

Numerical Simulation of Lateral Pipe Intake from Open Channel

MAHMOOD RAHMANI FIROZJAIY^{1*}, EHSAN BEHNAM TALAB², SEYED ALI AKBAR SALEHI NEYSHABOURI³

1. Former MSc. Student, Civil Engineering Department, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

3. Professor, Civil Engineering Department, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

(Received: Feb. 9, 2018- Revised: March. 18, 2018- Accepted: Apr. 9, 2018)

ABSTRACT

Intake structures which are used as water diverting structures in open channels, rivers, and reservoirs are of the oldest issues of hydraulic engineering. In this study, a lateral pipe intake was proposed as a flow diversion structure provided in side walls of a channel, and its discharge characteristics and flow pattern was studied numerically using 3D CFD package, Flow-3D. The simulations have been performed for various parameters. The results showed that the lateral pipe intake with 90° angle has the highest efficiency among all of our simulation scenarios. The vortex and the separation zone in the lateral pipe intake were formed behind the pipe. Also, formation of the recirculation zone behind the lateral pipe intake can be affected by other parameters like inlet Froude number and transversal position of the pipe intake mouth. Furthermore, an equation was developed for the discharge coefficient in the lateral pipe intake. The computed discharges were within ±15% of the observed ones.

Keywords: Lateral Intake, Pipe, Discharge Coefficient, Numerical Simulation, Flow3D

* Corresponding Author's Email: mrahmanif69@gmail.com

شبیه‌سازی عددی آبیگری جانبی لوله‌ای شکل از کانال روباز

محمود رحمانی^{۱*}، احسان بهنام طلب^۲، سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری^۳

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

۳. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱/۲۰)

خلاصه:

سازه‌های آبیگر که بعنوان سازه‌های هدایت آب در کانال‌های باز، رودخانه‌ها و مخازن سدها استفاده می‌شوند از قدیمی‌ترین مسائل مهندسی هیدرولیک هستند. در این مطالعه، یک آبیگر جانبی لوله‌ای به عنوان یک سازه انحراف جریان پیشنهاد گردید که در دیوارهای جانبی یک کانال استفاده می‌شود، و مشخصات دبی آبیگری و الگوی جریان آن با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها برای پارامترهای مختلف انجام شده است. نتایج نشان داد که آبیگری جانبی لوله‌ای با زاویه ۹۰ درجه بالاترین کارایی را در میان تمامی سناریوهای شبیه‌سازی شده دارد. گردابه و ناحیه جدایش جریان در پشت لوله آبیگر تشکیل می‌شود و نیز شکل‌گیری ناحیه جریان چرخشی در پشت لوله آبیگر جانبی می‌تواند تحت تاثیر پارامترهای دیگر مانند عدد فرود جریان ورودی و موقعیت عرضی دهانه لوله آبیگر باشد. علاوه بر این، یک معادله برای ضریب دبی آبیگری ارائه شده است. ضریب دبی ارائه شده نسبت به ضریب دبی مشاهده شده در حدود ۱۵ درصد اختلاف دارد.

واژه‌های کلیدی: آبیگر جانبی، لوله، ضریب دبی، مدل‌سازی عددی، Flow3D

مقدمه

آبیگری از رودخانه یکی از قدیمی‌ترین مسائل مطرح در زمینه مهندسی هیدرولیک می‌باشد و طراحی یک سازه آبیگر در یک رودخانه طبیعی، امروزه امری مهم به شمار می‌رود. موقعیت آبیگری برخی از رودخانه‌ها به گونه‌ای است که از نظر توپوگرافی، احداث سازه‌های آبیگر با کانال و روش‌های دیگر مشکل بوده یا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. در این حالت آبیگری با لوله می‌تواند روشی مناسب و مقرون به صرفه باشد. از مزیت‌های دیگر آبیگری با لوله این است که موقعیت دهانه ورودی لوله آبیگر در عرض کانال اصلی برخلاف حالت آبیگری با کانال قابل تغییر است و ضرورتی برای استقرار آن در مجاورت جداره‌های کانال اصلی وجود ندارد. از آنجایی که مواد زائد، آشغال و رسوبات موجود در جریان در مجاورت جداره کانال اصلی ته‌نشین می‌شود، احتمال ورود این موارد به درون کانال آبیگر خیلی بیشتر از لوله آبیگر است، درحالی‌که تخلیه رسوبات ورودی به داخل لوله‌های آبیگر نیز می‌تواند یک مشکل عمده برای این نوع سازه‌ها باشد و باید تمهیدات لازم در دهانه ورودی برای جلوگیری از ورود رسوبات و همچنین در مسیر آبیگر برای تخلیه

و بازدید دوره‌ای اندیشیده شود.

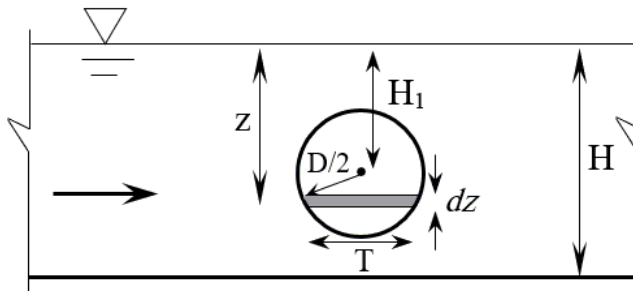
محققین مختلفی، مطالعاتی را بر روی آبیگر جانبی با روش‌های عددی و مدل فیزیکی انجام داده‌اند که تقریباً تمامی آنها بر روی آبیگرهای روباز متمرکز بوده‌اند. Kashuri and Pundarikanthan (1987)، Neary and Odgaard (1993)، Ramamurthy (1999)، Barkdoll et al. (1999)، Neary et al. (1999)، Seyedian et al. (2007)، Goudarzizadeh et al. (2010)، Asnaashari and Mirzaei et al. (2014)، Ouyang and Lin (2015)، Biswal et al. (2016)، Gómez-Zambrano et al. (2016)، Schindfessel et al. (2017)، Haddad et al. (2017) و محققان متعدد دیگری تحقیقات متعددی بصورت عددی و آزمایشگاهی بر روی آبیگری جانبی با کانال روباز انجام داده‌اند. Asnaashari and Merufinia (2015) نشان دادند که زاویه آبیگری نسبت به کانال اصلی یکی از پارامترهای تاثیرگذار در هیدرودینامیک جریان است. Biswal et al. (2016) و Schindfessel et al. (2017) طی بررسی‌های متعدد به این نتیجه رسیدند که زاویه آبیگری و دبی جریان ورودی نقش اساسی در دبی آبیگر جانبی دارند. همچنین Hussain et al. (2010)، Swamee, P. and Swamee, N. (2010)، Eghbalzadeh et al. (2015)، Hashid et al. (2010)

* نویسنده مسئول: mrahmanif69@gmail.com

عددی پرداخته است. پارامترهای مختلف تاثیرگذار از جمله عدد فرود در کانال اصلی، میزان فرورفتگی لوله آبگیر در کانال اصلی و نیز زاویه آبگیری، مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین مشخصات میدان جریان و نیز تاثیر هر یک از این پارامترها بر میدان جریان ارزیابی شده و در انتها بهترین مقادیر برای این پارامترها به منظور آبگیری بیشتر ارائه شده است. علاوه بر این رابطه‌ای مناسب برای محاسبه ضریب دبی با استفاده از پارامترهای ذکر شده ارائه گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

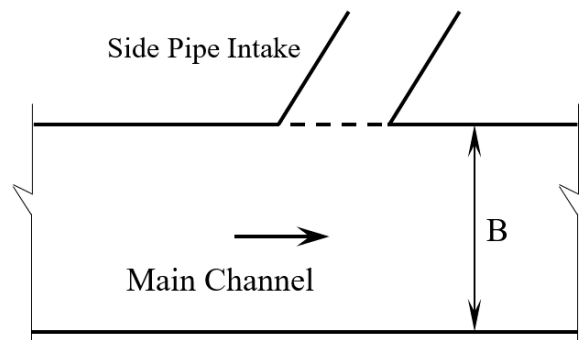
شکل (۱) آبگیری جانبی از کانال روباز با استفاده از لوله با قطر D در دیواره کانال اصلی با عرض B را نشان می‌دهد. با توجه به مشخصات ارائه شده در این شکل، رابطه (۱) قابل استنتاج است.



