

Numerical Modeling of 3D Flow Pattern at Lateral Intake

SEYED MOHAMMAD HADI MESHKATI^{1*}, SEYED ALI AKBAR SALEHI²

1. Water Research Institute, Tehran, Iran

2. Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: Dec. 23, 2019- Revised: March. 27, 2020- Accepted: Apr. 12, 2020)

ABSTRACT

In this paper, using a 3D numerical model, the flow pattern at lateral intake was simulated. A three-dimensional finite volume model with standard $k-\varepsilon$ was developed to solve turbulence equations. In order to simulate the main and diversion channels, only one block with varied domain arrays was used. The Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations are solved in a curvilinear non-orthogonal coordinate system with collocated grid. Pressure correction algorithm of SIMPLE and convection schemes of Power Law are applied to the model. In addition, for velocity-pressure coupling; the Rhie and Chow method were used. Experimental data obtained from laboratory study is utilized to verify the model computations. The flow pattern at lateral intake with one-block numerical method was modeled. The numerically modeled results show acceptable agreement with the measured data and demonstrate the capability of the developed numerical model.

Keywords: Numerical Simulation; 3D Model; Lateral Intake.

شبیه‌سازی عددی الگوی جریان سه‌بعدی در آبیگری از کانال مستقیم

سید محمد هادی مشکاتی^{*}، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۲

۱. موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

۲. دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱/۲۴)

چکیده

در این پژوهش به‌وسیله یک مدل عددی سه‌بعدی، فرآیند آبیگری از کانال مستقیم شبیه‌سازی شد. این مدل معادلات ناویر استوکس را در سه بعد به‌طور کامل و با روش حجم محدود حل نموده و از مدل $k-\epsilon$ استاندارد برای حل معادلات آشفتگی استفاده می‌نماید. جهت شبیه‌سازی کانال اصلی و انحرافی تنها از یک بلوک محاسباتی به تغییر دادن تعداد سلول‌ها در جهت عرضی استفاده شده است. معادلات در شبکه منحنی الخط غیرمتعامد و جابجا نشده، منفصل شده‌اند. طرح انفصال توانی برای گسسته‌سازی پارامترهای مختلف معادلات و الگوریتم نیمه‌ضمنی جهت حل هم‌زمان میدان جریان و فشار به‌کار گرفته شده است. مدل حاضر با شبیه‌سازی الگوی پیچیده جریان در فرآیند آبیگری از کانال مستقیم مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل حاضر الگوی جریان را از منظر کیفی و نواحی جداشدگی و برگشتی به‌طور مناسبی شبیه‌سازی نموده است. همچنین خطای مدل‌سازی پروفیل‌های سرعت طولی در قیاس با داده‌های آزمایشگاهی در کانال اصلی به ترتیب در نواحی مجاور آبیگر و پایین دست آن در حدود $6/3\%$ و $10/9\%$ درصد و در کانال آبیگر و در خارج از محدوده افتادگی جریان در ابتدای آن به میزان $14/5\%$ درصد بوده است. این نتایج در مقایسه با نتایج مدل عددی مشابه توسط سایر محققین، بیانگر همخوانی قابل قبول بین نتایج به‌دست‌آمده از مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی بوده و نشان می‌دهد مدل حاضر قادر است بدون نیاز به برخی الزامات مربوط به روش‌های چندبلوکی، الگوی جریان در چنین جریان‌های پیچیده‌ای را با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی نماید.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، مدل سه‌بعدی، آبیگری از کانال مستقیم.

مقدمه

کانال فرعی، خطوط جریان به‌صورت منحنی شکل در می‌آید که این انحنا در مقابل دهانه تشدید می‌شود. در ترازهای نزدیک بستر به دلیل کم‌بودن مقادیر سرعت و تأثیرپذیری بیشتر نسبت به مکش آبیگر، انحنای خطوط جریان در مقابل دهانه نسبت به سایر ترازها قابل ملاحظه است. بنابراین محدوده تقسیم جریان در مقطع ۲-۲ در عمق متغیر بوده به‌طوری‌که در نزدیکی بستر نسبت به سطح آب دارای عرض بیشتری می‌باشد و با فاصله گرفتن از بستر و کاهش اثرات لایه‌مرزی در کانال اصلی تقریباً به حالت ثابت در می‌آید.

از سوی دیگر به‌واسطه عدم تعادل میان گرادیان فشار عرضی و نیروهای گریز از مرکز، جریان ثانویه‌ای در جهت عقب‌به‌های ساعت در آبیگر شکل می‌گیرد و یک ناحیه جدایی جریان در طول دیواره داخلی آن (ناحیه A) ایجاد می‌نماید. همچنین به دلیل کاهش سرعت در کانال اصلی و بعد از دهانه آبیگر، امکان شکل‌گیری یک ناحیه جداشدگی دیگر در طول دیوار خارجی کانال اصلی نیز وجود دارد (ناحیه B). ناحیه مذکور وابسته به نسبت عرض به عمق کانال و نسبت دبی انحرافی به مجموع

یکی از قدیمی‌ترین و درعین‌حال ارزان‌ترین روش‌های استفاده از آب رودخانه‌ها برای مصارف گوناگون ساخت آبیگرهای ثقلی می‌باشد. آبیگری از رودخانه با استفاده از نیروی ثقل که در گذشته به شکل شق نهر صورت گرفته، اکنون به یک سازه هیدرولیکی تکامل یافته با معیارهای طراحی تبدیل شده است. در این‌گونه آبیگرها، دهانه ورودی وظیفه مهم جذب و کنترل جریان منحرف شده از رودخانه و هدایت آن به داخل کانال آبیگر را بر عهده دارد. الگوی جریان در چنین شرایطی با توجه به سه‌بعدی و غیریک‌نواخت بودن آن کاملاً پیچیده است و اغلب موجب تشکیل نواحی تقسیم خطوط جریان، جداشدگی، جریان برگشتی و جریان‌های گردابی و چرخشی شده که نسبت دبی آبیگری را به شدت متأثر می‌سازد.

الگوی جریان آبیگرهای جانبی در شکل ۱ ترسیم شده است (Neary and Odgaard, 1993). همان‌گونه که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن جریان به دهانه آبیگر و به‌واسطه فشار مکشی انتهای

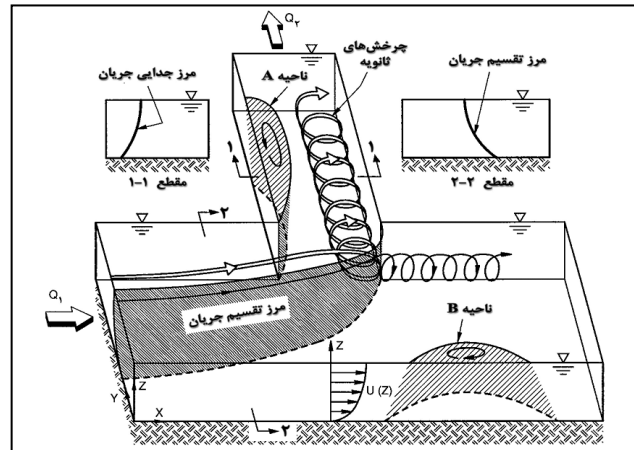
آزمایشگاهی تأثیر زبری بستر بر ساختار سه‌بعدی جریان در انحراف ۹۰ درجه با فرض عدد فرود کوچک و ثابت بودن عمق جریان پرداختند و در سال ۱۹۹۹ با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ فرآیند آبیگری را بدون در نظر گرفتن سطح آزاد به صورت عددی و سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند (Neary and Odgaard, 1999). در تحقیق دیگری محققین اقدام به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی مؤلفه‌های سرعت و تنش‌های آشفتگی داده‌های آزمایشگاهی در جریان اتصالی در کانال ۹۰ درجه پرداختند (Huang et al., 2002). Safarzadeh and Salehi (2006) فرآیند آبیگری از کانال مستقیم را به کمک نرم‌افزار فلوئنت بررسی کردند.

