

## Numerical Simulation of 3D Flow Pattern at Lateral Intake in 180-degree bend

SEYED MOHAMMAD HADI MESHKATI<sup>1\*</sup>, SEYED ALI AKBAR SALEHI NEISHABOURI<sup>2</sup>

1. Department of Hydraulic Structure, Research Institute of Hydraulic Engineering and Aquatic Environments, Water Research Institute, Tehran, Iran.
2. Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
(Received: July. 15, 2020- Revised: Dec. 5, 2020- Accepted: Dec. 12, 2020)

### ABSTRACT

In this research, a three-dimensional numerical model has been developed to simulate the flow pattern at lateral intake in 180-degree bend. Due to the curvature of flow boundaries and computational grid, the three-dimensional Navier-Stokes equations are solved in nonorthogonal and nonstaggered curvilinear coordinates, and given the complexity of the flow conditions, the  $k-\omega$  model for low Reynolds numbers is used to solve turbulence terms. The equations are discretised by the finite volume method and the central difference and power law algorithm are used to discretise the diffusion and convection terms, and the stable semi-implicit (SIMPLEC) is used to couple the flow and pressure field. Also, to increase the efficiency of the model, one block with variable domain has been used to simulate both channels (main and intake). The developed model was first validated in two tests of flow in 180-degree bend and the lateral intake in a straight flume. Then flow pattern at the lateral intake in 180-degree bend for 45-degree diversion angle in the establishment angle of 40-degree was simulated and compared with the available laboratory data. The average modeling error in the main channel and intake was about 7.3% and 19.7%, respectively, which is acceptable compared to the results of other commercial models.

**Keywords:** Numerical Simulation, 3D Model, Intake, 180-Degree Bend.

## شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی الگوی جریان در آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه

سید محمد هادی مشکاتی<sup>\*</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۲</sup>

۱. گروه سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۹/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۹/۲۲)

### چکیده

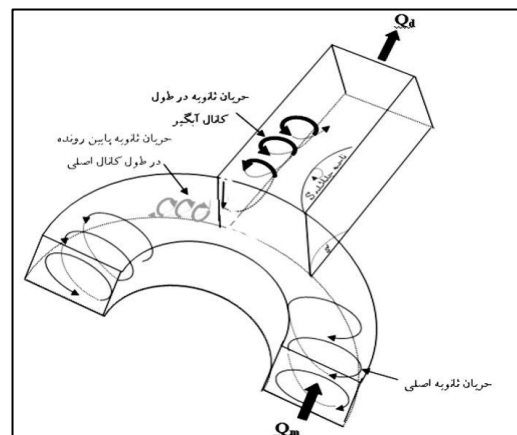
در این تحقیق مدل عددی سه‌بعدی برای شبیه‌سازی الگوی جریان در آبگیری از کانال قوسی شکل توسعه داده شده است. با توجه به انحنای مرزهای جریان و شبکه محاسباتی، معادلات سه‌بعدی ناویراستوکس در مختصات منحنی‌الخط غیرمتعامد و جابجانشده حل شده و با عنایت به پیچیدگی حاکم بر شرایط جریان، برای حل ترم‌های آشفتگی از مدل  $k - \omega$  برای اعداد رینولدز پایین استفاده شده است. انفصال معادلات با استفاده از روش حجم محدود صورت پذیرفته است و جهت گسسته‌سازی ترم‌های پخش و انتقال به ترتیب از طرح‌های اختلاف مرکزی و قاعده توانی و برای جفت‌نمودن میدان جریان و فشار از طرح نیمه‌ضمنی پایدار استفاده شده است. همچنین جهت افزایش راندمان مدل از یک بلوک با دامنه متغیر برای شبیه‌سازی هر دو کانال قوسی شکل و آبگیر استفاده شده است. مدل توسعه‌داده‌شده ابتدا در دو آزمون جریان در قوس ۱۸۰ درجه و آبگیری از کانال مستقیم صحت‌سنجی گردید. سپس الگوی جریان در آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه برای زاویه استقرار ۴۰ درجه و تحت زاویه آبگیری ۴۵ درجه شبیه‌سازی و با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه گردید. متوسط خطای مدل‌سازی در کانال اصلی و آبگیر به ترتیب در حدود ۷/۳ و ۱۹/۷ درصد بوده است که در مقایسه با نتایج سایر مدل‌های تجاری در حد قابل قبول می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، مدل سه‌بعدی، آبگیر، قوس ۱۸۰ درجه.

### مقدمه

جریان‌های انحرافی یا به‌طور طبیعی در رودخانه‌های پیچانرودی بوجود می‌آیند و یا آنکه به‌طور مصنوعی به‌صورت آبگیری از رودخانه‌ها و کانال‌ها جهت مصارف مختلف ایجاد می‌شوند. الگوی شماتیک جریان در آبگیری از قوس در شکل (۱) نشان داده شده است (Dehghani, 2006).

در بالادست آبگیر جریان حلزونی ناشی از جریان ثانویه و اینرسی در کانال اصلی وجود دارد که باعث حرکت رسوبات در کف به سمت قوس داخلی و جریان آب در سطح به سمت قوس خارجی می‌شود. با نزدیک شدن جریان به آبگیر به دلیل فشار مکشی اعمالی از طرف کانال جانبی، جریان در جهت عرضی شتاب گرفته و به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمتی وارد آبگیر شده و مابقی در کانال اصلی پایین‌دست جریان می‌یابد و بدین ترتیب صفحه تقسیم‌کننده جریان، شکل می‌گیرد. بخاطر وجود گرادیان فشار جانبی، تنش برشی بستر و نیروی گریز از مرکز ناشی از انحناء خطوط جریان، جریان ورودی به آبگیر دچار عدم تعادل گردیده که این پدیده باعث ایجاد جریان ثانویه‌ای (در خلاف حرکت عقربه‌های ساعت) در طول آبگیر می‌شود که مکانیسم تشکیل آن شبیه مکانیسم تشکیل جریان ثانویه در قوس‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است بواسطه جداسدگی جریان فوقانی و تحتانی پس از عبور از لبه بالادست آبگیر از آن، یک ناحیه جداسدگی نیز در گوشه بالادست آبگیر ایجاد می‌شود که نمونه این جداسدگی در آبگیری از مسیر مستقیم نیز مشاهده می‌شود. جریان رو به پایین در لبه پایین‌دست آبگیر نیز باعث ایجاد



شکل ۱- الگوی سه‌بعدی جریان در آبگیری جانبی از قوس

حجم محدود استفاده شده است. شبکه حل میدان، کارترین با المان‌های شش‌وجهی و شبکه جابجاشده می‌باشد.

در تحقیق دیگری نیز با استفاده از مدل فلونت اقدام به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول صفحات مستغرق در قوس ۱۸۰ درجه با آبگیر جانبی شده است (Rostamabadi, 2008). نتایج بدست آمده شامل پروفیل‌های سرعت، خطوط جریان، جریان‌های ثانویه در مقاطع عرضی و توزیع تنش برشی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. همچنین ایشان اقدام به بررسی تاثیر شبیه‌سازی سطح آزاد بر الگوی جریان در آبگیری از قوس (به همراه صفحات مستغرق) به کمک نرم‌افزار فلونت نموده‌اند (Rostamabadi et al., 2010). در این تحقیق مقایسه نتایج مربوط به روش‌های مختلف مدل‌سازی سطح آزاد در نرم‌افزار فلونت بررسی گردیده است.

در مطالعه دیگری به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف صفحات مستغرق در آبگیر جانبی واقع در قوس ۱۸۰ درجه با استفاده از مدل عددی Flow3D پرداخته شده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود، خطای مدل تعیین شده است. در این مطالعه برخی پارامترهای مؤثر از جمله نوع طرح، تعداد و اندازه صفحات مستغرق و تغییرات عدد فرود در کانال اصلی مورد بررسی قرار گرفته است (Sarhadi and Jabbari, 2017).

در خصوص مدل‌سازی الگوی رسوب ورودی به آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه در تحقیقی و با استفاده از نرم افزار فلونت به مدل‌سازی پدیده انتقال رسوب و مکانیسم‌های ورود رسوبات به آبگیر جانبی واقع در موقعیت ۱۱۵ درجه پرداخته شده است (Tavakoli and Montaseri, 2017). برای بررسی عملکرد مدل‌های دوفازی، روند حرکت رسوبات در زمان‌های مختلف از شروع تزریق در مدل‌های عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردیده‌اند. ایشان در تحقیق دیگری انتقال رسوب و تغییرات بستر در قوس ۱۸۰ درجه با آبگیر جانبی را در قالب مطالعات آزمایشگاهی و عددی بررسی نمودند (Montaseri et al., 2020). در این مطالعه با نرم افزار فلونت و با مدل‌های اوپلری و لاگرانژی اقدام به شبیه‌سازی پدیده‌های انتقال شده است و عملکرد آنها در شبیه‌سازی جریان‌های طولی و عرضی و مکانیسم حرکت ذرات بررسی گردید. همچنین بررسی جزئیات مسیر حرکت رسوبات در ۳ زاویه مختلف آبگیری توسط این تیم مطالعاتی در تحقیق دیگری نیز منتشر شده است (Tavakoli et al., 2019).

با توجه به مرور تحقیقات پیشین، مطالعاتی که به شبیه‌سازی عددی جریان به‌صورت سه‌بعدی در آبگیری از قوس پرداخته‌اند از مدل‌های تجاری موجود استفاده نموده‌اند. لازم بذکر است در تحقیقات صورت‌گرفته در اغلب موارد از شبکه

یک جریان ثانویه (در جهت عقربه‌های ساعت) در کانال اصلی می‌گردد که باعث آبشستگی بستر در کانال اصلی (پایین‌دست آبگیر) می‌شود.

