

مطالعه عددی الگوی جریان آشفته و بررسی کیفی انتقال رسوب و فرسایش در آبگیری جانبی از رودخانه

اکبر صفرزاده گندشمین^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

salehi@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: اسفند ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: بهمن ۱۳۸۴)

چکیده- حل عددی معادلات ناویراستوکس برای جریان آشفته در انشعاب ۹۰ درجه با مقطع مستطیلی از کانال مستقیم با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و بررسی الگوی سه‌بعدی جریان و نحوه توزیع تنش برشی بر روی بستر و دیواره‌های کانال اصلی و انشعاب، هدف اصلی این تحقیق است. محاسبات برای مقادیر مختلف نسبت دبی انحرافی انجام و برای مدل‌سازی آشفتگی از دو مدل $k-\omega$ و $k-\epsilon$ استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و تغییرات پروفیل طولی سرعت در راستای کانالهای اصلی و انشعابی بررسی شده است. تغییرات قدرت جریان ثانویه ناشی از انحنا خطوط جریان در راستای کانالهای اصلی و انشعابی بررسی و تأثیر نسبت دبی بر روند تغییرات و همچنین ارتباط بین این پارامتر و نواحی چرخشی موجود در داخل آبگیر و کانال اصلی مطالعه شده است. بعد از شناخت الگوی جریان، نحوه توزیع تنش برشی در بستر کانالهای اصلی و انشعاب بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که هر دو مدل آشفتگی استفاده شده در پیش‌بینی الگوی جریان در راستای کانال اصلی، دقت بالایی دارند، اما مدل $k-\omega$ در پیش‌بینی نواحی گردابه‌ای و جدایی جریان، بهتر از مدل $k-\epsilon$ عمل کرده و ابعاد گردابه حاصل از این مدل، انطباق بهتری با مقادیر آزمایشگاهی دارد. نتایج مدل‌سازی، نشان از وجود یک گردابه دیگر با جهت چرخش در خلاف جهت چرخش گردابه اصلی در گوشه بالادست ورودی آبگیر، برای نسبت‌های دبی پایین دارد.

کلید واژگان: آبگیر جانبی، جریان آشفته، جریان ثانویه، حل عددی، تنش برشی، فلوئنت.

۱- مقدمه

الگوی جریان ناشی از احداث آبگیر جانبی به منظور انشعاب آب رودخانه، ویژگی‌های پیچیده‌ای داشته و کاملاً سه‌بعدی است. با نزدیک شدن جریان به آبگیر، به دلیل فشار مکشی اعمال شونده از طرف کانال جانبی، جریان در جهت عرضی شتاب گرفته و به دو قسمت تقسیم می‌شود: قسمتی وارد آبگیر شده و بقیه در کانال اصلی

پایین دست جریان می‌یابد. قسمتی که به کانال انشعابی وارد می‌شود، توسط صفحه برشی خمیده‌ای معین می‌شود که به صفحه تقسیم‌کننده جریان معروف است. جریانی که وارد آبگیر می‌شود، دارای مومنتم شدیدی در جهت کانال اصلی بوده و به همین علت، در داخل آبگیر، جدایی جریان اتفاق می‌افتد. به سبب وجود گرادیان فشار جانبی، تنش برشی بستر و نیروی جانب مرکز ناشی از انحنا

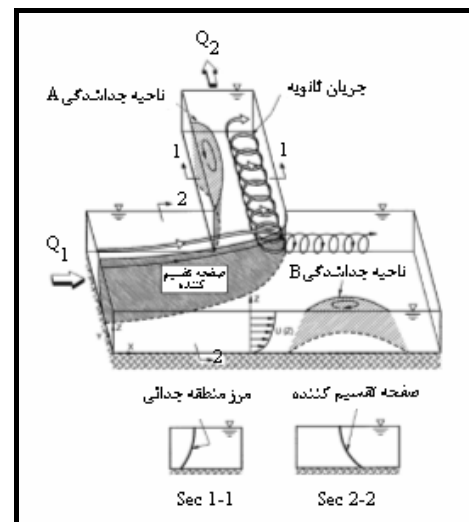
قسمتی از ورودی انشعاب مسدود خواهد شد و سرعت جریان در ناحیه مقابل ناحیه A افزایش خواهد یافت. از میان پارامترهای دخیل در شکل‌گیری الگوی جریان در چنین میدانی، می‌توان به شدت جریان ورودی (Q_1)، نسبت دبی انحرافی ($r = q_2/q_1$) که q_1 و q_2 به ترتیب معرف دبی در واحد عرض کانالهای اصلی و انشعاب است)، عرض نسبی کانالهای اصلی و انشعابی، نسبت عمق جریان به عرض کانال ($AR = d/W$) و زبری بستر کانال اصلی اشاره کرد [۱].

بیشتر مطالعات عددی در این زمینه در حالت جریان لایه‌ای بوده و معادلات مربوط در حالت دوبعدی حل شده است. مطالعه الگوی جریان در حالت لایه‌ای و حل معادلات در سیستم سه‌بعدی توسط نیری و سوتیروپولوس در سال ۱۹۹۶ بر روی انشعاب ۹۰ درجه انجام گرفته است [۲].

برای شبیه‌سازی عددی جریان در حالت آشفته، شتار و مورتی در سال ۱۹۹۲ از معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق (حالت دوبعدی) استفاده کرده و مدل آشفتگی k-ε استاندارد را همراه با تابع دیوار استاندارد برای بستن سیستم معادلات آشفته خود به کار گرفتند [۳]. عیسی و الیویرا در سال ۱۹۹۴ برای اولین بار به مدلسازی عددی الگوی جریان آشفته در حالت سه‌بعدی پرداختند. این دو محقق، معادلات ناویر استوکس را به صورت متوسط‌گیری شده زمانی^۲ با استفاده از روش حجم محدود و با به کار گرفتن مدل آشفتگی k-ε با تابع دیوار استاندارد حل کرده و از ۳۰۰۰۰ گره برای میدان مورد نظر استفاده کردند [۴].

نیری و همکاران در سال ۱۹۹۹ با تهیه یک مدل عددی سه‌بعدی، الگوی جریان آشفته را در یک انشعاب ۹۰ درجه مدلسازی کردند. معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز با استفاده از مدل آشفتگی k-ω برای بستن

خطوط جریان، جریان ورودی به آبگیر دچار عدم تعادل شده و همین پدیده باعث ایجاد جریان ثانویه‌ای در طول آبگیر میشود که سازوکار تشکیل آن شبیه به تشکیل جریان ثانویه در قوسها است. در شکل ۱ الگوی شماتیک جریان سه‌بعدی نشان داده شده است.



شکل ۱ الگوی جریان در آبگیر جانبی [۱]

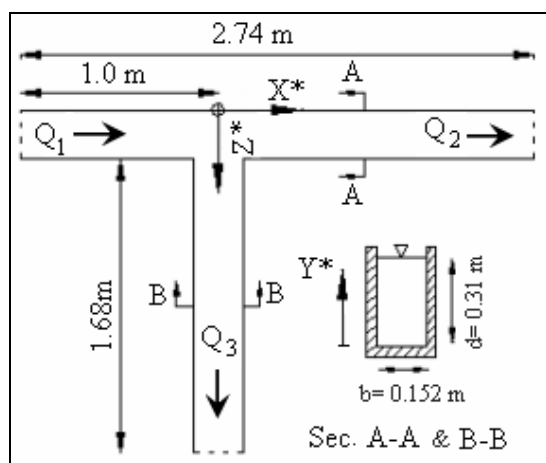
فرایند انتقال ناشی از این جریان، همواره ذهن مهندسان هیدرولیک و ژئومورفولوژیست‌ها را به علت ایجاد تغییرات در بستر مجاری آبرفتی - به صورت آبشستگی موضعی و رسوبگذاری و تشکیل پشته‌های ماسه‌ای^۱ - به خود معطوف کرده است. ناحیه جدایی داخل آبگیر (ناحیه A در شکل ۱) باعث کاهش موضعی سرعت در این ناحیه می‌شود. جریان ثانویه ناشی از انحنا خطوط جریان، در نزدیکی بستر، قدرت بالایی دارد و همین پدیده باعث جاروب شدن رسوبات نزدیک بستر به طرف داخل آبگیر و ورود آنها به داخل ناحیه A خواهد شد. رسوبات ورودی به این ناحیه به دام افتاده و ته‌نشین می‌شود. به مرور زمان و در اثر تجمع رسوبات،

شود و ثانیاً به مطالعه پارامتری این پدیده پرداخته شود. در همین راستا از دو مدل آشفتگی استفاده شده و تأثیر نسبت دبی بر الگوی جریان، قدرت جریان ثانویه، نحوه انتقال رسوب بستر و توزیع تنش برشی در مرزهای صلب دهانه آبیگیر بررسی شده است. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار تحلیل جریان فلونت، شناخت بیشتر فیزیک حاکم بر این پدیده و نکات مبهم آن مد نظرخواهد بود.

۲- مشخصات هندسی میدان

همانطوری که قبلاً اشاره شد، مطالعه حاضر بر اساس کار آزمایشگاهی برکدل پی‌ریزی شده است. میدان مورد نظر عبارت است از تقاطع T شکلی که از اتصال قائم دو کانال مستقیم با مقطع مستطیلی با نسبت عمق به عرض (AR) تقریبی ۲ تشکیل شده است.

در شکل ۲ مشخصات هندسی فلوم نشان داده شده است. در این شکل مختصات میدان نسبت به عرض کانال بی‌بعد شده است ($X^*=X/b$). مبدا مختصات در دیوار بیرونی کانال اصلی و در مقابل دهانه ورودی آبیگیر واقع شده است، به طوری که جهت مثبت Y^* از کف کانال به سمت بالا است.