Ramamurthy et al. (2007) به بررسی آزمایشگاهی و عددی آبیگری از کانال مستقیم پرداختند. تحقیق مذکور با فرض یکسان بودن عرض انشعاب و کانال اصلی و با استفاده از مدل آشفتگی دومعادله‌ای انجام شده است. موسوی و گودرزی زاده نیز با استفاده از مدل تجاری فلوئنت به مدل‌سازی آبیگری از کانال مستقیم و بررسی الگوی جریان در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پرداختند (Musavi and Goudarzizadeh, 2012).

Karimi et al. (2015) آبیگری از کانال مستقیم را با استفاده از ANSYS-CFX و مدل آشفتگی دومعادله‌ای $k-\omega$ شبیه‌سازی نمودند. در این تحقیق با توجه به شبیه‌سازی الگوی جریان، محل قرارگیری جریان‌سنج جهت اندازه‌گیری جریان در آبیگر و خطای حاصل از آن بررسی شده است. در تحقیق دیگری با روش حجم کنترل و انفعال معادلات در آن، آبیگری از کانال مستقیم در چهار بلوک شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی برکدل مقایسه شده است (Ashari et al. 2015). همچنین محققین با به‌کارگیری مدل Flow-3D به شبیه‌سازی الگوی جریان در آبیگری از کانال مستقیم پرداختند. در این تحقیق از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG استفاده شد و نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است (Azimi et al. 2019).

با توجه به تحقیقات انجام‌شده قبلی و بررسی نقاط ضعف و قوت آن‌ها که به‌طور خلاصه بیان شد، اغلب مطالعات به شبیه‌سازی عددی جریان به‌صورت سه‌بعدی در آبیگر نپرداخته و یا از مدل‌های تجاری موجود استفاده نکرده‌اند. همچنین در تحقیقات انجام‌شده از روش‌های چندبلوکی جهت بررسی کانال انحرافی استفاده شده است. در این مقاله با یک مدل سه‌بعدی بومی، الگوی جریان در آبیگری از کانال مستقیم با استفاده از یک بلوک (برای شبیه‌سازی جریان در کانال اصلی و انحرافی) مدل‌سازی شد. بنابراین مدل حاضر به‌واسطه عدم نیاز به برخی

دبی می‌باشد و در شاخه‌های رودخانه طبیعی و انشعابات آن‌ها متداول است. این ناحیه جداشدگی به دلیل افزایش سرعت در سطح جریان در قیاس با نزدیک بستر از ابعاد کوچک‌تری برخوردار است و در برخی مواقع فقط در نزدیکی بستر شکل گرفته و در سطح از بین می‌رود.



شکل ۱- الگوی جریان سه‌بعدی آبیگری از کانال مستقیم

با عنایت به موارد فوق؛ بررسی چنین شرایط پیچیده‌ای در تعیین کارایی آبیگر حائز اهمیت است و به همین دلیل، فرآیند آبیگری از کانال‌ها همواره موردتوجه محققین مختلف بوده و تاکنون مطالعات متعددی در خصوص بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی این‌گونه جریان‌ها انجام گرفته است. Taylor (1944) برای اولین بار به بررسی آزمایشگاهی تقسیم جریان پرداخت و روش گرافیکی را برای تحلیل آن ارائه کرد. پس از آن در تحقیق دیگری؛ تقسیم جریان در کانال‌های با نسبت عرضی متفاوت را به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه شد و با توجه به تشکیل موج ایستا در نزدیکی انشعاب، این نوع جریان را به دو رژیم تقسیم‌بندی شد (Grace and Priest, 1958). در تحقیقات دیگری به کمک روش نگاشت و با فرض ثابت بودن عمق جریان به حل تحلیلی جریان در انشعاب پرداخته شده است (Tanaka, 1957; Milne, 1949; Murota, 1958). همچنین محققین رابطه‌ای برای ضریب اتلاف انرژی در جریان‌های انشعابی با فرض وابستگی ضریب تقسیم دبی به عدد فرود در کانال بالادست ارائه نمودند (Hager, 1992).

در خصوص شبیه‌سازی عددی این فرآیند می‌توان به تحقیقات (Chen and Lian, 1992; Shettar and Murthy, 1996) اشاره نمود. آن‌ها به مطالعه جریان دوبعدی آبیگر پرداختند و از معادلات متوسط‌گیری‌شده در عمق به همراه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده کردند. در تحقیق دیگری جریان اتصالی T شکل با مدل سه‌بعدی و مدل‌سازی آشفتگی دومعادله‌ای بررسی شد (Issa and Oliveira, 1994). نیری و اودگارد به بررسی

در این مدل و ذخیره مؤلفه‌های سرعت کارترین در محل گره‌های اسکالر به تبع آن، نیاز به درون‌یابی خاصی برای تخمین شار انتقالی در وجوه حجم کنترل می‌باشد که در این خصوص روش رای و چاو بکار رفته است (Rhie and Chow, 1983). همچنین برای انفصال ترم‌های مختلف جابجایی و پخش از روش توانی استفاده شده است (Patankar, 1980). لازم بذکر است برنامه‌نویسی در محیط Microsoft Visual Studio 2012 و با کامپایلر Intel Fortran XE 2013 انجام گرفته است.

اعمال شرایط مرزی

با توجه به بیضوی بودن معادلات حاکم لازم است شرایط مرزی در تمامی مرزهای دامنه محاسباتی معلوم شود. در مدل حاضر امکان بهره‌گیری از شرایط مرزی متنوعی فراهم و برحسب نیاز از آن‌ها استفاده شده است. در مرز ورودی برای معادل‌سازی با شرایط آزمایشگاهی، از جریان توسعه‌یافته استفاده شده است. بدین منظور و با توجه به توصیه‌های مراجع، جریان در کانالی مشابه با کانال اصلی (از نظر شبکه میدان در مقطع ولی بدون آبگیر) و با طولی در حدود ۱۰ برابر عمق جریان شبیه‌سازی شد و پارامترهای جریان و آشفتگی در خروجی آن به‌عنوان شرط مرزی ورودی برای مدل استفاده شد (Cengel and Cimbala, 2006).

در مدل حاضر از شرط مرزی گرادیان صفر برای مرز خروجی استفاده شده است. در خصوص مؤلفه‌های سرعت و جهت تسریع همگرایی، تصحیح دیگری برای ارضاء پیوستگی کلی میدان جریان صورت گیرد. بدین منظور مؤلفه‌های سرعت در مرز خروجی در نسبت کل جرم ورودی به جرم خروجی که با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از تکرار قبل محاسبه شده‌اند، ضرب می‌شود.

در مرز دیواره صلب، شار انتقالی عمود بر آن صفر بوده و به همراه شرط غیرلغزشی، شرایط مرزی سرعت روی دیواره را ایجاد می‌کند. برای در نظر گرفتن تنش برشی مرزهای صلب از تابع دیواره استفاده شده که به‌صورت ترم‌های چشمه در معادلات مومنتوم اعمال می‌شود. همچنین برای پارامترهای آشفتگی با توجه به برقراری تعادل منطقه‌ای از روابط ذیل استفاده می‌شود (Versteeg and Malalasekera, 1995).

زبری در محاسبه تنش برشی دیواره اعمال شده است.

$$\varepsilon = \frac{(c_\mu)^{\vee\vee} k_p^{\vee\vee}}{\kappa \Delta y_p} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$k = \frac{\rho (c_\mu)^{\vee\vee} k_p^{\vee\vee} u_p^+}{\Delta y_p} \quad (\text{رابطه ۸})$$

الزامات و تمهیدات روش‌های چندبلوکی (که در ادامه تشریح می‌شود)، شرایط ساده‌تری را برای بررسی میدان جریان فراهم ساخته و نیازمند زمان اجرای بسیار کمتری می‌باشد.