الگوی یادشده با توجه به پیچیدگی‌های حاکم و همچنین اهمیت بهینه‌سازی جریان و نیز کنترل رسوب ورودی به آبگیر همواره مورد توجه محققین بوده است. در این خصوص اغلب مطالعات صورت‌گرفته در زمینه شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی آبگیری از قوس‌ها به بهره‌گیری از مدل‌های تجاری اشاره دارد. در تحقیقی مدل عددی دوبعدی جهت شبیه‌سازی جریان آب و رسوب در کانال قوسی با آبگیر جانبی تهیه گردید که در این مدل، معادلات دوبعدی و غیردائمی ناویراستوکس با روش المان محدود حل شده و بستر جریان به صورت ثابت و بدون تغییر فرض شده است (Hsieh and Yang, 2003). نتایج این مدل عددی دوبعدی با نتایج آزمایشگاهی کانال قوسی با آبگیر جانبی ۹۰ درجه مقایسه گردید (Ketabdar, 2016). الگوی جریان آبگیری از کانال مستقیم با مقطع دوزنقه‌ای به کمک مدل عددی، شبیه‌سازی گردیده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است (Nazari et al., 2019).

در مطالعه‌ای با استفاده از مدل تجاری فلونت اقدام به مدل‌سازی الگوی جریان در آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه گردید (Safarzadeh, 2005). در این تحقیق، الگوی جریان در دو موقعیت آبگیری (۴۰ و ۱۱۵ درجه) و دو زاویه آبگیری برای هر یک از این موارد شبیه‌سازی گردید. جهت مدل‌سازی آشفتگی از مدل تنش‌های رینولدز و برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان از تکنیک کسر حجمی سیال (VOF) استفاده شده است که به همین منظور محدوده‌ای در حدود سه برابر عمق جریان جهت عبور لایه فوقانی (هوا) به دامنه محاسباتی مدل اضافه شده است. شبیه‌سازی برای یک دبی ثابت ۴۵ لیتر بر ثانیه انجام گرفت و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی (Pirestani, 2005) مقایسه گردید. در تحقیق دیگری و به کمک مدل عددی شبه‌سه‌بعدی GLLVHT اقدام به شبیه‌سازی الگوی جریان و کیفیت در آبگیری از یک رودخانه واقعی شده است (Na and Park, 2005). روش اختلاف محدود بواسطه سادگی فرآیند انفصال معادلات بعنوان روش حل عددی در این مدل، انتخاب شده است. هدف اصلی از این تحقیق، بررسی موقعیت بهینه آبگیری در محدوده مطالعاتی موردنظر در بازه رودخانه‌ای در کره، با امکان شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در آن بوده است.

Ho (2006) در رساله دکتری خود به کمک مدل سه‌بعدی Flow-3D اقدام به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در آبگیری از رودخانه‌ای در نیومکزیکو نمود. در این شبیه‌سازی جریان به صورت دائمی فرض شده و از مدل آشفتگی k-ε استاندارد و روش

پارامترهای به کار رفته در این معادلات به شرح ذیل می‌باشند.

$$\mu_t = \rho \alpha^* \frac{k}{\omega} \quad (\text{رابطه ۶}) \text{ لزجت آشفتگی}$$

$$P_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} P_k \quad (\text{رابطه ۷}) \text{ تولید انرژی جنبشی آشفتگی}$$

$$P_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} P_k \quad (\text{رابطه ۸}) \text{ تولید فرکانس آشفتگی}$$

در این روابط  $\alpha^*$  تابع کاهش‌دهنده برای اعداد رینولدز آشفتگی پایین می‌باشد که عامل تاثیر دیواره‌های صلب (که در نزدیکی آنها عدد رینولدز آشفتگی کم است) بر روی لزجت آشفتگی و به تبع آن تاثیرگذار بر مدل آشفتگی  $k - \omega$  خواهد بود. در مطالعه حاضر از نسخه‌ای از مدل استفاده گردید که برای جریان در نزدیکی دیواره نیز با استفاده از ضریب مذکور، کالیبره شده و رفتار جریان در نواحی نزدیک به دیواره‌ها را به خوبی مدل‌سازی می‌نماید. پارامترهای آشفتگی در این مدل به شرح ذیل می‌باشند:

$$\alpha = \frac{5}{9} \frac{\alpha_0 + \frac{Re_T}{R_\omega}}{1 + \frac{Re_T}{R_\omega}} (\alpha^*)^{-1} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$\alpha^* = \frac{\alpha_0 + \frac{Re_T}{R_k}}{1 + \frac{Re_T}{R_k}} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$\beta^* = \beta_0^* \frac{5/18 + (Re_T/R_\beta)^4}{1 + (Re_T/R_\beta)^4} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

همچنین سایر پارامترهای ثابت و تجربی در رابطه ذیل معرفی شده‌اند (Wilcox, 1994).

$$\begin{aligned} \sigma_k &= 2 & , & \quad \sigma_\omega = 2 & , & \quad \beta = 0.075 \\ \beta_0^* &= 0.09 & , & \quad \alpha_0 = 0.1 & , & \quad \alpha_0^* = 0.025 \\ R_\beta &= 8 & , & \quad R_k = 6 & , & \quad R_\omega = 2.7 \end{aligned}$$

## انفصال معادلات و اعمال شرایط مرزی

### انفصال معادلات حاکم

در مدل تهیه‌شده در تحقیق حاضر، انفصال معادلات در مختصات منحنی‌الخط غیرمتعامد با استفاده از روش حجم محدود و در میدان جابجانشده صورت گرفته است. برای سهولت انجام محاسبات، کلیه معادلات حاکم بصورت رابطه عمومی  $\nabla \cdot \mathbf{J} = S$  تبدیل شده که در آن  $\mathbf{J}$  مجموع شار حاصل از انتقال و پخش کمیت  $\varphi$  می‌باشد و پس از اعمال ضرایب تبدیل مختصات هندسی (با توجه به بکارگیری مختصات منحنی‌الخط)، مولفه‌های آن از رابطه ذیل محاسبه شده است:

$$f_{nn}^i = \left( \rho \bar{U}^i \varphi - \Gamma \frac{A_k^i A_k^j}{J} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi^j} \right)_{nn} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

در این رابطه  $\varphi$  با توجه به معادله حاکم می‌تواند مولفه‌های سرعت و یا کمیت‌های آشفتگی باشد. همچنین  $\xi^j$  معرف محورهای مختصات منحنی‌الخط،  $J$  ژاکوبین تبدیل مختصات

بدون‌سازمان و در برخی از مطالعات در بکارگیری مدل Flow3D از روش‌های چندبلوکی جهت بررسی کانال انحرافی استفاده شده است. بر همین اساس و در تحقیق حاضر ضمن توسعه یک مدل سه‌بعدی بومی، الگوی جریان در آبخیزی از قوس ۱۸۰ درجه و با استفاده از یک بلوک (برای شبیه‌سازی جریان در کانال اصلی و انحرافی) مدل‌سازی گردید. مدل تک‌بلوکی حاضر، شرایط ساده‌تری را برای بررسی میدان جریان فراهم ساخته و نیازمند زمان اجرای بسیار کمتری می‌باشد (Meshkati and Salehi, 2020).

### معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان آشفته با استفاده از روابط حاکم بر اصول اساسی هیدرودینامیک و اعمال اثر آشفتگی در آن به دست می‌آید. حل این معادلات در حالت کلی به دلیل تصادفی بودن کمیت‌ها در زمان و مکان و سه‌بعدی بودن جریان به صورت تحلیلی و حتی عددی، پیچیدگی بسیاری دارد. در این تحقیق با توجه به حل دائمی میدان جریان تراکم‌ناپذیر از معادلات متوسط‌گیری‌شده زمانی رینولدز در حالت دائم به صورت زیر استفاده شده است (Daily and Harleman, 1966)

(رابطه ۱) معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

(رابطه ۲) معادلات ممنتوم در راستای محور  $i$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j})$$
 که در آن  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  تنش‌های ناشی از آشفتگی بوده که از رابطه ذیل محاسبه می‌شود (Wilcox, 1994). همچنین در روابط فوق  $\mu$ : لزجت مولکولی،  $\mu_t$ : لزجت آشفتگی،  $k$ : انرژی جنبشی آشفتگی ( $k = \overline{u'_i u'_i} / 2$ )،  $g$ : شتاب گرانشی زمین و  $p$ : فشار می‌باشد.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این تحقیق با توجه به پیچیدگی‌های الگوی جریان و مزایای مدل آشفتگی  $k - \omega$  همچون شبیه‌سازی مناسب‌تر زیرلایه‌لزوج و پیش‌بینی گرادیان فشار معکوس، از این مدل استفاده شده است. معادلات حاکم بر این مدل عبارتند از (Wilcox, 1994):

(رابطه ۴) معادله انرژی جنبشی آشفتگی

$$\frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \beta^* \rho \omega k + P_k$$

(رابطه ۵) معادله فرکانس آشفتگی

$$\frac{\partial \rho \omega u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] - \beta \rho \omega^2 + P_\omega$$

### اعمال شرایط مرزی

در مدل موجود امکان استفاده از شرایط مرزی متنوعی فراهم گردیده که از آن جمله می‌توان به مرزهای ورودی، خروجی (گرادیان صفر برای متغیرها)، دیواره (با به‌کارگیری تابع استاندارد دیواره) و تقارن اشاره نمود. قابل ذکر است در مدل حاضر و مخصوصاً با به‌کارگیری مدل آشفتگی یادشده و به‌واسطه ایجاد جریان‌های برگشتی در مرز خروجی، استفاده از فرض صفر بودن گرادیان‌های دوم متغیرها (برونبایی کردن از داخل میدان) شرایط حل را پایدارتر می‌نماید. همچنین در لایه مرزی آشفته در مجاورت دیوار فرض شده است که تعادل منطقه‌ای برقرار بوده و تولید و اتلاف آشفتگی در حال تعادل هستند. در این صورت پارامترهای آشفتگی در مجاورت مرز دیواره به صورت ذیل محاسبه گردیده که با تنظیم ترم‌های چشمه و چاه در معادلات اعمال شده اند (Versteeg and Malalasekera, 2007).