شکل ۲ مشخصات هندسی فلوم مورد بررسی [۶].

سیستم معادلات مورد استفاده، با روش حجم محدود حل شده است [۱]. بحث تغییرات سطح آب و تأثیر آن بر نتایج، توسط عده‌ای از محققان بررسی شده است. تیلور در سال ۱۹۴۴ نشان داد که برای نسبت دبی بین ۰ تا ۰/۴۵ و عدد فرود کانال اصلی تا ۰/۴، تغییرات تراز آب در مجاورت آبیگیر، معادل حداکثر ۲٪ عمق بیشینه جریان در کانال می‌باشد [۱]. نیری و همکاران با اشاره به نتایج تیلور سطح آب را به صورت متقارن در نظر گرفته و نشان دادند که شرط مرزی مورد استفاده برای سطح آب- به شرطی که پارامترهای جریان در محدوده فوق‌الذکر قرار گیرند- کافی است.

در سالهای اخیر علاوه بر مدلسازی عددی این پدیده، محققان زیادی سعی بر مطالعه آزمایشگاهی آن داشته‌اند. از میان کارهای مهم در این زمینه می‌توان به مطالعه آزمایشگاهی نیری و اودگارد در سال ۱۹۹۳ اشاره کرد [۵]. برکدل در سال ۱۹۹۸ مطالعات ارزنده‌ای در زمینه تغییرات سرعت در طول کانالهای اصلی و انشعابی انجام داده است [۶]. این نتایج توسط محققانی مانند نیری و همکاران -برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی- استفاده شده و در این تحقیق نیز از نتایج ایشان برای بررسی صحت نتایج استفاده خواهد شد.

مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در این مطالعات هیچ مقایسه‌ای بین مدل‌های مختلف آشفتگی برای انتخاب مدل مناسب انجام نشده است. علاوه بر این، بحث جریان ثانویه و روند رشد و استهلاك آن در طول کانال اصلی و انشعابی از نکات بسیار مهمی است که ارتباط بسیار نزدیکی با پدیده انتقال رسوب و مسائل مورفولوژیکی حاکم بر این میدان دارد و در تحقیقات قبلی، کمتر به این موضوع پرداخته شده است. بحث آبشستگی نیز از جمله مباحث مهمی است که مطالعات زیادی برای شناخت آن مورد نیاز است.

در این تحقیق سعی بر آن است که اولاً مدل آشفتگی مناسبی برای پیش‌بینی الگوی سه‌بعدی این جریان شناخته

۳- قوانین حاکم بر میدان

قوانین حاکم عبارتند از دو قانون مهم دینامیک سیالات:

۱- قانون بقای جرم ۲- قانون بقای مومتم.

معادلات مورد استفاده عبارتند از معادلات پیوستگی

(بقای جرم) و ناویر استوکس (بقای مومتم) که به صورت

معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز در حالت آشفته بیان

می‌شود. برای سیال تراکم‌ناپذیر و جریان دائم در سیستم

مختصات سه‌بعدی دکارتی، معادلات مذکور به صورت زیر

قابل بیان است [۸،۷]:

بقای جرم (معادله پیوستگی)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

بقای مومتم (معادلات ناویر استوکس)

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + g_{x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

در معادلات فوق، U_i ($i=1,2,3$) بیانگر مؤلفه‌های

متوسط سرعت در سه جهت متناظر $k/3 + p/\rho$

است که در آن p فشار پیزومتریک و k انرژی جنبشی

آشفته‌گی است. g_{x_i} مؤلفه ثقل در جهت x_i ، μ لزجت

دینامیکی سیال $R_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'}$ تنش رینولدز است که

نحوه محاسبه آن در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۳-۱- مدل‌های آشفته‌گی

برای مدل‌سازی تنش‌های رینولدز یا به بیان بهتر، بستن

سیستم معادلات حاکم بر میدان، از مدل‌های آشفته‌گی

استفاده می‌شود. در این تحقیق از دو مدل آشفته‌گی دو

معادله‌ای $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ بدین منظور استفاده شده و مدل

مناسب برای ادامه تحقیق و به منظور مطالعه پارامتری

میدان، انتخاب شده است.

۳-۱-۱- مدل $k-\varepsilon$

در این مدل برای بیان لزجت گردابه‌ای از انرژی جنبشی

آشفته‌گی (k) و نرخ استهلاک آن بر اثر لزجت (ε) استفاده

می‌شود. در استخراج معادلات k و ε ، چنین فرض شده

که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت ملکولی بسیار

ناچیز است.

با استفاده از رابطه پرائتل-کولموگروف می‌توان نوشت

[۷]:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

معادلات انتقال پارامترهای k و ε به صورت زیر قابل

بیان است:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\delta_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\delta_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

G جمله تولید آشفته‌گی ناشی از تنش برشی متوسط

می‌باشد که با رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$G = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

ضرائب ثابت به کار رفته در معادلات این مدل در

جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ ضرائب ثابت مدل $k-\varepsilon$ [۷]

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	δ_k	δ_ε
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰۰	۱/۳۰

۳-۱-۲- مدل $k-\omega$

این مدل توسط ویلگکس در طی سالهای ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۴

ارائه شده است [۷]. بر طبق این مدل، لزجت گردابه‌ای

توسط انرژی جنبشی آشفته‌گی (k) و فرکانس آشفته‌گی

(ω) بیان می‌شود که $\omega = \varepsilon / k$:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (7)$$

معادلات انتقال دو پارامتر k و ω به صورت زیر بیان

می‌شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\nu}{R} + \sigma^* \nu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \beta^* \omega k \quad (8)$$

جملات انتقال معادلات مانند آپویند^۳، آپویند مرتبه دوم^۴، توانی^۵ و کوئیک^۶ توسط کاربر قابل انتخاب است. به منظور تزویج میدان سرعت و میدان فشار نیز روشهای سیمپل و سیمپل سی در برنامه موجود است. در این تحقیق از نسخه ۶/۰/۱۲ این نرم افزار استفاده شده است.

(۹)
$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{1}{R} + \sigma v_i \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} G - \beta \omega^2$$
 ضرائب ثابت به کار رفته در معادلات فوق در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ ضرائب ثابت مدل k- ω [۷]

C_{μ}	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	δ_k	δ_{ϵ}
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰۰	۱/۳۰

۲-۴- حل معادلات

۱-۲-۴- روش حل

با توجه به وجود نواحی چرخشی در داخل میدان، جمله انتقال معادلات حاکم با استفاده از الگوی آپویند مرتبه دوم منفصل شده اند. به منظور حل میدان جریان از شبکه جابجا شده^۷ استفاده شده و از الگوریتم سیمپل برای تزویج جملات سرعت و فشار استفاده شده است.

۴- حل عددی معادلات

جهت حل میدان جریان و انجام مطالعاتی بر روی مدل، از نرم افزار تحلیل جریان فلونت استفاده شده است. در این بخش به معرفی این نرم افزار و نرم افزار پیش پردازنده گمبیت^۱ که برای تهیه هندسه و شبکه بندی میدان حل استفاده شده است، پرداخته شده و روش حل معادلات تشریح خواهد شد.

۲-۲-۴- شرایط مرزی

در ورودی کانال اصلی، از شرط مرزی سرعت معین استفاده شده است. شرایط جریان ورودی در جدول ۳ آورده شده است. جریان زیر بحرانی بوده و حالت آشفته دارد.

۱-۴- معرفی نرم افزارهای گمبیت و فلونت

نرم افزار گمبیت برای تهیه شبکه یا به بیان دیگر، برای تهیه هندسه مسأله برای حل میدان به کار می رود. در این نرم افزار محدوده میدان جریان تعیین شده و نحوه شبکه بندی میدان محاسباتی و نوع مرزهای حاکم بر میدان جریان مشخص می شود. نسخه استفاده شده از این نرم افزار در این تحقیق گمبیت ۲/۰ بوده است.

جدول ۳ شرایط جریان ورودی

عدد رینولدز Re	عدد فرود Fr	دبی ورودی (lit /s)
۴۹۶۰۰	۰/۱۳	۱۱

با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود، پروفیل سرعت ورودی کاملاً توسعه یافته است. برای حصول به این پروفیل، یک کانال مستقیم با طول نسبتاً زیاد با شبکه بندی منطبق بر شبکه بندی میدان اصلی در عمق و عرض، تهیه شده و در ورودی آن سرعت یکنواخت متناظر با دبی

فلونت، نرم افزار تحلیل سه بعدی جریان است که از معادلات پیوستگی و ناویراستوکس در تحلیل جریان استفاده می کند. در صورتی که جریان آشفته باشد، معادلات حاکم، به معادلات رینولدز تغییر شکل یافته و مدل های مختلفی برای تعیین تنش های رینولدز استفاده می شود. حل میدان جریان بر اساس انفصال معادلات به روش حجم محدود^۲ بوده و روشهای مختلف انفصال

3. Upwind
4. SOU
5. Power law
6. QUICK
7. Staggered

1. Gambit
2. FVM

شرط مرزی دیوار برای مرزهای صلب میدان اعمال شده و دیوارها از نظر هیدرولیکی، سطوح صاف در نظر گرفته شده است.