ب) تصویر جانبی کانال و لوله آبگیر جانبی

Azimi et al. (2017) و *Guo and Stitt* (2017) در تحقیقات خود روی آبگیری جانبی توسط روزنه از کانال روباز نشان دادند که عدد فرود جریان در کانال اصلی و شکل روزنه جانبی تاثیر مستقیمی روی دبی آبگیری جانبی دارند. مطالعات آزمایشگاهی *Hussain et al.* (2010) همچنین نشان داد که ضریب دبی به مقدار عدد فرود جریان در کانال اصلی، قطر روزنه و عرض کانال اصلی بستگی دارد. آنها در انتها براساس داده‌های آزمایشگاهی خود رابطه‌ای خطی از این سه پارامتر برای ضریب دبی ارائه کردند.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد تاکنون تحقیقی روی آبگیری جانبی از کانال روباز توسط لوله انجام نگرفته است. با توجه به اینکه این نوع آبگیری می‌تواند بطور گسترده‌ای در سیستم‌های آبگیری از منابع آبی مورد استفاده قرار گیرد این تحقیق به بررسی مشخصات این نوع آبگیری با استفاده از مدل



الف) پلان کانال اصلی

شکل (۱) آبگیری جانبی لوله‌ای از کانال روباز

$$Q = 2 \times C_D \int_{H_1-D/2}^{H_1+D/2} \sqrt{2gz} \times \sqrt{(D/2)^2 - (z-H_1)^2} \times dz \quad (\text{رابطه ۴})$$

با تغییر متغیر $\left(K = \frac{H_1}{D} + 0.5\right)$ و $\left(K_1 = \frac{z}{D}\right)$ در رابطه (۴) و انتگرال‌گیری از آن، رابطه زیر برای دبی واقعی خروجی از آبگیر لوله‌ای جانبی بدست می‌آید.

$$Q = C_D \times \sqrt{2gH_1} \times \frac{\pi}{4} D^2 \quad (\text{رابطه ۵})$$

با بررسی تحقیقات پیشین در زمینه آبگیری جانبی مشخص گردید که پارامترهای تاثیرگذار بر ضریب دبی یا C_D در آبگیری جانبی با لوله از کانال روباز شامل سرعت متوسط در کانال اصلی در بالادست آبگیر جانبی (V)، عمق جریان ورودی به کانال اصلی (H)، عرض کانال اصلی (B)، فاصله کف آبگیر جانبی تا کف کانال اصلی (W)، میزان فرورفتگی لوله در کانال اصلی (L)، قطر لوله آبگیر (D)، زاویه لوله آبگیر در صفحه افقی نسبت به کانال اصلی (θ)، زاویه لوله آبگیر در صفحه قائم نسبت به کف کانال اصلی (θ_1)، ضخامت لوله آبگیر (t)، زبری جداره

$$T = 2 \times \sqrt{(D/2)^2 - (z-H_1)^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

با توجه به اینکه سطح مقطع المان مشخص شده در شکل (۱) معادل $dA = T \cdot dz$ است و سرعت خروجی از لوله در موقعیت المان موردنظر با توجه به هد آب روی آن $V = \sqrt{2gz}$ است بنابراین سطح المان و دبی عبوری از این المان عبارتند از:

$$dA = T \cdot dz = 2 \times \sqrt{(D/2)^2 - (z-H_1)^2} \times dz \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$dQ = V \cdot dA = \sqrt{2gz} \times 2 \times \sqrt{(D/2)^2 - (z-H_1)^2} \times dz \quad (\text{رابطه ۳})$$

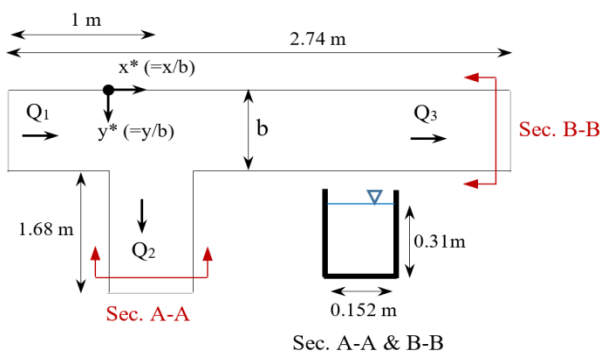
برای محاسبه دبی عبوری از لوله باید از رابطه (۳) در محدوده $H_1+D/2$ تا $H_1-D/2$ انتگرال‌گیری نمود. با توجه به اینکه پارامترهای مختلفی از قبیل زاویه آبگیری، عدد فرود جریان در کانال اصلی، موقعیت آبگیری جانبی و غیره بر دبی خروجی از لوله تاثیرگذار هستند و اثر آنها با روابط تئوریک ساده قابل تعریف نیست لذا ضریب اصلاحی تحت عنوان ضریب دبی C_D به رابطه دبی واقعی افزوده می‌شود (رابطه ۴).

برای تشخیص حجم سیال^۱ از روش‌های مختلفی استفاده کند. در این تحقیق از روش حجم سیال خودکار استفاده شده است. در این روش برای سلول‌های سطح جریان که به صورت نیمه پر هستند، کمیتی تعریف می‌شود که نسبت پرشدگی آنها از آب را نشان می‌دهد. با معلوم بودن این کمیت محل سطح آزاد و زاویه آن در میان سلول‌های میدان حل توسط نرم‌افزار قابل تشخیص است. همچنین جریان سیال در مدل‌های عددی بصورت تک فازی شبیه‌سازی شده است.

صحت‌سنجی مدل عددی آبگیر جانبی

صحت‌سنجی مدل عددی آبگیر جانبی با نرم‌افزار Flow3D در دو بخش، شامل صحت‌سنجی پروفیل‌های سرعت و نیز صحت‌سنجی دبی آبگیری انجام شده است. بدین منظور از مدل فیزیکی *Barkdoll et al.* (1999) و مدل فیزیکی *Hussain et al.* (2010) استفاده گردید. مدل فیزیکی *Barkdoll et al.* (1999) مربوط به آبگیری جانبی از کانال روباز توسط کانال است که در آن پروفیل سرعت عرضی در کانال اصلی و کانال جانبی با مدل عددی مقایسه شده است. همچنین برای صحت‌سنجی میزان دبی آبگیری از مدل فیزیکی *Hussain et al.* (2010) استفاده شد که مربوط به آبگیری جانبی از کانال روباز توسط روزنه می‌باشد.

مشخصات کامل مدل آزمایشگاهی *Barkdoll et al.* (1999) در شکل (۲) ارائه شده است. در شبکه‌بندی میدان حل از شبکه غیر یکنواخت استفاده گردیده است. این شبکه‌بندی طوری تنظیم شده که در محدوده دهانه آبگیر از شبکه ریزتر استفاده شده و این شبکه با تناسب قابل قبولی در سایر قسمت‌ها بزرگ شده است. در مدل حاضر از دو بلوک در نواحی مختلف سازه استفاده شده که بعد از حساسیت‌سنجی نسبت به اندازه شبکه‌بندی، در مجموع ۱۲۴۳۱۶۸ سلول در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. مدل فیزیکی *Barkdoll et al.* (1999)

لوله آبگیر (K)، شکل دهانه آبگیر، لزجت سیال (μ)، چگالی آب (ρ) و شتاب ثقل (g) هستند؛ بنابراین مطابق رابطه (۶) داریم:

$$C_D = f_1(V, H, B, W, L, D, \theta, \theta_1, t, K, \mu, \rho, g, \text{Shape of Mouth})$$

با استفاده از تحلیل ابعادی به روش پی‌باکینگهام و در نظر گرفتن پارامترهای V، B و ρ به عنوان پارامترهای تکراری، رابطه (۷) حاصل می‌شود.

$$C_D = f_2\left(\frac{H}{B}, \frac{W}{B}, \frac{L}{B}, \frac{D}{B}, \theta, \theta_1, \frac{t}{B}, \frac{K}{D}, \frac{V}{\sqrt{gB}}, \frac{\rho VB}{\mu}, \text{Shape of Mouth}\right)$$

همچنین با ترکیب پارامترهای بدون بعد می‌توان عدد فرود و رینولدز و نیز پارامتر بدون بعد K/B بدست آمده در رابطه بالا را به شکل زیر تغییر داد.

$$C_D = f_2\left(\frac{H}{B}, \frac{W}{B}, \frac{L}{B}, \frac{D}{B}, \theta, \theta_1, \frac{t}{B}, \frac{K}{D}, \frac{V}{\sqrt{gH}}, \frac{\rho VH}{\mu}, \text{Shape of Mouth}\right)$$