$$k = \frac{\rho C_{\mu}^{3/4} k_p^{3/2} u_p^+}{\delta_{np}} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$\omega = \frac{k_p^{1/2}}{\kappa C_{\mu}^{1/4} \delta_{np}}$$

مقدار  $u_p^+$  در این رابطه به صورت زیر بدست می‌آید.

$$u_p^+ = \begin{cases} y_p^+ y_p^+ < y_0^+ \\ \frac{1}{\kappa} \ln(E y_p^+) y_p^+ > y_0^+ \end{cases} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

نکته حائز اهمیت دیگر در تنظیم تقسیم دبی در وجوه مرزی خروجی می‌باشد. در شرایط معمولی، شارهای خروجی بر روی مرزها با توجه به ماهیت نوع مرز خروجی از طریق ارضاء معادله پیوستگی در سلول مجاور مرز صورت می‌گیرد، ولی در زمان الزام دبی خروجی به مرزها به صورت ریاضی و به میزان مشخص، لازم است تمهیدات خاصی مدنظر قرار گیرد. با توجه به آبیگری از کانال انحناءدار (و هم‌جهت‌نبودن مرز خروجی در انتهای آبیگیر با هیچ یک از محورهای مختصات کارتزین) و از آنجاییکه  $u_i$  مولفه سرعت‌های کارتزین می‌باشد، بنابراین اعمال رابطه تصحیح سرعت به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. در تحقیق حاضر برای رسیدن به نسبت تقسیم دبی به میزان  $\alpha$ ، اعمال اصلاح بر روی شارهای خروجی میدان صورت گرفته است و بدین ترتیب مشابه روابط ذیل، شارهای خروجی میدان ( $\bar{U}^i$ ) با توجه به ضریب اصلاحی بدست‌آمده، تصحیح شده اند. البته این روش به دلیل تاثیر غیرمستقیم بر میدان سرعت (تاثیرگذاری بر ضرایب انتقال در معادلات حاکم بر سرعت‌های میدان) دارای همگرایی کندتری نسبت به اعمال مستقیم اصلاح بر سرعت‌ها می‌باشد.

$$\bar{U}^{i2} = \bar{U}^{i2} \cdot \text{Fact}_1 \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$\bar{U}^{i3} = \bar{U}^{i3} \cdot \text{Fact}_2$$

$$\text{Fact}_2 = \alpha \cdot \frac{\text{Flowin}}{\text{Flowout}_2} \quad \text{و} \quad \text{Fact}_1 = (1 - \alpha) \cdot \frac{\text{Flowin}}{\text{Flowout}_1}$$

قلمرو محاسباتی به قلمرو فیزیکی،  $\bar{U}^i$  شار موازی با محور  $i$  ام،  $A_i^+$  مولفه‌های تانسور مساحت،  $\Gamma$  ضریب پخش و  $S$  ترم چشمه می‌باشد که مقدار آن وابسته به متغیر مورد نظر و شرایط مرزی خواهد بود. به‌عنوان نمونه ترم چشمه در معادله ممنتوم در جهت  $x$ ، پس از اعمال ضرایب هندسی به شکل رابطه ذیل می‌باشد:

$$S = - \left[ \frac{\partial p}{\partial \xi} A_{11} + \frac{\partial p}{\partial \eta} A_{21} + \frac{\partial p}{\partial \zeta} A_{31} \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{2}{3} \rho k \right) A_{11} + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{2}{3} \rho k \right) A_{21} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \frac{2}{3} \rho k \right) A_{31} \right]$$

ترم‌های پخش و انتقال به ترتیب بوسیله طرح‌های اختلاف مرکزی و قاعده توانی گسسته شده‌اند (Patankar, 1980). با توجه به اینکه در این مدل از شبکه جابجانشده استفاده شده است، شارهای عمود بر وجوه حجم کنترل به کمک روش درونبایی رای و چاو محاسبه می‌گردد (Rhie and Chow, 1983). همچنین برای کوپل‌نمودن میدان سرعت و فشار در مدل توسعه‌داده‌شده و در جهت بالابردن پایداری شرایط حل از الگوریتم نیمه‌ضمنی پایدار (SIMPLEC) استفاده شده است.

نکته مهم در این تحقیق بکارگیری روش تک‌بلوکی می‌باشد که در آن، توسعه مدل و انفصال معادلات حاکم در کل میدان حل فقط در یک بلوک محاسباتی صورت گرفته است. در این روش میدان حل و تعداد گره‌های محاسباتی آن در جهت عرضی به-صورت تابعی از موقعیت طولی گره تعریف گردید، فلذا کلیه فرآیندهای محاسباتی (اعم از تعیین ضرایب معادلات و حل آن‌ها و اعمال شرایط مرزی) در حلقه‌های عرضی محاسبات، به‌صورت آرایه‌ای وابسته به موقعیت طولی گره فعال تبدیل شد. به بیانی دیگر با رسیدن به ابتدای کانال آبیگیر (در جهت طولی) و بواسطه لزوم شبیه‌سازی جریان در آبیگیر، تعداد گره‌ها در جهت عرضی و کلیه محاسبات مربوطه به میزان موردنظر (تعداد گره‌های محاسباتی در جهت طول کانال آبیگیر) افزایش یافته و با رسیدن به موقعیت انتهای کانال آبیگیر (در جهت طولی) مجدداً به میزان سابق (تعداد گره‌های محاسباتی در جهت عرض کانال اصلی) کاهش یافته است. شایان ذکر است این روش در قیاس با روش چندبلوکی با توجه به عدم نیاز به تعریف سلول‌های هاله (و لزوم تکرار جهت همگرایی نتایج در کل میدان حل) و عدم نیاز به افزایش ابعاد آرایه‌ها (لزوم تعریف جهت سیستم مختصات و پیوند دادن آدرس سلول‌ها در مدل‌های چندبلوکی) به زمان کمتری جهت حل معادلات نیازمند است.

لازم بذکر است برنامه‌نویسی در محیط Microsoft Visual Studio 2012 و با کامپایلر Intel Fortran XE 2013 انجام گرفته است.

اختصار از ارائه آن خودداری شده است. پس از اطمینان از کارکرد مناسب مدل در شرایط جریان‌های ساده، اقدام به شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه که شرایط کاملاً پیچیده‌تری داشته و به واسطه وجود عموم پیچیدگی‌های موردنظر همچون جریان‌های ثانویه و حلزونی در این قوس، به‌عنوان نماینده‌ای مناسب جهت قوس‌های رودخانه‌ای می‌باشد، استفاده شده است (Ye and McCorquodale, 1998). از سوی دیگر صحت‌سنجی مدل در این آزمون به‌عنوان پیش‌نیاز هدف اصلی تحقیق که آنگیری از قوس ۱۸۰ درجه می‌باشد نیز مفید فایده خواهد بود. در این آزمون، فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس که شامل یک بازه خمیده با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه به همراه دو کانال مستقیم در قبل و بعد از مسیر انحناء به طول‌های ۷/۲ و ۳/۵ متر می‌باشد، به عنوان میدان حل انتخاب شده است. بستر و دیواره‌های کانال کاملاً صلب بوده و از پلکسی‌گلاس با ضریب مانینگ  $n = 0.008$  ساخته شده و عرض و عمق کانال، ۶۰ سانتی‌متر و عمق جریان در آن ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. شعاع میانی قوس ۲/۶ متر می‌باشد. با توجه به مقادیر مذکور نسبت شعاع به عرض کانال (R/B) مقدار ۴/۳۳ خواهد بود که قوس مورد آزمایش را در دسته قوس‌های ملایم قرار می‌دهد. این قوس از نظر هندسی (شعاع انحناء و نسبت عرض به شعاع) براساس مقادیر متوسط قوسی از رودخانه کارون طراحی و ساخته شده است (Tavakoli et al., 2019). دبی جریان در ورودی کانال برابر ۰/۰۳ مترمکعب بر ثانیه و اعداد فرود و رینولدز به‌ترتیب برابر ۰/۲۷ و ۴۹۵۰۰ می‌باشند. با توجه به مقادیر مذکور، جریان زیربحرانی بوده و حالت آشفته دارد. در شکل ذیل، مشخصات هندسی میدان نشان داده شده است.

در این روابط  $i_k$  محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  بوده و همچنین  $Flowin$ ،  $Flowout_1$  و  $Flowout_2$  به ترتیب میزان کل جرم ورودی به میدان، جرم خروجی از انتهای کانال اصلی و جرم خروجی از آنگیر می‌باشند. در نهایت اینکه در این مدل، دستگاه معادلات جبری به‌دست‌آمده از انفعال معادلات حاکم بوسیله روش توماس خط به خط، حل می‌گردد. البته برای پایداری روند حل معادلات از ضرایب زیرتخفیف نیز استفاده شده است (Patankar, 1980).

عطف به توضیحات ارائه‌شده، محدودیت‌های مدل توسعه‌داده‌شده حاضر، عبارت‌اند از:

تغییرات سطح آب در حد کمتر از ۱۰ درصد عمق جریان فرض شده که در این صورت می‌توان سطح آب را به‌عنوان مرز ثابت (دارای تقارن) در نظر گرفت و از شبیه‌سازی تغییرات آن صرف‌نظر شده است.