نکته مهم در شرط مرزی دیوار، تنظیم فاصله گره‌ها در جهت عمود بر دیوار است. اگر $y^+ = \frac{y_p U^*}{\nu}$ باشد که در آن U^* و y_p به ترتیب سرعت برشی و فاصله گره از دیوار است، در مدل $k-\epsilon$ برای $y^+ < 11.63$ از فرض رابطه خطی تنش- کرنش استفاده شده و برای خارج از این ناحیه، از تابع دیوار استفاده خواهد شد. در مدل $k-\omega$ از تابع دیوار استفاده نشده و زیرلایه لزج نیز حل خواهد شد. بنابراین در تنظیم فاصله گره‌های نزدیک دیوار باید به این نکته توجه شود.

۵- مطالعه مقدماتی و جزئیات محاسباتی میدان

همان طوری که در قسمت ۳ گفته شد، نتایج حاصل از مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی برکدل در حالت بستر ثابت مقایسه شده است. بدین منظور، مقایسه بین پروفیل‌های طولی سرعت نزدیک سطح آب ($Y^* = 2$) در امتداد کانال اصلی و انشعابی انجام شده است.

مطالعه مقدماتی شامل دو قسمت است:

۱- تنظیم شبکه‌بندی میدان حل برای دو مدل مزبور؛

۲- انتخاب مدل مناسب آشفتگی.

با توجه با اینکه در مدل $k-\epsilon$ استاندارد در صورت استفاده از تابع استاندارد دیوار، برای ناحیه متأثر از لزجت ملکولی نیازی به ریز کردن شبکه‌بندی نیست، لذا فاصله اولین گره واقع در ناحیه کاملاً آشفته از دیوار به صورت زیر قابل محاسبه است [۷]:

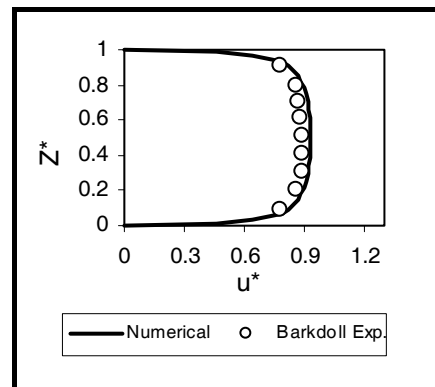
$$\bar{c}_f / 2 \approx 0.0359 \text{Re}_L^{-1/2} = 0.004$$

$$u_\tau \equiv \sqrt{\tau_w / \rho} = U_e \sqrt{\bar{c}_f} / 2 = 0.015$$

$$y_1 = \frac{5.0 \nu}{u_\tau} = 0.0033 \text{ m}$$

ورودی ($Q/A = 0.234 \text{ m}^3/\text{s}$) به میدان اعمال شده و با تنظیم پارامترهای آشفتگی ($k-\epsilon-\omega$)، پروفیل ورودی میدان اصلی به دست آمده است. در شکل ۳ پروفیل عرضی سرعت بی‌بعد شده در سطح آب در مقطع ورودی میدان نشان داده شده است ($u^* = u/u_0$).

برای مرزهای خروجی میدان، شامل خروجی کانال اصلی و آبگیر، از شرط مرزی خروجی استفاده شده است. با توجه به ماهیت شرط مرزی مورد استفاده- مبنی بر عدم تغییر مشخصات جریان در جهات عمود بر این مرزها ($\frac{\partial \phi}{\partial s} = 0$) لازم است موقعیت این مرزها برای حصول شرط فوق در راستای کانالهای اصلی و فرعی تعیین شود.



شکل ۳ پروفیل عرضی سرعت ورودی در سطح آب

با توجه به نکات فوق، طول کانال اصلی بعد از آبگیر در مدل عددی، برابر مقدار آزمایشگاهی ($1/6 \text{ m}$) کافی تشخیص داده شد اما طول کانال انشعاب به $2/2 \text{ m}$ افزایش یافت. دبی ورودی به میدان با توجه به مقادیر نسبت دبی آزمایشگاهی، بین دو مرز خروجی تقسیم شده است.

از شرط مرزی تقارن برای سطح آب استفاده شده و عمق آب در کل میدان برابر مقدار ثابت 0.31 m در نظر گرفته شده است. با این فرض، تنش برشی و شار تمام کمیتها در این سطح، برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

۶- نتایج مدلسازی

میدان مورد نظر برای دو مدل آشفتگی بیان شده برای شبکه‌بندی‌های مختلف حل شد و نتایج حاصل نشان داد که در مدل k-ε وجود ۱۰ گره در لایه مرزی (بیرون از ناحیه بینابینی) و در مدل k-ω وجود ۲ گره در ناحیه زیرلایه لزج ($y^+ < 5$) کافی بوده و استفاده از شبکه ریزتر، تأثیر چندانی در نتایج حاصل ندارد. بنابراین با استفاده از شبکه‌بندی موجود در جدول ۴ می‌توان به بحث در باره مدل مناسب آشفتگی پرداخت. بدین منظور، پروفیل‌های سرعت در امتداد کانالهای اصلی و جانبی در مقاطع مختلف برای دو مدل آشفتگی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است (شکل ۵).

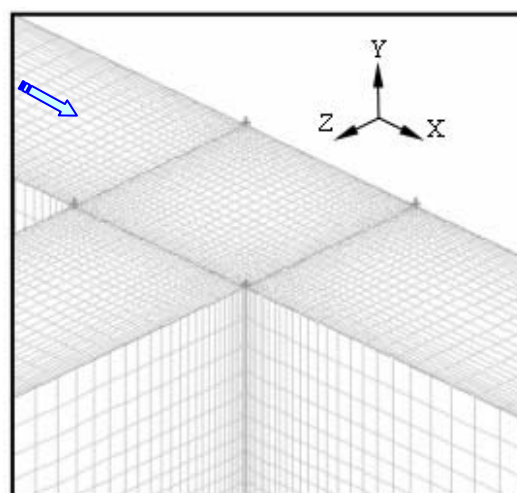
مقایسه نتایج حاصل نشان می‌دهد که دقت هر دو مدل در پیش‌بینی میدان جریان در طول کانال مستقیم بسیار خوب است، به طوری که حداکثر خطا در مقطع m_3 رخ داده و برای دو مدل مورد استفاده، به ترتیب برابر ۱۰٪ و ۶٪ است. با توجه به شکل ۵، تا فاصله‌ای قبل از ورودی آبگیر، پروفیل سرعت حالت گسترش یافته خود را حفظ می‌کند (مقطع m_1) و با نزدیک شدن به دهانه ورودی آبگیر، به دلیل فشار مکشی اعمالی از طرف آبگیر، پروفیل‌های سرعت به سمت کانال انشعاب منحرف شده و سرعت حداکثر به طرف دهانه آبگیر (مقطع m_2) جابه‌جا می‌شود.

با ورود جریان به آبگیر، برآیند سرعت در طول دهانه آبگیر کاهش یافته و در دیوار پایین دست ورودی آبگیر (مقطع m_4)، سرعت حداکثر از دیوار داخلی کانال اصلی دور می‌شود. جریان باقی مانده در طول کانال اصلی، بعد از گذر از دهانه آبگیر، در داخل مقطع توسعه می‌یابد، اما به دلیل تأثیرات ناشی از انحنای خطوط جریان در دهانه آبگیر، حداکثر سرعت باز به طرف دیوار داخلی منحرف می‌شود. در مقطع m_3 ، بزرگ بودن مقادیر سرعت پیش‌بینی شده نسبت به مقدار آزمایشگاهی، به دلیل تأثیرات ناشی از جریان ثانویه حاصل از آشفتگی است.

در مدل k-ω، نیازی به استفاده از تابع دیوار نبوده و برای تمام نواحی میدان از توزیع لگاریتمی سرعت استفاده می‌شود و به همین دلیل، ناحیه زیرلایه لزج ($y^+ < 5.0$) نیز باید شبکه‌بندی شده و حداقل دو گره باید در زیرلایه لزج وجود داشته باشد:

$$y_1 = \frac{2}{5} \frac{V}{u_\tau} = 0.00015 \text{ m}$$

با توجه به مقادیر y_1 محاسبه شده، شبکه‌بندی میدان طوری تنظیم شده که در نواحی نزدیک دیوار و نواحی که تغییرات شدید پارامترهای جریان در آن نواحی وجود دارد (دهانه آبگیر) از شبکه ریزتری استفاده شده و در سایر نواحی شبکه درشت‌تر در نظر گرفته شده است (شکل ۴).

