نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۵۱ ، شماره ۳ (پاییز ۱۴۰۰)، یادداشت پژوهشی، ۱۵۹-۱۶۹ پیاپی ۱۰۴

برآورد ضریب پسا برای آبشکن‌های توری‌سنگی با درصد تخلخل‌های متفاوت با استفاده از اندازه‌گیری آزمایشگاهی میدان جریان و حل معادلات ناویر استوکس

مهشید گودرزی[۱]، مجید فضلی*[۲]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
[۲] استادیار آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(دریافت: ۹۸/۴/۱۹، پذیرش: ۹۹/۱۱/۲۸، نشر آنلاین: ۹۹/۱۱/۲۸)

چکیده

آبشکن‌ها دیواره‌های عرضی هستند که در کنار ساحل رودخانه، ساخته شده و به حفاظت دیواره‌ها کمک می‌کنند. از نظر هیدرودینامیکی، تقابل بین آبشکن‌های متخلخل واقع در مسیر جریان و سیال اطراف آن پیچیده بوده و محاسبات نیرو بر روی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق با استفاده از روش جدیدی، در ترکیب نتایج آزمایشگاهی با حل عددی، میدان سرعت جریان پیرامون آبشکن‌های توری‌سنگی با تخلخل‌های متفاوت، در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و با داشتن میدان جریان، بروش عددی، معادلات میانگین زمانی ناویر-استوکس (Time-Averaged Navier-Stokes equation) برای جریان آشفته حل می‌شوند و توزیع میدان فشار پیرامون آن‌ها به‌دست می‌آید. سپس با استفاده از میدان فشار نیروی درگ (Drag force) وارد بر آبشکن‌ها و ضریب درگ بررسی می‌شود. شبکه‌بندی این پژوهش از نوع شبکه‌بندی جابه‌جا شده پسرو سه‌بعدی غیریکنواخت می‌باشد. نتایج نشان داد که جدایش جریان برای آبشکن‌ها با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد تخلخل، نیرو و ضریب درگ کاهش یافته و در نهایت ضریب دراگ براساس درصد تخلخل آبشکن‌ها، با برازش منحنی درجه سوم ارائه شد.

کلیدواژه‌ها: آبشکن توری‌سنگی، درصد تخلخل، معادلات میانگین زمانی ناویر- استوکس، توزیع فشار، نیروی پسا، ضریب پسا.

۱- مقدمه

رودخانه‌ها و آبراهه‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی و یا دخالت-های انسان دچار فرسایش بستر، فرسایش کناره‌ها و جابه‌جایی عرضی می‌شوند. یکی از روش‌های معمول در کنترل و حفاظت کناره‌های رودخانه‌ها، استفاده از آبشکن می‌باشد. آبشکن‌های توری‌سنگی یکی از انواع آبشکن‌ها می‌باشند و از جنس سنگ و مصالح سنگریزه‌ای هستند که توسط یک روکش توری‌فلزی پوشیده شده‌اند. آبشکن توری‌سنگی از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه و اجرای آن ساده است. از نظر هیدرودینامیکی، تقابل بین آبشکن متخلخل رودخانه‌ای و سیال اطراف آن پیچیده بوده و محاسبات نیرو بر روی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگر یک سیال حقیقی با سرعت ثابت پیرامون جسمی متقارن عبور کند، به خاطر گرانروی سیال، نیروی پسا که با توجه به شکل جسم اصطکاکی، فشاری و یا هر دو خواهد بود، وجود دارد. در اجسام دارای لبه‌های تیز، نقطه جدایی جریان، منطبق بر روی همان لبه‌های تیز است و نیروی پسای شدیدی از نوع شکلی یا فشاری بر صفحه وارد می‌شود؛ ولی نیروی برشی، در راستای حرکت اصلی سیال مؤلفه‌ای ندارد Streeter (۱۹۹۸). در زمینه بررسی میدان جریان اطراف آبشکن‌ها مطالعات زیادی انجام شده است. به عنوان مثال Uijtewaal (۲۰۰۵) با بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان اطراف آبشکن ذوزنقه‌ای مستغرق به این نتیجه رسید که در آبشکن‌های نفوذپذیر، اندازه حرکت جریان عبوری از بدنه آبشکن، ساختار جریان چرخشی پشت آبشکن را به‌هم زده و مانع شکل‌گیری الگوی چرخشی جریان می‌شود.

Duan و Nanda (۲۰۰۶) با استفاده از یک مدل هیدرودینامیکی با حل معادلات دوبعدی ناویر- استوکس، به شبیه‌سازی توزیع غلظت رسوب معلق در اطراف آبشکن، پرداختند. Lee و همکاران (۲۰۱۱) با مدل‌سازی عددی دوبعدی جریان پیرامون آبشکن‌های شمعی نفوذپذیر با استفاده از معادلات میانگین زمانی رینولدز[۱] و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ به این نتیجه دست

1. Reynolds

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس:
آدرس ایمیل: m.goudarzi94@basu.ac.ir (م. گودرزی)، mfazli@basu.ac.ir (م. فضلی).

یافتند که با افزایش دبی جریان، جهت جریان نزدیک شونده منحرف می‌شود.

فتاحی و همکاران (۱۳۹۷) با مطالعه عددی تأثیر نفوذپذیری آبشکن‌ها بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس۹۰ درجه بیان کردند که با افزایش درصد نفوذپذیری آبشکن‌ها، بیشینه عمق آبشستگی و ارتفاع رسوب‌گذاری کاهش می‌یابد.

آرمان و همکاران (۱۳۹۵) به مقایسه و شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه ملایم با استفاده از مدل‌های CCHE2D و SRH-2D پرداختند. Qi و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی آزمایشگاهی نیروی درگ بر یک مانع مکعبی در کانال باز، برای محاسبه نیروی پسا و نیز ضریب پسا روابطی ارائه نمودند. Yagmur و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌ای آزمایشگاهی و عددی با استفاده از حل معادلات رینولدز توسط مدل آشفتگی LES، برای جریان در اطراف سیلندر با مقاطع مربع، مثلث و دایره، انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ضریب درگ به‌ترتیب برای سیلندر مربعی و سیلندر دایره‌ای است.

Li و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3d و روش حجم محدود و استفاده از روش VOF به شبیه‌سازی جریان اطراف آبشکن پرداختند.

Azinfar و Kells (۲۰۰۹) با استفاده از اندازه‌گیری دبی و عمق جریان و همچنین استفاده از معادله مومنتوم به بررسی جریان پیرامون تک آبشکن با اندازه‌های مختلف پرداختند و بیان کردند که افزایش انسداد جریان عامل اصلی افزایش ضریب درگ و مقاومت جریان است. ایشان (۲۰۱۱) با بررسی مقدار نیروی درگ ناشی از قرارگیری آبشکن‌ها در یک کانال باز بیان کردند که با افزایش تعداد آبشکن‌ها و فاصله نسبی بین آن‌ها، نیروی درگ افزایش می‌یابد و بیش‌ترین نیروی درگ بر آبشکن قرارگرفته در بالادست وارد می‌شود و مانند یک سپر عمل می‌کند، به‌طوری‌که نیروی درگ واردشده بر آبشکن پایین‌دست کاهش می‌یابد.

Han و Lin (۲۰۱۸) با استفاده از یک مدل عددی براساس معادلات ناویر استوکس و روش VOF و مدل آشفتگی LES، جریان در اطراف دوبل آبشکن را مدل‌سازی کردند. با توجه به اهمیت مطالعات آزمایشگاهی و همچنین اهمیت معادلات رینولدز در علم مکانیک سیالات و هیدرولیک، و هم‌بستگی میان مطالعات عددی و آزمایشگاهی، ضرورت مطالعه در این زمینه احساس می‌شود. تاکنون بر اساس روش‌های:

۱- شبیه‌سازی عددی جریان توسط نرم‌افزار،

۲- اندازه‌گیری فشار توسط فشارسنج نقطه‌ای و انتگرال‌گیری از سطح،

۳- براساس معادله مومنتوم نیروی درگ محاسبه شده است.

اما تاکنون با استفاده از روش آزمایشگاهی- عددی به محاسبه نیروی وارد بر آبشکن‌های متخلخل پرداخته نشده است. در این پژوهش، داده‌های آزمایشگاهی سرعت‌ها و تنش‌های رینولدز توسط دستگاه سرعت‌سنج ADV [2] پیرامون آبشکن‌ها با درصد تخلخل‌های متفاوت برداشت شده است و ازآنجاکه درصد تخلخل متفاوت بر الگوی جریان تأثیر متفاوتی دارد، داده‌های آزمایشگاهی مطابق با شبکه‌بندی گره‌ها (شبکه جابه‌جاشده) به عنوان ورودی به نرم‌افزار متلب، داده می‌شود. سپس، معادلات حاکم بر جریان آشفته، با استفاده از چهار روش، اختلاف بالادست، اختلاف پیوند، توان-پیرو[3] و کوئیک هیاز[4] گسسته‌سازی می‌شوند و به صورت یک دستگاه معادلات برای محاسبه میدان فشار، در نرم‌افزار متلب نوشته می‌شوند و با حل دستگاه معادلات برای هریک از گره‌های فشار، چگونگی توزیع فشار برای آبشکن‌ها با درصد تخلخل‌های مختلف به‌دست آمده است و با انتگرال‌گیری از مقدار فشار در کل سطح در اطراف آبشکن نیروی درگ وارد بر آبشکن و همچنین ضریب درگ محاسبه شده است. بنابراین، در این پژوهش، ارتباط بین این ضریب با درصد تخلخل آبشکن مطالعه می‌گردد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- روش کار آزمایشگاهی

آزمایش موردنظر در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بوعلی‌سینا انجام گرفته است. کانال آزمایشگاه هیدرولیک، شامل یک فلوم[5] به طول ۱۵ متر، ارتفاع و عرض ۰/۶ متر می‌باشد. که جداره و کف فلوم از جنس شیشه شفاف به ضخامت ۱۰ میلی‌متر است (شکل (۱)).

