

شبیه‌سازی عددی آب‌شکن متخلخل با استفاده از نرم‌افزار Flow3D

علی چشمی، احسان بهنام طلب^{2*} و فرهاد خامچین مقدم³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد

2- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

3- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد

* e.behnamtalab@hsu.ac.ir

(دریافت مقاله: 97/4/13؛ پذیرش مقاله: 97/9/25)

چکیده - در این پژوهش، تأثیر احداث تک آب‌شکن متخلخل بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در کانال باز با استفاده از مدل عددی به کمک کالیبراسیون مدل غیرخطی فورشه‌ایمر بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D و برای شبیه‌سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است. بدین منظور آب‌شکن متخلخل با مشخصات مختلف، شبیه‌سازی و با انجام آنالیز حساسیت، ضرایب مناسب موردنیاز در معادله فورشه‌ایمر تعیین شد. بر اساس آنالیز حساسیت و مقایسه نتایج با نتایج مدل فیزیکی مشخص گردید اغلب پارامترهای جریان، حساسیت زیادی نسبت به ضریب جمله غیرخطی مدل فورشه‌ایمر دارند و در برخی موارد مدل با اعدادی خارج از محدوده پیشنهادی نرم‌افزار، کالیبره گردید. بررسی‌ها نشان داد، افزایش تخلخل موجب کاهش قابل توجه سرعت جریان و کوچک شدن محدوده اثر مقدار بیشینه این پارامتر می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش تخلخل آب‌شکن، موجب کاهش ارتفاع آب در بالادست آب‌شکن و افزایش ارتفاع آب در پایین‌دست آب‌شکن می‌شود. همچنین مشاهده گردید افزایش تخلخل از مقدار بیشینه سرعت کاسته و طول اثر آن را کاهش و نیز کمینه سرعت را افزایش خواهد داد.

کلیدواژه‌گان: آب‌شکن متخلخل، مدل عددی، مدل فورشه‌ایمر، ضریب درگ، آنالیز حساسیت، Flow3D

1- مقدمه

در این زمینه سازه‌های کنترل جریان رودخانه نقش اساسی ایفا می‌کنند. این سازه‌ها جهت کاهش نیروی هیدرودینامیک وارد بر ساحل رودخانه از طریق کنترل جهت، سرعت یا عمق جریان طرح می‌شوند (اهدایی و کاشفی‌پور 1394). آب‌شکن‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های کنترل جریان و حفاظت دیواره‌های رودخانه محسوب می‌شوند. آب‌شکن‌ها در رودخانه‌های آبرفتی از دیواره‌ها به طور عمود یا زاویه‌دار نسبت به دیواره رودخانه استقرار می‌یابند. کارایی اصلی آب‌شکن‌های رودخانه‌ای، انحراف جریان از

رودخانه یک زهکش طبیعی است که آب یک حوضه را خارج می‌کند. رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند زمین‌شناسی منطقه، توپوگرافی دره رودخانه، خصوصیات مواد آبرفتی سیلاب‌دشت رودخانه، مشخصات هیدرولوژیکی حوضه آبریز، شرایط هیدرولیکی جریان و نیز نحوه بهره‌برداری از آن، تمایل طبیعی به دستیابی به تعادل پویا دارند. مسأله کنترل و مهار رودخانه‌ها و تعیین حدود و حریم آن‌ها امروزه به شدت مورد توجه قرار گرفته است؛



شکل 1 نمونه‌ای از آب‌شکن متخلخل اجرا شده در ایران (خسروی، 1393)

تاکنون مطالعات بسیاری بر روی میدان جریان در اطراف آب‌شکن‌های صلب یا نفوذناپذیر به منظور پیدا کردن شرایط بهینه برای ساخت آنها صورت گرفته است. (Ahmed (1951), Rajaratnam and Nwachukwu (1983), Tingsanchali and Maheswaran (1990), Peng et al. (1996), Fei-Yong and Ikeda (1997), Soliman et al. (1996), Tominaga et al. (2001), Uijtewaal (2001), Miller et al. (2003), Uijtewaal (2005), Duan (2009), Azinfar and Kells (2008), Kang et al. (2011) با روش‌های مختلف آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی به بررسی مشخصات جریان در اطراف آب‌شکن صلب پرداخته‌اند. در این تحقیقات، پارامترهای متعددی از قبیل زوایای مختلف آب‌شکن نسبت به راستای جریان، مشخصات هندسی آب‌شکن، شدت جریان ورودی، تعداد آب‌شکن، مشخصات بستر رودخانه و ... مورد بررسی قرار گرفته است.

بر خلاف آب‌شکن صلب، تحقیقات کمی بر روی آب‌شکن متخلخل انجام شده است. نکته قابل توجه در تحقیقات انجام شده بر روی آب‌شکن متخلخل این است که آب‌شکن متخلخل با استفاده از میله‌های قائم چه در مدل‌های فیزیکی و چه در شبیه‌سازی‌های عددی ایجاد شده است. در این میان تحقیقات بسیار ناچیزی بر روی آب‌شکن گابیونی انجام شده است که در آن تخلخل با استفاده از مصالح نفوذپذیر انجام گرفته باشد.

(Uijtewaal (2005) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان اطراف آب‌شکن دوزنقه‌ای مستغرق متخلخل پرداخت. این محقق به این نتیجه رسید که در آب‌شکن‌های نفوذپذیر،

کناره رودخانه و هدایت آن به سمت مجرای اصلی است (اسدی، 1392). آب‌شکن‌ها مبتنی بر ساخت، سازه‌های متقاطع یا عرضی هستند که از دیواره طبیعی رودخانه با طول مناسب و با زاویه مناسبی نسبت به راستای عمومی جریان، توسعه یافته و سبب انحراف حمله جریان به کناره‌ها و نواحی بحرانی شده و جریان را به سمت محور مرکزی رودخانه هدایت می‌نمایند (اسدی، 1392). با انحراف جریان، کناره رودخانه در حد فاصل دیواره‌های طبیعی موجود با مرز راستای اصلاح شده به تدریج با ته‌نشست رسوبات و با استقرار تدریجی پوشش گیاهی در درازمدت تثبیت می‌یابد. بنابراین با گذشت زمان، جریان در بخش میانی بازه رودخانه متمرکز می‌گردد. آب‌شکن‌ها ممکن است بصورت صلب (نفوذپذیر) و یا متخلخل (نفوذپذیر) ساخته شوند. هر یک از این‌ها دارای مشخصاتی هستند که براساس آنها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان آب‌شکن‌های متخلخل یا نفوذپذیر که معمولاً به صورت توری گابیونی ساخته می‌شوند، به دلیل شرایط مناسب زیست محیطی و اکولوژیکی و مصالح سازگار با طبیعت و نیز حفظ اکوسیستم منطقه، امروزه بسیار مورد توجه هستند. آب‌شکن نفوذپذیر که معمولاً از توری گابیون ساخته می‌شود از جنس مصالح موجود در طبیعت می‌باشد که ساختار طبیعی رودخانه را حفظ کرده و به ادامه حیات آبریان کمک می‌کند. با توجه به اینکه این سازه‌ها از نفوذپذیری بالایی برخوردارند، مواد ارگانیک معلق در آب و همچنین ذرات رسوبی به راحتی از خلل و فرج آن عبور کرده و در بالادست سازه ته‌نشین نمی‌شوند. همچنین باکتری‌های ساکن در داخل بدنه آب‌شکن‌های گابیونی باعث تجزیه مواد آلی موجود در آب شده و این فعالیت بیوشیمیایی باعث خالص‌سازی و تصفیه آب عبوری به پایین دست می‌شوند. این نوع سازه‌ها به واسطه سهولت در اجرا و شکل‌پذیری مناسب دارای مقاومت سازه‌ای مناسب در برابر نشست‌های ناهمگون فونداسیون بوده و از این رو در پروژه‌های هیدرولیکی در شرایطی که مصالح مناسب در دسترس بوده و سازه متخلخل جوابگوی الزامات سازه‌ای طرح باشد، استفاده می‌شوند (اسدی، 1392). نمونه‌ای از آب‌شکن متخلخل در شکل 1 ارائه شده است.