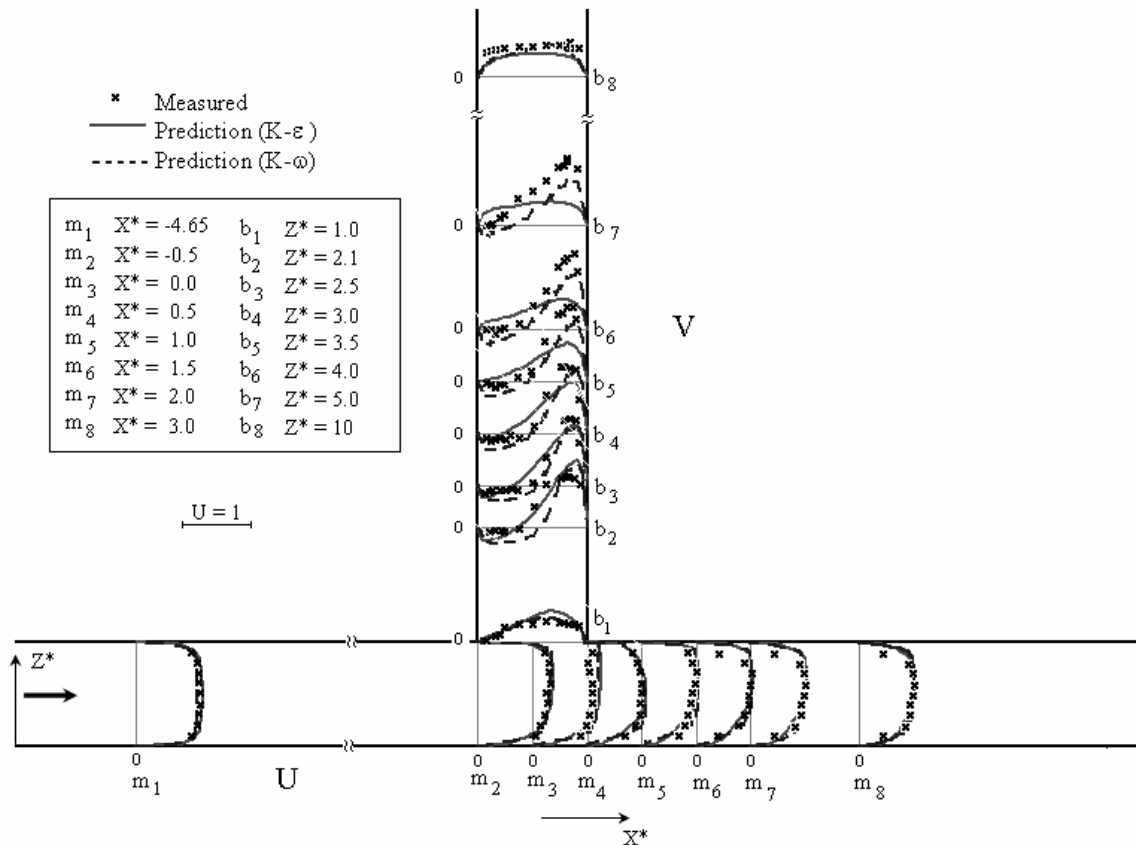


شکل ۴ شبکه‌بندی محاسباتی در ناحیه تقاطع

در جدول ۴ مشخصات هیدرولیکی (عدد رینولدز Re)، مدل آشفتگی مورد استفاده، تعداد گره‌ها (n) و فاصله اولین گره از دیوار (y_1) برای حالت‌های مختلف مورد نظر در واسنجی مدل نشان داده شده است.

جدول ۴ مشخصات هیدرولیکی و شبکه‌بندی مورد استفاده در واسنجی مدل

ردیف	مدل	Re	r	n	y_1
۱	k-ε	۴۹۶۰۰	۰/۳۱	۱۹۸۶۲۰	۰/۰۰۳۳
۲	k-ω	۴۹۶۰۰	۰/۳۱	۲۵۲۴۱۲	۰/۰۰۰۱۵



شکل ۵ مقایسه پروفیل‌های سرعت برای دو مدل آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی در امتداد کانالهای اصلی و انشعاب (مقادیر سرعت نسبت به سرعت حداکثر در مقطع m_1 بی‌بعد شده است)

و لزجت در آن ناحیه حاکم است- معتبر بوده و برای جریانهای با عدد رینولدز کم اعتبار چندانی ندارد. در چنین مواردی، مدل $k-\omega$ به علت استفاده از توزیع لگاریتمی برای پیش‌بینی سرعت در تمام نواحی میدان، نسبت به مدل $k-\epsilon$ عملکرد بهتری دارد.

نکته دیگر قابلیت مدل $k-\omega$ در پیش‌بینی نواحی متأثر از گرادیان معکوس فشار است [۷]. با توجه به توضیحات فوق، دلیل بالاتر بودن دقت مدل $k-\omega$ نسبت به مدل $k-\epsilon$ را در دو نکته زیر می‌توان دانست:

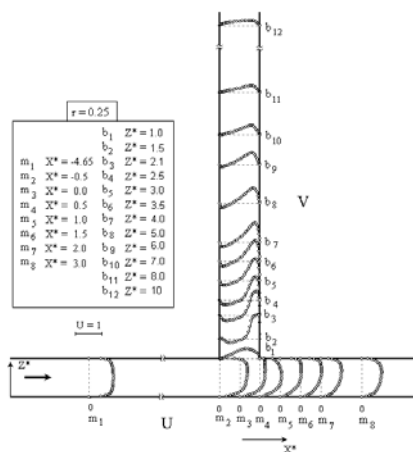
- توانایی مدل $k-\omega$ در پیش‌بینی جریانهای با عدد رینولدز کم به دلیل استفاده نکردن از تابع دیوار.
- قابلیت مدل $k-\omega$ در پیش‌بینی نواحی متأثر از گرادیان فشار معکوس.

مقایسه پروفیل‌های سرعت در طول آبگیر جانبی نشان می‌دهد که مدل $k-\epsilon$ در پیش‌بینی نواحی برگشتی از دقت خوبی برخوردار نبوده و ابعاد گردابه پیش‌بینی شده توسط این مدل کوچکتر از اندازه آزمایشگاهی است. مدل $k-\omega$ در پیش‌بینی ناحیه برگشتی جریان توانایی بهتری نسبت به مدل $k-\epsilon$ دارد.

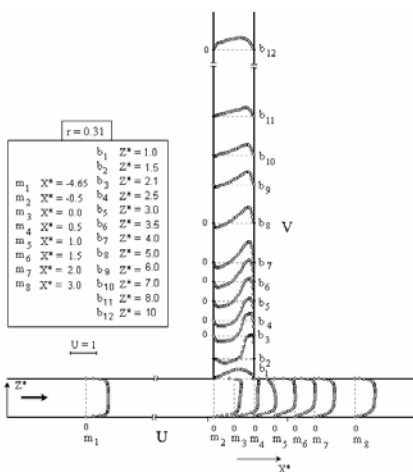
نتایج قبلی نشان داده است که برای نواحی از میدان با جریانهایی از نوع لایه مرزی- که تراکم ناپذیر بوده و تغییرات فشار در آن ناچیز است- در اعداد بالای رینولدز (نزدیک 10^6) هر دو مدل، توانایی خوبی در پیش‌بینی تنشهای برشی دیوار و سرعت متوسط جریان دارند و خطای پیش‌بینی در حدود ۵٪ است [۷].

در مدل $k-\epsilon$ ، به دلیل استفاده از تابع دیوار برای پیش‌بینی میدان جریان اطراف دیوار، فقط در جریانهای با عدد رینولدز بالا- که لایه مرزی ضخامت چندانی نداشته

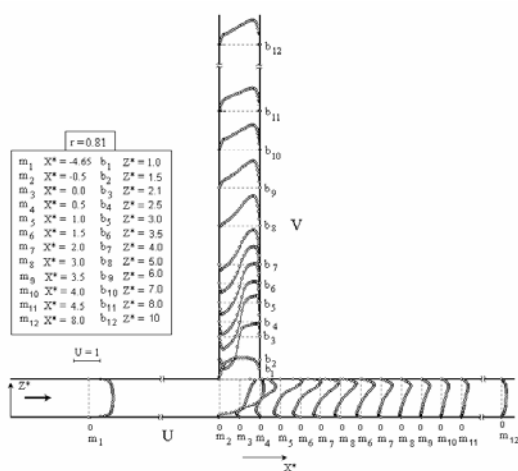
m_4 افزایش نسبت دبی باعث تشدید این پدیده شده و انحراف پروفیل سرعت به طرف دیوار سمت راست افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶ پروفیل سرعت در طول کانالهای اصلی و انشعاب برای نسبت دبی الف: $r=0.25$ ب: $r=0.31$ ج: $r=0.81$

به دلیل فرض لزجت گردابه‌ای هموزن در معادلات مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای، این مدل‌ها، دقت کافی در پیش‌بینی جریانهای پیچیده‌ای نظیر جریانهای ثانویه ناشی از آشفتگی را ندارند و علت عدم انطباق کامل نتایج حاصل از مدل $k-\omega$ با نتایج آزمایشگاهی می‌تواند همین موضوع باشد.

۷- مطالعه پارامتری

هدف از مطالعه پارامتری، بررسی تأثیر نسبت دبی بر الگوی جریان (شامل پروفیل‌های سرعت، ابعاد نواحی چرخشی، صفحه برشی، جریانهای ثانویه)، انتقال کیفی رسوب و توزیع تنش برشی دیوارها در دهانه آبگیر است. بدین منظور، برای سه نسبت دبی 0.25 ، 0.31 و 0.81 و سایر مشخصات یکسان با آزمایش اصلی و با بهره‌گیری از مدل $k-\omega$ ، میدان جریان حل شده است.

۷-۱- مقایسه پروفیل‌های سرعت

در شکل‌های ۶-الف تا ۶-ج پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده نسبت به سرعت پیشینه در مقطع عرضی m_1 در طول کانال اصلی و انشعاب برای سه نسبت دبی قبلی نشان داده شده است.

مقایسه پروفیل‌های سرعت در مقطع m_2 نشان می‌دهد که با افزایش نسبت دبی، انحراف پروفیل سرعت به سمت دهانه آبگیر شدیدتر شده و پروفیل گسترش یافته در مقطع مستقیم بالادست، حالت تقارن خود را از دست می‌دهد، به نحوی که در نسبت دبی 0.81 به علت انحراف شدید این پروفیل به سمت آبگیر و افزایش سرعت در دهانه آن، پدیده جدایی در دیوار راست کانال اصلی روی می‌دهد. در مقطع m_3 بین دو نسبت دبی 0.25 و 0.31 تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود، اما در نسبت دبی 0.81 ناحیه جداشدگی به‌خوبی نمایان شده و برگشت جریان مشهود است. با گذر از دهانه آبگیر، برآیند سرعت در امتداد دهانه آبگیر کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در مقطع

گوشه بالادست ورودی تشکیل شده که جهت چرخش این دو گردابه خلاف یکدیگر است. تشکیل این گردابه می‌تواند ناشی از وجود گوشه ۹۰ درجه انشعاب و مومتم شدید جریان در جهت کانال اصلی باشد (شکل ۸).