آبشکن بسته با ضخامت ۲ سانتی‌متر، از چسباندن دو صفحه پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱سانتی‌متر، ساخته شده است. سپس آبشکن بسته به صورت قالب برای ساخت آبشکن متخلخل استفاده شد و با استفاده از توری فلزی، آبشکن‌های متخلخل با درصد تخلخل ۲۰، ۴۰ و۶۰ در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بوعلی سینا ساخته شدند. چگالی سنگ‌دانه‌های مورداستفاده برای آبشکن با ۲۰، ۴۰، ۶۰ درصد تخلخل به‌ترتیب برابر با ۲/۵۶، ۲/۶۵ و ۲/۶۵ بوده است (شکل (۲)). ارتفاع، طول و عرض آبشکن‌ها به ترتیب ۶۰، ۱۰ و ۲ سانتی‌متراست که در فاصله ۶/۳ متری از بالادست کانال قرار گرفته است. با توجه به شرایط آزمایشگاه هیدرولیک و حجم بالای کار آزمایشگاهی و عددی و همچنین تعداد نقاط و تعداد لایه‌ها در شبکه‌بندی، در این پژوهش عمق آب در بالادست مانع ۱۲/۵ سانتی‌متر، دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، سرعت متوسط ۰/۳۳ متر بر ثانیه، می‌باشد. عدد فرود و عدد رینولدز به‌ترتیب برابر با ۰/۳ و ۲۹۰۰۰ است.

2. Acoustic Doppler Velocimeter
3. Power-low scheme
4. Quick by hayase
5. Flume

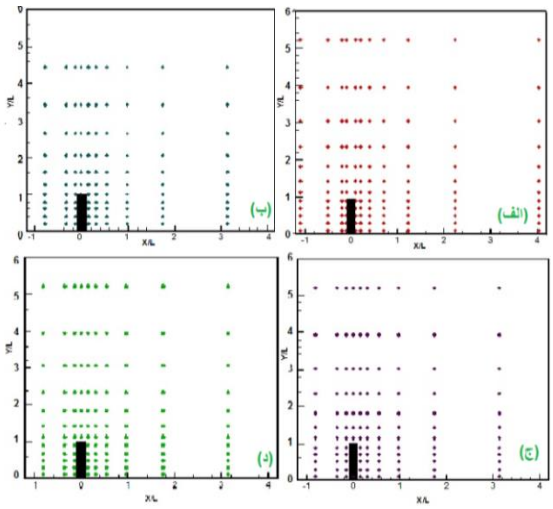
شکل ۱- کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بوعلی‌سینا

شکل ۲-آبشکن‌های مورداستفاده: الف) ۰٪ تخلخل، ب) ۲۰٪ تخلخل، ج) ۴۰٪تخلخل، د) ۶۰٪ تخلخل

جهت اندازه‌گیری مقدار متوسط مؤلفه‌های سرعت و مقادیر $\acute{u}\acute{v}$، $\acute{u}\acute{w}$ و $\acute{v}\acute{w}$، از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی صوتی داپلر[6] استفاده شده است (شکل (۳)). بنابراین، توسط عملیات ریاضی ساده، مقادیر تنش‌های رینولدز قابل محاسبه می‌باشند. در این پژوهش، به‌جز بستر و دیواره‌های کانال که تمامی مؤلفه‌های سرعت و تنش‌های رینولدز صفر می‌باشند، برای سطح آزاد و شرایط مرزی ورودی و خروجی، سرعت‌ها و تنش‌ها توسط سرعت-سنج برداشت شده است. در سطح آزاد فشار برابر با فشار اتمسفر و فشار در هر تراز، فشار هیدرواستاتیکی براساس عمق آب از سطح آزاد در نظر گرفته شده است.

شکل ۳- برداشت داده‌ها به‌وسیله سرعت‌سنج ADV

در این پژوهش حجم نمونه‌گیری به شکل یک استوانه به قطر ۶ میلی‌متر و ارتفاع ۷ میلی‌مترمی‌باشد. زمان برداشت داده‌ها یک دقیقه می‌باشد. فیلترهایی که برای استفاده از داده‌های سرعت و تنش‌های رینولدز انجام گرفت نیز عبارت‌اند از: مقدار SNR[7] بیشتر از ۱۵، مقدار همبستگی[8] بیشتر از ۷۰ و شتاب برابر با یک است. برای شبکه‌بندی کارهای آزمایشگاهی تاکنون از روش شبکه‌بندی هم‌مکان استفاده شده است. ازآنجاکه این پژوهش ترکیبی از روش آزمایشگاهی با حل عددی می‌باشد، به‌طوری‌که شبکه‌بندی داده-های آزمایشگاهی میدان جریان به صورت مستقیم و بدون درون-یابی وارد شبکه‌بندی حل عددی میدان جریان جهت محاسبه فشار می‌شوند، بنابراین، شبکه‌بندی آزمایشگاهی و شبکه‌بندی حل عددی، یکسان و از نوع شبکه‌بندی جابه‌جاشده پسرو سه-بعدی غیریکنواخت انتخاب گردید در روش کار عددی به صورت کامل این نوع شبکه‌بندی توضیح داده شده است. در این پژوهش، تعداد نقاط برداشت برابر با ۱۸۱۵ نقطه است. که تعداد نقاط فشار برای هر تراز ۱۱۵ و در ۵ تراز ارتفاعی، درمجموع ۵۷۵ نقطه فشار محاسبه می‌شود. در این پژوهش مؤلفه‌های سرعت طولی u و عرضی v در ترازهای ۰/۵، ۲/۳، ۵/۱، ۸/۳، ۱۰/۵ و مؤلفه سرعت قائم w در ترازهای ۱، ۳/۶، ۶/۶، ۱۱/۱۰ سانتی‌متری از کف موردنیاز می‌باشند. شبکه‌بندی فشار در ترازهای ۰/۵، ۲/۳، ۵/۱، ۸/۳، ۱۰/۵ سانتی‌متـــری از کف کانال، با مختصات طولی و عـرضی یکسان با میـــدان سرعت قائـم است (شکل (۴)). شبکـه‌بندی مؤلفه‌های سرعت و فشار را به طور شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۴- شبکه‌بندی مؤلفه‌های سرعت و شبکه‌بندی فشار: الف) سرعت u، ب) سرعت v، ج) سرعت w، د) فشار p

6. Doppler
7. SNR
8. Correlation

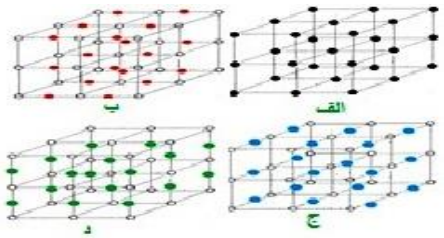
۲-۲- روش کار عددی

روش حجم محدود همیشه با گسسته‌سازی ناحیه جریان و معادلات انتقال مربوطه شروع می‌شود. اگر از شبکه‌بندی هم‌مکان استفاده شود، یک میدان فشار به‌شدت غیریکنواخت می‌تواند مانند یک میدان فشار یکنواخت در معادلات اندازه حرکت گسسته عمل کند.

یک راه‌حل برای این مشکل استفاده از شبکه جابه‌جا شده است. در این شبکه‌بندی، متغیرهای اسکالر فشار در گره‌ها ذخیره می‌شوند و مؤلفه‌های سرعت بر نقاط میانی سطوح حجم کنترل مربوط به هر یک از نقاط شبکه اصلی (که فشار در آن‌ها محاسبه می‌شود)، قرار می‌گیرند.

یکی از این محاسن مستقیم این نوع شبکه این است که درواقع جابه‌جایی سرعت‌ها از رفتار غیر واقعی معادله اندازه حرکت گسسته شده برای نوسانات سه‌بعدی فشار، جلوگیری می‌کند. مزیت دیگر شبکه جابه‌جاشده این است که سرعت‌ها را دقیقاً در مکان‌هایی که نیاز به محاسبات انتقال اسکالر نفوذ- جابه‌جایی دارد تولید می‌کند. ازاین‌رو جهت محاسبه سرعت‌ها نیازی به درون‌یابی در وجوه اسکالر سلول نیست. در شکل (۵) موقعیت مؤلفه‌های سرعت و فشار، در شبکه‌بندی جابه‌جاشده در حجم کنترل‌ها آمده است.

شبکه جابه‌جاشده پسرو به این صورت است که موقعیت مربوط به سرعت u، به اندازه ۰/۵- برابر طول حجم کنترل فشار، از اسکالر P فاصله دارد. برای سرعت‌های v و w نیز به همین صورت عمل می‌شود. درنهایت به ازای هر یک از سرعت‌های u و v و w و همچنین فشار P، یک حجم کنترل وجود دارد. برای حل هریک از معادلات گسسته شده اندازه حرکت از حجم کنترل سرعت متناظر و برای حل معادله پیوستگی، از حجم کنترل مربوط به فشار استفاده می‌شود. قرارداد مرسوم در روش‌های CFD این است که یک گره عمومی P در نظر گرفته می‌شود و همسایه-های آن در یک هندسه سه‌بعدی، گره‌های شرقی، غربی، شمالی، جنوبی، بالایی و پایین به‌ترتیب با E، W، N، S، T و B نشان داده می‌شود. همچنین برای مشخص کردن سطح شرقی، غربی، شمالی، جنوبی، بالایی و پایینی حجم کنترل به‌ترتیب از e، w، n، s، t و b استفاده می‌شود (Versteeg و Malalasekera، ۱۹۹۵).