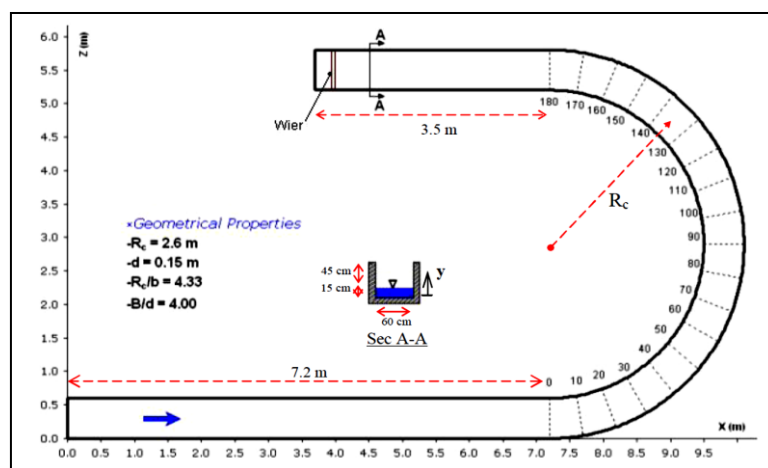
مدل آشفتگی به‌کار گرفته‌شده از گروه مدل‌های دو معادله‌ای می‌باشد که سطح بهینه‌ای از مدل‌های آشفتگی از نظر دقت و هزینه می‌باشد. سطح بعدی مدل‌ها برای افزایش دقت شبیه‌سازی مدل RSM می‌باشد که البته باعث افزایش هزینه محاسبات می‌شود.

کانال مورد شبیه‌سازی، صلب (غیرقابل فرسایش) فرض شده و انتقال رسوب مدل‌سازی نشده است.

#### صحت‌سنجی مدل عددی

#### جریان در قوس ۱۸۰ درجه

در این تحقیق ابتدا مدل سه‌بعدی توسعه‌داده‌شده برای شرایط مختلف در آزمون‌های ساده‌ای همچون تست جریان در حفره و جریان عبوری از روی ترانشه صحت‌سنجی گردید که جهت

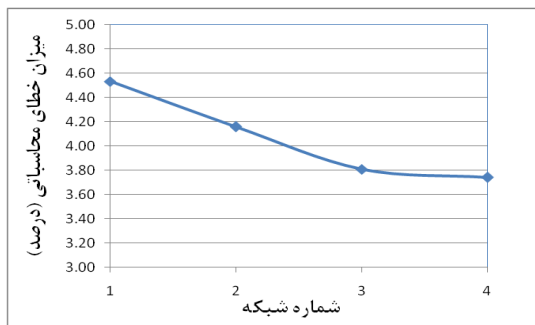


شکل ۲- مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی قوس ۱۸۰ درجه

جریان تقسیم شده و سرعت متوسط حاصله به عنوان سرعت ورودی یکنواخت (۰/۳۳ متر بر ثانیه) به مدل اعمال شده است.

در مدل حاضر برای ورودی میدان از شرط مرزی سرعت معلوم استفاده شده است. بدین منظور، دبی ورودی بر سطح مقطع

محاسباتی در نظر گرفته شده برای نتایجی که در ادامه می‌آید، شبکه شماره ۴ خواهد بود.



شکل ۳- روند بهبود میانگین خطای محاسباتی در شبکه‌های مختلف

شکل ( سرعت‌های طولی (به‌عنوان نماینده مناسبی از الگوی جریان) را در لایه زیرین نزدیک سطح آب ( $Z=0.125\text{ m}$ ) نشان می‌دهد. تصویر سمت راست در این شکل به پروفیل‌های سرعت طولی در مقاطع مختلف و تصویر سمت راست به موقعیت حداکثر سرعت طولی در آن مقطع اشاره دارد. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی عددی همخوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. متوسط و بیشینه خطای محاسباتی در این آزمون به میزان  $4/95$  و  $8/15$  درصد می‌باشد.

#### جریان در آبیگری از کانال مستقیم

پس از ارزیابی مدل در خصوص عملکرد مناسب در مختصات منحنی‌الخط و الگوی جریان در قوس‌ها در این قسمت به ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی فرآیند آبیگری پرداخته می‌شود. در این خصوص نتایج مدل توسعه‌داده‌شده با نتایج آزمایشگاهی برکدل در آزمون آبیگری از کانال مستقیم مقایسه گردیده است (Barkdoll, 1998). لازم به ذکر است که سرعت جریان در مدل آزمایشگاهی مذکور توسط سرعت‌سنج الکترومغناطیس (EVM-523) با دقت  $\pm 5\%$  اندازه‌گیری شده است.

میدان محاسباتی با توجه به مطالعه آزمایشگاهی موردنظر انتخاب شده است و شامل کانالی مستقیم به همراه یک آبگیر می‌باشد. عرض کانال اصلی و آبگیر با یکدیگر مساوی ( $w = 0/152\text{ m}$ ) می‌باشند. جهت شبیه‌سازی عددی، طول میدان در بالادست آبگیر در کانال اصلی به اندازه ۸ برابر عرض آن فرض شده است. همچنین جهت اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان در مرزهای خروجی، طول کانال آبیگری 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  $0/304$  متر می‌باشد. شرایط مرزی بکاررفته در شکل ۳) نشان داده شده است.

همچنین برای انرژی جنبشی و فرکانس آشفتگی در این مرز به ترتیب مقادیر  $0/000017$  و  $0/21$  لحاظ گردیده است. برای مرز خروجی، از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده شده و برای مسیر مستقیم بعد از قوس از کانالی به طول ۶ متر برای شبیه‌سازی عددی استفاده گردید. اگرچه طول بکار رفته بلندتر از فلوم آزمایشگاهی بوده، لیکن نتایج حساسیت‌سنجی‌های انجام شده بیانگر لزوم چنین بازه‌ای برای توسعه‌یافتگی میدان جریان می‌باشد. با توجه به تغییرات ناچیز سطح آب (کمتر از ۱۰ درصد عمق کل جریان) از شرط مرزی تقارن برای آن استفاده شده است (Neary et al., 1999). شرط مرزی دیواره نیز مطابق آنچه قبلاً بیان شد در مدل اعمال گردیده است. لازم بذکر است مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری‌شده در فلوم مذکور صورت گرفته است (Pirestani, 2005).

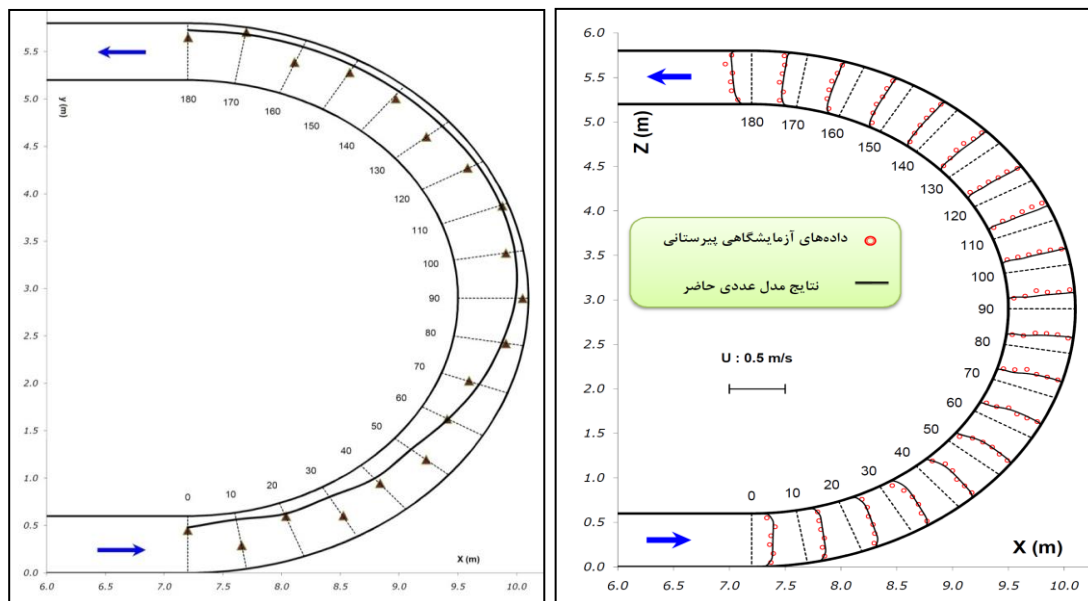
شبکه‌بندی میدان حل با توجه به لزوم هموار و یکنواخت بودن ساختار آن، طوری تنظیم شده است که شبکه‌بندی در قوس متناسب با شبکه تولید شده در مسیرهای مستقیم طرفین باشد. از سوی دیگر به دلیل حائز اهمیت بودن میدان جریان در نزدیکی دیواره سعی شده است تا حد امکان شبکه تولید شده در نزدیکی این مرزها ریز گردد. در این خصوص الگوی جریان میان ۴ حالت مختلف شبکه‌بندی مقایسه گردید. مشخصات شبکه‌های مختلف در

(ارائه شده است. شبکه اول تا سوم نمایانگر ریزش فاصله گره‌های محاسباتی با اعمال ضریب کلاستر بندی مختلف بوده و شبکه چهارم در مقایسه با شبکه سوم بیانگر تاثیر ریزش فاصله گره‌ها با افزایش تعداد گره‌ها می‌باشد.