در این رابطه $\frac{V}{\sqrt{gH}}$ نشان‌دهنده عدد فرود جریان (Fr) در کانال اصلی در بالادست آبگیر جانبی است. در کانال‌های روباز اثر عدد رینولدز جریان قابل صرف‌نظر کردن است و می‌تواند از رابطه بالا حذف گردد (*Hussain et al.*, 2010). بنابراین رابطه نهایی تحلیل ابعادی برای ضریب دبی آبگیر لوله‌ای از کانال روباز را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$C_D = f_2\left(\frac{H}{B}, \frac{W}{B}, \frac{L}{B}, \frac{D}{B}, \theta, \theta_1, \frac{t}{B}, \frac{K}{D}, Fr, \text{Shape of Mouth}\right)$$

معادلات حاکم در مدل‌سازی عددی

همان‌طور که گفته شد مدل‌سازی عددی آبگیر جانبی لوله‌ای با استفاده از نرم‌افزار Flow3D انجام گرفته است. این نرم‌افزار از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند که دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. قوانین حاکم بر جریان آشفته یک سیال تراکم‌ناپذیر و لزج توسط معادله پیوستگی و معادله رینولدز به شکل زیر بیان می‌شوند (*Hirt, 1988*).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

(رابطه ۱۰)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right)$$

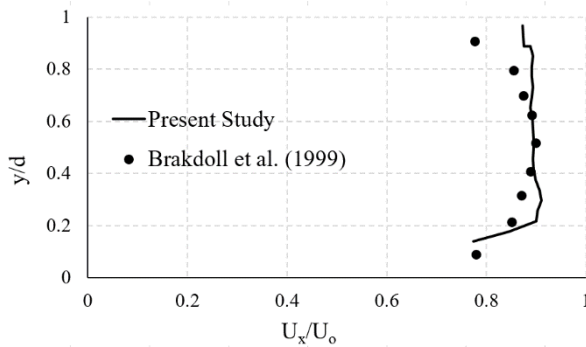
(رابطه ۱۱)

این نرم‌افزار از مدل‌های آشفتگی مختلفی از جمله طول اختلاط پراتنل، یک معادله‌ای، k- ω ، k- ϵ و RNG استفاده می‌کند (*Hirt, 1988*). نرم‌افزار Flow3D این قابلیت را دارد که

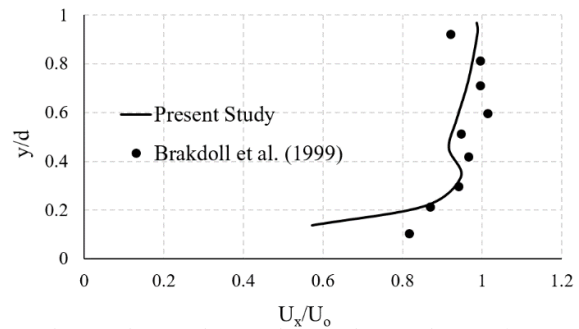
1. Volume of Fluid (VOF)

بنابراین مدل آشفتگی RNG برای شبیه‌سازی عددی مدل فیزیکی *Barkdoll et al.* (1999) انتخاب گردید. شکل (۳) پروفیل سرعت طولی بی‌بعد در راستای عرضی در نزدیکی کف کانال در دو موقعیت طولی در مدل عددی حاضر و مدل فیزیکی *Barkdoll et al.* (1999) را مقایسه کرده است. در این شکل محور طولی نمودارها سرعت بدون بعد (U_x/U_0) و محور قائم آن‌ها مختصات بی‌بعد شده در راستای عرض کانال است. پارامتر U_0 حداکثر سرعت در مقطع عرضی در ورودی کانال است.

برای انتخاب مدل آشفتگی در مدل‌سازی عددی مدل *Barkdoll et al.* (1999)، مدل‌های آشفتگی RNG و LES مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور سرعت در راستای طولی در کانال اصلی در موقعیت $x^*=0.5$ و عمق جریان، برای دو مدل آشفتگی موردنظر مقایسه شدند. میانگین درصد خطا برای دو مدل آشفتگی RNG و LES به ترتیب ۶ و ۱۵ درصد بود. درصد خطا با مقایسه سرعت در موقعیت‌های ذکر شده در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی در هر پروفیل محاسبه و متوسط‌گیری شد.



$x^* = -4.65$

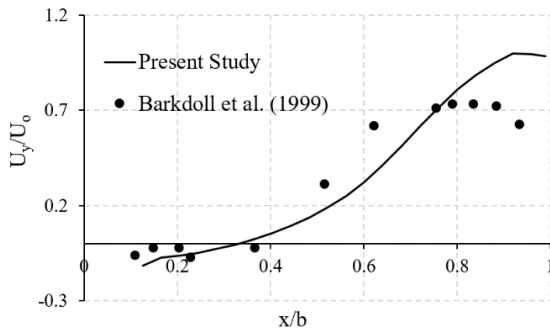


$x^* = -0.5$

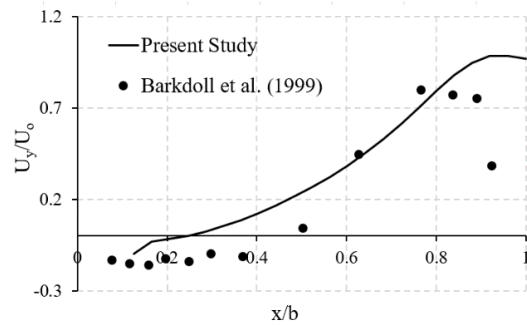
شکل ۳. مقایسه پروفیل سرعت در مدل عددی حاضر و نتایج *Barkdoll et al.* (1999) در مقطع عرضی کانال اصلی در نزدیکی کف کانال در بالادست لوله آبگیر

نیز با نتایج مدل فیزیکی مقایسه گردید (شکل (۴)). در این شکل محور طولی ($x^*=x/b$) و محور قائم سرعت بدون بعد طولی در راستای آبگیر (U_y/U_0) است.

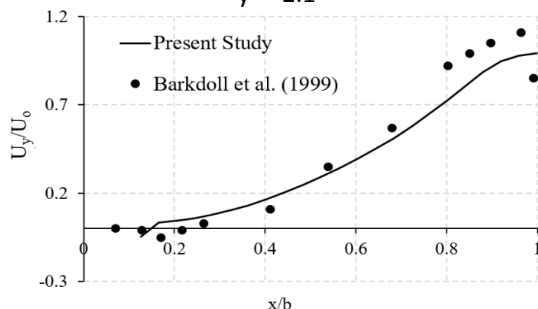
مقدار متوسط خطا در مقاطع $x^* = -0.5$ و $x^* = -4.65$ به ترتیب حدود ۶ و ۷/۵ درصد بوده که نشان‌دهنده توانایی خوب مدل عددی حاضر در شبیه‌سازی الگوی جریان است. همچنین پروفیل سرعت جریان در مقاطع عرضی آبگیر جانبی



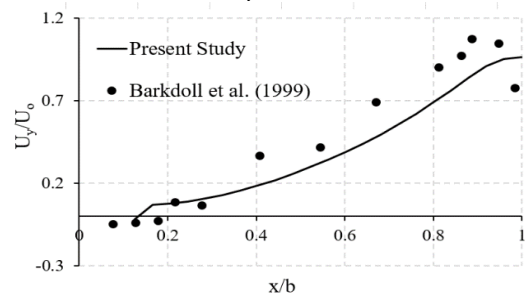
$y^* = 2.1$



$y^* = 3$



$y^* = 4$

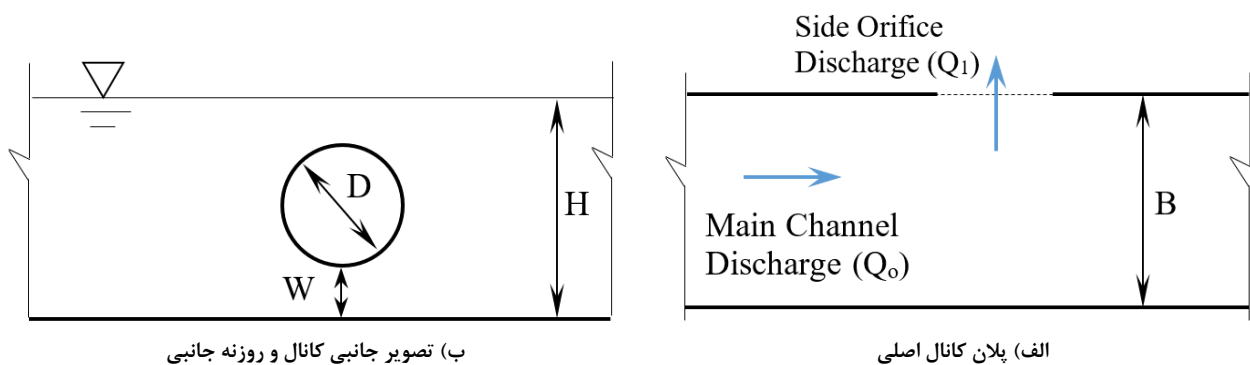


$y^* = 4.5$

شکل ۴. مقایسه پروفیل سرعت در مدل عددی حاضر و نتایج *Barkdoll et al.* (1999) در مقطع عرضی آبگیر جانبی در نزدیکی کف کانال داخل لوله آبگیر