شکل ۵- شبکه‌بندی هریک از مؤلفه‌های سرعت و فشار: الف) فشار، ب) سرعت u، ج) سرعت v، د) سرعت w

قدم دوم در روش حجم محدود گسسته‌سازی معادلات حاکم بر جریان است. معادله میانگین زمانی برای اسکالر φ حاکم بر جریان آشفته می‌شود:

$$\partial(\rho\phi)/\partial t + div(\rho\phi u) = div\left(\Gamma_\phi^* grad\phi\right) + \left[-\partial\overline{\rho\acute{u}\acute{\phi}}/\partial x - \partial\overline{\rho\acute{v}\acute{\phi}}/\partial y - \partial\overline{\rho\acute{w}\acute{\phi}}/\partial z\right] + S_\phi \qquad (۱)$$

در این معادله ϕ برابر با مقدار متوسط اسکالر اختیاری φ، Γ_ϕ^* ضریب نفوذ خاصیت φ، u بردار سرعت، $\acute{u}$، $\acute{v}$، $\acute{w}$، $\acute{\phi}$ به‌ترتیب مؤلفه نوسانی سرعت‌های طولی، عرضی و قائم و اسکالر φ و S_ϕ عبارت چشمه می‌باشد. معادلات رینولدز برای هریک از راستای z، y، x با جایگذاری مؤلفه‌های سرعت w، v، u به‌ترتیب به‌جای φ در معادله (۱) به‌دست می‌آید. بنابراین، معادله رینولدز حاکم بر جریان آشفته سه‌بعدی در راستای x به‌صورت معادله (۲) می‌باشد که U، V و W به‌ترتیب متوسط مؤلفه‌های سرعت طولی، عرضی و قائم، P فشار، $-\rho\overline{\acute{u}^2}$، $-\rho\overline{\acute{u}\acute{v}}$ و $-\rho\overline{\acute{u}\acute{w}}$ متوسط تنش‌های آشفتگی و S_U ترم چشمه، می‌باشند:

$$\begin{aligned}
&\int \partial(\rho UU)/\partial x + \int \partial(\rho UV)/\partial y + \int \partial(\rho UW)/\partial z \\
&= \int \partial(\mu(\partial U/\partial x))/\partial x \\
&+ \int \partial(\mu(\partial U/\partial y))/\partial x + \int \partial(\mu(\partial U/\partial z))/\partial x - \int \partial P/\partial x \\
&+ \int S_U \\
&+ \int \partial\left(-\rho\overline{\acute{u}^2}\right)/\partial x \\
&+ \int \partial\left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{v}}\right)/\partial y + \int \partial\left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{w}}\right)/\partial z
\end{aligned} \qquad (۲)$$

در گام بعد، انتگرال حجمی تبدیل به انتگرال سطحی شده است و با استفاده از روش‌های گسسته‌سازی، پارامترهای سرعت تقریب‌زده می‌شوند. بنابراین، معادله (۲) با روش توان- پیرو به صورت معادله (۳) نوشته می‌شود. δx، δy و δz به‌ترتیب طول، عرض و ارتفاع حجم کنترل u، a_P ضریب مرکزی و a_B و a_E, a_W, a_N, a_S, a_T ضرایب همسایه هستند که در جدول (۱) به-صورت خلاصه بیان شده‌اند.

$$\begin{aligned}
&(P_e - P_w)\,\delta y.\delta z = a_E U_E + a_W U_W + a_N U_N + a_S U_S \\
&+ a_T U_T + a_B U_B - a_P U_P + D_e(U_E - U_P) \\
&- D_w(U_P - U_W) + (\mu/\delta x)A_n(V_N - V_P) \\
&- (\mu/\delta x)A_s(V_P - V_S) + (\mu/\delta x)A_t(W_T - W_P) \\
&- (\mu/\delta x)A_b(W_P - W_B) + A_e\left(\left(-\rho\overline{\acute{u}^2}\right)_E + \left(-\rho\overline{\acute{u}^2}\right)_P\right)/2 \\
&- A_W\left(\left(-\rho\overline{\acute{u}^2}\right)_P + \left(-\rho\overline{\acute{u}^2}\right)_W\right)/2 \\
&+ A_n\left(\left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{v}}\right)_N + \left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{v}}\right)_P\right)/2 \\
&- A_s\left(\left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{v}}\right)_P + \left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{v}}\right)_S\right)/2 \\
&+ A_t\left(\left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{w}}\right)_T + \left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{w}}\right)_P\right)/2 \\
&- A_b\left(\left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{w}}\right)_P + \left(-\rho\overline{\acute{u}\acute{w}}\right)_B\right)/2
\end{aligned} \qquad (۳)$$

جدول ۱- ضرایب همسایه طرح توان پیرو

$a_p =$	$a_W + a_E + a_S + a_N + a_B + a_T + F_e - F_w + F_n - F_s + F_t - F_b$
$a_W =$	$D_w \max[0, (1-0.1\lvert Pe_w\rvert)^5] + \max[F_w, 0]$
$a_E =$	$D_e max[0, (1-0.1\lvert Pe_e\rvert)^5] + max[-F_e, 0]$
$a_S =$	$D_s max[0, (1-0.1\lvert Pe_s\rvert)^5] + max[F_s, 0]$
$a_N =$	$D_n \max[0, (1-0.1\lvert Pe_n\rvert)^5] + \max[-F_n, 0]$
$a_B =$	$D_b \max[0, (1-0.1\lvert Pe_b\rvert)^5] + \max[F_b, 0]$
$a_T =$	$D_t \max[0, (1-0.1\lvert Pe_t\rvert)^5] + \max[-F_t, 0]$

که به‌عنوان مثال متغیر شار جرم جابه‌جاشده (F)، قابلیت نفوذ سلول (D) و همچنین عدد پکلت[9] (Pe)، برای یک سطح غربی به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Pe_w = \frac{F_w}{D_w} = \frac{(\rho u)_w}{\Gamma_w/\delta x_{WP}}$$
$$F_w = (\rho U A)_w$$
$$D_w = A_w\, \Gamma_w/\delta x_{WP} \text{ و } \Gamma = \mu \text{ سیال دینامیکی ویسکوزیته} \qquad (۴)$$

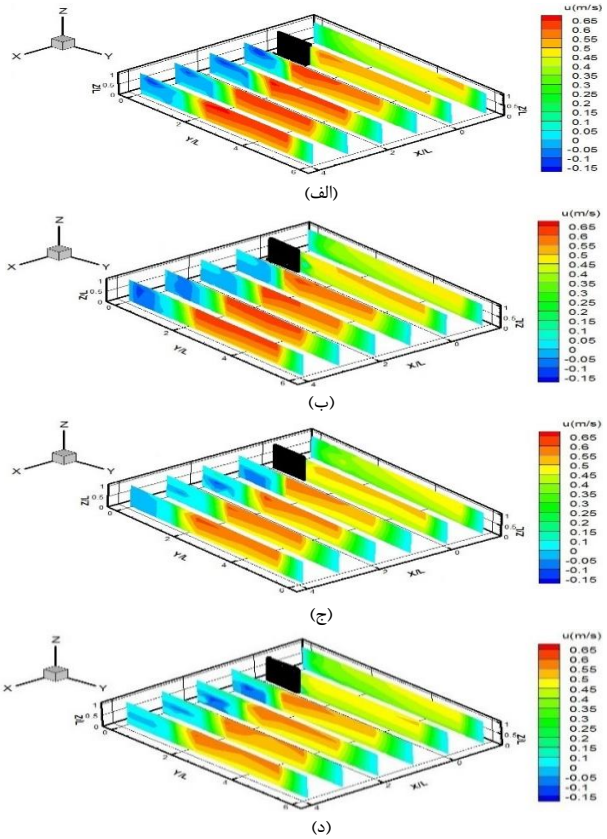
معادلات رینولدز در سه راستا به‌دست آمده با استفاده از روش‌های مختلف گسسته‌سازی، به‌صورت یک دستگاه معادلات برای محاسبه میدان فشار، در نرم‌افزار متلب نوشته می‌شوند و دستگاه معادلات برای تعیین توزیع فشار حل می‌شود. فشار یک کمیت نرده‌ای است که در یک نقطه عبارت است از حد نسبت نیروی قائم به مساحت، زمانی که مساحت به صفر میل کند. در یک نقطه ازسیال ساکن، فشار در تمامی جهات یکسان است. اما اگر سیال در حال حرکت باشد، فشار در یک نقطه به‌صورت متوسط تنش‌های فشاری قائم در سه جهت اندازه‌گیری می‌شود. اما در یک سیال ایده‌آل قوانین استاتیک سیالات حاکم است. در این پژوهش، متوسط فشار در سه راستا از حل عددی، به‌دست آمده است و با انتگرال‌گیری از مقدار فشار، در سطح اطراف آبشکن، نیروی درگ وارد بر آن‌ها محاسبه شده است. درنهایت ضریب درگ برای هریک از آبشکن‌ها از تقسیم نیروی درگ محاسبه شده بر عبارت $\left(\frac{1}{2}\rho V_0^2 A\right)$ به‌دست می‌آید. که A مساحت سطح و V_0^2 مجذور سرعت متوسط و ρ چگالی می‌باشد، در این پژوهش، دستگاه معادلات نوشته شده برای میدان فشار دارای ۵۷۵ معادله و ۵۷۵ مجهول می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایشگاهی

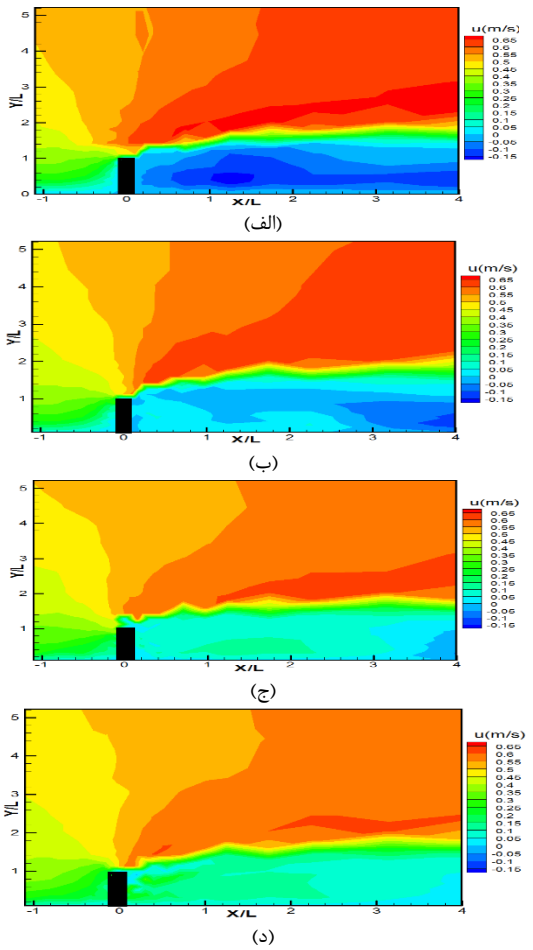
۳-۱-۱- توزیع سرعت‌های طولی اطراف آبشکن‌ها

شکل (۶) کانتورهای سه‌بعدی توزیع سرعت‌های طولی اطراف آبشکن‌ها را نشان می‌دهد، در تمامی شکل‌ها مختصات بر اساس $\frac{X}{L}$، $\frac{Y}{L}$ و $\frac{Z}{L}$ که L طول آبشکن می‌باشد. هنگام برخورد جریان نزدیک شونده به آبشکن در ناحیه بالادست، سرعت جریان نزدیک شونده به آبشکن کاهش می‌یابد و جریان پس از برخورد به آبشکن، به سمت دیواره مقابل منحرف می‌شود. علاوه براین در اثر عبور جریان از مقطع آبشکن در ناحیه پشت آبشکن در امتداد دیواره کناری سمت آبشکن در ناحیه سکون، به‌دلیل تشکیل شدن ناحیه جریان چرخشی، در این ناحیه سرعت‌های در جهت جریان دارای مقادیر منفی و کوچک هستند. سرعت جریان در بالادست با نزدیک شدن به آبشکن در محل تنگ‌شدگی کانال در حال افزایش است. در ناحیه میانه کانال، بعد از آبشکن، ناحیه‌ای وجود دارد که دارای بیشینه سرعت طولی است که وسعت این ناحیه با افزایش ارتفاع در جهت پایین‌دست گسترده می‌شود و همچنین بعد از ناحیه پر سرعت، سرعت‌های طولی دوباره کاهش می‌یابند. همچنین سرعت طولی جریان در ترازهای بالاتر نسبت به ترازهای نزدیک بستر، دارای اندازه بزرگ‌تری می‌باشد. بیشینه سرعت طولی برای آبشکن با درصد تخلخل ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد در تراز ۸/۳ سانتی‌متری ایجاد می‌شود و اندازه‌های این سرعت‌های بیشینه به‌ترتیب ۰/۶۷، ۰/۶۴، ۰/۶۱، ۰/۶ متر بر ثانیه می‌باشد. در شکل (۷)، کانتورهای سرعت‌های طولی در ترازهای ۸/۳ سانتی-متری برای آبشکن‌های مختلف نشان داده شده است.

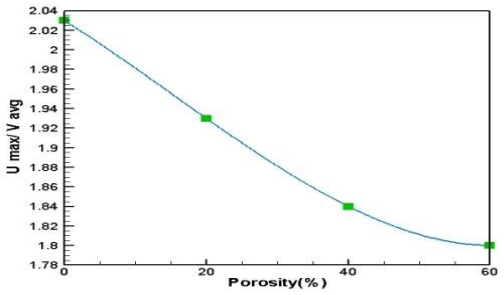


شکل ۶- توزیع سرعت‌های طولی آبشکن با درصد تخلخل‌های مختلف: الف)۰٪ ، ب) ۲۰٪، ج)۴۰٪، د)۶۰٪

9. Peclet number



شکل۷- کانتور سرعت طولی آبشکن با تخلخل‌های مختلف در تراز ۸/۳ سانتی‌متری: الف) ۰٪، ب) ۲۰٪، ج) ۴۰٪، د) ۶۰٪

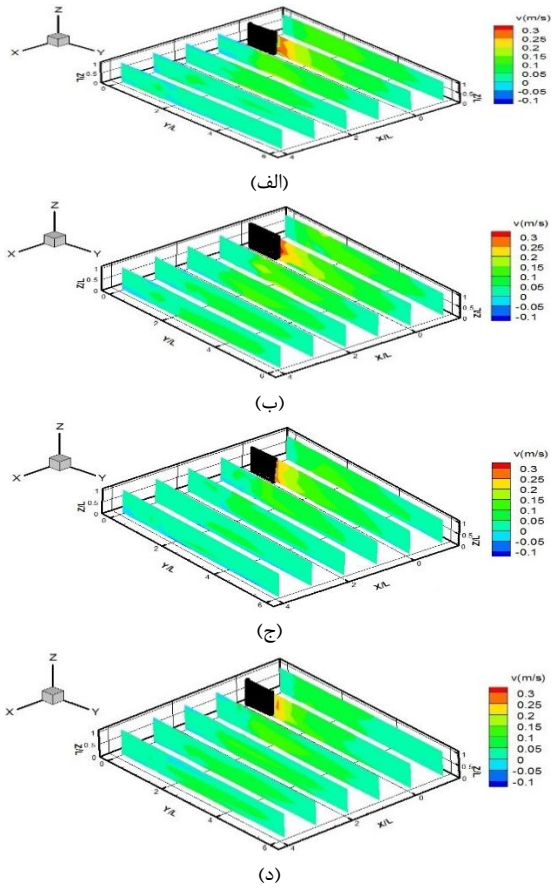


شکل ۸- نمودار اندازه حداکثر سرعت طولی نسبت به سرعت متوسط جریان بر اساس درصد تخلخل آبشکن‌های مختلف

با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود، بیشینه سرعت طولی برای آبشکن با درصد تخلخل ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب حدود ۲/۰۳، ۱/۹۳، ۱/۸۴ و ۱/۸ برابر سرعت متوسط جریان است. به‌بیان‌دیگر، در آبشکن‌ها با افزایش درصد تخلخل نسبت بیشینه سرعت طولی به‌سرعت متوسط جریان کاهش می‌یابد و روند کاهش در تخلخل‌های بیشتر کندتر است.

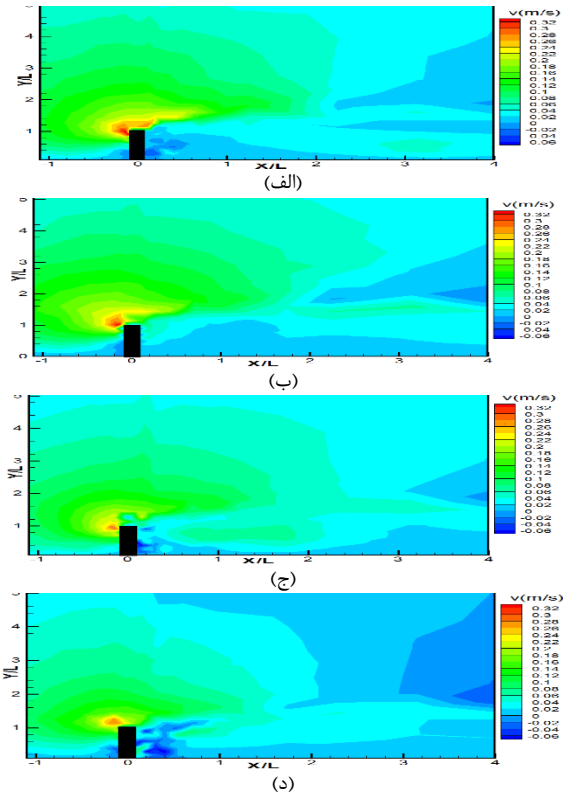
۳-۱-۲- توزیع سرعت‌های عرضی در اطراف آبشکن‌ها

با توجه به شکل (۹) که کانتورهای سه‌بعدی توزیع سرعت عرضی اطراف آبشکن‌ها را نشان می‌دهد مشاهده می‌شود، مقادیر سرعت‌های عرضی در نواحی جلوی آبشکن در پایین‌دست و امتداد دیواره سمت آبشکن منفی می‌باشد. همچنین، بیشینه سرعت عرضی در اطراف دماغه آبشکن در بالادست کانال رخ می‌دهد. که این سرعت عرضی، با افزایش ارتفاع از بستر دارای اندازه و همچنین گستردگی ناحیه کوچک‌تری می‌شوند هرچند در تراز سطح آب نسبت به تراز قبلی اندکی افزایش در سرعت دیده می‌شود.