معادلات حاکم

معادلات ناویر استوکس بیان ریاضی الگوی هر نوع جریان سیالی در طبیعت می‌باشد. البته حتی با توجه به قدرت کامپیوترهای موجود در شرایط فعلی نیز حل کامل آن‌ها در مقیاس‌های کوچک مقرون‌به‌صرفه نبوده و لذا محققین فرض‌های ساده‌کننده‌ای را در این معادلات اعمال نموده‌اند تا متناسب با شرایط موردنظر جریان، جواب‌های قابل قبولی استخراج نمایند. معادلات مذکور در سیستم مختصات کارترین و در حالت متوسط‌گیری شده در زمان برای جریان‌های آشفته (معادلات رینولدز) به‌صورت ذیل می‌باشند (Rodi, 1980).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این معادلات $p, P = p/\rho + \nu k/3$ فشار پیزومتریک، k انرژی جنبشی آشفتگی و ν_i لزجت آشفتگی می‌باشد. در این تحقیق از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ برای شبیه‌سازی فرآیند آشفتگی استفاده شده که معادلات آن عبارتند از (Rodi, 1980):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \varepsilon \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن ν_i (ویسکوزیته آشفتگی) و G (ترم تولید آشفتگی) به‌صورت ذیل محاسبه می‌شوند.

$$\nu_i = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$G = \nu_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (\text{رابطه ۶})$$

ضرایب ثابت در معادلات اخیر به‌صورت ذیل می‌باشند.

$$c_1 = 1/44, c_2 = 1/92, c_\mu = 0.09, \sigma_k = 1/0, \sigma_\varepsilon = 1/3$$

انفصال معادلات و اعمال شرایط مرزی

انفصال معادلات حاکم

در مدل تهیه‌شده در این تحقیق، معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود و بر روی یک میدان جابجا نشده و در شبکه منحنی‌الخط غیرمتعامد گسسته‌سازی شده‌اند. از روش نیمه‌ضمنی SIMPLE برای حل هم‌زمان میدان سرعت و مؤلفه فشار استفاده شده است. با توجه به استفاده از شبکه جابجا نشده

سبب اصلاح کلیه محاسبات مربوط به پارامترهای میدان جریان و نحوه اعمال شرایط مرزی خواهد شد. البته این روش در برخی موارد نیازمند به کارگیری تمهیدات ویژه‌ای در این خصوص می‌باشد. به عنوان مثال جهت اعمال شرایط مرزی گره‌های گوشه در دهانه ورودی آبیگر لازم است از رفتار دوجانبه‌ای برای هر کدام از کانال‌های اصلی و آبیگر با توجه به مرز مربوط به آن استفاده نمود.

صحت‌سنجی مدل عددی

جریان در کانال مستقیم

جهت ارزیابی مدل حاضر ابتدا از آزمون استاندارد جریان در حفره^۱ استفاده شد و نتایج آن با تحقیقی مشابه که در آن از مدل تجاری Fluent استفاده شده است، مقایسه شد (Zhang and Li, 2008). در این آزمون یک کانال مستقیم با مقطع مربع به ضلع ۳۰ سانتی‌متر و طول ۴/۵ متر با جریان هوا مدل‌سازی شده است. سرعت جریان هوا در حالت یکنواخت در ورودی کانال، ۷ متر بر ثانیه می‌باشد.

جهت شبیه‌سازی جریان به وسیله مدل عددی حاضر، سعی شده است تا حد امکان از شرایط مشابه با تحقیق مرجع فوق استفاده شود. ابعاد کانال در مدل عددی حاضر ۰/۳×۰/۳×۱۰ متر تعریف شده است. قابل ذکر است از آنجایی که در تحقیق مرجع از مرز پرئودیک (به دلیل لزوم صرفه‌جویی در زمان محاسبات) برای شرط مرزی ورودی استفاده شده، در تحقیق حاضر طولی در حدود دو برابر طول اصلی کانال برای آن و به منظور اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان در محل خروجی در نظر گرفته شده است. شبکه محاسباتی دارای تعداد ۱۰۰، ۲۰ و ۲۰ سلول محاسباتی به ترتیب در جهات طول، عرض و عمق کانال بوده و به کمک ضریب کلاستر بندی ۱/۲ در نزدیکی دیوارهای طرفین ریز شد.

نتایج به دست آمده از مدل عددی حاضر و مدل تجاری فلونت در مقطع جریان توسعه‌یافته در انتهای کانال در شکل ۲ مقایسه شده است. این شکل خطوط هم‌سرعت جریان طولی مربوط به شبیه‌سازی عددی با مدل $k-\epsilon$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج مدل عددی حاضر از نظر کیفی و الگوی جریان طولی همخوانی بسیار خوبی با نتایج مدل عددی فلونت دارد. از نظر کمی سرعت‌های بیشینه در مقطع خروجی کانال در مدل عددی حاضر و فلونت به ترتیب ۸/۳۴ و ۸/۳۲ متر بر ثانیه به دست آمده که تفاوتی در حدود ۰/۲۵ درصد را نشان می‌دهد و حاکی از عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی جریان‌های ساده می‌باشد.

برای حالتی که اختلاف سطح آب کمتر از ده درصد عمق کل جریان باشد، استفاده از شرط مرزی تقارن برای سطح آب خطای چندانی در نتایج حاصله ایجاد نمی‌کند (Neary et al., 1999). با توجه به تغییرات ناچیز سطح آب، در این تحقیق نیز از شرط مرزی تقارن برای سطح آب استفاده شده که در آن شار عمود بر مرز و گرادیان سرعت‌های موازی با آن صفر فرض می‌شود. همچنین برای کاهش مقیاس طول آشفتگی، از رابطه ذیل جهت محاسبه ترم استهلاک انرژی جنبشی استفاده شده است (Rodi, 1980).

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{0.43h} \quad (\text{رابطه ۹})$$

نحوه مدل‌سازی آبیگر با روش تک‌بلوکی

جهت مدل‌سازی کانال اصلی و آبیگر (که محدوده‌های محاسباتی آن‌ها از چند ناحیه تشکیل شده است) می‌توان از روش‌های مختلفی از قبیل روش‌های چندبلوکی و تک‌بلوکی بهره‌گیری نمود. مهم‌ترین مزایا و معایب این دو روش عبارت‌اند از:

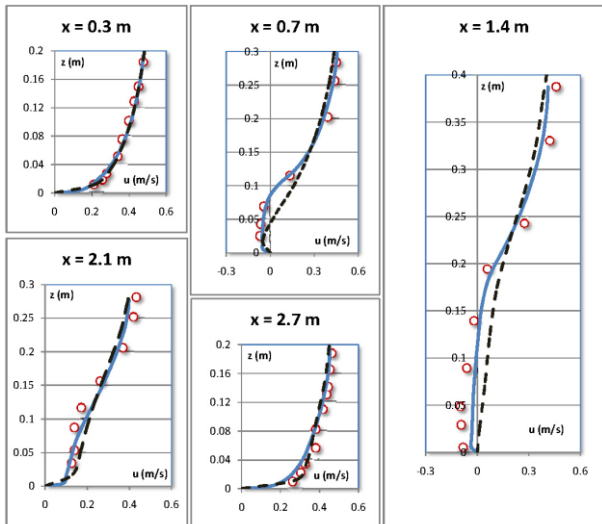
(۱) روش چندبلوکی با توجه به تعریف سلول‌های هاله نیازمند تکرار الگوریتم حل بوده که زمان همگرایی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد ولی روش تک‌بلوکی با توجه به عدم تعریف بلوک‌های مجزا از این موضوع مستثنا است. به عبارت دیگر این مسئله مهم‌ترین ضعف روش چندبلوکی در این قیاس می‌باشد.

(۲) در روش چندبلوکی ابعاد آرایه‌ها بیشتر می‌شود و برای تعریف جهت سیستم مختصات و پیوند دادن آدرس سلول‌ها به چند ماتریس کمکی نیاز خواهیم داشت. اما در روش تک‌بلوکی از آنجایی که با تمام سلول‌های بلوک‌های مختلف به صورت مشابه رفتار می‌شود، دیگر نیازی به افزودن ابعاد آرایه‌ها نیست.