استفاده گردیده است. این شبکه‌بندی طوری تنظیم شده است که در نواحی نزدیک روزنه از شبکه ریز استفاده و این شبکه با نسبت وجهی قابل قبولی در سایر قسمت‌ها بزرگ شده است. در مدل حاضر از یک بلوک در نواحی مختلف سازه استفاده شده است که بعد از حساسیت‌سنجی نسبت به اندازه شبکه‌بندی، تعداد سلول بکار رفته ۷۴۸۸۰۰ می‌باشد. همچنین بر اساس بخش قبل، در این مدل‌سازی نیز از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است.

نمودارهای فوق نشان‌دهنده دقت مناسب مدل‌سازی عددی حاضر در پیش‌بینی پروفیل سرعت در آبگیر جانبی است. همچنین اختلافی که در نمودارها بین مدل عددی و نتایج مدل فیزیکی مشاهده می‌شود ممکن است به دلیل دقت مدل آشفتگی مورد استفاده باشد. زیر در محل آبگیری به دلیل وجود جریان آشفتگی و گردابه‌های موجود، تاثیرگذاری مدل آشفتگی بر نتایج قابل ملاحظه خواهد بود. مشخصات کامل مدل آزمایشگاهی Hussain *et al.* (2010) در شکل (۵) ارائه شده است. برای مدل‌سازی عددی این مدل از شبکه غیریکنواخت



شکل ۵. مدل فیزیکی Hussain *et al.* (2010)

درصد دبی آبگیری را پیش‌بینی می‌کند. بنابراین با اعتماد به نتایج مدل‌سازی عددی آبگیری جانبی در نرم‌افزار Flow3D می‌توان به مدل‌سازی آبگیر جانبی توسط لوله از کانال روباز پرداخت.

پارامترهای متغیر در آزمایش‌های Hussain *et al.* (2010) قطر روزنه جانبی، عدد فرود جریان در کانال اصلی و ارتفاع روزنه در دیواره جانبی کانال بود. نتایج مقایسه دو آزمایش در جدول (۱) نشان داد که نرم‌افزار Flow3D با خطای کمتر از ۸

جدول ۱. مقایسه نتایج دبی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی Hussain *et al.* (2010)

Model No.	Q_0 (m ³ /s)	D (m)	H (m)	W (m)	Q_1 (m ³ /s)		Error Percent (%)
					Hussain <i>et al.</i> (2010)	Present Study	
۱	0.03183	0.05	0.1716	0.05	0.00167	0.00156	6.5
۲	0.04202	0.10	0.2922	0.10	0.0084	0.009	7.1

شده است. با داشتن مقدار W مقدار $H_1 (=H-W-D/2)$ نیز برابر با $22/5$ سانتیمتر محاسبه خواهد شد. با وجود H_1 و D ، دبی آبگیری از لوله آبگیر که از مدل عددی حاصل خواهد شد به کمک رابطه (۵) ضریب دبی (C_D) محاسبه می‌شود. در این تحقیق، جریان بصورت تک فازی مدل‌سازی و با توجه به نتایج بخش صحت‌سنجی، از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است. در شبکه‌بندی میدان حل از شبکه غیر یکنواخت استفاده گردیده است. این شبکه‌بندی طوری تنظیم شده است که در نواحی پراهمیت (دهانه آبگیر) از شبکه ریز استفاده شده و این شبکه با نسبت وجهی قابل قبولی در سایر قسمت‌ها بزرگ شده

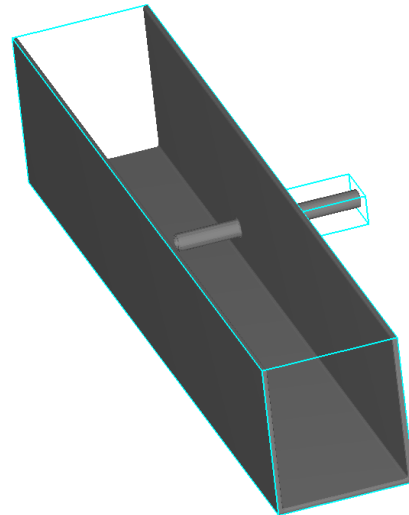
مدل‌سازی آبگیری جانبی توسط لوله از کانال روباز برای مدل‌سازی عددی آبگیر جانبی لوله‌ای از کانالی با مشخصات نزدیک به مدل Hussain *et al.* (2010) استفاده شد. کانال اصلی به طول $3/5$ متر، عرض $0/5$ متر و ارتفاع $0/5$ متر می‌باشد. به منظور تنظیم عمق جریان نیز سرریزی به ارتفاع 25 سانتی‌متر در انتهای کانال اصلی تعبیه شده است. آبگیر موردنظر، لوله‌ای به طول 80 سانتی‌متر، قطر داخلی 5 سانتی‌متر (D)، ضخامت 1 سانتیمتر (t) به فاصله 10 سانتیمتری از کف (W) قرار دارد. آبگیری در فاصله 2 متری از ابتدای کانال انجام و عمق جریان 35 سانتیمتر در نظر گرفته

با یک سرعت متوسط و مشخص وارد کانال اصلی گردد و در انتهای کانال نیز با شرایط گرادیان صفر از کانال خارج شود. مرز بالای میدان و مرز مشترک لوله با کانال اصلی (محل اتصال بلوک شماره ۱ و بلوک شماره ۲ به یکدیگر) از شرط مرزی تقارن^۳ و شرط مرزی دیوار^۴ نیز برای بقیه جداره‌های کانال اصلی و لوله آبگیر استفاده شده است. به دلیل اینکه از سطح آب تا سطح بالای مش‌بندی، مقداری فاصله بود بنابراین از شرایط مرزی تقارن استفاده گردید تا هیچ‌گونه فشار اضافی بر سطح آب وارد نگردد. همچنین به منظور ثابت نگه‌داشتن عمق آب در کانال اصلی از یک سرریز در انتهای کانال اصلی استفاده شده است.

در مدل‌سازی‌های این تحقیق، به دلیل گستردگی پارامترهای تاثیرگذار بر ضریب دبی، تنها سه پارامتر از پارامترهای ارائه‌شده در معادله (۸) مورد بررسی قرار گرفت. عدد فرود جریان در کانال اصلی (Fr)، میزان فرورفتگی لوله آبگیر در کانال اصلی (L) و زاویه آبگیری نسبت به محور طولی کانال اصلی (θ) پارامترهایی هستند که اثر آنها بر میدان جریان و ضریب C_D مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات مدل‌های بررسی‌شده در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین شمای کلی مدل و مشخصات آن در شکل (۱) ارائه شده است.

3. Symmetry
4. Wall

است. در مدل حاضر از دو بلوک شامل بلوک شماره ۱ مربوط به کانال اصلی و بلوک شماره ۲ مربوط به لوله آبگیر استفاده شده است که پس از حساسیت‌سنجی نسبت به اندازه شبکه‌بندی، مجموعاً ۲۶۸۱۶۶۰ سلول در نظر گرفته شده است. شکل (۶) مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمونه‌ای از مدل آبگیر جانبی لوله‌ای در نرم‌افزار Flow3D در شرایط $L=25\text{ cm}$ و $\theta=90^\circ$

در ورودی کانال اصلی از شرط مرزی سرعت ورودی^۱ و در انتهای کانال اصلی و انتهای لوله آبگیر از مرزی خروجی^۲ استفاده شده است. این شرایط بدین منظور بوده است که جریان

1. Specified Velocity
2. Outflow

جدول (۲) مشخصات هیدرولیکی میدان حل

پارامتر	Fr			H/B	W/B			L/B			D/B	θ					t/B	SPM*
	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۷	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۱	۱۵	۳۰	۴۵	۵۰	۶۰	۷۵	۹۰	۰/۰۲	معمولی
محدوده																		

* Shape of mouth

شکل (۷) تغییرات ضریب دبی در اعداد فرود مختلف برای ۳ زاویه آبگیری مختلف ارائه شده است. مطابق شکل زیر افزایش عدد فرود در زوایای آبگیری ۶۰ و ۷۵ درجه باعث افزایش ضریب دبی شده است ولی میزان افزایش ضریب دبی برای زاویه ۹۰ درجه کاملاً متفاوت با این دو زاویه می‌باشد.