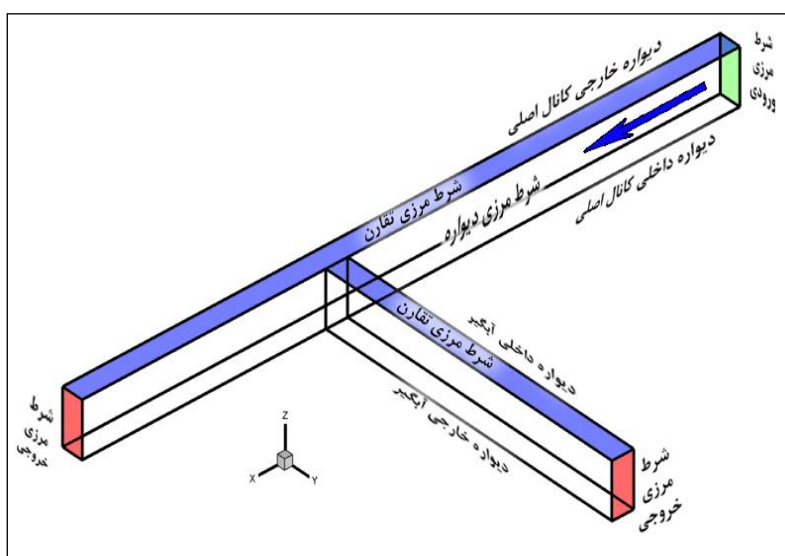
جدول ۱- مشخصات شبکه‌های مختلف برای حساسیت‌سنجی نتایج جریان در قوس نسبت به شبکه محاسباتی

نوع شبکه	ضریب کلاستر بندی سلول‌ها	فاصله اولین گره تا مرز دیواره (میلی‌متر)	تعداد سلول‌های محاسباتی در جهات		
			طول	عرض	عمق
شبکه ۱	۱	۴/۶۸	۲۱۴	۱۶	۱۶
شبکه ۲	۱/۱	۳/۲۸	۲۱۴	۱۶	۱۶
شبکه ۳	۱/۲	۲/۲۷	۲۱۴	۱۶	۱۶
شبکه ۴	۱/۲	۰/۹۵	۳۷۰	۲۴	۲۴

در شکل (، میانگین خطای محاسباتی (مجذور میانگین مربعات اختلاف‌ها) برای پروفیل‌های محاسبه‌شده در شبکه‌های مختلف ارائه شده است. این شکل نمایانگر کافی بودن ریزش شبکه در حالت ۴ بوده و به نظر می‌رسد با رسیدن به شرایط حدی و مطلوب دیگر نیازی به ریزتر نمودن شبکه نباشد. بنابراین شبکه



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل حاضر با داده‌های آزمایشگاهی (سرعت‌های نزدیک سطح آب)



شکل ۳- شرایط مرزی بکاررفته در مدل

( نمایش داده شده است. برای نمایش مناسب‌تر و جهت بی‌بعد کردن پروفیل سرعت از سرعت مبنا (۰/۲۶۲ متر بر ثانیه) که حداکثر مقدار سرعت در محل ورودی کانال اصلی (جریان توسعه‌یافته) می‌باشد، استفاده شده‌است.

میزان متوسط خطای مدل حاضر (انحراف جذر میانگین مربعات) در کانال اصلی برای مقاطع a تا g در سه تراز سطح آب، عمق میانه و نزدیک بستر به ترتیب در حدود ۹/۷، ۴/۵ و ۴/۷ درصد و در مدل عددی تحقیق مشابه در سه تراز مذکور در حدود ۹/۷، ۴/۱ و ۷/۷ درصد می‌باشد (Neary et al., 1999). همچنین برای سایر مقاطع در کانال اصلی (h تا k) میزان متوسط خطا در سه تراز مذکور به ترتیب در حدود ۹/۲، ۱۲/۲ و ۱۱/۵ درصد برای شبکه منتخب و در مدل عددی نیری در سه تراز مذکور با خطایی

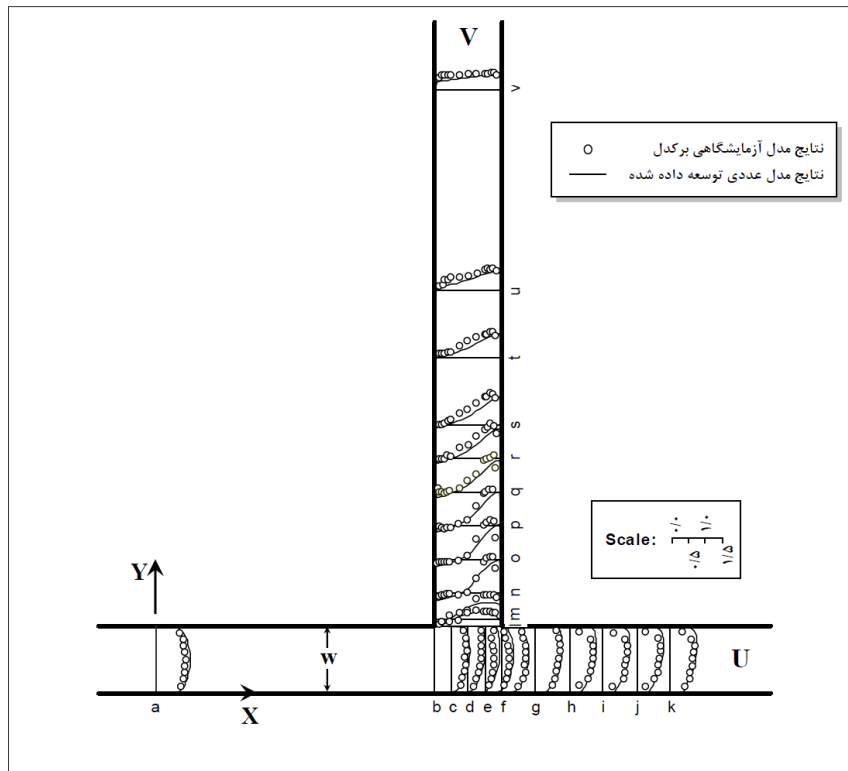
مشخصات جریان شامل عمق، دبی ورودی، درصد جریان انحرافی و اعداد فرود و رینولدز جریان براساس داده‌های آزمایشگاهی، انتخاب گردیده و به ترتیب به میزان ۰/۳۰۴ متر، ۱۱ لیتر بر ثانیه، ۳۱ درصد، ۰/۱۳ و ۴۹۶۰۰ می‌باشد. برای حساسیت‌سنجی مدل‌سازی به انفصال میدان محاسباتی، ضمن بررسی شبکه‌های مختلف و فرض افزایش کمتر از یک درصد در دقت نتایج در شبکه‌های ریزتر به‌عنوان شرط استقلال از میدان محاسباتی، شبکه ای با ابعاد ۲۴×۲۴×۱۵۱ و ۲۴×۱۶×۱۲۵ به- ترتیب در جهات طول، عرض و عمق در کانال‌های اصلی و آبگیر به عنوان شبکه نهایی، انتخاب گردید.

مقایسه پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده و به‌دست‌آمده از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی در تراز نزدیک سطح آب در شکل



آزمایشگاهی در کانال اصلی و آبگیر به ترتیب در حدود ۷/۸ و ۱۴/۵ درصد بوده است. این نتایج در مقایسه با نتایج مدل عددی معتبر مشابه توسط سایر محققین، بیانگر همخوانی قابل قبول بین نتایج به‌دست‌آمده از مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

در حدود ۱۱/۲، ۹/۱ و ۱۲/۷ درصد می‌باشد. در کانال آبگیر نیز میزان متوسط خطا در ترازهای یادشده به ترتیب در حدود ۱۹/۸، ۱۸/۹ و ۱۹/۱ درصد و در مدل عددی نیری با خطایی در حدود ۱۹/۵، ۱۶/۱ و ۱۷/۹ درصد همراه می‌باشد. متوسط خطای مدل‌سازی برای پروفیل‌های سرعت طولی در قیاس با داده‌های



شکل ۶- مقایسه پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده حاصل از مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی در تراز سطح آب

شده است.

با توجه به لزوم بررسی الگوی جریان در محدوده دهانه آبگیری، مقاطع برداشت سرعت به شکلی انتخاب شده است که با نزدیک شدن جریان در کانال اصلی به آبگیر، فاصله مقاطع اندازه‌گیری نزدیک‌تر به هم در نظر گرفته شود. مقاطع برداشت اطلاعات برحسب درجه در کانال اصلی به شرح مشخصات هیدرولیکی میدان جریان در جدول (ارائه شده است. با توجه به مقادیر اعداد رینولدز و فرود، جریان حالت کاملاً آشفته داشته و زیر بحرانی می‌باشد. شرایط مرزی مشابه آنچه در بخش ۳-۲ بیان گردید به مدل اعمال شده و در این خصوص تمهیدات لازم جهت تقسیم دبی به نسبت اجباری ۰/۲۷۷ درصد میان کانال آبگیر و کانال اصلی بکار گرفته شده است.