(۳) اگرچه روش چندبلوکی، به‌طور ذاتی دارای قابلیت پردازش موازی است لیکن این امر متأثر از محدودیت‌هایی همچون لزوم تناسب تعداد گره‌ها در بلوک‌های مختلف می‌باشد. البته در روش تک‌بلوکی نیز می‌توان با به کارگیری الگوریتم‌های مناسب جهت حل دستگاه معادلات، امکان استفاده از پردازش موازی را فراهم نمود.

با عنایت به مزایای فوق، در مدل حاضر، انفصال محدوده محاسباتی با استفاده از روش تک‌بلوکی صورت پذیرفت. در این حالت ابعاد میدان در جهت عرضی (j) به صورت آرایه‌ای از شاخص طولی (i) در نظر گرفته می‌شود و در محدوده آبیگر جهت پوشش کانال انحرافی به مقدار موردنظر (مجموع تعداد گره‌های در عرض کانال اصلی و در طول کانال آبیگری) افزایش می‌یابد. این روند

مقایسه پروفیل‌های سرعت طولی با یکدیگر در شکل ۴ (۴) نمایش داده شده است. نقاط دایره‌ای، خطوط توپر و توخالی به ترتیب نمایانگر داده‌های آزمایشگاهی، نتایج مدل عددی در شبکه ریز و در شبکه درشت می‌باشد.



شکل ۴- مقایسه پروفیل سرعت طولی در مقاطع مختلف کانال به همراه ترانسه برای دو شبکه ریز و درشت

بررسی نتایج نشان می‌دهد که ریز شدن شبکه با افزایش دقت قابل توجهی در نتایج همراه می‌باشد؛ به طوری که در شبکه درشت و در مقطع سوم ($x=1/4$) جریان‌های برگشتی شبیه‌سازی نشده در حالی که جزئیات مذکور در شبکه ریز مدل‌سازی شده است. همچنین در سایر مقاطع نیز نتایج شبیه‌سازی عددی مخصوصاً در داخل ترانسه به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. مقادیر خطا (انحراف جذر میانگین مربعات) در مقاطع مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

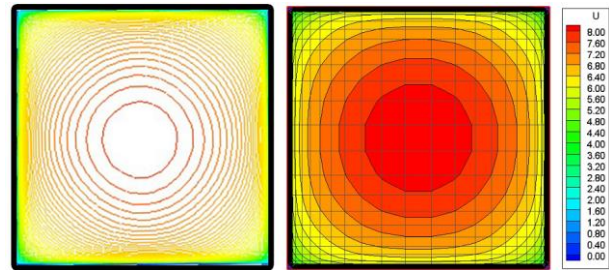
جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان

مقدار خطا	x=2.7	x=2.1	x=1.4	x=0.7	x=0.3
شبکه درشت	۲/۷	۳/۹	۹/۵	۶/۱	۱/۸
شبکه ریز	۲/۹	۲/۸	۴/۹	۱/۴	۱/۵

ارزیابی مدل در شبیه‌سازی آبریزی از کانال مستقیم

مشخصات میدان فیزیکی و محاسباتی

پس از صحت‌سنجی مدل عددی حاضر در جریان‌های ساده، این مدل برای هدف اصلی مقاله، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور به ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی میدان جریان در آبریزی از کانال مستقیم پرداخته شد و نتایج به‌دست‌آمده از آن با نتایج آزمایشگاهی برکدل مقایسه شد (Barkdoll, 1997). لازم به ذکر



شکل ۲- مقایسه نتایج خطوط هم‌سرعت طولی در کانال مستقیم در مدل عددی حاضر (راست) با فلونت (چپ)

جریان عبوری از روی ترانسه

آزمون دیگری که برای صحت‌سنجی مدل حاضر بکار گرفته شد، جریان عبوری از روی ترانسه^۱ دوزنقه‌ای شکل می‌باشد که نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شد (Alfrink and Rijn, 1983).

طول، عرض و عمق کانال آزمایشگاهی در این آزمون به ترتیب برابر ۱۷، ۰/۵ و ۰/۷ متر می‌باشد. پارامترهای میدان جریان در محل ورودی (سرعت‌ها و متغیرهای آشفتگی) به کمک معادلات لگاریتمی اعمال شده و بدین ترتیب فقط طولی معادل نیم متر در بالادست و پایین‌دست ترانسه شبیه‌سازی شده است. پروفیل سرعت افقی و مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی و استهلاك آن در راستای عمودی در مرز ورودی با توجه به روابط ذیل به مدل عددی اعمال شده است.

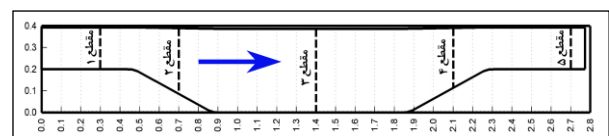
$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}} \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

در روابط فوق H ، u_* و z به ترتیب عمق جریان در ورودی، سرعت برشی و فاصله از کف می‌باشد و مقادیر C_μ ، u_* ، z_0 با توجه به داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۰۲۹ متر بر ثانیه، ۰/۰۰۶۷ متر برآورد شده‌اند (Alfrink and Rijn, 1983).

انفصال میدان محاسباتی در دو شبکه درشت (در شبکه محاسباتی بدون کلاستر بندی و شامل $100 * 10 * 10$ گره) و ریز (شامل $100 * 10 * 20$ گره با ضریب کلاستر بندی $1/2$) انجام گرفته است. نتایج مدل حاضر در ۵ مقطع مطابق شکل ۳) با داده‌های آزمایشگاهی آفرینک و راین مقایسه شده است.



شکل ۳- دامنه محاسباتی و مقاطع مورد نظر جهت مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی حاضر

جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی جریان

عمق جریان (متر)	دبی ورودی (لیتر بر ثانیه)	نسبت دبی انحرافی	عدد فرود	عدد رینولدز
۰/۳۰۴	۱۱	۰/۳۱	۰/۱۳	۴۹۶۰۰

جهت بررسی استقلال شبکه و حساسیت سنجی نسبت به گسسته سازی میدان حل از شبکه‌هایی با شرایط مختلف استفاده شد تا شبکه‌ای به عنوان شبکه منتخب برگزیده شود که تأثیر ریزتر نمودن آن در جواب‌ها قابل صرف نظر کردن باشد. همچنین با توجه به استفاده از تابع دیواره در مدل آشفتگی $k-\epsilon$ لازم است حداقل یک گره محاسباتی جهت حصول اطمینان از بررسی وضعیت ناحیه زیرلایه لزج در این ناحیه قرار گیرد.

از آنجایی که با ریزتر نمودن بیشتر شبکه می‌توان همچنان به نتایج بهتری دست یافت، افزایش کمتر از یک درصد در دقت نتایج در شبکه‌های ریزتر به عنوان شرط استقلال از شبکه مدنظر قرار گرفت. در نهایت و پس از حساسیت سنجی به عمل آمده شبکه‌ای با مشخصات معرفی شده در جدول ۳ به عنوان شبکه منتخب لحاظ شد که کلیه نتایج که در ادامه ارائه می‌شود مربوط به این شبکه بندی می‌باشد.

به عنوان نمونه نتایج به دست آمده در شبکه‌ای درشت تر از شبکه منتخب که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۶ نمایانگر افزایش دقت نتایج مدل سازی عددی در شبکه منتخب نسبت به شبکه مذکور می‌باشد. در این شکل مقطع g در کانال اصلی (اندکی پایین تر از دهانه آبگیر) و مقطع l در کانال انحرافی (در ابتدای ورودی کانال) قرار دارد (توضیحات تکمیلی در جدول (۴) ارائه شده است). همچنین محور طولی به سرعت بی بعد شده در جهت اصلی u/u_{ref} در کانال اصلی و v/v_{ref} در کانال انحرافی) و محور قائم به عرض بی بعد شده y/w در کانال اصلی و x/w در کانال انحرافی) اشاره دارد.