خطوط تقسیم جریان در شکلهای مزبور با علامت (SL) مشخص شده است. نگاهی به سه شکل اول نشان می‌دهد که با افزایش نسبت دبی، فاصله خط تقسیم جریان از دیوار داخلی کانال اصلی بیشتر می‌شود.

نگاهی به خطوط جریان نزدیک بستر نشان می‌دهد که تمام ذرات نزدیک بستر - که از بالادست کانال اصلی به آبگیر نزدیک می‌شود - از سمت گوشه بالادست ورودی به طرف آبگیر کشیده شده و در یک نقطه مشترک (نقطه F_s) به هم می‌رسند. نقطه مزبور به نقطه تکین^۱ خطوط جریان معروف است [۱]. در چنین نقاطی مقدار تنش برشی برابر با صفر بوده و محلی است که ناحیه چرخشی A (شکل ۱) شروع می‌شود. در این نقطه ذرات رسوبی به دام افتاده و به دلیل نبود تنش برشی و سرعت پایین جریان، ته‌نشین شده و باعث تشکیل پشته‌های ماسه‌ای می‌شود. با توجه به جهت خطوط جریان در مقابل دهانه، علاوه بر ذرات بالادست، ذرات مقابل دهانه و حتی تا فاصله‌ای پایین دست دهانه نیز به طرف نقطه مزبور کشیده می‌شود. ناحیه متأثر از این پدیده در پایین دست ورودی آبگیر، بستگی به قدرت جریان ثانویه و محدوده تحت تأثیر آن در طول کانال اصلی دارد و در قسمت مربوط به قدرت جریان ثانویه بررسی خواهد شد. برای هر سه نسبت دبی مورد مطالعه، وجود نقطه‌ای که با علامت S در گوشه پایین دست ورودی آبگیر مشخص شده است، مشهود است.

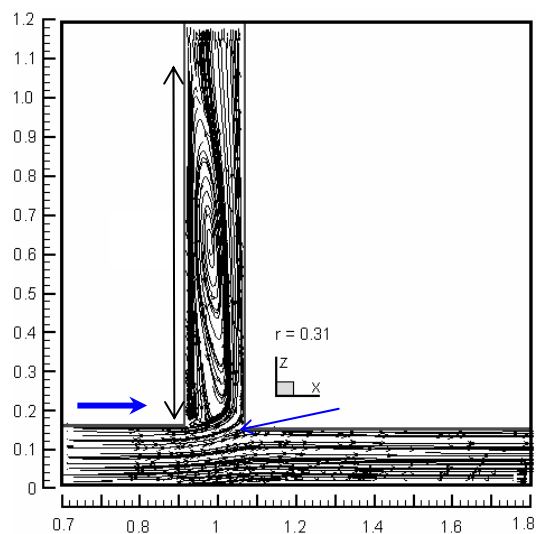
تأثیر پدیده مزبور در نسبت دبی ۰/۲۵ بعد از گذر از مقطع m_4 حذف شده ولی برای نسبت دبی ۰/۳۱ تا مقطع m_5 ادامه دارد.

در نواحی پایین دست، بعد از گذر از ناحیه دهانه آبگیر، جریان تمایل به توسعه در کل عرض کانال داشته و به دلیل تأثیرات ناشی از انحنا خطوط جریان در دهانه، محل وقوع بیشینه سرعت به طرف دیوار داخلی کانال اصلی منحرف می‌شود. برای نسبت دبی ۰/۸۱ ناحیه برگشتی در عرض کانال توسعه یافته و در مقطع m_5 حداکثر انقباض را ایجاد می‌کند. تنگ‌شدگی مقطع باعث افزایش سرعت در ناحیه مقابل می‌شود، به طوری که در مقطع m_5 سرعت در نزدیکی دیوار داخلی به حداکثر مقدار خود رسیده و به تدریج با کم شدن عرض ناحیه جدایی، از سرعت جریان در ناحیه مقابل نیز کاسته می‌شود. مقایسه پروفیل‌های سرعت در طول آبگیر نشان می‌دهد که برای دو نسبت دبی اول، تغییر چندانی در الگوی جریان روی نداده و نواحی گردابه‌ای ایجاد شده، شباهت زیادی با یکدیگر دارند اما برای نسبت دبی ۰/۸۱، ابعاد ناحیه برگشتی کاهش می‌یابد. نگاهی به پروفیل b_2 نشان می‌دهد که ناحیه سرعت مثبت حالت یکنواخت‌تری نسبت به دو حالت قبلی دارد.

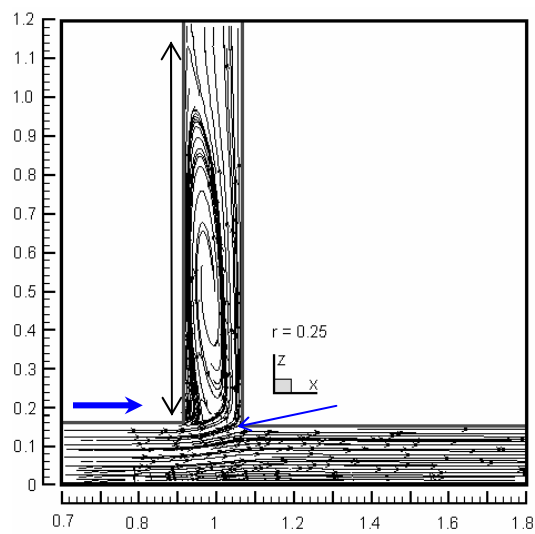
۷-۲- مقایسه خطوط جریان

در شکل ۷ خطوط جریان برای نسبت‌های مختلف دبی نشان داده شده است. سه شکل اول مربوط به خطوط جریان در سطح آب بوده و سه‌تای بعدی نشان دهنده خطوط جریان در نزدیکی بستر است. در شکلهای مزبور ساختار صفحه تقسیم جریان، نواحی جدایی و چرخشی و ساختار پیچیده خطوط جریان در نزدیکی بستر مشهود است. با مقایسه شکلهای ۷-الف تا ۷-ج مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت دبی، طول گردابه داخل آبگیر کوتاهتر شده و از عرض آن کاسته می‌شود. برای دو نسبت دبی اول، در طول آبگیر علاوه بر گردابه اصلی یک گردابه دیگر نیز در

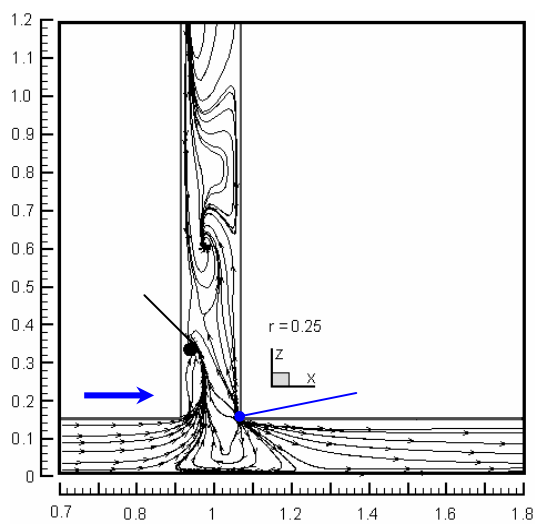
1. Singular
2. Saddle point



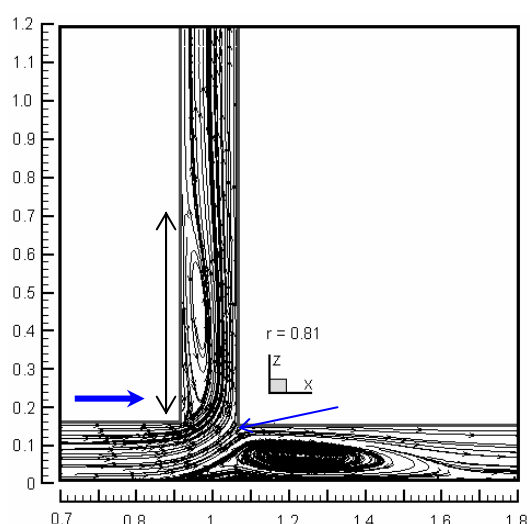
(ب)



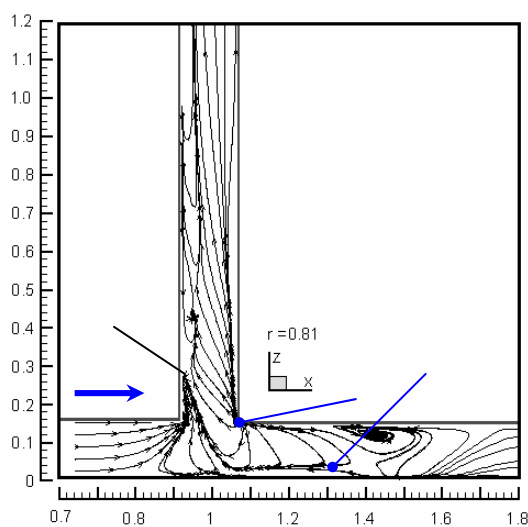
(الف)