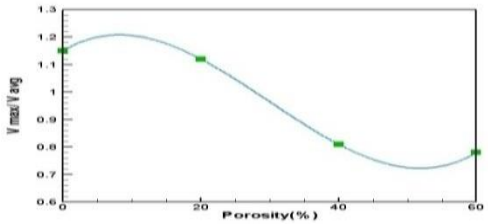
شکل ۹- توزیع سرعت‌های عرضی آبشکن‌ها با درصد تخلخل‌های مختلف: الف) ۰٪، ب) ۲۰٪، ج) ۴۰٪، د) ۶۰٪

اندازه حداکثر مقدار مؤلفه عرضی سرعت در نزدیکی بستر برای آبشکن با درصد تخلخل ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ به‌ترتیب ۰/۳۸، ۰/۳۷، ۰/۲۷ و ۰/۲۶ متر بر ثانیه می‌باشد که به‌ترتیب حدود ۱/۴، ۱/۳۸، ۱/۳۵ و ۱/۳۴ برابر مؤلفه عرضی سرعت در ترازهای نزدیک سطح آب می‌باشند. شکل (۱۰) کانتورهای سرعت عرضی را در تراز ۸/۳ سانتی‌متری از کف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- کانتور سرعت عرضی آبشکن با تخلخل‌های مختلف در تراز ۸/۳ سانتی‌متری: الف) ۰٪، ب) ۲۰٪، ج) ۴۰٪، د) ۶۰٪

همچنین نتایج نشان داد، بیشینه سرعت عرضی برای آبشکن با تخلخل ۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ به ترتیب حدود ۱/۱۵، ۱/۱۲، ۰/۸۱ و ۰/۷۸ سرعت متوسط جریان می‌باشند. بنابراین، بیشینه سرعت عرضی، با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد (شکل (۱۱)).

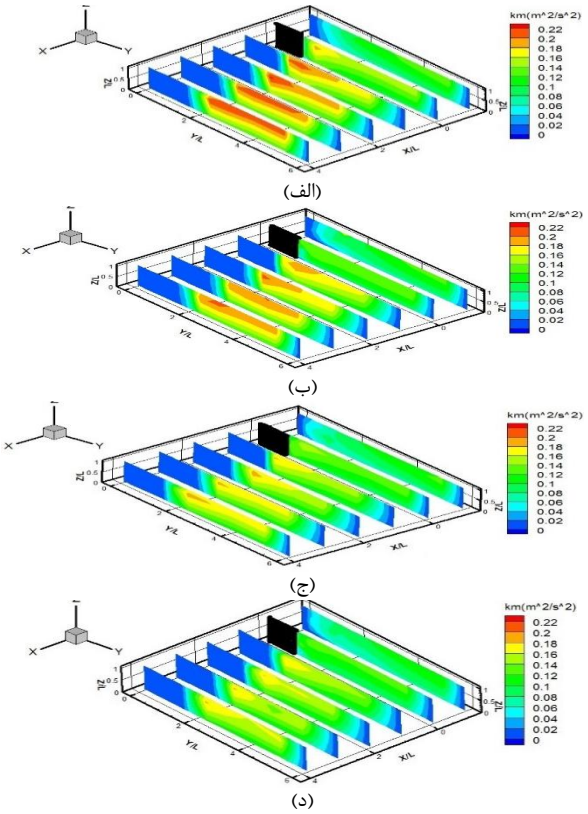


شکل ۱۱- نمودار اندازه حداکثر سرعت عرضی نسبت به سرعت متوسط جریان بر اساس درصد تخلخل

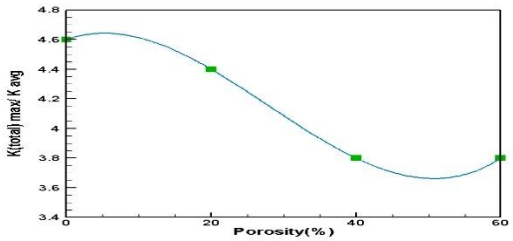
۳-۱-۳- توزیع انرژی جنبشی در اطراف آبشکن‌ها

انرژی جنبشی از فرمول $k=\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)$ محاسبه شده است. شکل (۱۲) کانتورهای توزیع انرژی جنبشی اطراف آبشکن‌ها را نشان می‌دهد. شباهت زیاد توزیع انرژی جنبشی به توزیع سرعت طولی (شکل (۶)) ناشی از تأثیرپذیری زیاد انرژی جنبشی از سرعت طولی است. نتایج نشان داد که انرژی جنبشی در مقاطع عرضی، با افزایش فاصله از آبشکن، دارای اندازه‌های بزرگ‌تر می‌شود و این مقادیر به‌سمت دیواره مقابل متمایل می‌شود. از مقایسه انرژی جنبشی در عمق‌های مختلف نیز دریافت شد که انرژی جنبشی نیز مانند سرعت طولی با افزایش ارتفاع از کف کانال دارای اندازه‌های بزرگ‌تر و همچنین دارای وسعت بیشتری می‌شود و ماکزیمم انرژی جنبشی در عمق‌های میانی، جایی که ناحیه پر سرعت تشکیل می‌شود ایجاد می‌شود.

همچنین مقایسه کانتورهای انرژی جنبشی و سرعت عرضی (شکل (۹)) نتایج نشان داد که سرعت‌های عرضی در اطراف دماغه آبشکن در بالادست آبشکن، جایی که دارای بیشینه مقدار خود می‌باشند، در افزایش انرژی جنبشی اثرگذاری زیادی دارند و چون این سرعت‌های عرضی و محدوده‌های دارای مقادیر بیشینه این سرعت‌ها با افزایش ارتفاع از کف کانال، کاهش می‌یابد پس در نتیجه تأثیرگذاری این سرعت‌های عرضی بیشینه با افزایش ارتفاع از کف کانال رفته‌رفته کم‌تر می‌شود. علاوه بر این، سرعت‌های عرضی جز در سمت دماغه که مؤلفه عرضی سرعت دارای مقادیر نسبتاً بزرگی است، در دیگر نقاط کانال و همچنین سرعت قائم به علت این‌که دارای اندازه‌های کوچک هستند، تأثیرگذاری قابل‌توجهی بر انرژی جنبشی ندارند. بیشینه انرژی جنبشی برای آبشکن با درصد تخلخل ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب ۰/۲۳، ۰/۱۹ و ۰/۱۹ مترمربع بر مجذور ثانیه است. که به‌ترتیب حدود ۴/۶، ۴/۴، ۳/۸ و ۳/۸ برابر انرژی جنبشی متوسط جریان است. بنابراین، با افزایش درصد تخلخل، انرژی جنبشی بیشینه کاهش می‌یابد (شکل (۱۳)).



شکل ۱۲- توزیع انرژی جنبشی آبشکن‌ها با درصد تخلخل‌های مختلف: الف) ۰٪، ب) ۲۰٪، ج) ۴۰٪، د) ۶۰٪

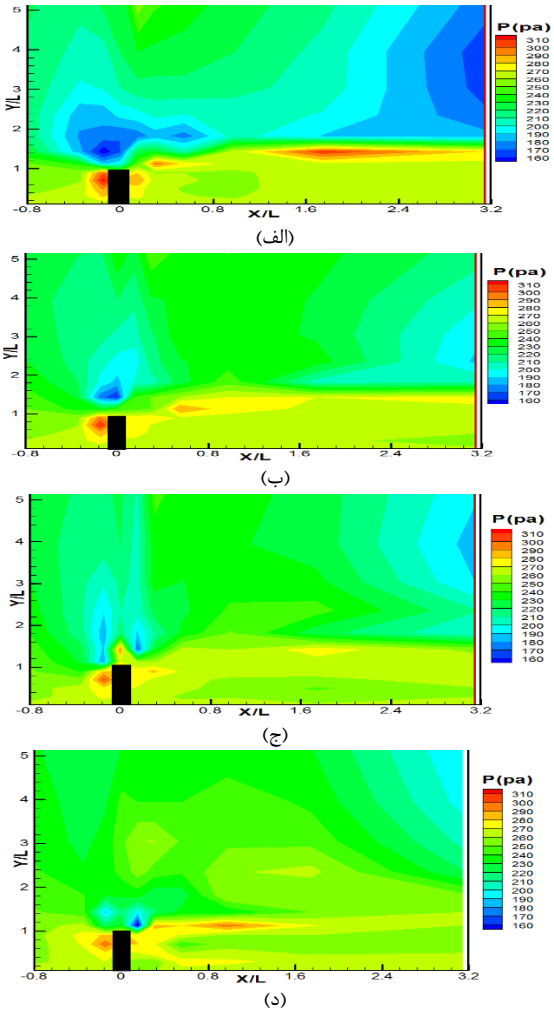


شکل ۱۳- نمودار نسبت اندازه حداکثر انرژی جنبشی به انرژی جنبشی متوسط جریان بر اساس درصد تخلخل

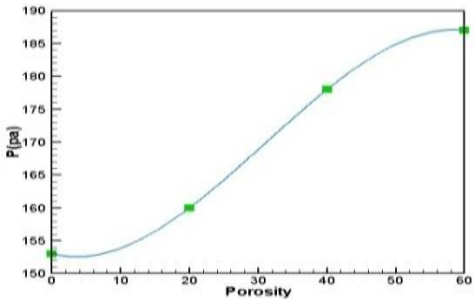
۳-۲- نتایج عددی

۳-۲-۱- مقایسه کانتورهای فشار برای آبشکن‌ها

جهت خلاصه کردن مباحث و ازآن‌جا که طرح توان پیرو مبادرت به ارائه حل با دقت زیاد می‌کند و مفید بودن این طرح در محاسبات جریان‌های واقعی ثابت شده است، بنابراین، روش توان پیرو به عنوان روش اصلی جهت بررسی توزیع فشار انتخاب شد.