2- مواد و روش‌ها

همانطور که در بخش قبل عنوان شد از نرم‌افزار Flow3D برای شبیه‌سازی آبشکن نفوذپذیر استفاده شده است. نرم‌افزار Flow3D یک مدل مناسب برای مسائل پیچیده سیالات می‌باشد، که دارای بازه کاربرد وسیعی است. این نرم‌افزار برای جریان‌های سه بعدی غیرماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند کاربرد دارد. این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم استفاده می‌نماید.

نرم‌افزار Flow3D این قابلیت را دارد که برای تشخیص حجم سیال¹ 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. در مدل‌های این تحقیق، از شرایط No-Slip (شرایط بدون لغزش) در سطح تماس با دیوار استفاده گردیده است. در این نرم‌افزار برای شبکه‌بندی مدل می‌توان از بلوک استفاده کرد و هر بلوک پس از ایجاد، به سلول‌های بسیار کوچک‌تری تقسیم‌بندی خواهد شد.

معادلات حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر و لزج توسط معادله پیوستگی و معادله ناویر-استوکس به شکل معادلات (1) و (2) بیان می‌شوند (Hirt and Nichols, 1988).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial g}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

در این روابط ρ چگالی سیال، u ، v و w به ترتیب سرعت در جهات اصلی، p فشار، g شتاب ثقل و μ ویسکوزیته دینامیکی است. این نرم‌افزار از مدل‌های آشفتگی مختلفی از جمله طول اختلاط پرانتل، یک‌معادله‌ای، $k-\omega$ ، $k-\epsilon$

برخلاف آبشکن‌های نفوذناپذیر، مومنتوم جریان عبوری از بدنه آبشکن، ساختار جریان چرخشی پشت آبشکن را به هم زده و در واقع مانع شکل‌گیری الگوی چرخشی جریان خواهد شد. (Kang et al. 2001) به بررسی تأثیر تخلخل آبشکن تک بر روی مشخصات جریان پرداختند. آنها در تحقیقات خود آبشکن‌های نفوذناپذیر، میله‌ای متخلخل و مثلی شکل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بود که با افزایش نفوذپذیری که با افزایش فاصله بین میله‌های قائم صورت می‌گرفت سرعت در لبه آبشکن و طول گردابه‌ها و اندازه منطقه جریان چرخشی کاهش می‌یابد. (Michioku et al. 2013) به بررسی هیدرودینامیک و هیدرومورفولوژی سازه‌های رودخانه‌ای ساخته شده از جنس مصالح موجود در طبیعت پرداختند. در این تحقیق نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی سرریزها، آبشکن‌ها و ریپرپ‌های رودخانه‌ای ساخته شده از مصالح سنگی گرد گوشه و ماسه رودخانه‌ای با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. نتیجه نشان داد، شبیه‌سازی عددی مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. اردشیری و همکاران (1391) و عبدالهی درگاه و همکاران (1393) با استفاده از آبشکن نفوذپذیر میله‌ای به بررسی میدان جریان در اطراف آبشکن‌های متخلخل پرداختند.

بررسی تحقیقات انجام گرفته بر روی آبشکن نفوذپذیر نشان داد در تحقیقات پیشین، آبشکن نفوذپذیر به صورت میله‌های عمودی با فاصله‌ای مشخص در کنار یکدیگر، شبیه‌سازی شده‌اند که درصد نفوذپذیری به میزان فاصله میله‌ها وابسته است. در این بین مطالعات عددی صورت گرفته بر روی آبشکن‌های نفوذپذیر نشان‌دهنده خلاء تحقیقات صورت گرفته در مطالعه آبشکن‌های نفوذپذیر با در نظر گرفتن خصوصیات ذاتی نفوذپذیری اجزای تشکیل دهنده می‌باشد.

بنابراین در این تحقیق، به بررسی میدان جریان در اطراف آبشکن نفوذپذیر گابیونی با استفاده از مدل عددی پرداخته شده است. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Flow3D جهت شبیه‌سازی میدان جریان و با در نظر گرفتن ویژگی‌های ذاتی تخلخل مصالح سازنده آبشکن جهت مدل‌سازی نفوذپذیری استفاده شده است.

¹ Volume of Fluid (VOF)

RNG و LES استفاده می‌کند.

در رابطه بالا u_{bulk} سرعت جریان، μ ویسکوزیته دینامیکی و ∇p گرادیان فشار درون مصالح متخلخل است. مشاهدات اصلی داری در حالتی بود که عدد رینولدز منافذ (Re_p) کمتر از یک باشد و معمولاً به طور مستدل برای Re_p تا 10 اطلاعات دقیقی به دست می‌آورد. این در حالی است که برای Re_p بالاتر از 10، این رابطه دیگر برقرار نیست. برای چنین شرایطی، فورشه‌ایمر، ترم دیگری به رابطه فوق اضافه نمود که ترم غیرخطی معادله فورشه‌ایمر نامیده می‌شود. این ترم یک پارامتر درجه دوم است که می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری نسبت به معادله داری استخراج نماید. مدل فورشه‌ایمر تلفات را در مصالح متخلخل به وسیله ترکیبی از ویسکوزیته (ترم خطی) و پارامترهای درگ (ترم درجه دوم) بیان می‌کند زیرا در Re_p بیش‌تر از 10، نیروی درگ، شکل مهمی به خود می‌گیرد. در معادله فورشه‌ایمر، افت فشار بصورت رابطه (4) بیان می‌شود (Hirt and Nichols, 1988).

$$-\nabla p = (a + b|u_{bulk}|)u_{bulk} \quad (4)$$

در معادله بالا a و b پارامترهایی هستند که به وسیله آزمایش بدست می‌آیند. اولین پارامتر (a)، ضریب ترم درجه اول معادله و دومین پارامتر (b)، ضریب ترم درجه دوم معادله می‌باشد. در صورتی که پارامتر b به سمت صفر میل کند، ترم درجه دوم معادله درگ فورشه‌ایمر صفر شده و مدل درگ به مدل داری تقلیل پیدا می‌کند. رابطه (5) مشارکت اتلاف فشار خطی و غیرخطی بر حسب واحد طول را بر اساس تابع سرعت کل ارائه می‌دهد (Hirt and Nichols, 1988).

$$-\nabla p = A|u_{bulk}|\mu \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} + B|u_{bulk}|^2\rho \frac{(1-\phi)}{\phi^3} \quad (5)$$

در این رابطه ϕ ، تخلخل و A و B نیز به ترتیب ضرایب نیروی درگ خطی و غیرخطی هستند. این ضرایب مطابق رابطه (6) محاسبه می‌شوند (Hirt and Nichols, 1988):

$$A = a \frac{\phi^3}{\mu(1-\phi)^2} \text{ and } B = b \frac{\phi^3}{\rho(1-\phi)} \quad (6)$$

هنگامی که داده‌های آزمایشگاهی موجود نباشند، پارامترهای A و B می‌توانند به وسیله معادله (7) تخمین زده شوند (Hirt and Nichols, 1988):

1-2- شبیه‌سازی محیط متخلخل

منظور از مصالح متخلخل، مصالحی صلب با فضاهای خالی متصل به هم است به گونه‌ای که سیال بتواند درون آن، جریان پیدا کند. در مقیاس کوچک، سرعت و فشار در فضاهای خالی بین مصالح به شدت بدون قاعده هستند، ولی از شمای کلی، در نظر گرفتن یک دبی میانگین می‌تواند نماینده خوبی برای نشان دادن جریان باشد. شبیه‌سازی به وسیله تعریف کردن یک اندازه فضاهای خالی در تمامی جهات از شبیه‌سازی هر کدام از خلل و فرج به صورت منفرد می‌تواند مناسب‌تر باشد. جهت معتبر بودن مشخصه میانگین که برای تعداد زیادی خلل و فرج بر روی یک سلول محاسباتی در نظر گرفته شده است، اندازه فضاهای خالی باید کوچکتر از حجم کنترل باشد.