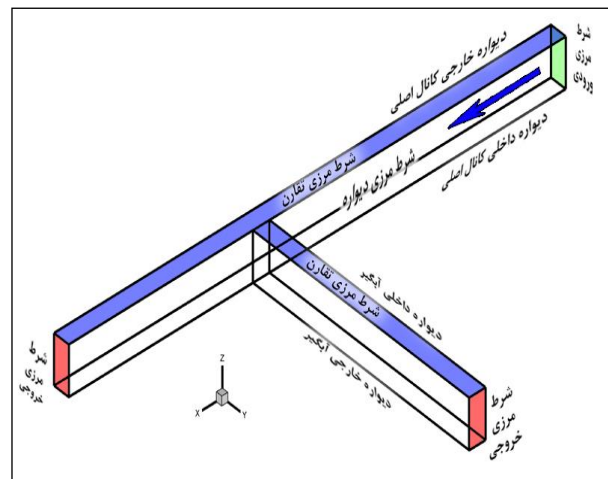
جدول ۳- مقایسه تعداد گره‌های محاسباتی در شبکه منتخب با یک شبکه درشت (به عنوان نمونه)

کانال اصلی			آبگیر			تعداد گره‌های محاسباتی
طول	عرض	عمق	طول	عرض	عمق	
۱۵۱	۲۴	۲۴	۱۲۵	۱۶	۲۴	شبکه منتخب
۸۳	۱۵	۱۵	۸۰	۱۲	۱۵	شبکه درشت

قابل ذکر است که جهت تدقیق تأثیر مرز دیواره‌ها از کلاستر بندی شبکه با ضریب ۱/۱ در نزدیکی آن‌ها استفاده شد. ابعاد مدل و نمونه‌ای از فشرده سازی شبکه محاسباتی در شکل ۷ نشان داده شده است.

است که سرعت جریان در مدل آزمایشگاهی مذکور توسط سرعت سنج الکترومغناطیس (EVM-523) با دقت $\pm 5\%$ اندازه گیری شده است.

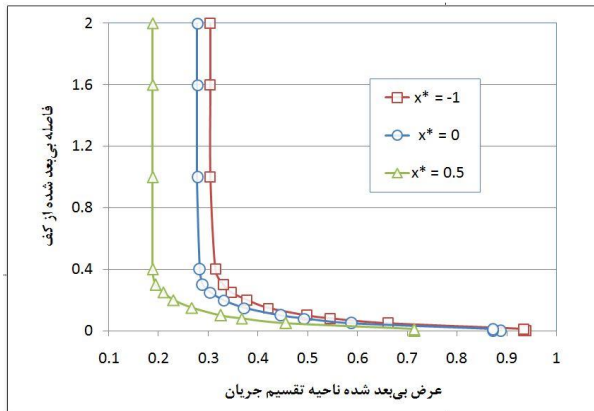
میدان محاسباتی با توجه به مطالعه آزمایشگاهی مورد نظر انتخاب شده است و شامل کانالی مستقیم به همراه یک آبگیر می‌باشد. عرض کانال اصلی و آبگیر با یکدیگر برابر ($w = 0/152 \text{ m}$) می‌باشند. جهت شبیه سازی عددی، طول میدان در بالادست آبگیر در کانال اصلی به اندازه ۸ برابر عرض آن فرض شده است. همچنین جهت اطمینان از توسعه یافتگی جریان در مرزهای خروجی، طول کانال آبگیری و فاصله مرز خروجی در کانال اصلی از محل آبگیر به اندازه ۱۲ برابر عرض، در نظر گرفته شده است. عمق جریان ثابت بوده و به میزان ۰/۳۰۴ متر می‌باشد. شرایط مرزی به کاررفته در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- شرایط مرزی به کاررفته در مدل

مشخصات جریان شامل عمق، دبی ورودی، درصد جریان انحرافی و اعداد فرود و رینولدز جریان بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، انتخاب شده و در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

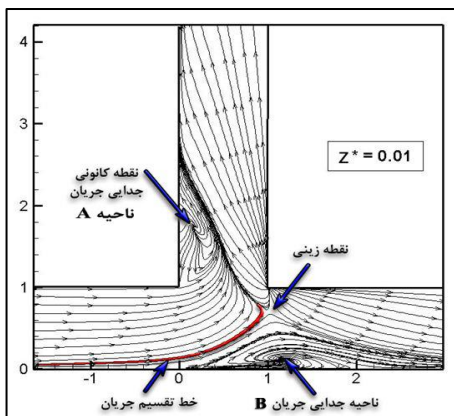
همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تأثیر تراکم شبکه در نتایج به دست آمده آشکار بوده و بیانگر کاهش میزان خطای متوسط (انحراف جذر میانگین مربعات) در مقاطع مختلف با ریزتر شدن شبکه در حدود ۵ درصد بوده است.



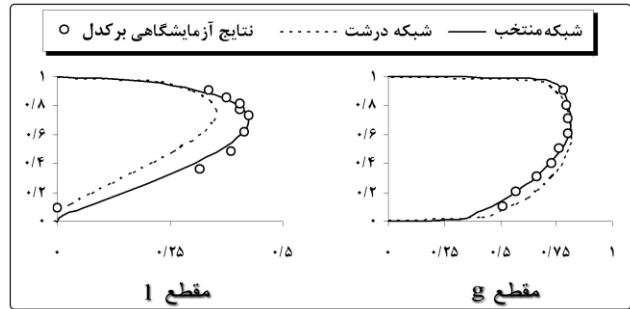
شکل ۹- مشخصات ناحیه تقسیم جریان در نتایج مدل حاضر

همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد و در این شکل نیز مشاهده می‌شود، عرض جریان تقسیم‌شده با فاصله گرفتن از بستر، کاهش می‌یابد و تقریباً تمام این تغییرات در ۲۰ درصد پایینی جریان رخ داده و عرض تقسیم جریان در ترازهای فوقانی آن یکسان است. داده‌های مربوط به این شکل نشان می‌دهد که عرض ناحیه تقسیم جریان در نزدیکی بستر ۳/۸، ۳/۲ و ۳/۱ برابر آن در سطح آب به ترتیب برای مقاطع میانه دهانه آبگیری، لبه آبگیری و بالادست آن، می‌باشد. همچنین این داده‌ها نشان‌دهنده جذب حدود ۶۹ درصد عرض جریان بالادست به داخل آبگیر بوده که این مقدار در میانه دهانه آبگیری به ۸۱ درصد افزایش می‌یابد. نکات اشاره‌شده حاکی از انتقال شدید جریان در نزدیکی بستر به آبگیر بوده که سبب ورود رسوبات نزدیک بستر به داخل آبگیر خواهد شد.

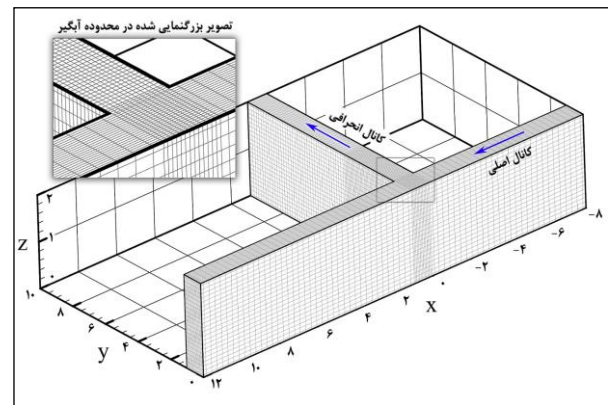
نتایج مدل عددی حاضر در خصوص شکل‌گیری نواحی جداشدگی A و B (مطروحه در بخش مقدمه) در (۱۰) نشان داده شده است. قابل‌ذکر است که تصویر ذیل مربوط به نزدیک بستر ($z^* = 0.01$) با نسبت دبی انحرافی (۰/۳۱) می‌باشد و در سطح آب ناحیه جداشدگی B از بین رفته است.