شکل ۱۴- کانتور فشار اطراف آبشکن‌ها با تخلخل‌های مختلف در تراز ۸/۳ سانتی‌متری: الف) ۰٪، ب) ۲۰٪، ج) ۴۰٪، د) ۶۰٪



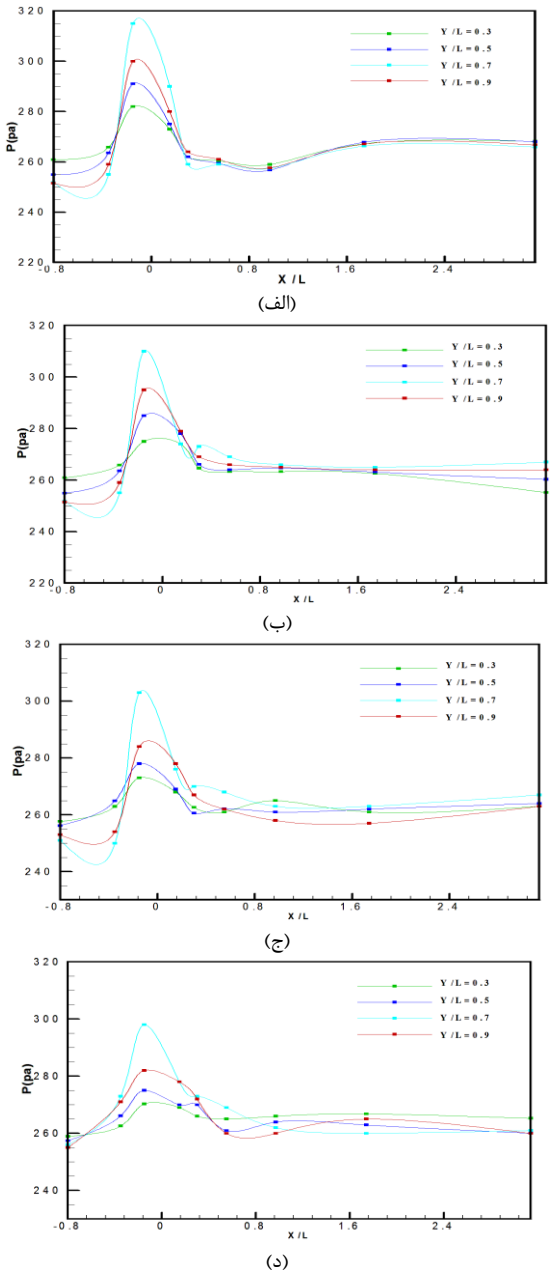
شکل ۱۵- نمودار فشار حداقل بر اساس درصد تخلخل

از مقایسه کانتورهای سرعت طولی شکل (۷) و فشار شکل (۱۴)، برای آبشکن‌ها در تراز ۸/۳ سانتی‌متری از کف، برای تخلخل‌های مختلف مشاهده می‌شود، همچنین در جاهایی که سرعت‌های طولی دارای مقادیر کم‌تری هستند، مانند نواحی پایین‌دست دیواره‌ای که آبشکن بر آن نصب شده است، مقادیر فشار بیشتر می‌باشد و در جاهایی که سرعت‌های طولی به بیشترین مقدار خود می‌رسد مقادیر حداقل فشار اتفاق می‌افتد.

همچنین با مقایسه کانتور سرعت‌های عرضی شکل (۱۰) با شکل (۱۴) نتایج نشان داد که در اطراف دماغه آبشکن در بالادست آبشکن، جایی که سرعت عرضی دارای بیشینه مقدار خود می‌باشد، فشار دارای مقادیر حداقل است و سرعت‌های عرضی جز در سمت دماغه آبشکن، در دیگر نقاط کانال، تأثیرگذاری کم‌تری بر توزیع فشار دارند. بنابراین، تغییرات مؤلفه سرعت طولی و سرعت‌های عرضی اطراف دماغه، عامل اصلی تغییرات فشار می‌باشند. با توجه به شکل (۱۵)، مشاهده می‌شود مقادیر فشار حداقل برخلاف مقادیر سرعت طولی بیشینه برای آبشکن‌ها، با افزایش درصد تخلخل افزایش می‌یابد.

۳-۲-۲- مقایسه نمودارهای فشار برای آبشکن‌ها

در شکل (۱۶)، نمودار تغییرات فشار (توان- پیرو) در امتداد جریان، برای آبشکن‌ها با تخلخل‌های مختلف در فواصل متفاوت از دیواره‌ای که آبشکن بر روی آن نصب گردیده، در تراز ۸/۳ سانتی‌متری از کف نشان داده شده است. نتایج نشان داد، برای تمامی آبشکن‌ها در بالادست آبشکن، فشار از مقادیر کم شروع شده و با نزدیک شدن به آبشکن مقدار فشار افزایش می‌یابد و در محل برخورد جریان به آبشکن، به حداکثر مقدار خود می‌رسد. به‌عبارت‌دیگر، تغییرات فشار در جلوی آبشکن نسبت به امتداد جریان روند افزایشی دارد. بعد از برخورد جریان به آبشکن و عبور از آن بلافاصله بعد از آبشکن مقدار فشار از فشار حداکثر درجلوی آبشکن کم‌تر می‌شود و در پایین‌دست آبشکن تغییرات فشار نسبت به امتداد جریان روند کاهشی دارد ولی فشار دوباره از مقادیر حداقل شروع به افزایش می‌کند.



شکل ۱۶- نمودار تغییرات فشار در اطراف آبشکن‌های مختلف در تراز ۸/۳ سانتی‌متری: الف) ۰٪، ب) ۲۰٪، ج) ۴۰٪، د) ۶۰٪

همچنین مشاهده شد، اندازه حداکثر فشار در جلوی آبشکن با دور شدن از دیواره‌ی کانال تا $\frac{Y}{L} = 0.7$ افزایش می‌یابد و بعد از آن تا $\frac{Y}{L} = 0.9$ مقداری کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که حداقل فشار در $\frac{Y}{L} = 0.7$ نسبت به $\frac{Y}{L} = 0.9$ کم‌تر است و نیز افت فشار بین پشت و جلوی آبشکن در $\frac{Y}{L} = 0.7$ نسبت به $\frac{Y}{L} = 0.9$ بیشتر است. در این نمودارها Y فاصله از دیواره کانال که آبشکن بر آن نصب شده و L طول آبشکن می‌باشد. نمودارها نشان می‌دهند که حداکثر فشار در جلوی آبشکن همچنین افت فشار بین بالادست و پایین‌دست آن نیز، با افزایش درصد تخلخل، کاهش می‌یابند.

۳-۲-۳- نیروی پسا وارد بر آبشکن‌ها

شیب فشار مطلوب، شیبی است که به‌موجب آن فشار در جهت جریان کاهش می‌یابد و با کاهش سرعت ذرات در لایه مرزی مقابله می‌کند. در این حالت، $\partial p/\partial x < 0$ و هنگامی روی می‌دهد که سرعت جریان آزاد U برحسب x افزایش می‌یابد. شیب فشار معکوس، شیبی است که به‌موجب آن فشار در جهت جریان افزایش می‌یابد و در کاهش سرعت سیال سهم دارد. در این حالت، $\partial p/\partial x > 0$ و هنگامی روی می‌دهد که U برحسب x کاهش می‌یابد. اگر شیب فشار معکوس خیلی شدید باشد، جدایش جریان و ناحیه دنباله ایجاد می‌شود. این پدیده را جدایی جریان می‌گویند. البته، نمی‌توان گفت در جریان با شیب فشار معکوس، همواره جدایی جریان و ناحیه دنباله وجود دارد؛ بلکه، شیب فشار معکوس برای وجود پدیده جدایی فقط یک شرط لازم است. برای اجسام لبه تیز بلافاصله بعد از برخورد جریان به مانع جدایش جریان اتفاق می‌افتد (Fox و همکاران، ۲۰۰۴). نیروی پسا دو مؤلفه دارد؛ نیروی پسای شکل و نیروی پسای اصطکاک پوسته‌ای یا نیروی پسای لزجتی. جدایش و جریان برگشتی که دو پدیده همراه هستند، تأثیر عمیقی بر نیروی کشش ناشی از شکل دارند. در جریان روی یک صفحه تخت عمود بر جریان مانند آبشکن‌ها، تنش برشی جداری در امتداد عمود بر جریان است، در این حالت نیروی پسای اصطکاکی برابر با صفر می‌باشد. بنابراین، نیروی پسا وارد بر موانع از نوع پسا فشاری یا پسا شکلی می‌باشد. نیروی پسا در این حالت با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود:

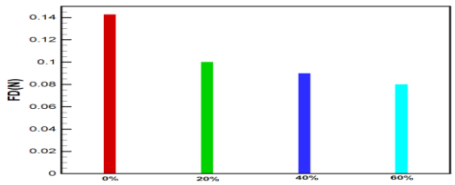
$$F_D = \int p.dA_{\text{سطح}} \qquad (۵)$$

که F_D نیروی درگ و p فشار و dA مساحت هر یک از المان‌های روی سطح جسم می‌باشد. برای این شکل هندسی، جریان از لبه‌های صفحه جدا می‌شود و جریان برگشتی در ناحیه دنباله جریان وجود دارد. برای تعیین نیروی پسا باید به آزمایش متوسل شد. رابطه بالا بیان می‌کند که با انتگرال‌گیری از توزیع فشار وارد بر کل سطح جسم، نیروی پسای فشاری به دست می‌آید. با توجه به معادله (۵) با انتگرال‌گیری از توزیع فشار وارد بر سطح آبشکن‌ها در ۰/۵ سانتی‌متری قبل و بعد از آبشکن نیروی پسا وارد بر آبشکن‌ها محاسبه شده است. بر طبق جدول (۲)، تفاوت نیرو پسا وارد بر سازه‌ها از روش‌های اختلاف بالادست مرتبه اول، اختلاف پیوند و توان پیرو بسیار ناچیز است. اما روش اختلاف بالادست مرتبه دوم یا طرح کوئیک دارای تفاوت بیشتری است. به این صورت که نیروی پسا محاسبه شده با روش کوئیک، دارای اندازه کم‌تری می‌باشد.