دو نوع رژیم جریان اشباع و غیر اشباع می‌تواند در یک محیط متخلخل برقرار گردد. جریان اشباع زمانی است که فصل مشترک بین گاز و مایع نسبتاً مشخص و قابل تفکیک باشد و جریان غیر اشباع زمانی بوجود می‌آید که سطح بین گاز و مایع پراکنده و گاز در داخل خلل و فرج حبس می‌شود.

در نرم‌افزار Flow3D شش مدل مختلف جهت شبیه‌سازی نیروی درگ در محیط متخلخل وجود دارد. این شش مدل شامل مدل درگ داری اشباع، مدل درگ فورشه‌ایمر اشباع، مدل درگ اشباع وابسته به نفوذپذیری، مدل درگ پایستگی انرژی غیراشباع، مدل درگ نمایی غیراشباع و مدل درگ غیراشباع وابسته به گذردهی هستند. از این شش مدل، سه مدل اول برای شبیه‌سازی نیروی درگ در جریان اشباع و سه مدل بعدی برای جریان غیر اشباع است و لازمه استفاده از این سه مدل آن است که مدل درگ مصالح متخلخل بر روی جریان غیراشباع قرار گیرد.

مبنای مدل درگ داری اشباع معادله هنری-داری است، جایی که نرخ جریان یک طرفه میان مصالح متخلخل با گرادیان فشار ایجاد شده مطابق رابطه (3) به صورت خطی متناسب است (Hirt and Nichols, 1988):

$$-\nabla p = u_{bulk} \frac{\mu}{K} \quad (3)$$

(Nichols, 1988)

$$A = \frac{150}{d_m^2} \text{ and } B = \frac{\beta}{d_m} \quad (9)$$

در معادله‌ی بالا A و B ضرایب معادله درگ فورشه‌ایمر و d_m قطر متوسط مصالح مورد استفاده جهت ساخت آبشکن متخلخل می‌باشد.

2-2- مشخصات مدل فیزیکی به منظور

صحت‌سنجی

در این پژوهش برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی از نتایج آزمایشگاهی (Michioku et al. (2013) استفاده شده است. ایشان جریان سیال حول پنج نوع آبشکن مختلف را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. از این پنج آبشکن، آبشکن شماره یک، نفوذ ناپذیر و از جنس مصالح صلب ساخته شده و چهار آبشکن دیگر، نفوذپذیر و از جنس مصالح متخلخل می‌باشند.

(Michioku et al. (2013) با ثابت نگه داشتن مشخصات اصلی آبشکن شامل طول، عرض و ارتفاع به بررسی تأثیر تغییرات تخلخل ناشی از تغییر قطر مصالح بدنه آبشکن و عمق بالادست جریان بر روی عمق پایین‌دست و دیگر پارامترهای مؤثر در طراحی آبشکن پرداختند. مشخصات آبشکن‌های مورد استفاده توسط ایشان در جدول 1 ارائه شده است. همچنین شمای کلی مدل فیزیکی ایشان در شکل 2 ارائه شده است.

تعداد 28 مدل عددی مختلف از آبشکن غیرمستغرق ساخته شد. در این میان 5 مدل عددی از آبشکن (1) جهت انتخاب بهترین مش بندی و بهترین مدل آشفتگی، 7 مدل از آبشکن (2)، 5 مدل از آبشکن (3)، 6 مدل از آبشکن (4) و 5 مدل از آبشکن (5) جهت انتخاب بهترین ضریب β در معادله فورشه‌ایمر ساخته شد.

در این مدل‌ها مبدا مختصات در شکل 2 نشان داده شده است. مبدا مختصات در کف کانال، در لبه بالادست آبشکن و در کنار دیوار جانبی روبروی آبشکن قرار دارد. در این سیستم مختصات، h عمق آب در کانال، h_0 عمق آب در ابتدای کانال که در جدول 1 ارائه شده است، u سرعت نقطه‌ای آب در کانال و u_0 سرعت متوسط جریان ورودی به کانال است. سرعت متوسط جریان ورودی به کانال با

$$A = \frac{\alpha}{d_{fiber}^2} \text{ and } B = \frac{\beta}{d_{fiber}} \quad (7)$$

α و β ضرایب ثابت و d_{fiber} نیز قطر متوسط مصالح محیز متخلخل می‌باشند. ارگون در سال 1959 نشان داد کاهش فشار، در نتیجه‌ی کاهش همزمان انرژی جنبشی و انرژی لزجتی حاصل می‌گردد. بر همین اساس معادله‌ای پیشنهاد داد که می‌تواند با دقت خوبی برای جریان‌های غیر داری مورد استفاده قرار گیرد که معروف به معادله ارگون است. این معادله از نقطه نظر وابستگی به میزان دبی جریان، مشخصات سیال، حجم خلل و فرج، شکل، اندازه و سطح ذرات جامد مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آزمایشگاهی حاکی از دقت بالای این معادله در جریان‌های عبوری از محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای می‌باشند. شکل کلی این معادله برای اشکال کروی تا مصنوعی بی‌قاعده در جریان آشفته به صورت رابطه (8) است (Hirt and Nichols, 1988):

$$i = \left(\frac{1-n}{n^3} \right) \left[\frac{150V(1-n)}{gd^2} v + \frac{1.75}{gd} V^2 \right] \quad (8)$$

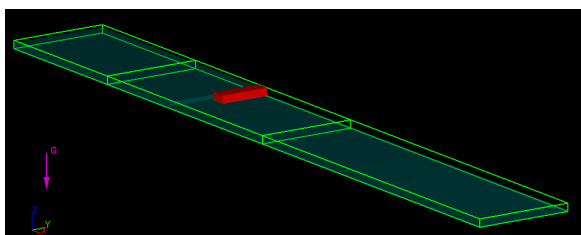
در این معادله، i گرادیان هیدرولیکی، V سرعت جریان عبوری، d قطر ذرات و n تخلخل مصالح می‌باشد. این معادله را می‌توان تبدیل به شکل کلی معادله فورشه‌ایمر نمود و از مقایسه آنها، ضرایب A و B را محاسبه کرد. بر اساس معادله ارگون، ضریب خطی معادله فورشه‌ایمر برابر 150 و ضریب غیرخطی آن مقداری بین 1/8 تا 4/0 پیشنهاد شده است، هرچند نتایج این تحقیق نشان داده، مقادیر ارائه شده برای β در معادله ارگون محتاطانه است و این مقدار می‌تواند کمتر از 1/8 یا بیش از 4/0 باشد. توضیحات ارائه شده مشخص می‌کند انتخاب بهترین مدل درگ برای فیزیک مسأله، منوط به انتخاب بهترین ضریب β برای مدل می‌باشد و انتخاب بهترین پارامتر β منجر به انتخاب بهترین مدل درگ و در نتیجه بهترین شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی می‌گردد. در این پژوهش برای انتخاب بهترین پارامتر β تنها به بازه ارائه شده توسط معادله ارگون اکتفا نشده است و مقادیر کمتر از 1/8 و بیش‌تر از 4/0 نیز برای این پارامتر در نظر گرفته شد. رابطه (9) مقادیر استفاده شده در این تحقیق برای پارامترهای معادله درگ فورشه‌ایمر را نشان می‌دهد (Hirt and

آب پایین‌دست در مدل فیزیکی، در دیواره‌های سمت چپ، سمت راست و کف کانال، شرط مرزی دیوار و سطح بالایی کانال، شرط مرزی فشار صفر در نظر گرفته شده است.