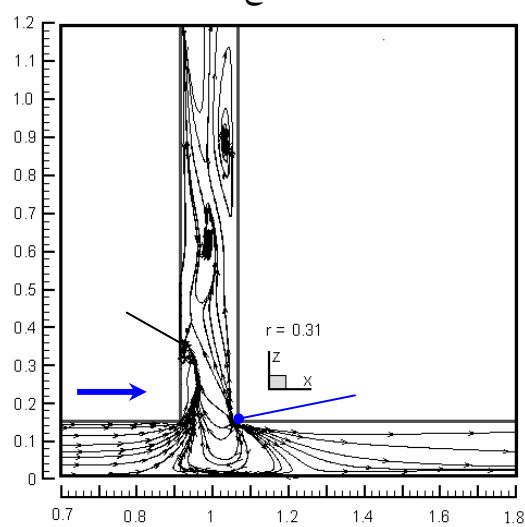
(د)



(ج)

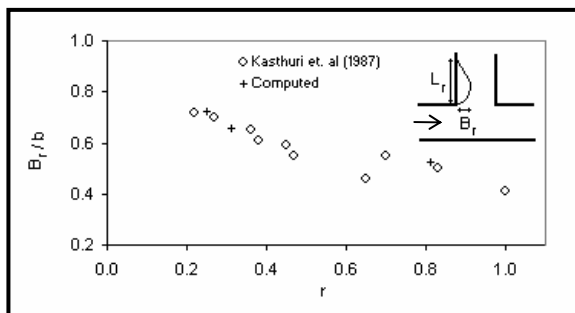


(ز)



(ه)

شکل ۷ خطوط جریان در دهانه آبگیر برای سه نسبت دبی: الف- ۰/۲۵- سطح آب، ب- ۰/۳۱- سطح آب، ج- ۰/۸۱- سطح آب، د- ۰/۲۵- نزدیک بستر، ه- ۰/۳۱- نزدیک بستر، و- ۰/۸۱- نزدیک بستر.



شکل ۹ مقایسه عرض گردابه حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی کاستوری و همکاران [۹]

۷-۳- جریان ثانویه

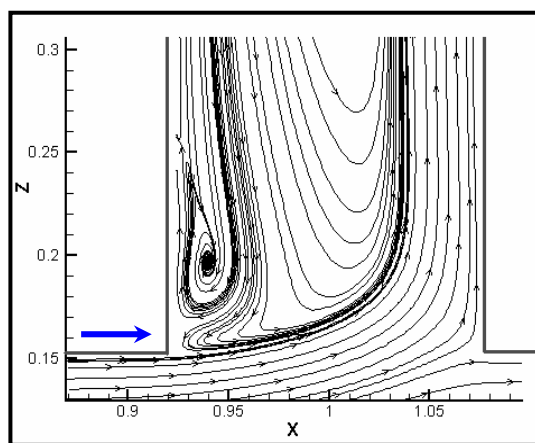
به دلیل وجود صفحه تقسیم جریان و ناحیه چرخشی A در داخل آبگیر، محدوده ورودی آبگیر شبیه به یک قوس عمل کرده و باعث تشکیل جریان ثانویه ساعتگرد در طول کانال انشعاب می‌شود. چنین جریان‌هایی عامل اصلی انتقال رسوب از بستر کانال اصلی به طرف ناحیه چرخشی A بوده و بحث در باره انتقال رسوب در چنین میدانی، مستلزم شناخت دقیق الگوی جریان ثانویه است.

در شکل ۱۰ بردارهای سرعت ثانویه در دهانه ورودی آبگیر برای سه نسبت دبی نشان داده شده است. لازم است ذکر شود که برای وضوح بیشتر شکلها، نتایج حاصله فقط تا ارتفاع ۵ سانتیمتری بالای بستر نشان داده شده است.

با توجه به این شکلها، وجود سلول چرخشی در ناحیه نزدیک بستر مشهود است. با افزایش نسبت دبی، ناحیه متاثر از سلول چرخشی مزبور گسترش یافته و بر اندازه بردارهای سرعت افزوده می‌شود. مرکز تغییر جهت بردارهای سرعت به طرف بالا جابه‌جا شده و در نتیجه، محدوده متاثر از جریان ثانویه در عمق افزایش یافته و بر قدرت جریان برگشتی (جریانی در خلاف جهت جریان اصلی که از گوشه پایین دست دهانه ورودی در نواحی نزدیک بستر تشکیل می‌شود) افزوده می‌شود.

این نقطه به نقطه زینی^۳ معروف بوده و نکته قابل توجه، ارتباط این نقطه با نقطه تکین داخل آبگیر (F_s) است [۱]. به طوری که این نقطه منشأ خطوط جریانی است که باعث انتقال رسوبات جلوی دهانه آبگیر به طرف نقطه تکین داخل آبگیر می‌شود. در شکل ۷-و خط جریان نشان داده شده با علامت X بیانگر وجود ارتباط بین دو گردابه در نسبت دبی ۰/۸۱ است. برای هر سه حالت، در ورودی آبگیر خطوط جریانی وجود دارد که از دیوار سمت راست آبگیر به طرف دیوار مقابل امتداد دارند.

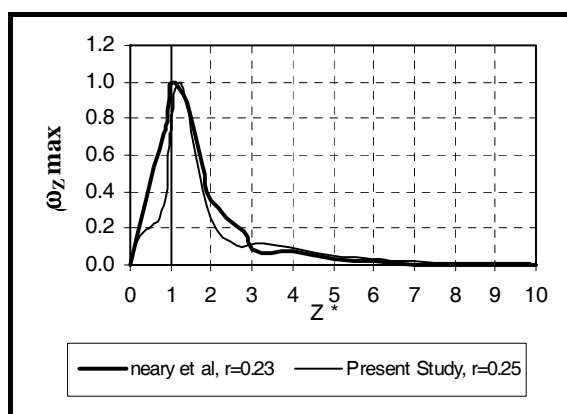
خطوط مزبور نشان دهنده جریان‌هایی هستند که در ترازهای بالاتر وارد آبگیر شده و پس از برخورد به دیوار سمت راست به طرف بستر منحرف شده و بر اثر ترکیب با جریان ثانویه ساعتگرد موجود در دهانه آبگیر، باعث تشکیل جریان حلزونی می‌شود که در طول آبگیر امتداد می‌یابند.



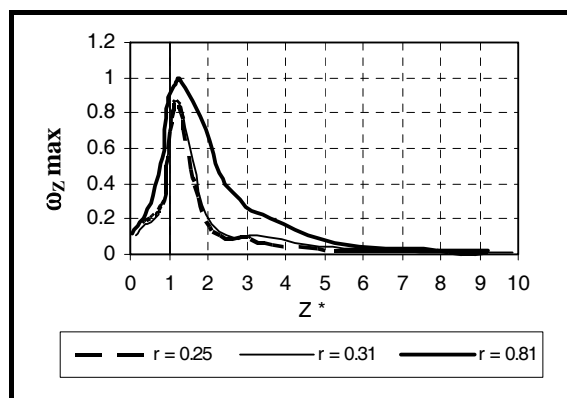
شکل ۸ وجود گردابه ثانویه در گوشه بالادست ورودی آبگیر برای نسبت دبی ۰/۲۵

در شکل ۹ برای بررسی صحت نتایج حاصل عرض بی‌بعد شده گردابه A با نتایج آزمایشگاهی کاستوری و همکاران مقایسه شده است [۹]. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

با توجه به این شکل، روند رشد و استهلاك جریان ثانویه انطباق بسیار خوبی با نتایج نیروی و همکاران دارد. این شکل نشان می‌دهد که جریان ثانویه در عرض کانال اصلی ($Z^* = 0 \sim 1$) به تدریج رشد کرده و در نزدیکی دهانه آبیگر به حداکثر قدرت خود می‌رسد. بعد از گذر از ناحیه دهانه، از قدرت آن کاسته شده و در نهایت به صفر میل می‌کند. در شکل ۱۱-ب تغییرات قدرت جریان ثانویه برای نسبت‌های مختلف دبی در طول کانال انشعابی رسم شده است.



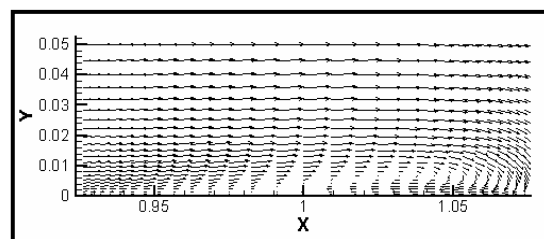
(الف)



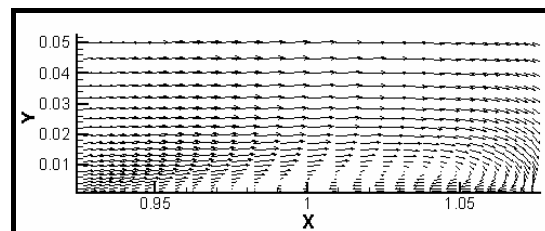
(ب)

شکل ۱۱ مقایسه قدرت جریان ثانویه الف- برای نسبت دبی ۰/۲۵ با نتایج نیروی و همکاران؛ ب- بین سه نسبت دبی مورد مطالعه

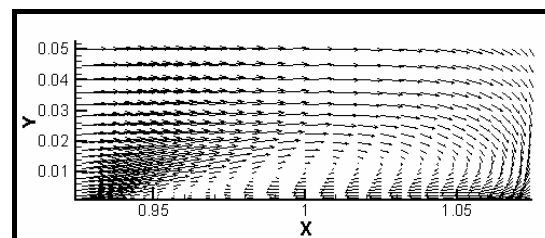
در این منحنی، مقادیر حداکثر در هر مقطع عرضی، نسبت به مقدار حداکثر در نسبت دبی ۰/۸۱ بی‌بعد شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

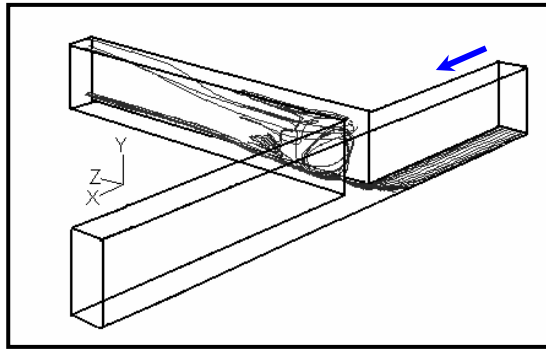
شکل ۱۰ بردارهای سرعت ثانویه در مقطع ورودی آبیگر برای نسبت دبی الف: $\Gamma = 0/25$ ؛ ب: $\Gamma = 0/31$ و ج: $\Gamma = 0/81$.