جدول ۲- نیروی پسا وارد بر آبشکن‌ها بر حسب نیوتن

درصد تخلخل	اختلاف بالادست	اختلاف پیوندی	توان-پیرو	کوئیک
٪۰	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۲
٪۲۰	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱	۰/۰۹۷
٪۴۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۸۶
٪۶۰	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۶

شکل (۱۷) نمودار میله‌ای نیروی پسا وارد بر آبشکن‌ها با درصد تخلخل متفاوت با استفاده از روش توان- پیرو می‌باشد. با توجه به نمودار، مشاهده می‌شود، با افزایش تخلخل از ۰ تا ۶۰ درصد، به دلیل جدایش جریان و جریان‌های بازگشتی کم‌تر، نیروی پسا وارد بر آبشکن متخلخل کاهش می‌یابد. همچنین روند کاهش نیروی درگ در تخلخل‌های بیشتر کندتر است.



شکل ۱۷- نمودار میله‌ای نیروی پسا وارد بر آبشکن‌ها

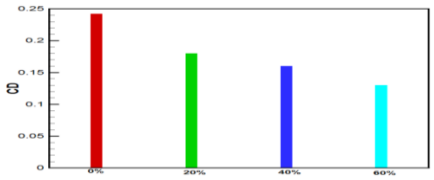
۳-۲-۴- ضریب پسای آبشکن‌ها با تخلخل‌های مختلف

مقدار ضریب پسا شکلی به‌صورت مقدار نیروی پساشکلی تقسیم بر $\left(\frac{1}{2}\rho V^2 A\right)$ که A سطح تصویر جسم است، تعریف می‌شود. در جدول (۳)، ضریب پسا برای آبشکن‌ها با استفاده از طرح‌های مختلف گسسته‌سازی حاصل گردیده، ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول نیز مشاهده می‌شود. اختلاف این ضریب در بین روش‌های مختلف توان پیرو، اختلاف بالادست مرتبه اول و روش اختلاف پیوند بسیار ناچیز است اما روش اختلاف بالادست مرتبه دوم یا طرح کوئیک دارای تفاوت بیشتری نسبت به سایر روش‌هاست. به این صورت که ضریب پسا محاسبه‌شده با روش کوئیک اندازه کوچک‌تری دارد.

جدول ۳- ضریب پسا برای آبشکن‌ها با درصد تخلخل متفاوت

درصد تخلخل	اختلاف بالادست	اختلاف پیوندی	توان- پیرو	کوئیک هیاز
٪۰	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۰
٪۲۰	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۱۷	۰/۱۶
٪۴۰	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۴
٪۶۰	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱

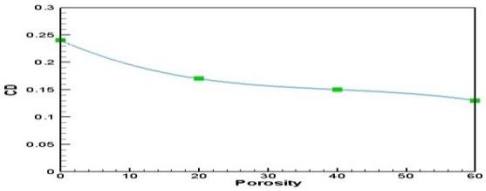
در شکل (۱۸) نمودار میله‌ای ضریب پسا برای آبشکن‌ها با درصد تخلخل متفاوت با استفاده از روش توان- پیرو رسم شده است. به علت گرادیان فشار معکوس و افت فشار شدیدتر، مشاهده می‌شود که ضریب پسا برای آبشکن، با افزایش تخلخل از ۰ تا ۶۰ درصد، کاهش می‌یابد. زیرا که در آبشکن توری‌سنگی، با افزایش درصد تخلخل به‌دلیل عبور جریان آب از آبشکن، در بالادست فشار کم‌تری ایجاد می‌شود پس افت فشار کم‌تری بین بالادست و پایین‌دست رخ می‌دهد. درنتیجه، جدایش جریان و جریان‌های بازگشتی کم‌تری ایجاد می‌شود و اختلال کم‌تری در الگوی جریان ایجاد می‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، با افزایش تخلخل، از میزان اختلاط جریان کاسته می‌شود و ضریب پسا کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸- نمودار میله‌ای ضریب پسا آبشکن‌ها

۳-۲-۵- رابطه بین ضریب پسا با درصد تخلخل موانع

با توجه به نتایج حاصله تغییرات ضریب پسا برحسب مقدار تخلخل برحسب درصد برای آبشکن‌ها در شکل (۱۹) ترسیم شده است. همان‌گونه که می‌شود رابطه بین ضریب پسا با مقدار تخلخل برحسب درصد با برازش یک منحنی درجه سوم به‌دست آمد.



شکل ۱۹- تغییرات ضریب پسا برحسب درصد تخلخل

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برآورد نیروی پسای وارد بر آبشکن‌ها برای تخلخل‌های متفاوت با استفاده از ترکیب نتایج آزمایشگاهی میدان جریان و تعیین میدان فشار از طریق گسسته‌سازی معادلات ناویر استوکس موردمطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از برداشت داده‌های آزمایشگاهی نشان داد، با افزایش درصد تخلخل در آبشکن‌ها، جریان‌های بازگشتی کم‌تر و همچنین ناحیه پرسرعت میانی با اندازه کوچک‌تر ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده شد نسبت بیشینه سرعت طولی به‌سرعت متوسط جریان و بیشینه سرعت عرضی به سرعت متوسط جریان، با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. شباهت زیاد توزیع انرژی جنبشی و توزیع برآیند سرعت به توزیع سرعت طولی، ناشی از تأثیرپذیری انرژی جنبشی و برآیند سرعت

از سرعت طولی است. همچنین نتایج نشان داد، اطراف دماغه آبشکن در بالادست آبشکن، جایی که سرعت عرضی دارای بیشینه مقدار خود می‌باشد، این سرعت‌های عرضی در افزایش انرژی جنبشی و توزیع برآیند سرعت اثرگذارند. علاوه براین مشاهده شد، بیشینه برآیند سرعت و بیشینه انرژی جنبشی، با افزایش درصد تخلخل کاهش می‌یابد. مقایسه کانتورهای فشار با کانتورهای سرعت‌های طولی و عرضی نشان داد که، تغییرات مؤلفه سرعت طولی و سرعت‌های عرضی اطراف دماغه، عامل مؤثر در تغییرات فشار می‌باشند. همچنین مقادیر فشار حداقل برخلاف مقادیر سرعت طولی بیشینه برای آبشکن‌ها، با افزایش درصد تخلخل افزایش می‌یابد. مقادیر فشار حداکثر و همچنین افت فشار بین بالادست و پایین‌دست، نیز همانند سرعت طولی بیشینه برای آبشکن‌ها، با افزایش درصد تخلخل کاهش می‌یابد. درنهایت، نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی و عددی نشان داد که روش گسسته-سازی برای محاسبه فشار و ضریب درگ مؤثر بوده و نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. در نهایت، نتایج حاصله نشان می‌دهد که، با افزایش تخلخل در آبشکن‌ها، نیرو و ضریب پسا برای آبشکن‌ها کاهش می‌یابد و رابطه ضریب پسا با درصد تخلخل آبشکن با برازش منحنی درجه سوم ارائه شد.

۵- مراجع

آرمان ع، ظهیری ج، فتاحی پ، قنبری س، "مقایسه و شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس ۹۰درجه ملایم با استفاده از دل‌های CCHE2D و SRH-2D"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶، ۴۷ (۱)، ۱۱-۱۹.

فتاحی پ، آرمان ع، ظهیری ج، "مطالعه عددی تأثیر نفوذپذیری آبشکن‌ها بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس۹۰ درجه ملایم"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۷، ۸۴ (۳)، ۴۱-۴۹.

Azinfar H, Kells AJ, "Flow resistance due to a single spur dike in an open channel", Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (6), 755-763.

Azinfar H, Kells AJ, "Drag force and associated backwater effect due to an open channel spur dike filed", Journal of Hydraulic Research, 2011, 49 (2), 248-256.

Duan JG, Nanda S K, "Two-dimensional depth-averaged model simulation of suspended sediment concentration distribution in a groyne field", Journal of Hydrology, 2006, 327 (3), 426-437.

Fox RW, McDonald AT, "Intruduction to Fluid mechanics", John Wiley and Sons, Inc., 2011, 8th Ed.

Han X, Lin P, "3D Numerical Study of the Flow Properties in aDouble-Spur Dikes Field during a Flood Process", Journal Water, 2018, 10, 1574.

Lee JT, Chan HC, Huang CK, Wang YM, Huang WC, "A depth-averaged two-dimensional model for flow around permeable pile groins", International Journal of the Physical Sciences,2011, 6 (6), 1379-1387.