جهت کاهش زمان تثبیت پارامترهای جریان، شرایط اولیه آب در بالادست و پایین دست آب‌شکن با توجه به آنچه در آزمایشات (Michioku et al. (2013) اندازه‌گیری شده، به کانال اعمال گردید. شرط تثبیت شبیه‌سازی‌های عددی، عدم تغییر خروجی‌های دو گام زمانی بیش از 0/1 درصد است. مقدار 130 ثانیه جهت برقراری شرایط تثبیت در کانال برای تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شد. دو نوع مش بندی در طول کانال جهت عدم افزایش بی‌رویه تعداد مش‌ها و در نتیجه افزایش مدت زمان محاسبات و حجم خروجی‌های نرم‌افزار صورت گرفته است. یک نوع مش بندی ریز در طول کانال از 3 متری تا 8 متری و یک نوع مش درشت‌تر هم از ابتدای کانال تا 3 متری و از 8 متری تا انتهای کانال در نظر گرفته شد. به منظور افزایش دقت نتایج خروجی، مش‌بندی به صورت تدریجی در طول کانال از درشت به ریز تقلیل می‌یابد. شکل کلی مدل در شکل 3 ارائه شده است.

برای انتخاب بهترین مش‌بندی، 3 نوع مختلف مش‌بندی بر روی آب‌شکن (1) شامل 2 سانتی‌متری، 5 سانتی‌متری و 8 سانتی‌متری انجام گرفت. انواع مش‌بندی انجام شده در جدول 2 قابل مشاهده است.

نتایج حاصل از مقایسه 4 مش‌بندی مختلف در شکل 4 ارائه شده است. در این نمودار محور افقی نمایانگر تعداد سلول‌ها و محور قائم، عمق بدون بعد آب در لبه آب‌شکن (h/h_0) است. نتایج ارائه شده در شکل 4 حاکی از آن است که تعداد سلول‌ها وقتی از تعداد پانصد هزار می‌گذرد، پارامتر (h/h_0) تقریباً ثابت است.

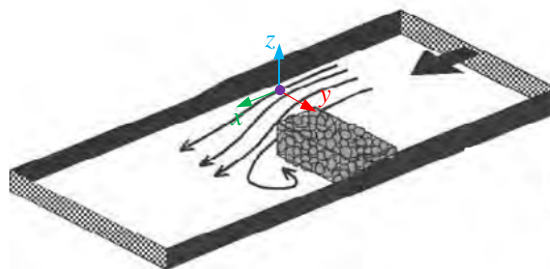


شکل 3 مشخصات کانال و آب‌شکن شبیه‌سازی شده

توجه به دبی ورودی (0/05193 مترمکعب بر ثانیه)، عرض جریان (2 متر) و عمق آب بالادست (h_0) به ترتیب برای آب‌شکن‌های 1 تا 5 برابر با 0/252، 0/265، 0/270، 0/260 و 0/262 متر بر ثانیه است.

جدول 1 مشخصات آب‌شکن‌های آزمایش‌های Michioku et al. (2013)

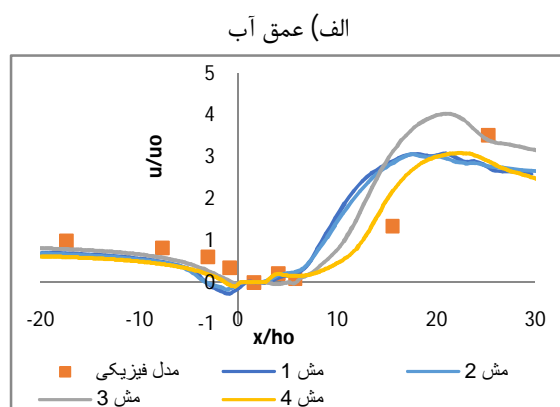
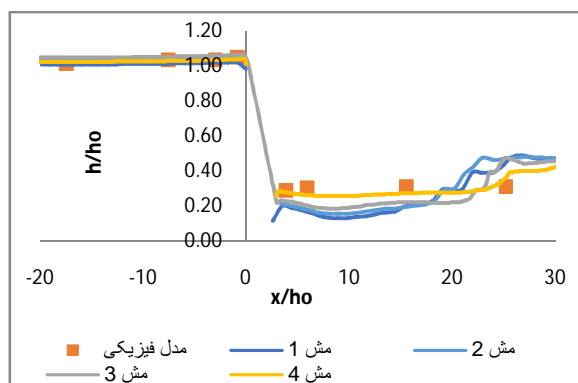
نام مدل	آب‌شکن 1	آب‌شکن 2	آب‌شکن 3	آب‌شکن 4	آب‌شکن 5
نوع	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	نفوذ پذیر
طول، l_g (m)	1	0/3	0/2	0/035	0/019
مشخصات آب‌شکن عرض، b_g (m)	0/3	0/2	0/035	0/019	-
ارتفاع h_g (m)	0/2	0/035	0/019	0/035	0/019
قطر، d_m (m)	-	0/38	0/33	0/38	0/33
تخلخل، n	-	0/05193	0/05193	0/05193	0/05193
دبی، Q (m^3/s)	0/05193	0/05193	0/05193	0/05193	0/05193
عرض کانال، B (m)	2	2	2	2	2
شیب کف، i	1/800	1/800	1/800	1/800	1/800
عمق آب بالادست، h_0 (m)	0/103	0/098	0/096	0/1	0/099
عمق آب پایین‌دست، h_1 (m)	0/029	0/034	0/037	0/06	0/061



شکل 2 شمای کلی آب‌شکن غیرمستغرق نفوذپذیر در مدل فیزیکی (Michioku et al. (2013)

3-2- مطالعه اندازه مش و مدل آشفتگی

شبیه‌سازی عددی در کانالی به طول 15 متر، عرض 2 متر و ارتفاع 15 سانتی‌متر که آب‌شکنی به طول 30 سانتی‌متر، عرض 1 متر و ارتفاع 15 سانتی‌متر در فاصله 5 متری از ابتدای کانال قرار دارد تولید شده است. شرایط مرزی استفاده شده در ورودی کانال، شرط مرزی دبی، در انتهای کانال، فشار ثابت همراه با عمق مشخص آب (برابر عمق



(ب) سرعت جریان

شکل 5 آنالیز حساسیت الف) عمق آب روی آبشکن غیرمستغرق، ب) سرعت آب

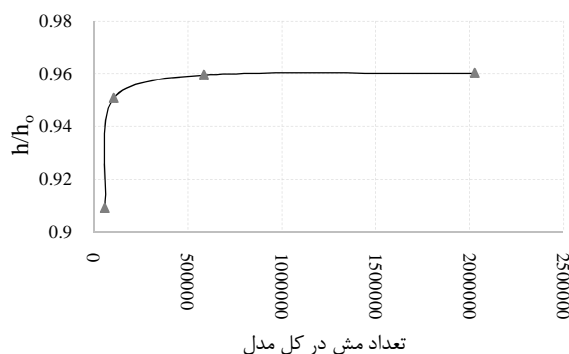
پس از مشخص شدن بهترین مش بندی برای شبیه سازی، با توجه به اینکه جریان در اطراف آبشکن کاملاً آشفته است، باید مشخص نمود کدام مدل آشفتگی جهت شبیه سازی جریان های توربولانسی و گردابه ای مناسب است. در این تحقیق نتایج شبیه سازی با استفاده از دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و RNG با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که هر دو مدل نتایج نزدیکی به داده های آزمایشگاهی دارند اما مدل RNG نتایج نزدیک تری به نتایج آزمایشگاهی موجود به خصوص در نواحی نزدیک به آبشکن را داراست. این نتایج در شکل 6 و جدول 4 ارائه شده اند.