قدرت چرخش سلول مزبور (قدرت جریان ثانویه)، توسط پارامتری موسوم به ورتیسیته^۱ بیان می‌شود که بر طبق تعریف، عبارت است از مقدار چرخش داخل صفحه برای اضلاع المانی به ابعاد $(\Delta x \times \Delta y)$ در خلاف جهت چرخش عقربه‌های ساعت. پارامتر مزبور با رابطه

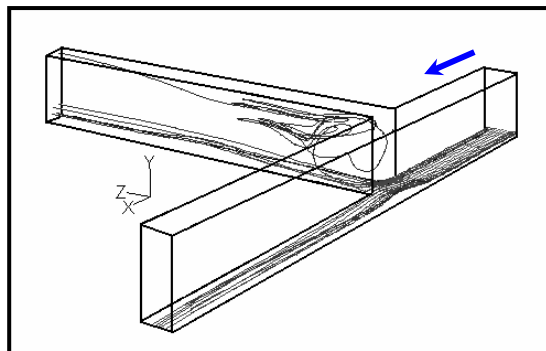
$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

این پارامتر برای نسبت دبی $\Gamma = 0/25$ در طول آبیگر محاسبه شده و مقادیر بیشینه هر مقطع نسبت به مقدار بیشینه در طول کانال بی‌بعد شده است. در شکل ۱۱-الف نتایج حاصل با نتایج مدل عددی نیروی و همکاران مقایسه شده است [۲].

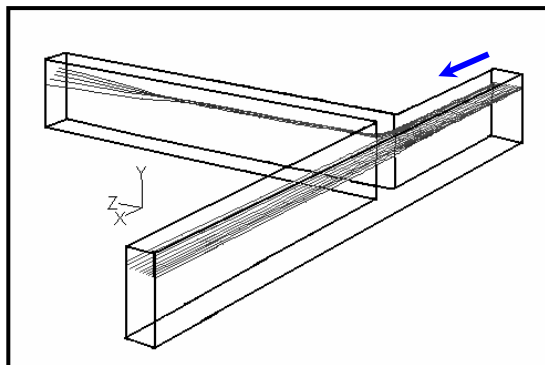
1. Vorticity



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲ الگوی سه بعدی حرکت ذرات در صفحات:

الف - $Z^* = 0/006$ - ب - $Z^* = 0/065$ - ج - $Z^* = 1/007$

۷-۵- بررسی تنش برشی دیوارها و پیش‌بینی نواحی آبستگي

در شکل ۱۳، کانتورهای تنش برشی بستر برای سه نسبت دبی و در دهانه آبگیر و بستر کانالهای اصلی و فرعی برای نسبت دبی $\tau = 0/25$ نشان داده شده است. از این شکلها می‌توان برای پیش‌بینی نواحی آبستگي و رسوبگذاری استفاده کرد. با توجه به این شکل وجود ۴ ناحیه مشخص قابل مشاهده است:

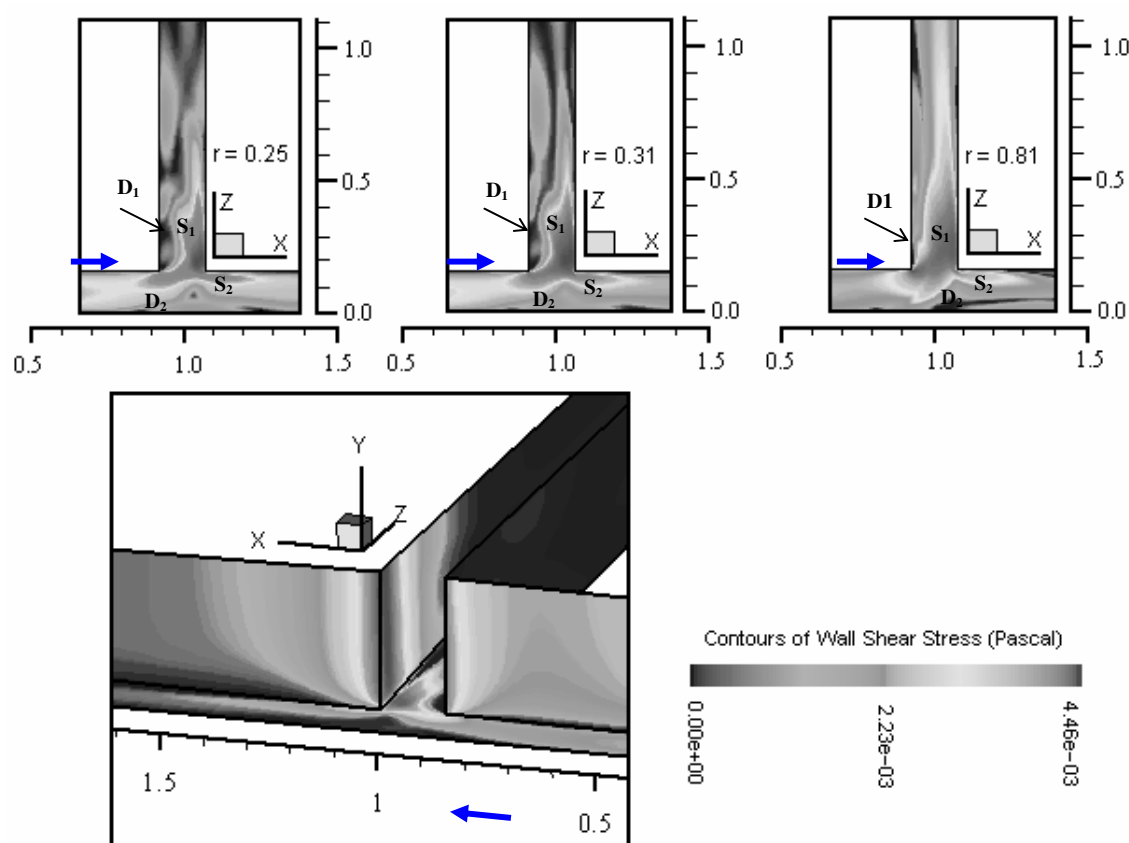
با توجه به این شکل، با افزایش نسبت دبی، قدرت جریان ثانویه افزایش یافته و محل وقوع حداکثر قدرت از دهانه آبگیر ($Z^* = 1$) دور می‌شود.

۷-۴- بررسی کیفی نحوه انتقال رسوب

در شکل‌های ۱۲-الف تا ۱۲-ج نحوه حرکت ذرات تزریق شده از مقطع ورودی در سه تراز مختلف برای نسبت دبی $\tau = 0/25$ نشان داده شده است. نحوه تزریق ذرات بدین صورت بوده که در هر تراز، ذرات با قطر متوسط $0/01$ میلی‌متر در کل عرض مقطع ورودی کانال اصلی و با سرعت برابر با سرعت جریان به سیستم وارد می‌شود. شکل ۱۲-الف گویای این است که تمامی ذرات نزدیک بستر، از گوشه بالادست ورودی، به آبگیر وارد شده و در ناحیه چرخشی به دام می‌افتند. در شکل ۱۲-ب ذرات نزدیک شده به دهانه ورودی به دو قسمت تقسیم شده و باز درصد بیشتری از جریان به آبگیر وارد می‌شود. ناحیه برجسته موجود در دیوار سمت چپ کانال اصلی نشان دهنده قدرت بالای جریان ثانویه در ترازهای پایین و تأثیر آن در انتقال ذرات به طرف آبگیر است، به طوری که در ترازهای بالاتر (شکل ۱۲-ج) چنین پدیده‌ای مشاهده نشده و قسمت اعظم جریان در کانال اصلی بعد از انشعاب ادامه می‌یابد.

وجود چنین الگویی با توجه به شکل ۱۰-الف و عمق متأثر از جریان ثانویه قابل توجه است.

نقش جریان ثانویه در انتقال ذرات نزدیک بستر به داخل ناحیه A شبیه نقش این جریان در انتقال ذرات نزدیک بستر در یک قوس رودخانه از دیوار خارجی به سمت دیوار داخلی است. با توجه به این سه شکل، فاصله صفحه تقسیم جریان از دیوار سمت چپ کانال اصلی، از بستر به طرف سطح آب کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳ توزیع تنش برشی محاسباتی در دهانه آبگیر با استفاده از مدل آشفتگی k- ω

نسبت دبی، ابعاد ناحیه S_1 افزایش یافته و ناحیه تحت تأثیر آن در طول آبگیر و بالادست ورودی افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که در نسبت دبی بالا، حجم بیشتری از رسوبات بستر به آبگیر وارد شوند. برخلاف ناحیه S_1 ، افزایش دبی ورودی به آبگیر، باعث کاهش ابعاد ناحیه D_1 شده و در نتیجه برای نسبتهای بالای دبی، با وجود ورود حجم قابل توجهی از رسوبات رودخانه به داخل آبگیر، درصد ناچیزی از آن در ناحیه A ته نشین خواهند شد. ناحیه D_2 با افزایش نسبت دبی کاهش یافته و در نسبتهای دبی زیاد، تحت تأثیر ناحیه سکون مقابل دهانه آبگیر در امتداد دیوار بیرونی کانال اصلی قرار می‌گیرد. ناحیه S_2 به علت وجود جریان ثانویه در این ناحیه و نیز جریان رو به پایین شدید در آن تشکیل شده و با افزایش نسبت دبی، ابعاد این ناحیه افزایش می‌یابد. عباسی در

۱- ناحیه S_1 با تنش برشی بسیار بالا که به شکل خنجر است. وقوع آبشستگی در این ناحیه حتمی بوده و ذرات بستر جابجا خواهند شد.