شکل ۱۰- شکل‌گیری نواحی جدایی جریان در نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی حاضر در نزدیک بستر



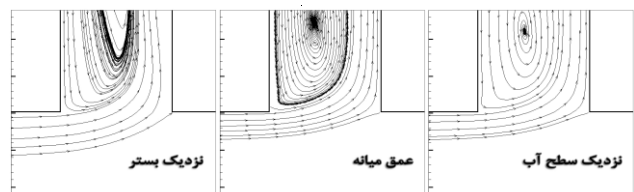
شکل ۶- مقایسه پروفیل سرعت بی‌بعد شده با نتایج آزمایشگاهی در تراز عمق میانه برای دو شبکه مختلف



شکل ۷- ابعاد مدل و شبکه محاسباتی آن

بررسی کیفی الگوی جریان

جهت برآورد و ارزیابی نتایج مدل عددی حاضر در شبیه‌سازی الگوی جریان‌های انحرافی، ابتدا در این قسمت الگوی کیفی جریان شامل نحوه تقسیم جریان، شکل‌گیری نواحی جداشدگی و توزیع فشار در دهانه آبگیر با توجه به نتایج گزارش‌شده از سایر تحقیقات در این زمینه که در بخش مقدمه بیان شد، ارائه می‌شود. نتایج مدل عددی حاضر در خصوص جریان انحرافی و تغییرات آن در سه عمق مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- نتایج مدل حاضر در خصوص تغییرات عرض ناحیه تقسیم جریان در عمق

در شکل ۹ تغییرات این ناحیه در عمق برای سه مقطع مختلف نمایش داده شده است. این مقاطع به مقطعی در فاصله‌ای معادل عرض آبگیر در بالادست دهانه ($x^* = -1$)، لبه بالادست آبگیر ($x^* = 0$) و میانه دهانه آبگیر ($x^* = 0.5$) اشاره دارد. همچنین برای بی‌بعد نمودن عرض ناحیه تقسیم جریان و فاصله از کف، از عرض کانال استفاده شده است.

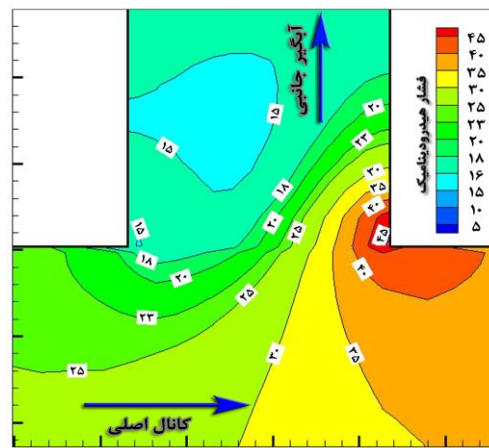
پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل در شبیه‌سازی کیفی الگوی جریان در ادامه به مقایسه کمی نتایج در مقاطع مختلف با داده‌های آزمایشگاهی پرداخته می‌شود.

بررسی کمی نتایج مدل عددی حاضر

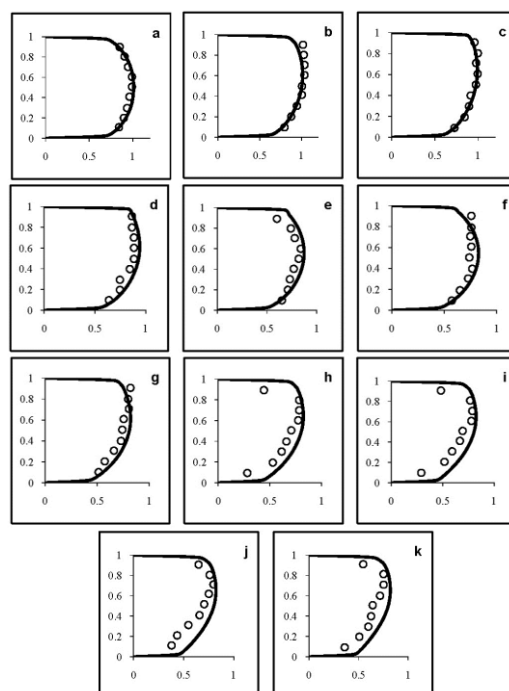
در این قسمت جزئیات کمی نتایج حاصل از مدل حاضر ارائه می‌شود. برای این منظور پروفیل‌های سرعت در ۲۲ مقطع که نیمی از آن‌ها در کانال اصلی و نیمی دیگر در کانال انحرافی و با تراکم مناسبی در محدوده آبگیر توزیع شده‌اند، با نتایج آزمایشگاهی برکدل (که اندازه‌گیری سرعت در این مقاطع صورت گرفته بود) مقایسه شد. موقعیت مقاطع در مقایسه پروفیل‌های سرعت بی بعد شده و به دست آمده از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی (علامت دایره) در تراز عمق میانه برای کانال اصلی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. برای بی بعدسازی پروفیل سرعت از سرعت مبنا (۰/۲۶۲ متر بر ثانیه) که حداکثر مقدار سرعت در محل ورودی کانال اصلی (جریان توسعه یافته) می‌باشد، استفاده شده است. در این شکل محور طولی به سرعت بی بعد شده در جهت اصلی (u/uref در کانال اصلی) و محور قائم به عرض بی بعد شده (y^*) اشاره دارد.

جهت نمایش مناسب‌تر اطلاعات، مبدأ مختصات در ابتدای محل آبگیری و محورهای مختصات با عرض کانال به صورت $x^* = x/w$ و $y^* = y/w$ و $z^* = z/w$ بی‌بعد شده‌اند.

در شکل ۱۱ کانتورها و خطوط هم‌تراز فشار هیدرودینامیک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از مدل عددی حاضر توزیع فشار در دهانه آبگیر را به صورت نواحی پرفشار و کم‌فشار (به ترتیب با مقادیر فشار هیدرودینامیک ۴۵ و ۱۵ kg/m.s^2) شبیه‌سازی نموده است که این موضوع با مطالعات سایر محققین همخوانی دارد. لازم به ذکر است که نیری و همکاران نیز تغییر فشار قابل‌ملاحظه‌ای را در امتداد دهانه آبگیر گزارش نموده‌اند که شامل ناحیه‌ای کم‌فشار در گوشه بالادست و ناحیه‌ای پرفشار در گوشه پایین‌دست بوده و می‌تواند به نوعی بیانگر تغییرات سطح آب در این نواحی باشد (Nery *et al.*, 1999).



شکل ۱۱- توزیع فشار هیدرودینامیک در دهانه آبگیر



شکل ۱۲- مقایسه پروفیل سرعت بی‌بعد شده طولی (U) حاصل از مدل عددی حاضر و نتایج آزمایشگاهی در تراز عمق میانه برای کانال اصلی

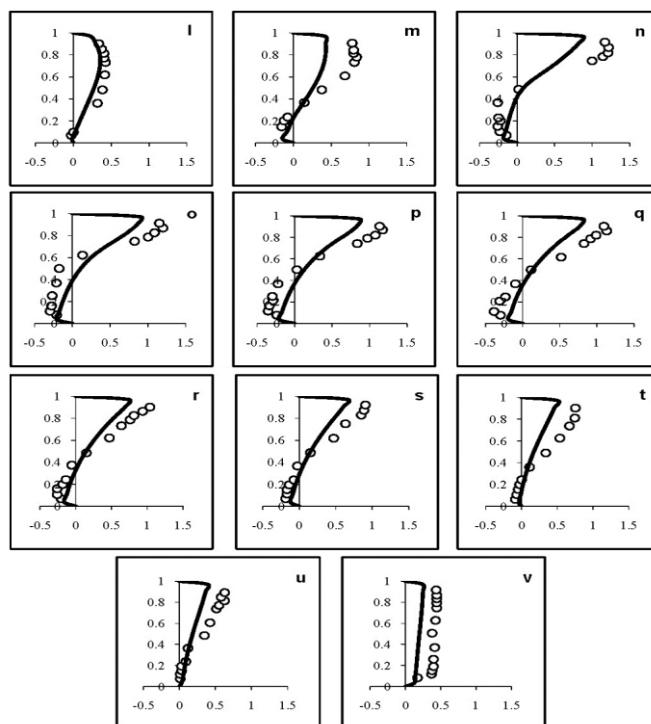
جدول ۴- موقعیت مقاطع موردنظر جهت مقایسه پروفیل‌ها

مقطع	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	کانال اصلی
x^*	-۴/۱۵	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	
مقطع	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	کانال انحرافی
y^*	۱	۱/۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۵	۶	۹	

گرداب شکل گرفته در این ناحیه را اندکی کم برآورد نموده است. میزان متوسط خطا در سه تراز سطح آب، عمق میانه و نزدیک بستر به ترتیب در حدود ۹/۲، ۱۲/۲ و ۱۱/۵ درصد برای شبکه منتخب (با متوسط خطای ۱۰/۹ درصد) و در مدل عددی نیری در سه تراز مذکور با خطایی در حدود ۱۱/۲، ۹/۱ و ۱۲/۷ درصد می‌باشد.