جدول 4 پارامتر RMSE برای مدل های آشفتگی مختلف

	RNG	$k-\epsilon$
پارامتر h/h_0	0.0507	0.0345
پارامتر u/u_0	0.2213	0.4991

جدول 2 مشخصات مش بندی صورت گرفته روی آبشکن (1)

مشخصات	اندازه مش در جهت طولی (سانتی متر)	اندازه مش در جهت عرضی (سانتی متر)	تعداد کل مش ها	مش ریز مش درشت (سانتی متر)	مش ریز مش درشت (سانتی متر)
مش (1)	10	8	1	8	59250
مش (2)	10	55	1	55	107400
مش (3)	5	2	0.5	2	587200
مش (4)	2	1	0.5	1	2025600



شکل 4 نمودار عدم وابستگی به اندازه مش

از آنجا که افزایش تعداد سلول ها موجب افزایش مدت زمان محاسباتی می گردد، لذا افزایش تعداد سلول ها تنها مدت زمان محاسبات را افزایش داده و در میزان دقت نتایج تأثیری نخواهد داشت. بعلاوه در شکل 5 نتایج شبیه سازی عددی و نتایج مدل فیزیکی در مش های مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند. همچنین در جدول 3، میزان خطای نتایج مدل عددی در مقایسه با مدل فیزیکی در قالب پارامتر RMSE ارائه شده است. با توجه به شکل های 4 و 5 و نیز جدول 3، مش (3) نتایج نزدیکی به داده های آزمایشگاهی دارد ضمن اینکه در زمان محاسبات صرفه جویی لازم را دارد، بنابراین برای شبیه سازی آبشکن ها در این تحقیق از مش شماره 3 استفاده شد.

جدول 3 پارامتر RMSE برای مش های مختلف

	مش 1	مش 2	مش 3	مش 4
پارامتر h/h_0	0/08772	0/08825	0/07937	0/02769
پارامتر u/u_0	0/6988	0/688	0/6554	0/4395

(10) به دست می‌آید:

$$E_{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n \{[(ExD_i - SiD_i)/ExD_i] * 100\}}{n} \quad (10)$$

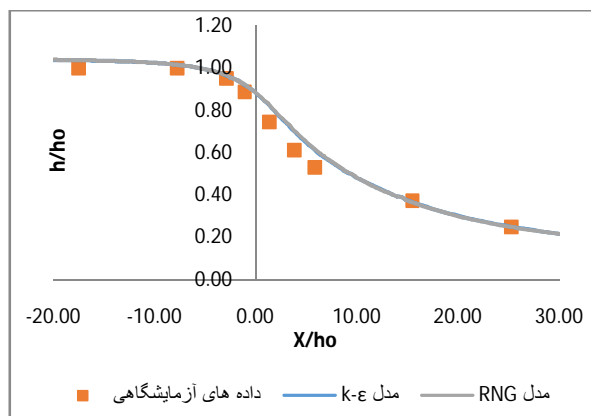
در معادله بالا ExD داده‌های آزمایشگاهی و SiD داده‌های بدست آمده به وسیله شبیه‌سازی عددی و n تعداد نقاط اندازه‌گیری شده توسط Michioku et al. (2013) می‌باشد. همچنین بوسیله رسم نمودارهای عمق و سرعت جریان از داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در مقطع طولی $y=0.95$ و مقایسه به صورت کیفی، نیز می‌توان به صحت نتایج حاصل از آنالیز حساسیت پی برد. نمودارهای مقایسه‌ای داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی عمق و سرعت جریان در مقطع طولی که از داخل آبشکن نمی‌گذرد برای آبشکن‌های متخلخل 2 تا 5 در شکل‌های 7 و 8 ارائه شده است.

خلاصه نتایج آنالیز حساسیت به وسیله میانگین خطای ثبت شده عمق و سرعت جریان در نمودارهای 7 و 8 در جدول 5 ارائه شده است.

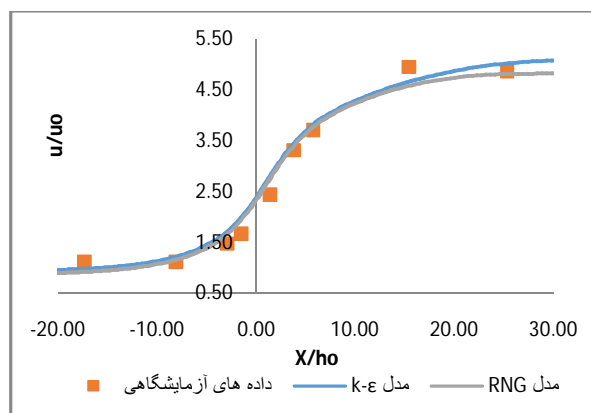
بر اساس نتایج به دست آمده از جدول 5 مشاهده می‌شود، محدوده ارائه شده توسط معادله ارگون، محدوده کاملی برای کالیبراسیون مدل فورشه‌ایمر در شبیه‌سازی آبشکن متخلخل نبوده و مقادیر β می‌تواند بیشتر از 4/0 و کمتر از 1/8 باشد.

جدول 5 آنالیز حساسیت پارامتر β برای آبشکن‌های مورد آزمایش

مقادیر β	آبشکن 2		آبشکن 3		آبشکن 4		آبشکن 5	
	خطای عمق جریان	خطای سرعت جریان	خطای عمق جریان	خطای سرعت جریان	خطای عمق جریان	خطای سرعت جریان	خطای عمق جریان	خطای سرعت جریان
0/4	-	-	-	-	50/06	2/99	-	-
1/2	6/26	44/34	7/17	39/2	2/16	30/29	2/44	38/26
2	4/87	46/13	5/53	43/61	3/1	34/28	1/74	13/84
2/8	4/89	46/81	5/65	46/16	5/04	38/6	2/3	22/24
3/6	2/74	44/9	5/3	24/24	2/91	40/77	2/15	90/27
4/4	3/32	41/88	5/24	47/19	2/98	51/37	3/25	83/6
5/2	2/68	33/23	-	-	-	-	-	-
6	3/12	37/04	-	-	-	-	-	-
بهترین مقدار β	5/2	3/6	1/2	2	-	-	-	-



الف) عمق آب

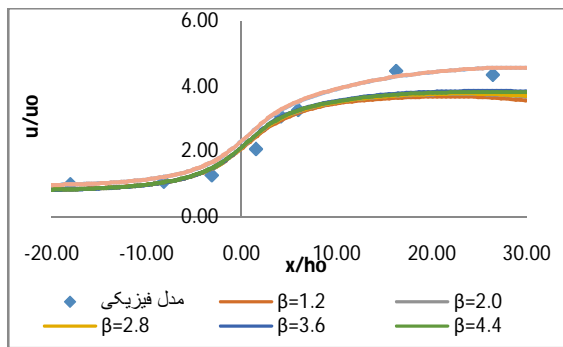


ب) سرعت جریان

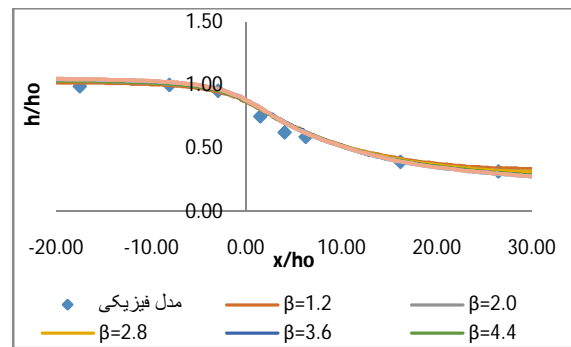
شکل 6 آنالیز حساسیت الف) ارتفاع آب روی آبشکن غیرمستغرق، ب) سرعت جریان