تاثیر میزان فرورفتگی لوله آبگیر در کانال اصلی

به منظور مطالعه تاثیر میزان فرورفتگی لوله آبگیر در کانال اصلی (L) بر میدان جریان و ضریب دبی، فرورفتگی‌های بدون بعد مختلف شامل $L/B=0.1, 0.3, 0.5$ در زوایای آبگیری ۴۵ و ۹۰ درجه با عدد فرود و سرعت جریان ورودی به ترتیب ۰/۱ و ۰/۱۸۵ متر بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفتند.

تغییرات عدد فرود جریان در کانال اصلی با استفاده از تغییرات سرعت متوسط در کانال اصلی انجام و عمق آب جریان در مدل‌سازی‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.

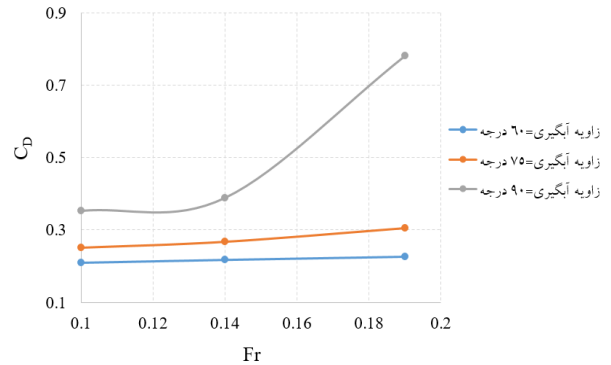
تحلیل نتایج

تاثیر پارامترهای مختلف بر میدان جریان و ضریب دبی

تاثیر عدد فرود

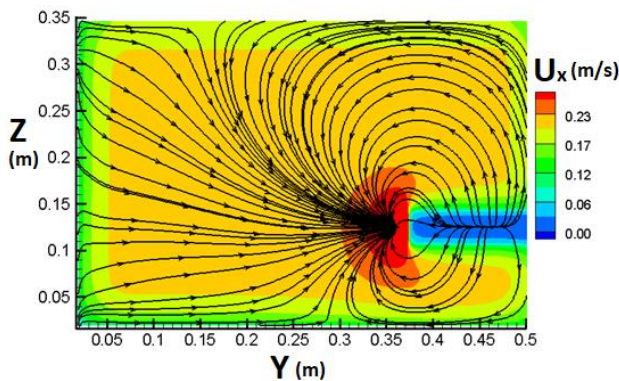
مطالعه عدد فرود جریان در کانال اصلی نشان می‌دهد تغییرات عدد فرود جریان در کانال اصلی در زوایای مختلف تاثیر متفاوتی بر دبی آبگیری دارد، ولی بطور کلی می‌توان گفت که افزایش عدد فرود باعث افزایش ضریب دبی خواهد شد. همچنین افزایش ضریب دبی در زاویه آبگیری ۹۰ درجه کاملاً مشهود است. در

از ابتدای کانال را نشان می‌دهد. خطوط جریان عرضی نشان داده شده در این شکل بیانگر تأثیر موقعیت دهانه ورودی لوله آبگیر بر نحوه تشکیل خطوط جریان عرضی در دهانه ورودی آبگیر می‌باشد. مشاهده می‌شود اگر فرورفتگی لوله آبگیر کم باشد، ناحیه چرخشی تشکیل نمی‌شود ولی با افزایش میزان فرورفتگی آبگیر، تشکیل دو ناحیه چرخشی در بالا و پایین لوله آبگیر شدت می‌گیرد. به معنای دقیق‌تر مشاهده می‌شود هر چه مقدار فرورفتگی لوله بیشتر باشد خطوط جریان مسیر طولانی‌تری برای ورود به دهانه لوله آبگیر می‌پیمایند و از مقدار دبی آبگیری نیز کاسته خواهد شد.

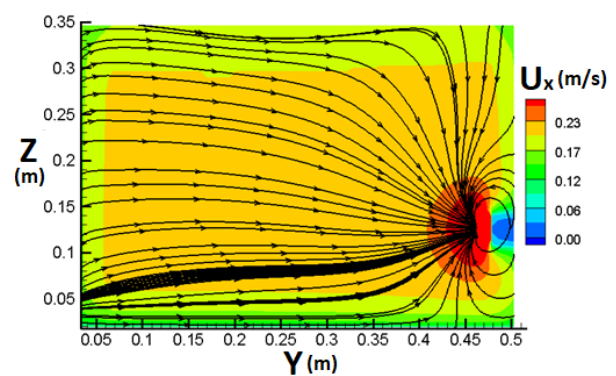


شکل ۷. تغییرات ضریب دبی در اعداد فرود مختلف

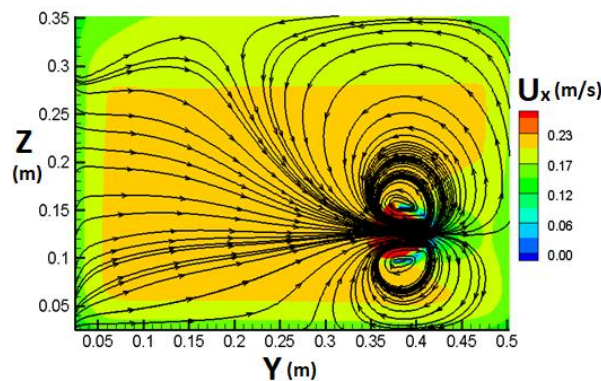
شکل (۸)، خطوط جریان عرضی برای آبگیری در زوایای ۹۰ و ۴۵ درجه در فرورفتگی‌های مختلف در فاصله ۱/۹ متری



ب) $L/B=0.3$ در زاویه آبگیری ۹۰ درجه



الف) $L/B=0.1$ در زاویه آبگیری ۹۰ درجه



ج) $L/B=0.3$ در زاویه آبگیری ۴۵ درجه

شکل ۸. سطوح هم‌تراز سرعت طولی (U_x) و خطوط جریان عرضی در زوایای آبگیری ۹۰ و ۴۵ درجه در فرورفتگی‌های مختلف در فاصله ۱/۹۰ متری از ابتدای کانال (X راستای طولی، Y راستای عرضی و Z راستای عمق کانال)

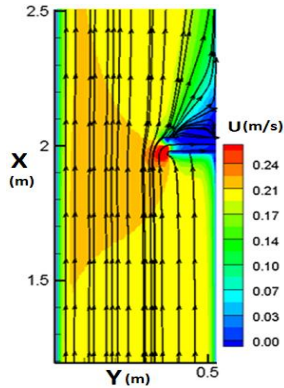
آبگیر در کانال اصلی، ناحیه چرخشی پشت لوله آبگیر بزرگتر خواهد شد.

همچنین در جدول (۳) ضریب دبی برای فرورفتگی‌های مختلف لوله آبگیر در کانال اصلی در زوایای آبگیری ۹۰ و ۴۵ درجه ارائه شده است. با توجه به جدول، هرچه محل آبگیری به میانه کانال اصلی نزدیک شود، دبی خروجی از لوله آبگیر کمتر

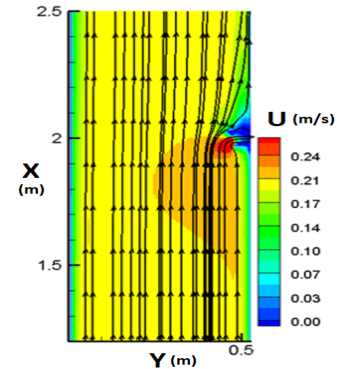
مشاهدات نتایج مدل عددی نشان می‌دهد میزان فرورفتگی لوله آبگیر، عامل مؤثر بر تشکیل ناحیه چرخشی در پشت لوله آبگیر است. به این منظور سطوح هم‌تراز سرعت کل جریان (U) و خطوط جریان در تراز محور مرکزی لوله آبگیر برای آبگیری با زاویه ۹۰ درجه در شکل (۹) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد با افزایش میزان فرورفتگی لوله

یافته است. همچنین برای زاویه آبگیری ۴۵ درجه، ضریب دبی از ۰/۲۶۵ به ۰/۱۵۷ کاهش یافته است.