می‌باشد. همچنین اطلاعات هر مقطع در کانال اصلی و آبگیر (مطابق شکل ۴) در یک شبکه ۶×۶ و ۶×۵ برداشت شده است. مشخصات هیدرولیکی میدان جریان در جدول (ارائه شده

## ارزیابی مدل در شبیه‌سازی آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه

### مشخصات میدان فیزیکی و محاسباتی

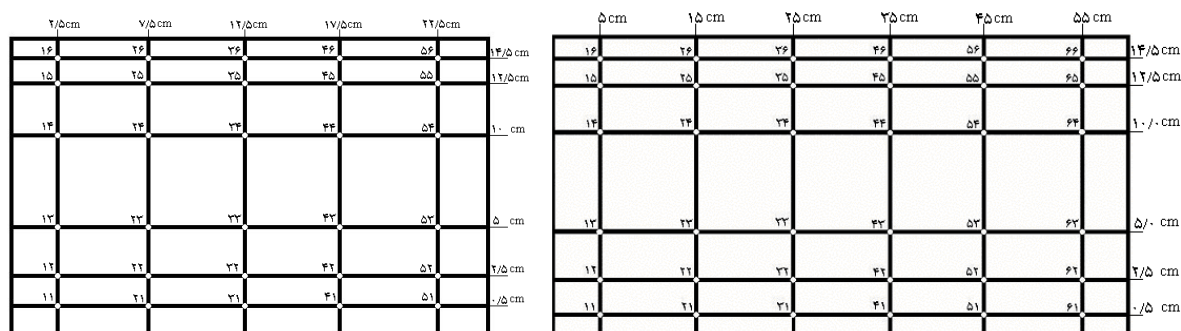
در این بخش به تحلیل و بررسی عددی آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی (Pirestani (2005) پرداخته می‌شود. بدین منظور فلوم دانشگاه تربیت مدرس به همراه انشعاب جانبی آن بعنوان آزمون موردنظر برای شبیه‌سازی‌های مربوطه انتخاب شده است. مشخصات فیزیکی کانال قوسی شکل مشابه مطالب مندرج در بند ۴-۱ می‌باشد. همچنین آبگیر، کانالی مستطیلی به عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۳ متر با طول ۱/۱ متر می‌باشد. در این تحقیق به شبیه‌سازی و بررسی الگوی جریان برای زاویه استقرار ۴۰°، تحت زاویه آبگیری ۴۵°، که مشابه با یکی از تست‌های آزمایشگاهی می‌باشد، پرداخته (جدول ) می‌باشد. کانال انحرافی نیز به ده مقطع طولی تقسیم‌بندی شده، به طوریکه فواصل مقاطع از مقطع اول تا مقطع پنجم برابر ۵ سانتی‌متر و از مقطع پنجم تا دهم برابر ۱۰ سانتی‌متر

تمهیدات لازم جهت تقسیم دبی به نسبت اجباری ۰/۲۷۷ درصد میان کانال آبگیر و کانال اصلی بکار گرفته شده است.

است. با توجه به مقادیر اعداد رینولدز و فرود، جریان حالت کاملاً آشفته داشته و زیر بحرانی می‌باشد. شرایط مرزی مشابه آنچه در بخش ۳-۲ بیان گردید به مدل اعمال شده و در این خصوص

جدول ۲- مقاطع انتخاب شده در کانال قوسی شکل جهت اندازه‌گیری سرعت (درجه)

شماره مقطع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
زاویه	۰	۱۰	۲۰	۲۵	۳۰	۳۲/۵	۳۵	۳۷/۵	۴۰	۴۲/۵	۴۵	۴۷/۵	۵۰	۵۵	۶۰	۷۰	۸۰



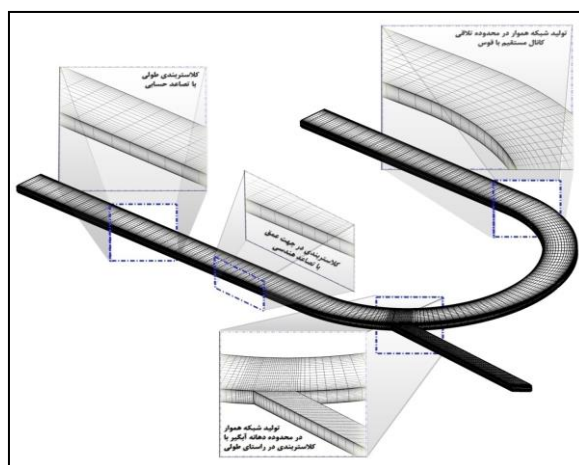
شکل ۴: شبکه‌بندی انجام شده در هر مقطع برای اندازه‌گیری سرعت در کانال اصلی (راست) و کانال آبگیر (چپ)

جدول ۳- مشخصات هیدرولیکی جریان

عمق جریان	دبی ورودی (m <sup>3</sup> /s)	دبی خروجی آبگیر (m <sup>3</sup> /s)	نسبت دبی آبگیری	عدد فرود	عدد رینولدز
۰/۱۵	۰/۰۴۵	۰/۰۱۲۴۶۲	۰/۲۷۷	۰/۴۱	۴۹۶۵۲/۴

شبکه‌ای با ابعاد ۲۵×۲۱×۴۰ و ۲۵×۲۵×۱۷۲ جهت در راستای طول، عرض و عمق ایجاد شده است. شکل جزئیات شبکه محاسباتی مذکور را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، شبکه در نقاط تلاقی کانال‌های مستقیم با قوس ۱۸۰ درجه و همچنین محدوده دهانه آبگیری از همواری همسانی قابل قبولی برخوردار است.

برای دستیابی به نتایج مناسب ضمن حساسیت‌سنجی نسبت به ابعاد شبکه محاسباتی، در نهایت شبکه منتخب در جهات عرض و عمق با تصاعد هندسی (با ضریب کلاستر بندی ۱/۲) و در راستای طولی کانال‌ها به کمک تصاعد حسابی (ریزشونده به سمت کانال قوسی شکل و دهانه آبگیری) اقدام به تولید شبکه شده است. با این اوصاف برای کانال اصلی و آبگیر



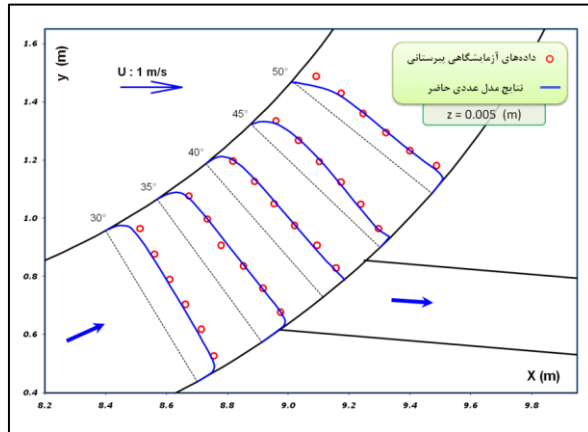
شکل ۸- شبکه‌بندی میدان حل با کلاستر بندی‌های مختلف در جهات متفاوت

محدوده آبگیر و در نزدیکی بستر ( $z = 0.005 \text{ m}$ ) به همراه داده‌های آزمایشگاهی مربوطه در شکل) نشان داده شده است. همچنین

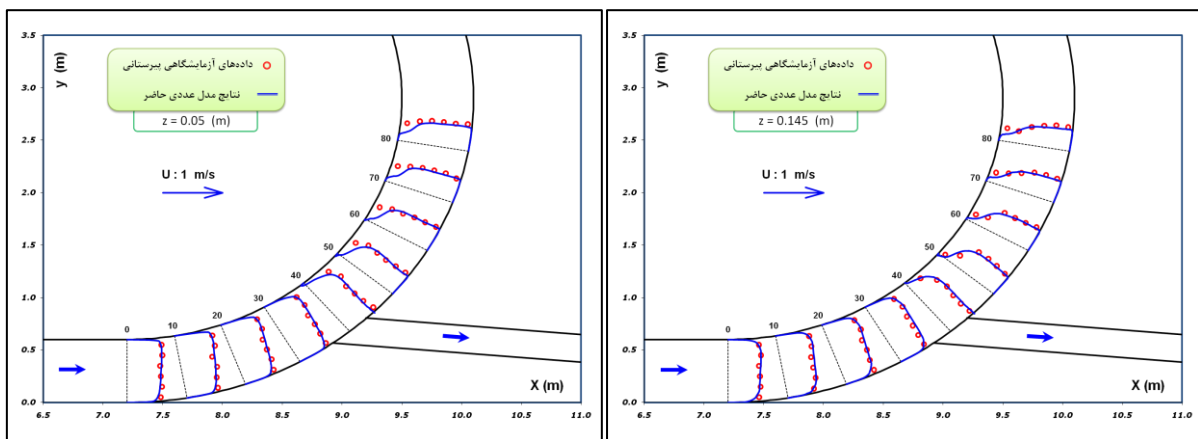
بررسی نتایج مدل عددی حاضر تغییرات پروفیل‌های سرعت طولی در امتداد کانال اصلی در

مختصات (واقع در گوشه پایین و ابتدای دیواره خارجی کانال اصلی) می‌باشد. این شکل همخوانی و انطباق مناسبی را میان نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

شکل ۵) پروفیل‌های مذکور را در عمق میانه ( $z = 0.05 \text{ m}$ ) و نزدیکی سطح آب ( $z = 0.145 \text{ m}$ ) نشان می‌دهد. در این شکل‌ها  $x$ ،  $y$  و  $z$  به ترتیب فاصله طول، عرض و عمق نقاط نسبت به مبدأ



شکل ۹- پروفیل سرعت‌های طولی در کانال اصلی در نزدیکی بستر و در محدوده دهانه آبگیر



شکل ۵- مقایسه پروفیل سرعت‌های طولی به دست آمده از مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی در عمق میانه (راست) و نزدیکی سطح آب (چپ)

وضعیت با تأثیر نیروی گریز از مرکز و جریان‌های ثانویه تشدید شده و در نزدیکی دیواره داخلی به شدت از سرعت‌های طولی می‌کاهد (مقاطع ۶۰ و ۷۰ درجه).