2-4- تعیین ضرایب معادله فورشه‌ایمر

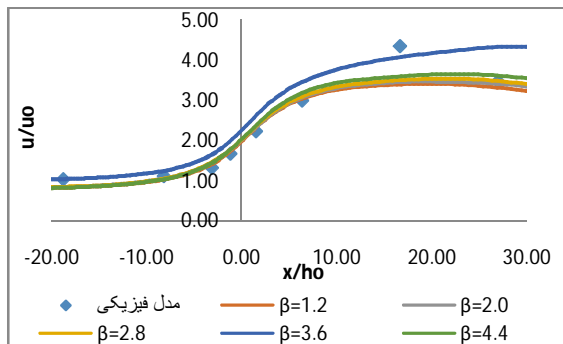
به منظور تعیین ضرایب A و B در معادله (9) نیاز است که تنها ضریب β مشخص شود. جهت مشخص شدن پارامتر β از آنالیز حساسیت استفاده شده است. آنالیز حساسیت جهت تعیین بهترین مقدار β به وسیله میانگین درصد خطای داده‌های شبیه‌سازی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفته است. این پارامتر که با E_{β} نمایش داده می‌شود، میزان نزدیکی داده‌های بدست آمده توسط شبیه‌سازی به داده‌های آزمایشگاهی Michioku et al. (2013) را نمایش می‌دهد. در حقیقت این آنالیز چگونگی تغییر خروجی‌های نرم‌افزار به وسیله تغییر در پارامتر غیرخطی معادله فورشه‌ایمر را مشخص می‌کند. پارامتر E_{β} به وسیله میانگین خطی درصد تفاضل داده‌های آزمایشگاهی در نقاط اندازه‌گیری شده و داده‌های شبیه‌سازی تقسیم بر داده‌های آزمایشگاهی، طبق رابطه



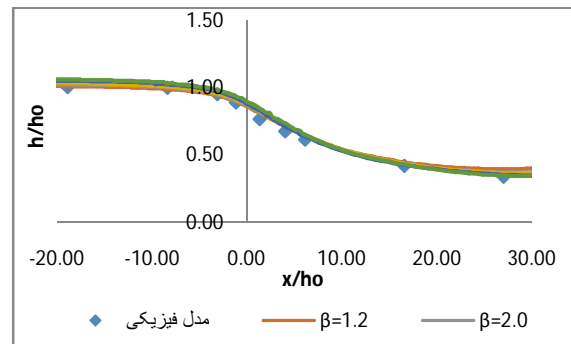
الف) آبشکن 2



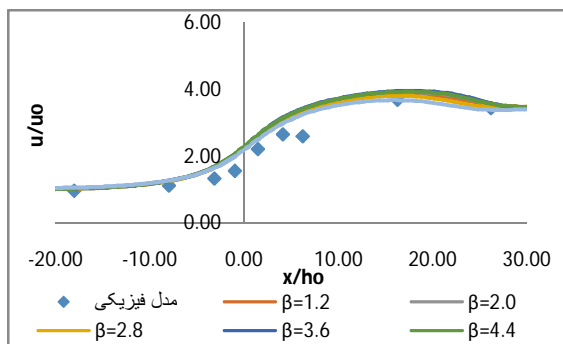
الف) آبشکن 2



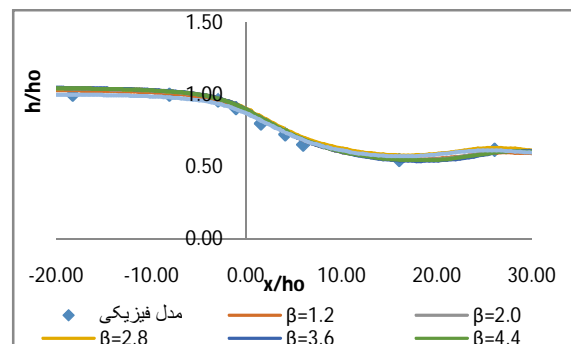
ب) آبشکن 3



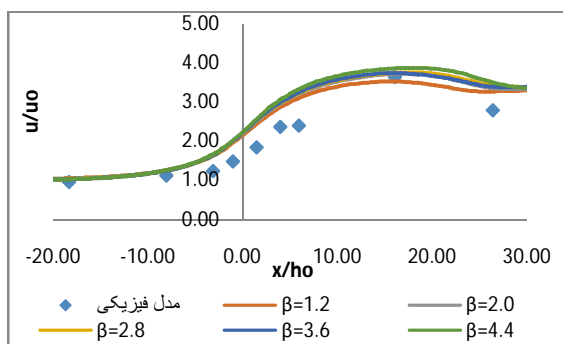
ب) آبشکن 3



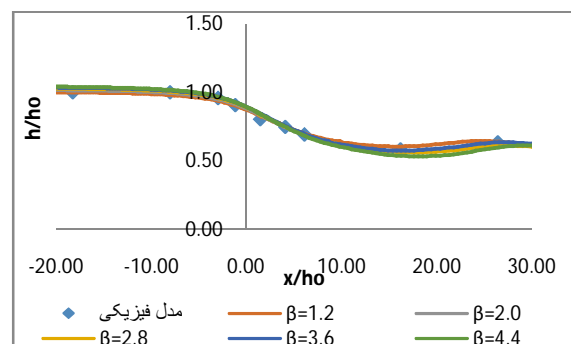
ج) آبشکن 4



ج) آبشکن 4



د) آبشکن 5



د) آبشکن 5

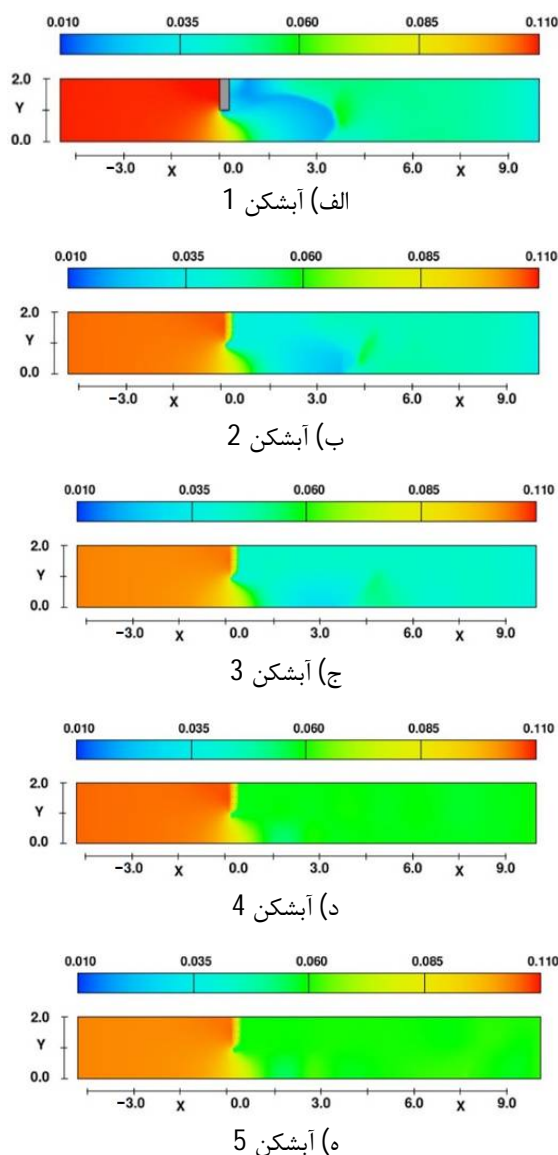
شکل 8 سرعت جریان در مقطع طولی $y=0.95$

شکل 7 عمق جریان در مقطع طولی $y=0.95$ (عمق جریان ورودی)

تخلخل، باعث کاهش بیشینه عمق بالادست آب‌شکن می‌گردد. همچنین افزایش درصد تخلخل، کمینه عمق جریان در کانال را کاهش و عمق سیال در مجاورت جداره داخلی را افزایش می‌دهد.