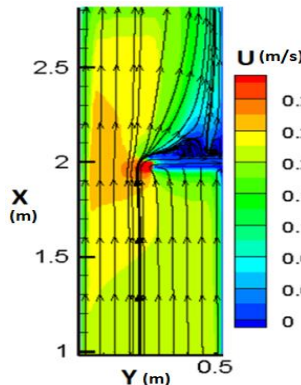
خواهد شد. مطابق جدول در آبگیری با زاویه ۹۰ درجه با افزایش میزان فرورفتگی لوله آبگیر در کانال اصلی از $L/B=0.1$ به $L/B=0.5$ میزان ضریب دبی از ۰/۴۴۸ به ۰/۳۵۲ کاهش



(ب) فرورفتگی ۱۵ سانتی‌متر ($L/B=0.3$)



(الف) فرورفتگی ۵ سانتی‌متر ($L/B=0.1$)



(ج) فرورفتگی ۲۵ سانتی‌متر ($L/B=0.5$)

شکل ۹. سطوح هم‌تراز سرعت کل (U) و خطوط جریان برای زوایای آبگیری ۹۰ درجه در تراز محور مرکزی آبگیر

تمامی مدل‌سازی‌ها در این بخش برای عدد فرود (Fr)، ۰/۱، سرعت جریان ورودی (u)، ۰/۱۸۵ متر بر ثانیه و فرورفتگی آبگیر (L)، ۲۵ سانتیمتر انجام شده است.

الف- تأثیر گرادیان فشار

با توجه به اینکه یکی از عوامل ایجادکننده جریان گرادیان فشار است، مقادیر اختلاف فشار بین نقطه‌ای در دهانه لوله آبگیر در کانال اصلی و نیز نقطه‌ای داخل لوله آبگیر، در تراز محور مرکزی لوله آبگیر در جدول (۴) ارائه شده است.

با توجه به مقادیر جدول مشاهده می‌شود که بیشترین گرادیان فشار ایجادشده در طول لوله آبگیر در زاویه آبگیر ۹۰ درجه اتفاق افتاده است. بررسی اختلاف فشار بین نقطه‌ای در دهانه لوله آبگیر در کانال اصلی و داخل لوله آبگیر در نزدیک ورودی آن، در تراز مرکز لوله آبگیر نشان داد که با افزایش زاویه آبگیری میزان اختلاف فشار یا به عبارتی گرادیان فشار افزایش می‌یابد. بررسی مقادیر دبی عبوری از لوله آبگیر نیز نشان

جدول ۳. ضریب دبی در فرورفتگی‌های مختلف برای زوایای آبگیری ۹۰ و ۴۵ درجه

میزان فرورفتگی بدون بعد (L/B)	ضریب دبی (C_D)	
	زاویه ۹۰ درجه	زاویه ۴۵ درجه
۰/۱	۰/۴۴۸	۰/۲۶۵
۰/۳	۰/۴۰۵	۰/۲۵۵
۰/۵	۰/۳۵۲	۰/۱۵۷

زاویه قرارگیری لوله آبگیر نسبت به کانال اصلی

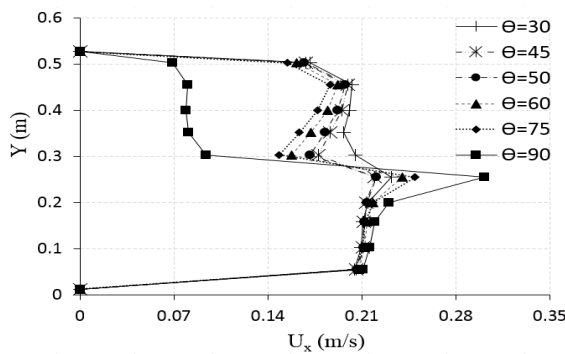
به منظور بررسی میزان تأثیر زاویه انحراف لوله آبگیر در صفحه افقی نسبت به کانال اصلی بر میدان جریان و ضریب دبی، آبگیری تحت زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۵۰، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای طولی کانال اصلی شبیه‌سازی شده است. برای تغییر زاویه لوله آبگیر، محل دوران لوله آبگیر در صفحه افقی، مرکز ورودی لوله آبگیر بوده بطوری که فاصله عرضی ورودی آبگیر تا جداره کانال اصلی در همه زوایا یکسان بوده است.

زوایای آبگیری یکسان است ولی با نزدیک شدن به لوله آبگیر داده است. همچنین در شکل (۱۰) پروفیل سرعت طولی جریان در کانال اصلی در عرض آن نشان داده شده است. در این نمودارها، محور طولی سرعت طولی جریان (u) و محور قائم، عرض کانال اصلی (Y) می‌باشد. با توجه به این شکل تا قبل از رسیدن به لوله آبگیر (X=1.5 m)، پروفیل سرعت در تمامی

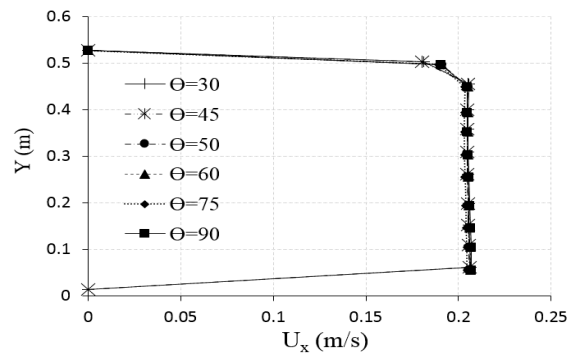
می‌دهد که بیشترین دبی نیز در زاویه آبگیری ۹۰ درجه رخ داده است. همچنین در شکل (۱۰) پروفیل سرعت طولی جریان در کانال اصلی در عرض آن نشان داده شده است. در این نمودارها، محور طولی سرعت طولی جریان (u) و محور قائم، عرض کانال اصلی (Y) می‌باشد. با توجه به این شکل تا قبل از رسیدن به لوله آبگیر (X=1.5 m)، پروفیل سرعت در تمامی

جدول ۴. اختلاف فشار بین نقطه‌ای در دهانه لوله آبگیر در کانال اصلی و داخل لوله آبگیر در تراز مرکز لوله آبگیر

نسبت دبی آبگیری (دبی آبگیری به دبی ورودی در کانال اصلی)	اختلاف فشار (pa)	زاویه آبگیری
۰/۰۲۶	۴۲	۱۵
۰/۰۲	۴۶	۳۰
۰/۰۱۹۶	۵۱	۴۵
۰/۰۱۸۸	۵۰	۵۰
۰/۰۲۶۲	۱۱۰	۶۰
۰/۰۳۱	۱۸۱	۷۵
۰/۰۴۴	۳۰۰	۹۰



ب) در فاصله X=1.92 m از ابتدای کانال

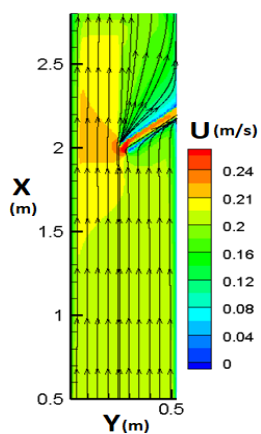


الف) در فاصله X=1.5 m از ابتدای کانال

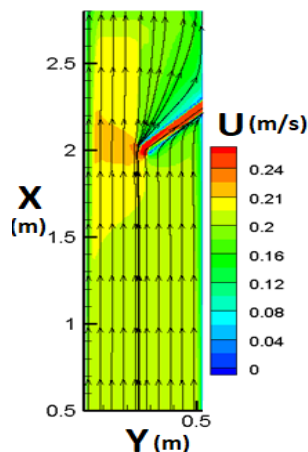
شکل ۱۰. پروفیل سرعت طولی جریان (U_x) در مقطع عرضی کانال اصلی در تراز محور مرکزی لوله

جدایش در کانال اصلی، پایین‌دست کانال آبگیر و در سمت مخالف دهانه آبگیر و نیز در زاویه آبگیری ۳۰ درجه تشکیل می‌گردد (Neary et al., 1999) درحالی‌که در آبگیری با لوله، ناحیه جدایی جریان از زاویه آبگیری ۶۰ درجه شروع به تشکیل کرده و در زاویه آبگیری ۹۰ درجه بخوبی توسعه یافته است. بررسی جریان طولی در راستای کانال اصلی مشخص می‌کند که این جریان تمایل بیشتری برای ورود به لوله آبگیر با زاویه کمتر آبگیری دارد درحالی‌که بررسی جریان عرضی در شکل (۱۲) نشان می‌دهد که با افزایش زاویه آبگیری مخصوصاً در زاویه آبگیری ۹۰ درجه، به دلیل ایجاد جریان چرخشی در نزدیکی دهانه آبگیر، جریان‌های عرضی در مسیر لوله آبگیر قرار گرفته و مسیر راحت‌تری برای ورود به لوله آبگیر دارند که این موضوع باعث شده است که آبگیری در زوایای بالاتر آبگیری، افزایش یابد.