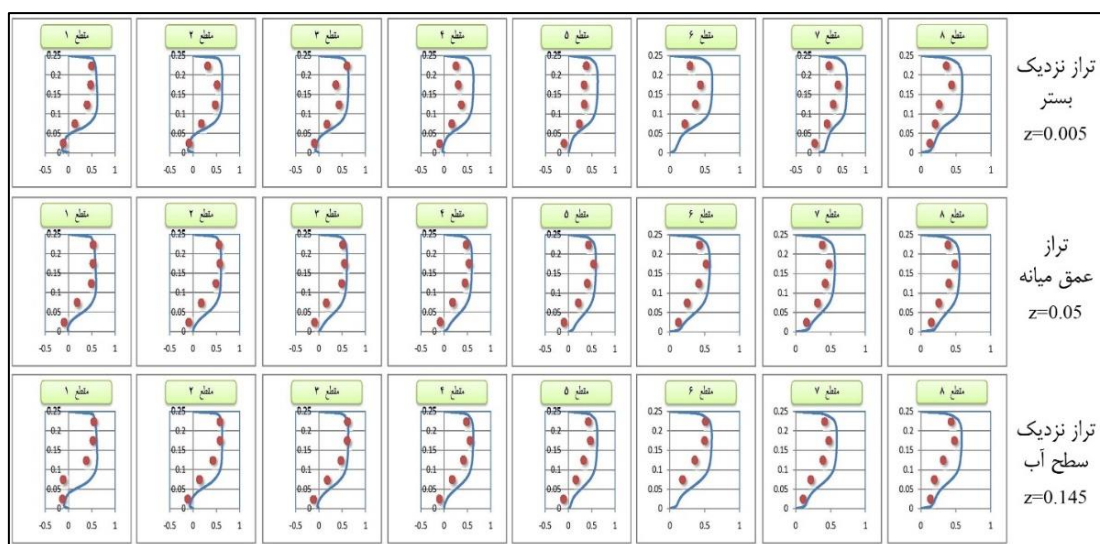
مقادیر میانگین خطای محاسباتی (مجذور میانگین مربعات اختلافها) برای پروفیل‌های محاسبه شده در ترازهای مختلف در کانال اصلی به میزان  $7/5$  و  $8/7$  و  $5/6$  درصد به ترتیب برای تراز نزدیک بستر، عمق میانه و تراز نزدیک سطح آب می‌باشد. بررسی جزئیات خطاها نشان می‌دهد که در مقاطع قبل از آبگیر بیشترین خطا به ترتیب مربوط به نزدیکی دیواره (به دلیل بکارگیری تابع دیواره) و نزدیکی سطح آزاد (بدلیل عدم شبیه‌سازی تغییرات آن مخصوصاً در ورودی آبگیر) می‌باشد. لازم به ذکر است به واسطه تغییرات سطح آزاد در دهانه ورودی آبگیر و تأثیر آن بر بالانس جرمی جریان، پروفیل سرعت طولی در محدوده پایین دست آن با خطا مواجه شده است. البته بخشی از خطاها نیز بدلیل وجود خطا

همانگونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، پروفیل سرعت‌های طولی در کانال مستقیم بالادست به خوبی توسعه یافته است. با ورود جریان به داخل قوس مشابه الگوی جریان در قوس بدون آبگیر، افزایش گرادیان طولی فشار ناشی از نیروی جانب مرکز، سرعت بیشینه جریان را به سمت دیواره داخلی منحرف می‌نماید (مقاطع اولیه) به طوریکه سبب تیزی پروفیل‌های سرعت در این ناحیه می‌گردد. با نزدیک شدن جریان به دهانه آبگیر به واسطه مکش ایجاد شده، جریان‌های طولی به سمت دهانه آبگیر منحرف می‌گردد که این مساله در میانه دهانه کاملاً تشدید می‌شود. بدین ترتیب در محدوده آبگیری، حداکثر سرعت‌های طولی به دیواره خارجی نزدیک می‌گردد (مقطع ۴۰ درجه). بعد از عبور از روبروی دهانه به واسطه تأثیر ممنوم عرضی بر الگوی جریان طولی، از ممنوم طولی جریان کاسته شده و سرجمع مقادیر سرعت‌های طولی کاهش می‌یابد (مقطع ۵۰ درجه). این

دیواره داخلی آبگیر در مقطع ۲ تا ۴، تشدید سرعت‌های طولی مثبت در مقاطع ۳ و ۴ و در نهایت تشکیل جریان توسعه‌یافته در مقاطع انتهایی می‌باشد.

مقادیر میانگین خطای محاسباتی (مجذور میانگین مربعات اختلافها) برای پروفیل‌های محاسبه‌شده در ترازهای مختلف در آبگیر به میزان  $15/2$  و  $20/3$  و  $23/5$  درصد به ترتیب برای تراز نزدیک بستر، عمق میانه و تراز فوقانی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود و در قیاس با نتایج سایر مدل‌های عددی، مدل عددی حاضر توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی الگوی جریان دارد که البته در برخی موارد (مخصوصاً تخمین جریان‌های برگشتی) تفاوت‌های ایجاد شده میان نتایج قابل توجه بوده که با عنایت به تغییرات زیاد سطح آزاد جریان در دهانه آبگیر توجیه‌پذیر می‌باشد.

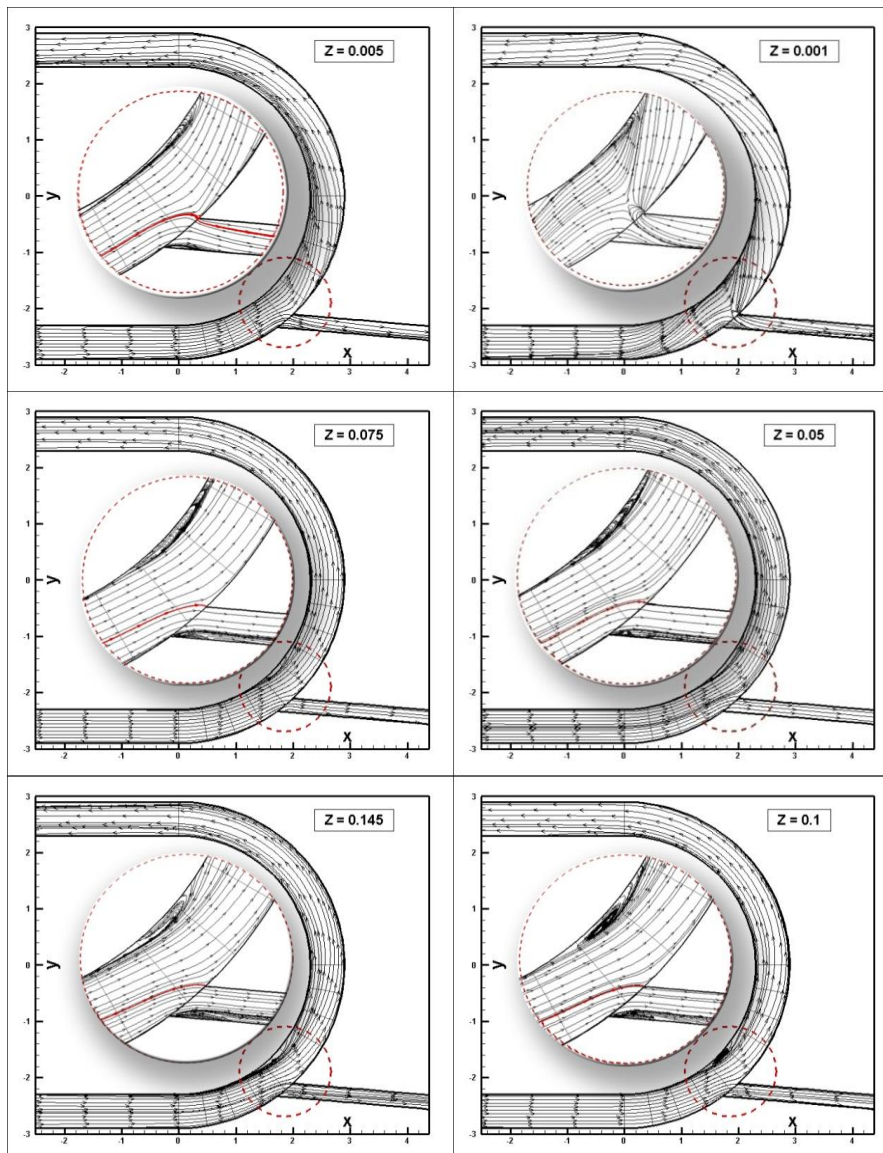
و اختلال در اطلاعات برداشت‌شده آزمایشگاهی بوده است. در شکل (۶) نتایج مدل حاضر در خصوص پروفیل‌های سرعت طولی در آبگیر با داده‌های آزمایشگاهی (در ۸ مقطع ابتدایی از مقاطع معرفی‌شده در بند ۱-۵) در سه تراز نزدیک بستر، عمق میانه و تراز نزدیک سطح مقایسه شده است. لازم به ذکر است در آخرین تراز فوقانی ( $z = 0.145$  m) با توجه به افت شدید سطح آب در دهانه کانال انحرافی، داده آزمایشگاهی برداشت نشده است. محور افقی و قائم در این شکل به ترتیب به سرعت طولی در امتداد کانال انحرافی بر حسب متر بر ثانیه و فاصله از دیواره داخلی آبگیر بر حسب متر اشاره دارد. این شکل به خوبی نمایانگر الگوی جریان طولی در آبگیر اعم از انحراف جریان طولی به سمت دیواره خارجی آبگیر در مقطع ۱، ایجاد ناحیه جدایی جریان در سمت



شکل ۱۱- مقایسه پروفیل سرعت‌های طولی بدست آمده از مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی در کانال آبگیر

مقطع که در نزدیکی بستر به سمت دیواره داخلی قوس می‌باشد، به شدت به سمت این دیواره منحرف شده و در یک نقطه کانونی در این منطقه که مرکز ناحیه سکون است، جمع شده اند. البته بخشی از جریان پایین دست آبگیر نیز از کانال اصلی به داخل آبگیر، مکیده شده و تلاقی این خطوط جریان سبب تشکیل ناحیه زینی شکل در نزدیک بستر گردیده است. از سوی دیگر در کانال انحرافی در این تراز بواسطه انحراف خطوط جریان وارد شده به آبگیر، یک ناحیه جریان برگشتی در نزدیکی دیواره داخلی و به صورت گوه‌ای شکل ایجاد شده است. در خارج از محدوده آبگیری نیز در کانال اصلی الگویی مشابه با قوس بدون آبگیر رخ داده که با انحراف شدید خطوط جریان به سمت دیواره داخلی همراه است.