۲- ناحیه D_1 با تنش برشی پایین که منطبق با ناحیه چرخشی A است. وقوع رسوبگذاری در این ناحیه حتمی است.

۳- ناحیه S_2 با تنش برشی نسبتاً بالا که می‌تواند باعث ایجاد حفره آبشستگی در پایین دست دهانه شود.

۴- ناحیه D_2 با تنش برشی پایین که منطبق با ناحیه زینی اشاره شده در خطوط جریان می‌باشد. در این ناحیه در صورتی که مؤلفه قائم سرعت زیاد نباشد، امکان وقوع رسوبگذاری و تشکیل پشته ماسه‌ای وجود دارد. با مقایسه چهار ناحیه مزبور، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش

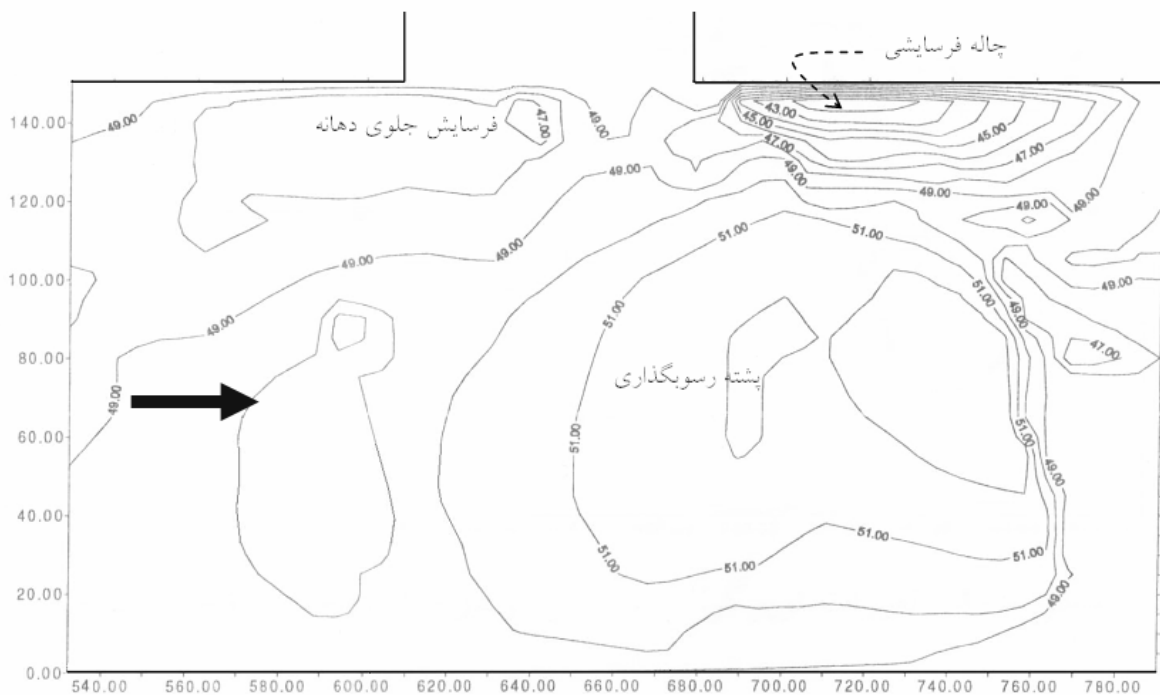
۸- نتیجه گیری

مدلسازی عددی جریان آشفته در آبیگری جانبی از مسیر مستقیم به صورت سه بعدی انجام و نتایج زیر حاصل شده است:

- ۱- توانایی مدل آشفتگی $k-\omega$ در پیش بینی نواحی چرخشی و جدایی جریان بهتر از مدل $k-\epsilon$ است.
- ۲- با افزایش نسبت دبی، ابعاد ناحیه برگشتی کاهش یافته و فاصله صفحه تقسیم جریان از دیوار داخلی کانال اصلی افزایش می یابد. برای نسبت دبی $0/81$ جدایی جریان در نزدیکی دیوار بیرونی کانال اصلی روی می دهد.
- ۳- با توجه به خطوط جریان نزدیک بستر، برای تمامی حالتها، وجود دو نقطه کانونی و زینی مشهود است. نقطه کانونی به عنوان محل تله اندازی رسوبات و نقطه زینی به عنوان منشأ جریان برگشتی جلوی دهانه به طرف نقطه کانونی عمل می کند.

سال ۱۳۸۲ در تحقیقات آزمایشگاهی خود، وجود چنین ناحیه ای را گزارش کرده است [۱۰]. در شکل ۱۴ توپوگرافی بستر تغییر یافته در یکی از آزمایشهای عباسی نشان داده شده است. با توجه به شکل مزبور نواحی فرسایشی مقابل دهانه و نیز پایین دست دهانه و نیز ناحیه متناظر با D_2 به صورت پشته رسوبی، کاملاً مشهود است. لازم است ذکر شود که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ توانایی پیش بینی نواحی S_2 و D_2 را ندارد.

با توجه به شکل سه بعدی توزیع تنش برشی در دهانه آبیگر (شکل ۱۳)، گوشه پایین دست ورودی انشعاب از تنش برشی بالایی برخوردار بوده و احتمال فرسایش آن وجود دارد. وجود این ناحیه می تواند ناشی از انقباض موضعی متأثر از منطقه A و در نتیجه گرادبان شدید سرعت در ناحیه مقابل باشد.



شکل ۱۴ توپوگرافی بستر متحرک برای شرایط $Q=82/4 \text{ lit/s}$ ، $h_0=0/13 \text{ m}$ ، $r=0/18$

در کار عباسی تراز اولیه بستر برابر $48/8$ بوده است [۱۰]

[2] Neary V. and Sotiropoulos F.; "Numerical Investigation of Laminar Flows Through 90-degree Diversion of Rectangular Cross-Section"; *Comp. and Fluids*, 25(2); 1996; pp. 95-118.

[3] Shettar A., and Murthy K.; "A Numerical Study of Division of Flow in Open Channels"; *J. Hydr. Res.*, 34(5); 1996; pp. 651-675.

[4] Issa, R.I and Oliveira, P.J.; "Numerical Prediction of Phase Separation in Two-phase Flow through T-junction." *Comp. and Fluids*. 23(2); 1994; pp. 347-356.

[5] Neary V., and Odgaard J.; "Three-Dimensional Flow Structure at Open Channel Diversions."; *J. Hydr. Engrg. ASCE*, 119(11); 1993; pp. 1224-1230.

Barkdoll B.; "Sediment Control at Lateral Diversion"; PhD dissertation, Civil and Environmental Engineering, University of Iowa; 1997.

[7] Celik I.B.; "Introductory Turbulence Modeling"; Western Virginia University; 1999.

[8] Fluent Inc.; "FLUENT User's Guide"; Fluent, New Hampshire; 1993.

[9] Kasthuri, B., and Pundarikanthan, N.V.; "Discussion of Separation Zone at Open Channel Junction"; *J. Hydr. Engrg, ASCE*, 113(4); 1987; pp.543-544.

[۱۰] عباسی، علی اکبر؛ "مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب در آبیگری جانبی از مسیر مستقیم"؛ رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۸۲.

۴- با افزایش نسبت دبی، بر قدرت جریان ثانویه در طول آبیگر افزوده شده و محل وقوع حداکثر قدرت از دهانه به طرف پایین دست کانال آبیگر جابجا می شود.

۵- نگاهی به الگوی سه بعدی جریان نشان می دهد که تمامی ذرات نزدیک بستر - که از کانال بالادست به دهانه نزدیک می شوند - به طرف آبیگر منحرف می شود، اما برای ترازهای بالاتر، قسمت اعظم جریان در کانال اصلی جاری می شود.

۶- کانتورهای تنش برشی بستر و دیوار معیار مناسبی برای پیش بینی نواحی آبشستگی و رسوبگذاری است. احتمال وجود یک حفره آبشستگی در داخل آبیگر (ناحیه S_1)، ناحیه رسوبگذاری (ناحیه D_1) و یک حفره آبشستگی گوشه پایین دست ورودی آبیگر (ناحیه S_2)، برای تمامی حالتها وجود دارد.

۷- با توجه به الگوی تنش برشی در بستر و دیوارهای اطراف دهانه گوشه پایین دست ورودی، به حفاظت ویژه ای در مقابل فرسایش و تخریب نیاز دارد. با استفاده از این الگو می توان نواحی لازم برای حفاظت در برابر فرسایش در بالادست و پایین دست آبیگر را شناسایی کرد.

۱۰- منابع

[1] Neary V.; "Three-Dimensional Numerical Model of Lateral-Intake Inflows"; *J. Hydr. Engrg. , ASCE*, 125(2); 1999; pp. 126-140.