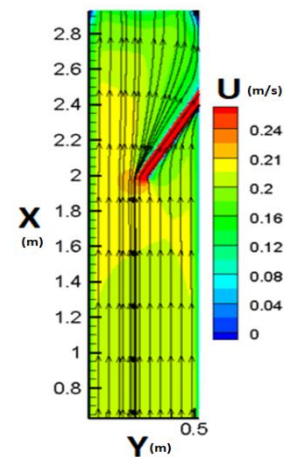
در شکل (۱۱) سطوح هم‌تراز سرعت طولی جریان (u) و خطوط جریان در تراز محور مرکزی لوله آبگیر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود خطوط جریان در پشت لوله آبگیر از جداره سمت چپ به جداره سمت راست منحرف شده‌اند. این خطوط جریان در زاویه ۹۰ درجه بیشترین و در زاویه ۳۰ درجه کمترین انحراف را دارند. همچنین مشاهده می‌شود یک ناحیه چرخشی در پشت لوله آبگیر با افزایش زاویه آبگیر در حال شکل‌گیری و توسعه می‌باشد. وسعت این ناحیه، از زاویه آبگیری ۶۰ درجه به سمت زاویه آبگیری ۹۰ درجه در حال افزایش است و در زاویه آبگیری ۹۰ درجه به حداکثر اندازه خود می‌رسد. نکته قابل‌توجه این است که تشکیل این ناحیه در پشت لوله آبگیر متفاوت از ناحیه چرخشی ایجادشده در آبگیری با کانال جانبی است. در حقیقت در آبگیری با کانال جانبی ناحیه



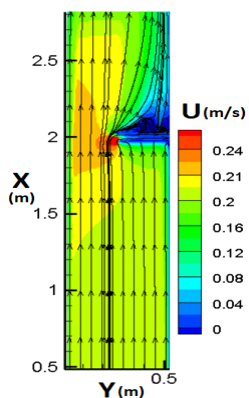
ج) زاویه آبگیری ۵۰ درجه



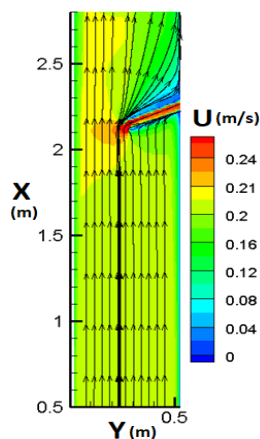
ب) زاویه آبگیری ۴۵ درجه



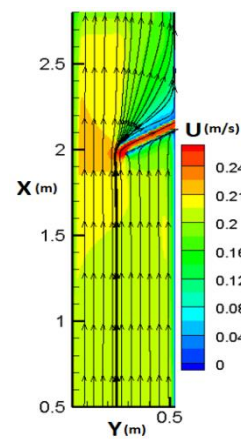
الف) زاویه آبگیری ۳۰ درجه



و) زاویه آبگیری ۹۰ درجه

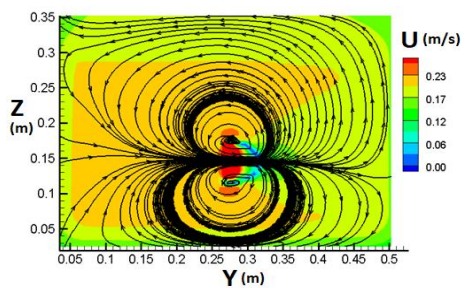


ه) زاویه آبگیری ۷۵ درجه

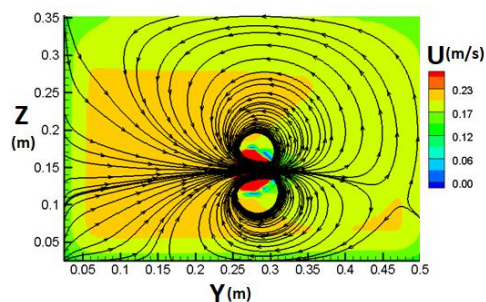


د) زاویه آبگیری ۶۰ درجه

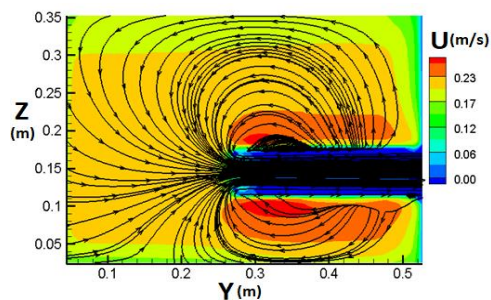
شکل ۱۱. سطوح همتراز سرعت کل (U) و خطوط جریان برای زوایای آبگیری مختلف در تراز مرکز لوله آبگیر



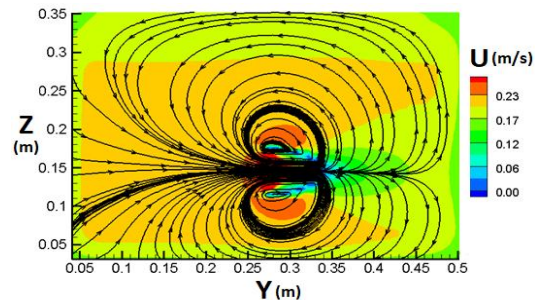
ب) زاویه آبگیری ۴۵ درجه



الف) زاویه آبگیری ۳۰ درجه



د) زاویه آبگیری ۹۰ درجه



ج) زاویه آبگیری ۶۰ درجه

شکل ۱۲. منحنی همتراز سرعت طولی و خطوط جریان عرضی در دهانه لوله آبگیر

جدول ۵. ضریب دبی برای آبیگری در زوایای مختلف

زاویه (درجه)	۱۵	۳۰	۴۵	۵۰	۶۰	۷۵	۹۰
ضریب دبی (C _D)	۰/۲۰۷	۰/۱۶۲	۰/۱۵۷	۰/۱۵۱	۰/۲۱۰	۰/۲۵۰	۰/۳۵۲

(W/B)، قطر لوله آبیگیر (D/B) ضخامت لوله آبیگیر (t/B) به ترتیب ۰/۷، ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۰۲ است. همچنین شکل دهانه آبیگیر نیز معمولی مدل سازی شده است. (رابطه ۱۲)

$$C_D = 0.126 + 0.296 \times Fr - 0.259 \times \frac{L}{B} + 0.200 \times \theta$$

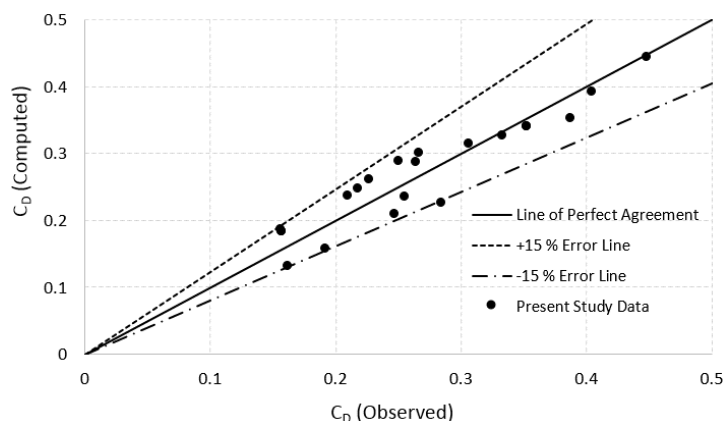
$$R^2 = 0.884$$

ضرایب محاسبه شده در مدل های عددی و ضرایب پیش بینی شده با رابطه (۱۲) در شکل (۱۳) با یکدیگر مقایسه شده اند. این نمودار نشان می دهد رابطه (۱۲) ضرایب C_D را می تواند با خطای حداکثر ۱۵ درصد پیش بینی نماید. به نظر می رسد با توجه به تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب دبی در آبیگری با لوله جانبی این دقت قابل قبول است زیرا این رابطه تنها با استفاده از ۳ پارامتر تأثیرگذار ارائه گردیده است.