در شکل ۱۳ نیز پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده و به‌دست‌آمده از مدل عددی در تراز عمق میانه برای کانال انحرافی با نتایج آزمایشگاهی (علامت دایره) مقایسه شده است. در این شکل محور طولی به سرعت بی‌بعد شده در جهت اصلی (v/v_{ref}) در کانال (انحرافی) و محور قائم به عرض بی‌بعد شده (x^*) در کانال (انحرافی) اشاره دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی جریان در کانال اصلی در مقاطع (a تا g) به‌وسیله مدل عددی به‌خوبی شبیه‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده همخوانی مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی دارند. نتایج نشان می‌دهد که در سه تراز سطح آب، عمق میانه و نزدیک بستر میزان متوسط خطا برای مدل حاضر به ترتیب در حدود ۹/۷، ۴/۵ و ۴/۷ درصد برای شبکه منتخب (با متوسط ۶/۳ درصد) می‌باشد که در مقایسه با نتایج مدل عددی سایر محققین (Neary et al., 1999) در سه تراز مذکور (با خطایی در حدود ۹/۷، ۴/۱ و ۷/۷ درصد) شبیه‌سازی مناسبی را نشان می‌دهد. قابل‌ذکر است که در مقاطع انتهایی کانال اصلی (h تا k) نتایج به‌دست‌آمده در نزدیکی دیواره خارجی تا حدودی دست‌بالا تخمین زده شده است. این بخش مربوط به ناحیه جداسازی جریان (ناحیه B) بوده و به نظر می‌رسد مدل عددی، قدرت



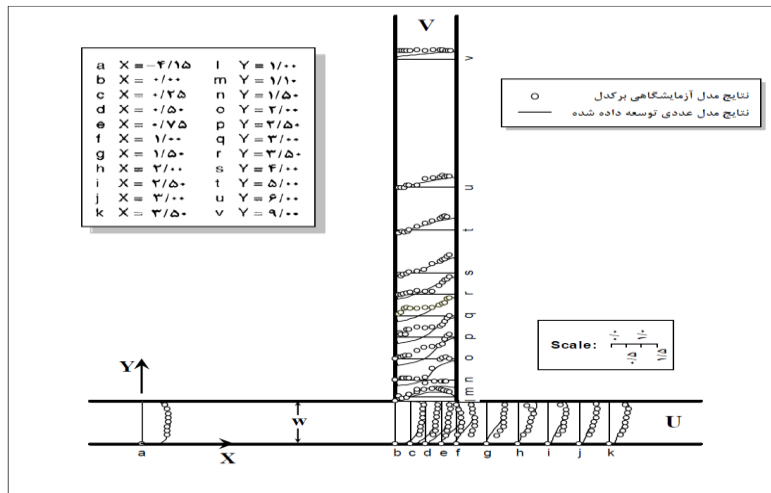
شکل ۱۳- مقایسه پروفیل سرعت بی‌بعد شده عرضی (V) حاصل از مدل عددی حاضر و نتایج آزمایشگاهی در تراز عمق میانه برای کانال انحرافی

عرض و طول جریان برگشتی و گرداب تشکیل شده در این ناحیه می‌باشد، با دقت مناسبی شبیه‌سازی شده لیکن به واسطه عدم

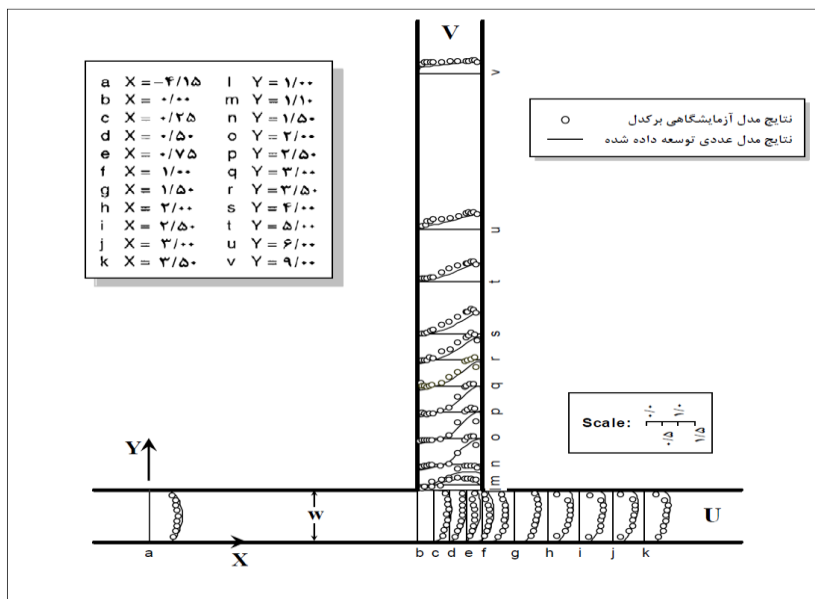
نتایج شبیه‌سازی جریان در آبگیر جانبی حاکی از آن است که در عموم مقاطع، محل تغییر جهت جریان که مشخص‌کننده

آزمایشگاهی مقایسه شده است. قابل ذکر است که نتایج در خصوص بیشینه سرعت در برخی از مقاطع تا حدودی دست پایین برآورد شده که با توجه به پیشینه تحقیقات به نظر می‌رسد این مسئله به دلیل ضعف مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ در مدل‌سازی چنین الگویی می‌باشد (Safarzadeh and Salehi, 2006). در این خصوص حساسیت‌سنجی نسبت به پارامترهای مدل آشفتگی به‌کاررفته همچون شدت آشفتگی در مقطع ورودی صورت پذیرفت ولیکن همان‌گونه که با توجه به نظرات سایر محققین پیش‌بینی می‌شد، تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در نتایج حاصل نشد. همچنین واسنجی مدل نسبت به ضریب زبری در دامنه ۱۵ درصدی و متناسب با زبری جداره مدل آزمایشگاهی تأثیر چندانی بر نتایج نداشته است.