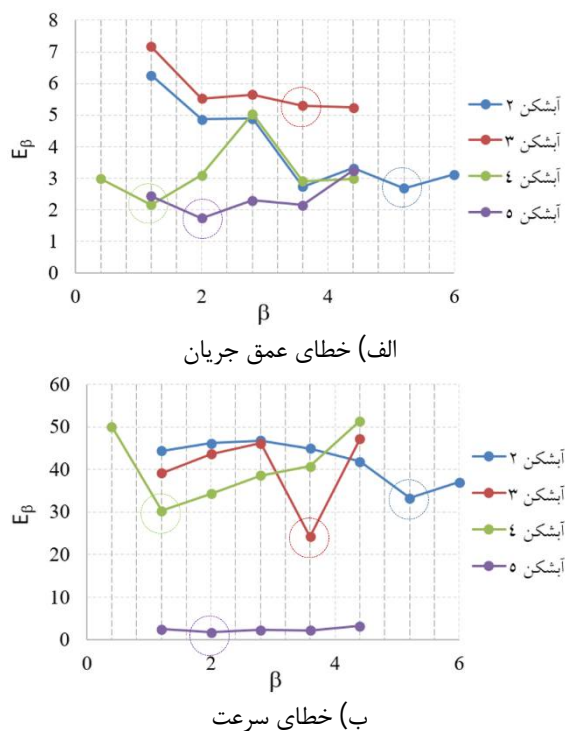
3-2- سرعت طولی جریان

سرعت در راستای طولی کانال در صفحه x-y و در نزدیکی کف کانال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. شکل 11 تغییرات سرعت جریان در کانال در مجاورت آب‌شکن‌های 1 تا 5) نمایش می‌دهد.



شکل 10 عمق جریان کانال در مجاورت آب‌شکن‌های 1 تا 5

همچنین با مقایسه نتایج به دست آمده از جدول 5 و داده‌های جدول 1 مشخص می‌گردد افزایش درصد تخلخل باعث کاهش ضریب جمله غیرخطی در معادله فورشهایمر و افزایش عمق جریان نیز باعث کاهش این مقدار می‌شود. نتایج جدول 5 در شکل 9 ارائه شده است. مطابق نمودار مشاهده می‌شود که بررسی‌های مختلف با گام تغییراتی 0/8 تا جایی ادامه پیدا می‌کند که به یک مینیمم نسبی منجر گردد.



شکل 9 تعیین ضریب β با استفاده خطای عمق جریان و سرعت

3- ارائه نتایج

3-1- تغییرات عمق آب در کانال

عمق آب در ابتدا و انتهای کانال برابر مقدار ارائه شده در آزمایش‌های Michioku et al. (2013) می‌باشد اما در طول کانال و به دلیل وجود تنگ شدگی ناشی از آب‌شکن، این مقدار در مقاطع قبل از آب‌شکن افزایش و در مقاطع بعد از آن کاهش می‌یابد. شکل 10 تغییرات عمق آب در کانال در مجاورت آب‌شکن‌های 1 تا 5 به ترتیب از بالا به پایین نمایش می‌دهد.

نتایج شکل‌های اخیر حاکی از آن است که افزایش

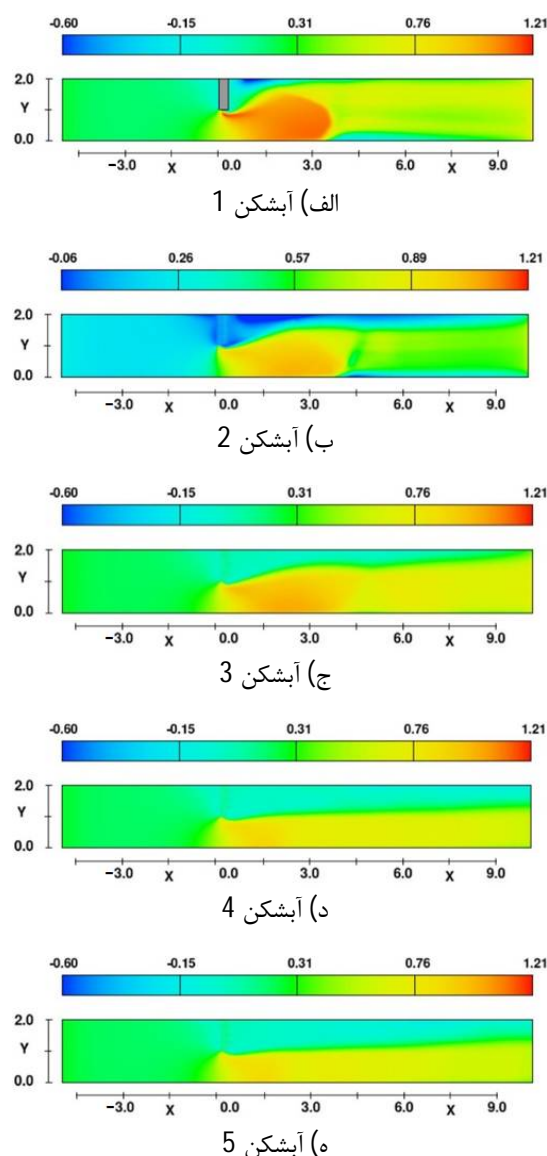
درصد تخلخل موجب کاهش قدرمطلق سرعت کمینه می‌گردد و این بدان معناست که افزایش تخلخل از اثر جریان‌های برگشتی می‌کاهد. با دقت در نواحی بعد از آبشکن مشاهده می‌شود یک منطقه جدایی جریان از لبه آبشکن در پایین‌دست وجود دارد که تا جداره داخلی آبشکن ادامه پیدا می‌کند. افزایش تخلخل آبشکن و همچنین افزایش عمق بالادست، موجب افزایش شیب خط جدایی جریان و افزایش طول جدایی جریان از جداره داخلی آبشکن می‌گردد. افزایش نفوذپذیری و افزایش عمق بالادست موجب کوتاه شدن خط اثر جریان بیشینه (مقطع قرمز رنگ) می‌شود.

بنابراین افزایش تخلخل مصالح، عملکرد حفاظتی سواحل رودخانه را بهبود بخشیده و بار انتقال رسوبات کف را کاهش می‌دهد. احداث آبشکن در دیواره داخلی آبشکن، یک نوار ساحلی کاملاً امن را به وجود می‌آورد که سرعت جریان در آن تقریباً برابر صفر است. از این خاصیت آبشکن‌های متخلخل می‌توان جهت حفاظت دیواره داخلی آبشکن استفاده نمود. بعلاوه افزایش نفوذپذیری طول اثرگذاری حفاظت ساحلی را به شدت افزایش می‌دهد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نحوه شبیه‌سازی عددی آبشکن متخلخل و میدان جریان در اطراف آن با استفاده از نرم‌افزار Flow3D بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی محیط متخلخل با استفاده از روش مدل نیروی درگ فورشه‌ایمر و کالیبراسیون آن انجام گرفت و ضرایب معادله فورشه‌ایمر با استفاده از نتایج مدل فیزیکی محاسبه شدند. یکی از نتایج قابل توجه در این تحقیق این بود که برای شرایط اینچینی یعنی عبور جریان از یک سازه متخلخل نظیر آبشکن و یا سرریز که سرعت و آشفتگی جریان داخل محیط متخلخل بالاست نتایج مدل داری قابل قبول نیست و در این شرایط می‌توان از مدل غیرخطی فورشه‌ایمر استفاده نمود و به نتایج قابل قبولی دست یافت.

