقال رسوب بستر به آبیگری می‌شود. برای بررسی این گرداب، قدرت جریان ثانویه درون آبیگری مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ جریان ثانویه تشکیل شده در سه عمق ۱۰، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر را برای نسبت آبیگری به ترتیب ۰/۲۲، ۰/۱۷ و ۰/۱۴ نشان می‌دهد. جریان ثانویه در محدوده گوشه پایین و چپ تصویر یعنی نزدیک دیواره پایین دست آبیگری تشکیل می‌شود. در عمق ۱۰ سانتی‌متر به دلیل نسبت آبیگری بیشتر، جریان ثانویه تشکیل شده واضح تر است.

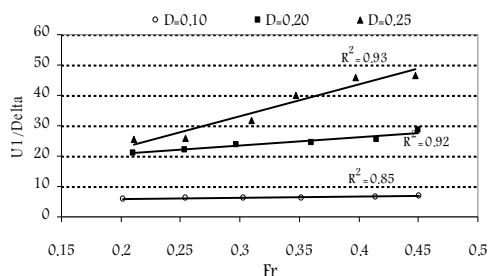
برای تعیین قدرت جریان ثانویه (δ)، از رابطه ۱۸ که تفاوت مؤلفه عرضی سرعت در سطح (U_s) و کف (U_b) در دهانه آبیگری در نقطه A را نشان می‌دهد، استفاده گردید [۳]. نقطه A ۳ سانتی‌متر از دیواره پایین دست آبیگری و ۷ سانتی‌متر از دهانه آبیگری فاصله دارد (شکل ۲).

$$\delta = U_s - U_b \quad (18)$$

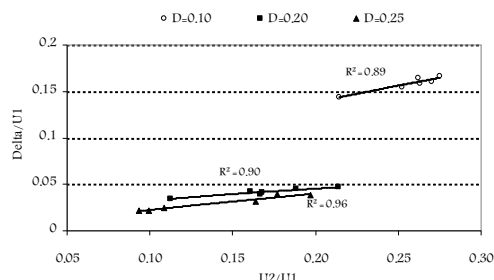
در شکل ۱۰ برای سه عمق ۱۰، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر رابطه بین $\frac{\delta}{U_1}$ و $\frac{U_2}{U_1}$ برقرار است که U_1 و U_2 به ترتیب سرعت در جهت جریان در کانال اصلی و آبیگری است. با توجه به شکل ۱۰ برای



شکل ۹- جریان ثانویه و جریان گردابی حلزونی: الف) عمق ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۲۵ سانتی‌متری (محور افقی عرض کانال آبیگری و محور عمودی عمق جریان می‌باشد)



شکل ۱۱- تأثیر عدد فرود بر قدرت جریان ثانویه



شکل ۱۰- تأثیر سرعت جریان در آبگیر بر قدرت جریان ثانویه

کف نیز با یکدیگر رابطه دارند. این روابط در تمامی نسبت‌های آبیگری و سه عمق مورد بررسی، برقرار بود. با بررسی جریانهای ثانویه در ابتدای آبگیر، قدرت جریان‌های حلزونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که قدرت جریان حلزونی با افزایش عدد فرود در هر عمق، کاهش و با افزایش سرعت متوسط در آبگیر نسبت به کانال اصلی که معرف نسبت آبیگری است، افزایش می‌یابد. در این مطالعه روابطی برای ابعاد مجرای جریان و قدرت گرداب حلزونی که هر دو در انتقال بار رسوبی به آبگیر بسیار نقش دارند، ارائه گردید.

۷- قدردانی

بخشی از هزینه‌های این طرح در قالب قرارداد شماره ۰۲۳-۰۲-۰۱ توسط سازمان آب و برق خوزستان، دفتر تحقیقات و استانداردهای شبکه آبیاری و زهکشی تامین شده است که به این وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد روابط برازش داده شده از دقت مناسبی برخوردار هستند. با توجه به شیب نمودارهای سه عمق، در عمق ۱۰ سانتی‌متر با افزایش عدد فرود، نرخ کاهش قدرت جریان ثانویه کم است اما با افزایش عمق، نرخ کاهش قدرت جریان ثانویه بیشتر می‌گردد. در یک عدد فرود با افزایش عمق، قدرت جریان ثانویه کاهش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در یک آبگیر ۹۰ درجه پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل 2 SSIIM از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های تکمیلی به دست آمده از مدل، الگوی جریان در کانال اصلی و ابتدای کانال آبگیر مورد بررسی قرار گرفت. رابطه‌ای بین عرض مجرای جریان در کانال اصلی در سطح و کف با نسبت آبیگری در واحد عرض وجود دارد. همچنین عرض مجرای جریان در سطح و

۸- مراجع

- 1- Lakshmana, R. N. S., Sridharan, K., and Baig, M. Y. A. (1968). "Experimental study of the division of flow in an open channel." *Proc., Australasian Conference on Hydraulic. and Fluid Mech.*, Sydney, Australia, 139-142.
- 2- Neary, V. S., Sotiropoulos, F., and Odgaard. A. J. (1999). "Three-Dimensional numerical model of lateral-intake inflows." *J. of Hydraulic Engineering*, 125, (2) 126-140.
- 3- Neary, V. S., and Odgaard, A.J. (1993). "Three-Dimensional flow structure at open-channel diversions." *J. of Hydraulic Engineering*, 119 (11), 1223-1230.
- 4- Raudkivi, A. J. (1993). *Sedimentation, exclusion and removal of sediment from diverted water*, IAHR. Pub., Nether land.
- 5- Hager, W. H. (1987). "Discussion of 'separation zone at open-channel junction' by Best, J. L., Reid, I." *J. of Hydraulic Engineering*, 113 (4), 539-543.
- 6- Ramamurthy, A. S., and Satish, M. G. (1988) "Division of flow in short open channel branches." *J. of Hydraulic Engineering*, 114 (4), 428-438.
- 7- Ingle, R. N., and Mahankal, A. M. (1990). "Discussion of 'division of flow in short open channel branches' by ramamurthy, A. S., Satish, M. G." *J. of Hydraulic Engineering*, 116(2), 289-291.

- 8- Shafai-Bajestan, M., and Nazari, S. (1999). "Effect of intrake angle on sediment entry at river bend." *Scientific J. of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahwaz*, 22 (1). (In Persian)
- 9- Montaseri, H., Ghodsian, M., Shafaiefar, M., Salehi Neishabouri, A. A., and Dehgahni, A.A. (2008). "Experimental investigation of 3D flow field and scouring in a 180 degree bend with a lateral intake." *Gorgan J. of Agri. Sci. and Natural Resources*, 15 (2), 225-533. (In Persian)
- 10- Abassi, A. A., Ghodsian, M., Habibi, M., and Salehi Neishabouri, A.A. (2002). "Experimental investigation on sediment control in lateral intake using sill." *Proc., of the 13th IAHR-APD Congress*, Singapore, 1, 230-233.
- 11- Odgaard, A.J. (2009). *River training and sediment management with submerged vanes*, ASCE pub., Reston, Virginia, USA.
- 12- Ramamurthy, A. S., Junying, Q., and Diep. V. (2007). "Numerical and experimental study of dividing numerical and experimental study of dividing." *J. of Hydraulic Engineering*, 133 (10), 1135-1144.