مقادیر ضریب دبی برای آبیگری در زوایای مختلف در جدول (۵) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول، آبیگری با زاویه ۹۰ درجه بیشترین ضریب دبی را دارد.

رابطه پیشنهادی برای ضریب دبی

بر اساس ضرایب دبی محاسبه شده در شرایط مختلف در مدل های عددی می توان رابطه زیر را ارائه نمود. در این رابطه ضریب C_D بر اساس عدد فرود جریان در کانال اصلی، فرورفتگی بدون بعد آبیگیر لوله ای در کانال اصلی و زاویه آبیگری برحسب رادیان ارائه شده است. میزان ضریب همبستگی (R²) این رابطه ۰/۸۸۴ است. این رابطه تنها برای پارامترهای عدد فرود جریان در کانال اصلی، میزان فرورفتگی لوله آبیگیر در کانال اصلی و زاویه آبیگری ارائه شده است. در این رابطه پارامترهای بدون بعد عمق آب در کانال اصلی (H/B)، فاصله ارتفاعی آبیگیر از کف کانال اصلی



شکل ۱۳. مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر محاسبه شده ضریب C_D

ترتیب ۰/۲۹۶، ۰/۲۵۹- و ۰/۲ است که نشان دهنده تأثیر بیشتر عدد فرود و تأثیر کمتر زاویه آبیگری بر میزان آبیگری می باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق آبیگری با لوله جانبی از کانال اصلی با استفاده از مدل عددی به کمک نرم افزار Flow3D مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل ابعادی نشان می دهد که پارامترهای مختلفی از جمله عدد فرود جریان در کانال اصلی، زاویه آبیگری نسبت به محور طولی کانال، فرورفتگی لوله در کانال، شکل دهانه آبیگیر، قطر لوله آبیگیر می تواند بر میزان دبی آبیگری تأثیرگذار باشند. بدین منظور در این تحقیق تأثیر سه پارامتر عدد فرود، زاویه آبیگری و فرورفتگی لوله در کانال اصلی با استفاده از مدل

ضرایب معادله بالا کاملاً منطبق با میدان جریان ارائه شده در این تحقیق است. مطابق این رابطه، ضریب C_D با عدد فرود رابطه مستقیم دارد که در بخش بررسی عدد فرود این موضوع نیز ارائه گردید. همچنین فرورفتگی لوله آبیگیر در کانال اصلی باعث کاهش میزان آبیگری خواهد شد که این رابطه نیز این موضوع را تأیید می کند. در بررسی های میدان جریان مشخص شد که زاویه آبیگری ۹۰ درجه بهترین عملکرد را دارد که این موضوع نیز در این رابطه کاملاً مشهود است.

رابطه بالا نشان می دهد که تأثیر عدد فرود بر میزان آبیگری نسبت به دو پارامتر دیگر بیشتر است. مطابق رابطه بالا ضرایب پارامترهای عدد فرود، فرورفتگی لوله و زاویه آبیگری به

گردابه در پایین‌دست لوله در پشت آن ایجاد خواهد شد درحالی‌که در آبگیری جانبی با کانال، ناحیه جدایی در نزدیکی دیوار روبروی آبگیر در کانال اصلی ایجاد خواهد شد. مدل‌سازی‌ها نشان داد که گردابه ایجادشده در پشت لوله آبگیر به‌شدت تحت تاثیر زاویه آبگیری و میزان فرورفتگی لوله آبگیر در کانال اصلی است. معادله‌ای برای تعیین ضریب دبی آبگیری با لوله از کانال اصلی بر اساس سه پارامتر عدد فرود جریان ورودی، زاویه آبگیری و میزان فرورفتگی لوله آبگیر در کانال اصلی با خطای ۱۵ درصد ارائه گردید.

REFERENCES

- Asnaashari, A., & Merufinia, E. (2015). Numerical Simulation of Velocity Distribution in the River Lateral Intake Using the SSIM2 Numerical Model. *Cumhuriyet Science Journal*, 36(3), 1473-1486.
- Azimi, H., Shabanlou, S., Ebtehaj, I., Bonakdari, H., & Kardar, S. (2017). Combination of Computational Fluid Dynamics, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, and Genetic Algorithm for Predicting Discharge Coefficient of Rectangular Side Orifices. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(7), 04017015.
- Barkdoll, B. D., Ettema, R., & Odgaard, A. J. (1999). Sediment control at lateral diversions: Limits and enhancements to vane use. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(8), 862-870.
- Biswal, S. K., Mohapatra, P., & Muralidhar, K. (2016). Hydraulics of combining flow in a right-angled compound open channel junction. *Sadhana*, 41(1), 97-110.
- Eghbalzadeh, A., Javan, M., Hayati, M., & Amini, A. (2016). Discharge prediction of circular and rectangular side orifices using artificial neural networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(2), 990-996.
- Gómez-Zambrano, H. J., López-Ríos, V. I., & Toro-Botero, F. M. (2017). New methodology for calibration of hydrodynamic models in curved open-channel flow. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (83), 82.
- Goudarzizadeh, R., Hedayat, N., & Jahromi, S. M. (2010). Three-dimensional simulation of flow pattern at the lateral intake in straight path, using finite-volume method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 47, 656-661.
- Guo, J. C., & Stitt, R. P. (2017). Flow through Partially Submerged Orifice. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8), 06017006.
- Haddad, H., Ahmad, E., & Azizi, K. (2017). Numerical simulation of the inlet sedimentation rate to lateral intakes and comparison with experimental results. *Journal of Research on Ecology*, 5(1): 464-472.
- Hashid, M., Hussain, A., & Ahmad, Z. (2015). Discharge characteristics of lateral circular intakes in open channel flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 46, 87-92.
- Hirt, C. W. (1988). Flow-3D User's Manual, Flow Sciences.
- Hussain, A., Ahmad, Z., & Asawa, G. L. (2010). Discharge characteristics of sharp-crested circular side orifices in open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3), 418-424.
- Kasthuri, B., & Pundarikanthan, N. V. (1987). Discussion of "Separation zone at open-channel junctions" by James L. Best and Ian Reid (November, 1984). *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(4), 543-544.
- Mirzaei, S. H. S., Ayyoubzadeh, S. A., & Firoozfar, A. R. (2014). The effect of submerged-vanes on formation location of the saddle point in lateral intake from a straight channel. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2(1), 26-33.
- Neary, V. S., & 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., & Odgaard, A. J. (1999). Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(2), 126-140.
- Ouyang, H. T., & Lin, C. P. (2016). Characteristics of interactions among a row of submerged vanes in various shapes. *Journal of hydro-environment research*, 13, 14-25.
- Ramamurthy, A. S., Qu, J., & Vo, D. (2007). Numerical and experimental study of dividing open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(10), 1135-1144.
- Schindfessel, L., Creëlle, S., & De Mulder, T. (2017). How Different Cross-Sectional Shapes Influence the Separation Zone of an Open-Channel Confluence. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 04017036.
- Seyedian, S. M., Bajestan, M. S., & Farasati, M. (2014). Effect of bank slope on the flow patterns in river intakes. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 26(3), 482-492.
- Swamee, P. K., & Swamee, N. (2010). Discharge equation of a circular sharp-crested orifice. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 106-107.
- عددی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که: با افزایش عدد فرود در کانال اصلی، ضریب دبی افزایش خواهد یافت. افزایش ضریب دبی در زاویه ۹۰ درجه بسیار چشمگیرتر نسبت به بقیه زوایا است. آبگیری جانبی با زاویه ۹۰ درجه بیشترین کارایی را دارد و بیشترین دبی را از خود عبور خواهد داد. در آبگیری جانبی با زاویه ۹۰ درجه، گردابه ایجادشده در پشت لوله از گردابه‌های ایجادشده در آبگیری با زوایای دیگر بزرگتر است. در آبگیری با لوله جانبی مشاهده شد که ناحیه جدایی و