نتایج این تحقیق نشان داد افزایش تخلخل آبشکن، موجب کاهش ارتفاع آب در بالادست آبشکن و افزایش ارتفاع در



شکل 11 سرعت جریان در مجاورت آبشکن‌های 1 تا 5

مقایسه شکل‌ها نمایانگر آن است که افزایش نفوذپذیری آبشکن، باعث کاهش بیشینه سرعت طولی در امتداد طولی کانال می‌شود که این به دلیل افزایش تراوایی بدنه آبشکن و کاهش عمق جریان در بالادست آبشکن می‌باشد. همچنین افزایش درصد تخلخل باعث افزایش کمینه سرعت طولی در راستای آبشکن (راستای عرض کانال) می‌گردد. در این مورد باید توجه کرد، کمینه سرعت در نواحی برگشتی جریان در مقطع بعد از آبشکن اتفاق می‌افتد و مقدار آن منفی است.

اگر قدر مطلق سرعت کمینه در نظر گرفته شود، افزایش

مستغرق در قوس 90 درجه". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-گرایش هیدرولیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

عبداللهی درگاه، ص؛ کریمی، پ؛ اختری، ع.ا. و حسینی، س.ا. (1393). "برسی عددی اثر نفوذپذیری آبشکن بر میدان سرعت و تنش برشی در قوس 90 درجه با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت". اولین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه‌های عمرانی، گرگان.

Ahmed, M., (1951). "Spacing and Projection of Spurs for Bank Protection" Vol. 46, Part I, London.

Azinfar, H., and Kells, J. A. (2008). "Backwater prediction due to the blockage caused by a single, submerged spur dike in an open channel". Journal of Hydraulic Engineering, 134(8), 1153-1157.

Fei-Yong, C., and Ikeda, S. (1997). "Horizontal separation flows in shallow open channels with spur dikes". Journal of Hydrosience and hydraulic Engineering, 15(2), 15-30.

Duan, J. G. (2009). "Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike". Journal of Hydraulic Engineering, 135(10), 803-811.

Hirt, C. W., and Nichols, B. (1988). *Flow-3D User's Manual*. Flow Science Inc, 107.

Kang, J., Yeo, H., Kim, S., and Ji, U. (2011). "Permeability effects of single groin on flow characteristics". Journal of Hydraulic Research, 49(6), 728-735.

Michioku, K., Nanjo, M., Haneda, M., Kanda, K., and Li, Z. (2013). "Hydrodynamics and hydromorphology of river structures constructed by natural materials". In Proc. 6th Intl. Conf. Water Resources and Environment Research, Water & Environment Dynamics.

Miller, R., Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., Truelsen, C., and Michelsen, J. (2003). "3-D numerical modelling of flow around a groin". In 30th International Association of Hydraulic Engineering and Research Congress (IAHR) (pp. 385-392). ATh.

Peng, J., Kawahara, Y., and Tamai, N. (1996). "Numerical analysis of three-dimensional turbulent flows around submerged groins". In Managing Water: Coping with Scarcity and Abundance (pp. 244-249). ASCE.

Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B. A. (1983). "Flow near groin-like structures". Journal of Hydraulic Engineering, 109(3), 463-480.

پایین دست آبشکن می‌گردد. همچنین مشاهده گردید افزایش تخلخل از مقدار بیشینه سرعت کاسته و طول اثر آن را کاهش و نیز کمینه سرعت را افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت اگر هدف حفاظت ساحل داخلی رودخانه نسبت به آبشکن باشد، آبشکن نفوذپذیر عملکرد بهتری نسبت به آبشکن نفوذناپذیر دارد.

5- فهرست علائم

A	ضریب جمله خطی معادله فورشه‌ایمر
B	ضریب جمله غیرخطی معادله فورشه‌ایمر
d_{fiber}	میانگین قطر کروی مصالح در محیط متخلخل
d_m	قطر متوسط مصالح
g	شتاب ثقل
Re_p	عدد رینولدز جریان در محیط متخلخل
u_{Bulk}	سرعت در محیط متخلخل
α	ثابت معادله ارگون، برابر 150
β	ثابت معادله ارگون، بین 1/8 تا 4
μ	ویسکوزیته دینامیکی
ρ	چگالی آب
ϕ	درصد تخلخل
∇P	گرادیان فشار در محیط متخلخل

6- مراجع

اردشیری، م.ا؛ صانعی، م. و رضایی، ز. (1392) "بررسی آزمایشگاهی اثر طول و فاصله آبشکن نفوذپذیر و غیرمستغرق بر تغییرات دبی آبگیر با زاویه 90 درجه". هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان.

اسدی، م. و زمردیان، س.م.ع. (1392). "شبیه‌سازی عددی الگوی جریان متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف سری آبشکن قائم و زاویه دار با مدل عددی Flow3D". پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، دانشگاه شیراز.

اهدایی، پ. و کاشفی پور، س.م. (1394). "بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه و نفوذپذیری تک آبشکن بر روی ابعاد چاله آبشستگی در شرایط غیر مستغرق"، علوم و مهندسی آبیاری، 38 (4).

خسروی مشیزی، م. قدسیان، م. و واقفی، م. (1393). "بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل

“Flow structures around submerged spur dikes with various relative height”. In Proceedings of the Congress-International Association for Hydraulic Research (pp. 421-427).

Uijtewaal, W. S. J., Lehmann, D. V., and Mazijk, A. V. (2001). “Exchange processes between a river and its groyne fields: Model experiments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11), 928-936.

Uijtewaal, W. S. (2005). “Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: Laboratory experiments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(9), 782-791.

Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B. A. (1983). “Erosion near groyne-like structures”. *Journal of hydraulic Research*, 21(4), 277-287.

Soliman, M. M., Attia, K. M., Talaat, A. M., and Ahmed, A. F. (1996). “Spur dike effects on the river Nile morphology after high Aswan dam”. In *Managing Water: Coping with Scarcity and Abundance* (pp. 805-810). ASCE.

Tingsanchali, T., and Maheswaran, S. (1990). “2-D depth-averaged flow computation near groyne”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(1), 71-86.

Tominaga, A., Ijima, K., and Nakano, Y. (2001).

Numerical simulation of porous spur dyke using Flow 3D software

Ali Cheshomi¹, Ehsan Behnamtalab^{2*} and Farhad Khamchin Moqadam³

1- Master of Civil Engineering, Azad University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azad University of Mashhad, Mashhad, Iran

* e.behnamtalab@hsu.ac.ir

Abstract

In the present research, effects of a porous spur-dyke on the hydraulic characteristics of the flow in an open-channel have been numerically studied through non-linear Forschheimer model. The numerical simulations were performed in Flow3D package using RNG k-epsilon turbulence closure model. During simulations of the porous spur-dyke, suitable Friesheimer non-linear coefficients were determined for various cases with the sensitivity analysis. The sensitivity analysis and comparisons of the numerical results with the results of the physical model showed that most of parameters are completely dependent to Friesheimer non-linear term and the proposed software range for Friesheimer nonlinear coefficient is not suitable. The results showed that by increasing of the porosity of the porous spur dyke, the flow velocity and also the effect area of the maximum velocity will decrease. Also, by increasing of the porosity of the porous spur dyke, the upstream water depth of the spur dyke will decrease and the downstream water depth of the spur dyke will increase. It was also observed that by increasing of the porosity of the porous spur dyke, the maximum value of the velocity decreases and the minimum value of it increases.

Keywords: Porous spur dyke, Numerical simulation, Forschheimer model, Drag coefficient, Flow3D.