در شکل (۶) خطوط جریان در ترازهای مختلف ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مدل عددی حاضر توانسته است نقطه کانونی در تراز بستر، ناحیه زینی شکل در ترازهای نزدیک به آن و جریان‌های برگشتی و نواحی گردابی شکل در کانال اصلی و کانال انحرافی و تغییرات آن در عمق (به صورت گوه‌ای شکل) را شبیه‌سازی نماید. این شکل نشان می‌دهد که در تراز نزدیک بستر ( $z = 0.001$  m) الگوی مشابهی با آبگیری از کانال مستقیم رخ داده است. در این تراز تقریباً نیمی از خطوط جریان بالادست به سمت آبگیر منحرف شده و همگی در نقطه کانونی (تشکیل شده در آبگیر) تجمع یافته‌اند. سایر خطوط جریان بالادست نیز پس از دهانه آبگیر بواسطه جریان ثانویه و عرضی در



شکل ۶- خطوط جریان در ترازهای مختلف

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از یک مدل بومی، فرآیند آگیری از کانال قوسی‌شکل با انحنای ۱۸۰ درجه با حل معادلات سه‌بعدی هیدرودینامیک جریان و استفاده از مدل آشفتگی دومعادله‌ای  $k - \omega$  مدل‌سازی گردید که مقایسه نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل جهت شبیه‌سازی الگوی پیچیده جریان در چنین شرایطی می‌باشد. لازم به ذکر است در این تحقیق با استفاده از یک بلوک و به‌طور هم‌زمان و با کمک آرایه‌هایی با ابعاد متغیر، کانال اصلی و انحرافی مدل‌سازی گردید. برخی از مهمترین نتایج تحقیق به شرح ذیل می‌باشند:

الگوی جریان در بالادست آگیر در تمامی ترازها با یکدیگر شباهت داشته و مانند حالت جریان در قوس ۱۸۰ درجه بدون آگیر می‌باشد. بنابراین در این مقاطع (مقاطع صفر تا ۳۰ درجه) در تمامی ترازها ابتدا حداکثر سرعت در کنار دیواره داخلی بوده

و سپس به نزدیک دیواره خارجی هدایت می‌شود.

در مقابل ورودی آگیر بواسطه مکش دهانه، پروفیل‌های سرعت طولی به سمت آگیر منحرف شده‌اند. مکش آگیر در ترازهای تحتانی با توجه به پایین بودن سرعت‌های طولی جریان تأثیر بیشتری می‌گذارد و همین امر سبب می‌شود که در این ترازها پروفیل تیزتری در نزدیکی ورودی آگیر شکل گیرد (مقطع ۴۰ درجه).

در تمامی ترازها در مقاطع بعد از دهانه آگیر (مقاطع ۵۰ تا ۸۰ درجه) به واسطه تأثیر ممنوم عرضی ناشی از مکش آگیر بر کاهش ممنوم طولی جریان، یک ناحیه کم‌سرعت در نزدیکی دیواره داخلی قوس تشکیل می‌شود.

از آنجایی که تأثیر ممنوم عرضی ناشی از جریان‌های ثانویه در نزدیکی سطح آب هم‌جهت با ممنوم عرضی ناشی از مکش آگیر می‌باشد، بنابراین در این تراز تأثیر توأمان دو عامل مذکور



تا رسیدن به عمق میانه بزرگتر شده و البته ابعاد ناحیه مذکور در ترازهای بالاتر از عمق میانه تثبیت گردیده است.

یکی از تفاوت‌های مهم الگوی جریان در آبیگری از کانال قوسی شکل نسبت به آبیگری از کانال مستقیم، کم‌تر بودن عرض ناحیه تقسیم جریان در ترازهای پایین‌تر بوده که به علت تاثیر جریان ثانویه در انتقال حداکثر سرعت به ترازهای پائین‌تر و مقابله آن با مکش آبیگر در این ناحیه می‌باشد. بنابراین در ترازهای پایین‌تر رسوبات کمتری به آبیگر (در قیاس با آبیگری از کانال مستقیم)؛ وارد می‌شود که این نکته باعث توجه خاص مهندسی در طراحی آبیگرها در کانال‌های قوسی شکل گردیده است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Barkdoll, B. D. (1998). *Sediment Control at Lateral Diversions*. (Ph.D. dissertation), University of Iowa.
- Daily, J., & Harleman, D. (1966). *Fluid Dynamics*: Wesley Publishing Co.
- Dehghani, A. A. (2006). *Laboratory Study of Sediment Control to Lateral Intake at 180 ° Bend*. (Ph.D. dissertation), Tarbiat Modares University.
- Ho, J. (2006). Hydraulic Modeling Study to Determine Diversion Structure Impacts: Rio Grande at Albuquerque, New Mexico: University of New Mexico.
- Hsieh, T., & Yang, J. (2003). Investigation on the Suitability of Two-Dimensional Depth-Averaged Models for Bend-Flow Simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(8), 597-612.
- Ketabdar, M. (2016). Numerical and Empirical Studies on the Hydraulic Conditions of 90 degree converged Bend with Intake. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 5(9), 441-444.
- Meshkati, S. M. H., & Salehi, S. A. (2020). 3D Modeling of Flow Pattern at Lateral Intake. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(6), 1501-1513.
- Montaseri, H., Tavakoli, K., Evangelista, S., & Omidvar, P. (year). Sediment Transport and Bed Evolution in a 180 Degree Curved Channel with Lateral Intake: Experiments and Numerical Simulations by Eulerian And Discrete Phase Models. *International Journal of Modern Physics C*. Accepted Manuscript, Retrieved April 21, 2020.
- Na, E. H., & Park, S. S. (2005). A Hydrodynamic Modeling Study to Determine the Optimum Water Intake Location in Lake Paldang, Korea. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(6), 1315-1332.
- Nazari, N., Salehi, S. A., & Amiri Tokaldany, E. (2019). Three-dimensional numerical simulation of flow pattern at intakes from straight channel with a trapezoidal section. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(6), 1289-1298.
- Near, V., Sotiropoulos, F., & Odgaard, A. (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*.
- Pirestani, M. R. (2005). Investigation of Flow Pattern and Scouring at The Intake of Curved Channels. (Ph.D. dissertation), Islamic Azad.
- Rhie, C., & Chow, W. L. (1983). Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil With Trailing Edge Separation. *AIAA journal*, 21(11), 1525-1532.
- Rostamabadi, M. (2008). Numerical Simulation of Turbulent Flow Pattern Around Submerged Vanes in Lateral Intake at 180 ° Bend. (MSc thesis), Tarbiat Modares University.
- Rostamabadi, M., Salehi, S. A. A., & Montaseri, H. (2010). *Comparison of Free Surface Simulation Methods in Fluent Software*. Paper presented at the 9th Iran Hydraulic Conference.
- Safarzadeh, A. (2005). *Numerical Simulation of Flow Intake in 180 ° Bend*. (MSc thesis), Tarbiat Modares University.
- Sarhadi, A., & Jabbari, E. (2017). Investigating Effect of Different Parameters of the Submerged Vanes on the Lateral Intake Discharge Located in the 180 Degree Bend Using the Numerical Model. *Civil Engineering Journal*, 3(11), 1176-1187.
- Tavakoli, K., & Montaseri, H. (2017). Evaluation of Two Phase Models for Numerical Simulation of Sediment Transport in a 180 Degree Bend with Lateral Intake. *Modares Civil Engineering*, 17.
- Tavakoli, K., Montaseri, H., Omidvar, P., & Evangelista, S. (2019). Numerical simulation of sediment transport in a U-shaped channel with lateral intake: Effects of intake position and diversion angle. *International Journal of Modern Physics C (IJMPC)*, 30(09), 1-26.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An

سبب تسریع در شکل‌گیری ناحیه کم‌سرعت می‌شود به طوری که در مقطع ۵۰ درجه سبب ایجاد ناحیه سکون و رسیدن سرعت طولی به حداقل مقدار خود شده است. در ترازهای نزدیک بستر به دلیل تاثیر معکوس دو عامل فوق‌الذکر (جریان ثانویه به سمت دیواره داخلی و مکش آبیگر به سمت دیواره خارجی) ناحیه کم‌سرعت با تاخیر و در مقطع ۷۰ درجه کامل شده است.

خطوط جریان در ترازهای مختلف نشان می‌دهد که با فاصله‌گرفتن از کف کانال و نزدیک شدن آن به سطح آب، ضمن حذف ناحیه زینی شکل و حذف کامل جریان‌های مکیده شده از کانال اصلی (از ناحیه پایین دست دهانه آبیگر در کانال اصلی به داخل آبیگر)، ناحیه جریان برگشتی گوه‌ای شکل داخل آبیگر به حالت گردبادی شکل تغییر یافته و ابعاد آن مخصوصاً از نظر عرضی

Introduction to Computational Fluid Dynamics:  
The Finite Volume Method: Pearson Education  
Limited.

Wilcox, D. C. (1994). *Turbulence Modeling for CFD*:  
DCW Industries, Incorporated.

Ye, J., & McCorquodale, J. (1998). Simulation of  
Curved Open Channel Flows by 3D  
Hydrodynamic Model. *Journal of Hydraulic  
Engineering*, 124(7), 687-698.