منظور کردن تغییرات سطح آزاد و مخصوصاً در ورودی آبگیر از دقت محاسبات کاسته شده است. میزان متوسط خطا در ترازهای نزدیک بستر، عمق میانه و سطح آب به ترتیب در حدود ۱۹/۱، ۱۸/۹ و ۱۹/۸ درصد برای شبکه منتخب (با متوسط ۱۹/۲ درصد) و در مدل عددی نیری در سه تراز مذکور با خطایی در حدود ۱۷/۹، ۱۶/۱ و ۱۹/۵ درصد همراه می‌باشد. لازم به ذکر است در صورتی که مقاطع ابتدای آبگیر که تأثیر فراوانی در جریان در آن زیاد است از محاسبات حذف شود، خطای محاسباتی کاهش یافته و میزان متوسط خطا در ترازهای نزدیک بستر، عمق میانه و سطح آب به ترتیب در حدود ۱۳/۶، ۱۴/۷ و ۱۵/۴ درصد (با متوسط ۱۴/۵ درصد) می‌شود. به‌طور مشابه در شکل (۱۴) و شکل ۱۵ نیز به ترتیب در تراز نزدیک بستر و سطح آب، نتایج مدل عددی حاضر با داده‌های



شکل ۱۴- مقایسه پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی در تراز نزدیک بستر ($Z^* = 0.2$)



شکل ۱۵- مقایسه پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی در تراز سطح آب ($Z^* = 2$)

نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از یک مدل بومی، فرآیند آبیگری از کانال مستقیم با حل معادلات سه بعدی هیدرودینامیک جریان و استفاده از یک مدل آشفتگی دومعادله‌ای، مدل سازی شد که مقایسه نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل جهت شبیه سازی الگوی پیچیده جریان در چنین شرایطی می باشد. نکته دیگر در این تحقیق عدم به کارگیری روش های چندبلوکی بود؛ به طوری که کانال اصلی و انحرافی به طور هم زمان در یک بلوک و با کمک آرایه هایی با ابعاد متغیر مدل سازی شد. برخی از مهمترین نتایج تحقیق به شرح ذیل می باشند:

با توجه به خطوط جریان در نزدیکی بستر مشاهده می شود که قسمت اعظم رسوبات بستر که از بالادست کانال اصلی به سمت آبیگر کشیده شده، در نقطه مشترک (نقطه کانونی) به دام افتاده و به خاطر عدم تنش های برشی و سرعت پایین جریان، در این منطقه ته نشین شده و باعث تشکیل پشته های ماسه ای می شوند. همچنین وجود نقطه زینی در گوشه پایین دست آبیگر نیز منشأ خطوط جریانی می باشد که باعث انتقال رسوبات جلوی دهانه به طرف نقطه تکین داخل آبیگر می شود.

بررسی فشار هیدرودینامیک در نزدیکی آبیگر نمایانگر دو ناحیه پرفشار و کم فشار به ترتیب در گوشه پایین دست و بالادست ورودی آن می باشد. با توجه به فرض شرط مرزی تقارن برای سطح آب و صفر بودن فشار در سطح آزاد می توان شکل گیری فشار هیدرودینامیک را در این مرز به تعبیری به تغییرات عمق مرتبط

دانست و بنابراین در نواحی مذکور (گوشه پایین دست و بالادست دهانه آبیگر) به ترتیب بالادستی و پایین افتادگی سطح آزاد را پیش بینی نمود.

مقایسه الگوی جریان در طول کانال اصلی و بعد از آبیگر در ترازهای مختلف (مقاطع k تا g) نشان دهنده وجود جریان ثانویه عمومی به صورت پادساعت گرد می باشد که با حرکت رو به پایین خود در سمت دیواره داخلی کانال اصلی سبب شده است که حداکثر سرعت در این مقاطع به سمت ترازهای نزدیک بستر هدایت شود.

مقایسه پروفیل های سرعت در نزدیکی دیواره داخلی کانال اصلی بعد از دهانه آبیگر بین ترازهای مختلف نمایانگر کاهش سرعت طولی مخصوصاً در نزدیکی سطح آب به واسطه افزایش تراز آب در این منطقه می باشد که مدل عددی حاضر به دلیل عدم مدل سازی سطح آزاد قادر به شبیه سازی این پدیده نبوده است.

در مجموع؛ مقایسه پروفیل های سرعت در مقاطع مختلف با نتایج آزمایشگاهی حاکی از عملکرد مناسب مدل حاضر در شبیه سازی جریان انحرافی و تقسیم دبی با نسبتی اجباری می باشد. مقایسه کمی سرعت های طولی نیز نشان داد که نتایج حاصل از مدل عددی شامل الگوی جریان در کانال اصلی و انحرافی، جریان های ثانویه و جریان های برگشتی در هر دو کانال با نتایج آزمایشگاهی همخوانی مناسبی داشته و خطای شبیه سازی در مقایسه با سایر مراجع و مدل های عددی معتبر محققین در حد قابل قبولی می باشد.

REFERENCES

- Alfrink, B. J. and Rijn, L. C. v. (1983). Two-Equation Turbulence Model for Flow in Trenches. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(7), 941-958.
- Ashari, A. A., Merufinia, E. and Nohani, E. (2015). Numerical investigation of velocity profiles in the lateral intakes using finite-volume method and comparison with experimental results in water distribution networks. *AAEL Bioflux*, 8(4), 544-555.
- Azimi, H., Shabanlou, S. and Kardar, S. (2019). Flow field within rectangular lateral intakes in the subcritical flow regime. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 421-430.
- Barkdoll, B. D. (1997). *Sediment control at lateral diversions*, Ph. D. dissertation, Dept. of Civil and Environmental Eng. University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2006). *Fluid mechanics: Fundamentals and Applications*. Boston, Mass: McGraw-Hill Higher Education.
- Chen, H. and Lian, G. (1992). The numerical computation of turbulent flow in tee-junctions. *Journal of Hydro-dynamics*, B (3), 19-25.
- Grace, J. L. and Priest, M. S. (1958). Division of flow in open channel junctions. *Bulletin Eng. Experimental Station*, Vol. 31.
- Hager, W. H. (1992). Discussion of Dividing flow in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(4), 634-637.
- Huang J., Weber L. J. and Lai Y. G. (2002). Three dimensional numerical study of flows in open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(3), 268-280.
- Issa, R. I. and Oliveira, P. J. (1994). Numerical prediction of phase separation in two phase flow through T-junctions. *Comp. and Fluids*, 23(2), 347-372.
- Karimi, S., Bonakdari, H. and Gholami, A. (2015). Numerical examination of the effect of the location of flowmeters in intakes on flow-velocity measurement. *Bulletin of Env. Pharmacology and Life Science*, 4, 1-10.
- Milne, T. M. (1949). *Theoretical hydrodynamics*. McMillan and Co. Ltd.
- Murota, A. (1958). On the flow characteristics of a channel with a distributary. *Technology Reports of*

- the Osaka University*, 198(6).
- Musavi, S. H. and Goudarzizadeh, R. (2012). Numerical Simulation of 3D Flow Pattern at Open-Channel Junctions. *Journal of Irrigation Sciences and Eng*, 34(2), 61-70. (In Farsi)
- Neary, V. S. and Odgaard, A. J. (1993). Three dimensional flow structure at open channel diversions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(11), 1223–1230.
- Neary, V. S., Sotiropoulos, F. and Odgaard, A. J. (1999). Three dimensional numerical model of lateral-intake inflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(2), 126–140.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Co.
- Ramamurthy, A. S., Qu, j. and Vo, D. (2007). Numerical and Experimental Study of Dividing Open-Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(10), 1135-1144.
- Rhie, C. M. and Chow, W. L. (1983). Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *Journal of AIAA*, 21, 1525-1532.
- Rodi, W. (1980). Turbulence Models and Their Application in Hydraulics - A State of the Art Review. IAHR, Delft, The Netherlands.
- Safarzadeh, A. and Salehi, A.A. (2006). Numerical Study Of Turbulent Flow Pattern And Qualitative Investigation On Sediment Transport And Erosion Phenomenon At Lateral Intake In River. *Journal of Modares Technical and Eng*, 25, 1-17. (In Farsi)
- Shettar, A. S. and Murthy, K. K. (1996). A numerical study of division of flow in open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 34(5), 651–675.
- Tanaka, K. (1957). The improvement of the inlet of the Power Canal. *Transactions of the Seventh General Meeting of I.A.H.R.* 1(17).
- Taylor, E. H. (1944). Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. *Transactions of Journal of Hydraulic Engineering*, 109, 893–902.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (1995). *An introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*. Longman Scientific & Technical.
- Zhang, J. and Li, A. (2008). Study on particle deposition in vertical square ventilation duct flows by different models. *Energy Conversion and Management*, 49, 1008–1018.