Li G, Lang L, Ning J, "3D Numerical Simulation of Flow and Local Scour around a Spur Dike", In IAHR World Congress, 2013.

Qi ZX, Eames I, Johnson ER, "Force acting on a square cylinder fixed in a free-surface channel flow", Journal of Fluid Mech, 2014, 756,716-727.

Streeter VL, Bedford K, Wylie EB, "Fluid Mechanics", McGraw-Hill Book Co, 1998, 9th Ed.

Uijttewaal, W SJ, "Effect of groyne layout on the flow in groyne fields: laboratory experiments", Journal of Hydraulics Engineering, 2005, 13 (9), 782-791.

Versteeg HK, Malalasekera W, "An introduction to computational fluid Dynamics the finite volum method", Longman Scientific and technical, 1995.

Yagmur S, Dogan S, Aksoy MH, Canli E, Ozgoren M, "Experimental and numerical investigation of flow stractures around cylindrical bluff bodies", EPJ web conferences 2015.

University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 51 (2021), Issue 3 (Autumn), 159-169

EXTENDED ABSTRACT

Estimation of the Drag Coefficient of Gabion Groin with Different Porosities Using a Measurement of Experimental Flow Field and Solution of Navier- Stokes Equations

Mahshid Goudarzi [a], Majid Fazli [b,*]

[a] *Graduated of Hydraulic Structure Engineering, Faculty of Engineering, Buali Sina University*
[b] *Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Buali Sina University*

Received: 11 July 2019; **Accepted:** 17 February 2021

Keywords:
Gabion groin, Porosity of percentage, Time averaged Navier- Stokes equations, Pressure distribution, Drag force, Drag coefficient.

1. Introduction

Rivers affected by natural factors or human interventions are involved in Corrosion of bed and sides. One of the common methods in controlling and protecting riversides is the use of groin. Gabion groynes are a kind of spur dike. On the basis of hydrodynamic the contrast between gabion groin of river and the environmental fluid are complex and computing of the affected force on them are so important. If a real fluid, with a constant velocity, passes around a groine, there is a drag force due to fluid viscosity. Lee et al (2011) used the time average of Navier-Stokes equations and *k-ε* turbulent model to predict the flow around permeable pile groins to develop a 2-D numerical model. Their results indicated that the direction of the approaching flow is diverted by increasing the flow rate, which is an advantage to protect the river banks Duan and Nanda (2006) simulated the distribution of suspended sediment concentrations around a spur dike using a two-dimensional depth averaged hydrodynamic model and solution of two-dimensional Navier-Stokes equations. Azinfar and Kells (2009) studied the flow around a single spure dike with different sizes using measurement flow and depth and using momentum equation. They resultes that an increase in the blockage due to the spur dike plate is the main parameter responsible for an increase in the spur dike drag coefficient, hence the associated flow resistance. The effect of porosity percentage of these porous groines in channels and rivers is not carefully investigated on how the pressure and drag force on these groin is distributed. Therefore, the necessity of studies in this field is observed.

2. Methodology

The experiment is conducted at the Hydraulic Laboratory of Bu-Ali Sina University. The laboratory channel consists of a concrete flume with a length of 15 meters, a height and width of 0.6 meters. The walls and the floor of the channel are made of transparent glass with a thickness of 10 mm. Impermeable groin is made of Plexiglas and porous groines with a porosity percentage of 20, 40 and 60% are gabion. The height, length and width of the groin are 60, 10 and 2cm, respectively**.** In this research, the discharge of flow, the mean velocity of approaching of flow, the flow depth, the froud number and the reynolds number were 0.025 ($\frac{m^3}{s}$), 0.33($\frac{m}{s}$), 12.5(cm), 0.3 and 29000, respectively. ADV was used to measure three- dimensional velocities and the components of Reynolds stresses. This research Combined Experimental method and numerical solution, so the grid in this research is 3D nonuniform backward staggered grid. In this research, after obtaining the velocity field around the groin, regarding the Reynolds stresses, the time averaged

* Corresponding Author
E-mail addresses: m.goudarzi94@basu.ac.ir (Mahshid Goudarzi), mfazli@basu.ac.ir (Majid Fazli).

Navier- Stokes equations (Reynolds equations) are solved for the turbulent flow using FVM method. The main step in the finite volume method is to discretize and integrate the governing equations on a control volume to achieve a discrete equation at the P node point. The mean time equation for the φ scalar is as follows:

$$\frac{\partial(\phi)}{\partial t} + div(\phi u) = div\left(\Gamma_{\phi}^{*} grad\phi\right) + \left[-\frac{\partial\overline{u\varphi}}{\partial x} - \frac{\partial\overline{v\varphi}}{\partial y} - \frac{\partial\overline{w\varphi}}{\partial z}\right] + S_{\phi} \quad (1)$$

In order to solve the discretized equations, the upwind differencing scheme, the hybrid differencing scheme, power law scheme and Quick scheme (modified by hayas) has been used. Then, using the relation between velocity and pressure, a computational code was prepared for calculating the pressure field based on the experimental velocity field. So the Drag force affected on groin and Drag coefficient would be determined.

3. Results and discussion

3.1. The Drag Force on the Side and Middle Obstacles of the Channel with Different Porosities

In Fig. 1, the bar graph of the drag force applied to the gabion groines with different porosity percentage is drawn using the power law scheme. According to the diagrams, the drag force applied to the gabion groines decreases by increasing porosity from 0 to 60 percent. In gabion groines, with increasing porosity, due to the flow of water through the groin, a lower pressure is formed at the upstream and a lower pressure gradient occurs between the upstream and downstream. As a result, less flow separation and back flow are created, and fewer turbulence occur in the flow pattern.

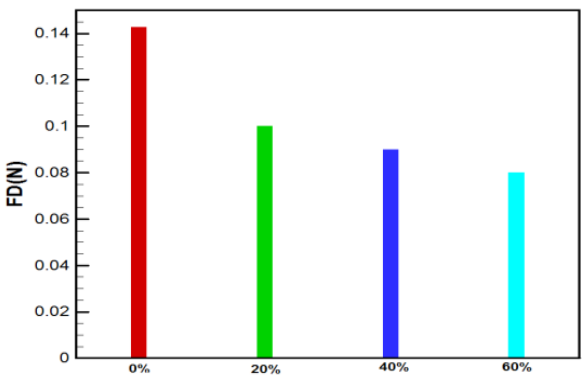


Fig. 1. Bar graph of the drag force applied to the gabion groines with different porosity percentage

3.2. Drag Coefficient of Side and Middle Obstacles of the channel with Different Porosity

In Fig. 2, the bar graph of the drag coefficient of gabion groines with different porosity percentage is drawn using the power law scheme. With increasing porosity, due to the adverse pressure gradient and lower pressure gradient, the flow mix rate is reduced and consequently the drag coefficient decreases as well.

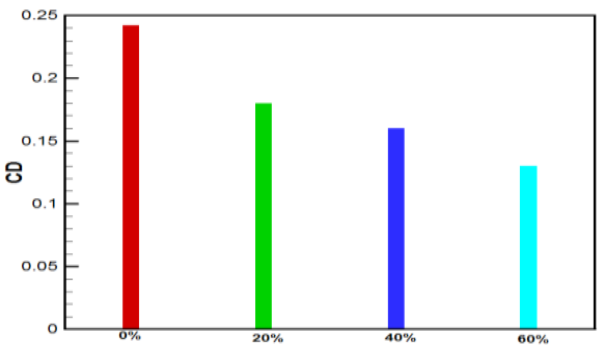


Fig. 2. The bar graph of the drag coefficient of gabion groines with different porosity percentage

3.3. Relationship between drag coefficient and obstacle porosity percentage

According to the results, changes in the drag coefficient in terms of porosity percentage are plotted for side obstacles in Fig. 3. As it can be seen in this figure, the relation between the drag coefficient and the porosity percentage follows the third degree curve relationship by a good approximation.

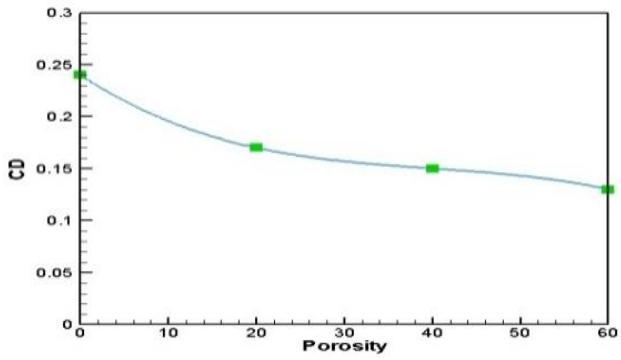


Fig. 3. Variation of drag coefficient with porosity percentage for side obstacles using power law scheme

4. Conclusions

The results show that, the drag force applied to the gabion groins and drag coefficient of gabion groines decreases by increasing porosity percentage. Additionally, if the drag coefficient is calculated, the relationship between this coefficient and the porosity percentage of the side obstacles is the third degree curve.

5. References

Azinfar H, Kells AJ, “Flow resistance due to a single spur dike in an open channel”, Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (6), 755-763.

Duan JG, Nanda SK, “Two-dimensional depth-averaged model simulation of suspended sediment concentration distribution in a groyne field”, Journal of Hydrology, 2006, 327, (3), 426-437.

Lee JT, Chan HC, Huang CK, Wang YM, Huang WC, “A depth-averaged two-dimensional model for flow around permeable pile groins”, International Journal of the Physical Sciences, 2011, 6 (6), 1379-1387.