

مقایسه ضریب تخلیه دبی آبگیرهای کفی مشبک با میله‌های متقاطع در دو حالت جریان رسوبدار و بدون رسوب

کیوان بینا^{۱*}، محمود فغفور مغربی^۲ و جلیلی ابریشمی^۳

*^۱- نویسنده مسئول، استادیار گروه عمران موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی، غیردولتی خاوران مشهد

^۲- استاد گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

^۳- دانشیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۲۰

چکیده

آبگیرهای کفی سازه‌های فلزی مشبکی هستند که جهت انحراف آب در بستر رودخانه‌های کوهستانی دارای شیب تند و بار بستر درشت دانه، نصب می‌شوند. یکی از اشکال آبگیرهای کفی که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته، آبگیر کفی ساخته شده از شبکه متقاطع میله‌های طولی و عرضی است که انتظار می‌رود به لحاظ سازه‌ای نسبت به سایر انواع کفهای مشبک، عملکرد بهتری در مقابل نیروهای وارده داشته باشد. در این پژوهش کفهای مشبک ساخته شده از میله‌های طولی و عرضی متقاطع با درصد بازشدگی‌های مختلف در کانالی با شیب‌های متفاوت نصب گردید و با عبور دادن دبی‌های مختلف آب زلال و جریان رسوبدار (بار بستر)، ضریب تخلیه این نوع کف مشبک در هر دو حالت جریان و تحت تاثیر پارامترهای مختلف هیدرولیکی و هندسی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی مناسبترین روابط خطی و غیرخطی بر داده‌های حاصل از آزمایش برازش داده شد و در نهایت روابط برازشی بدست آمده برای ضریب تخلیه این نوع کف مشبک در دو حالت جریان رسوبدار و بدون رسوب با یکدیگر بصورت کمی مقایسه گردید.

واژه‌های کلیدی: آبگیر کفی، ضریب تخلیه، آنالیز ابعادی، برازش، جریان متغیر مکانی با دبی کاهشی.

مقدمه

رودخانه‌ها می‌توان به عدم تغییر در توپوگرافی کف رودخانه به دلیل جلوگیری از تجمع رسوبات در مقابل سازه آبگیر، امکان آبیگری در تمام فصول سال، پایداری در مقابل نیروهای دینامیکی ناشی از زلزله به دلیل قرار گرفتن در خاک و مقرون به صرفه بودن آنها، اشاره نمود. در کنار مزایای فوق، به کارگیری کف‌های مشبک در آبیگری از رودخانه‌ها با مشکلات و دشواری‌هایی نیز همراه است که از آن جمله می‌توان به گرفتگی شبکه فلزی به دلیل تجمع رسوبات و یا یخ زدگی اشاره نمود.

اولین تعریف هیدرولیکی از آبگیرهای کفی توسط اورث و همکاران^۲ ارائه گردید. آنها آزمایش‌هایی بر روی مدل فیزیکی کف مشبک در کانالی با شیب ۲۰ درصد و پنج مقطع با اشکال هندسی متفاوت از میله‌های عرضی انجام دادند (۱۳). بر اساس تحقیقات ایشان مشخص گردید کمترین طول آبگیر با استفاده از میله‌هایی با مقطع تخم مرغی به دست آمده و کمترین دبی در هنگام به کارگیری مقاطع T شکل برای میله‌ها به دست می‌آید. در این تحقیق شیب کف، تنها تاثیر کمی در جلوگیری از مسدود شدن آبگیر داشته است. متعاقباً کونتزمان و بووارد^۳ در سال ۱۹۵۴ اولین

کف مشبک یا آبگیر کفی سازه‌ای است فلزی که از پروفیل‌های فولادی با مقاطع مختلف ساخته شده و در بستر رودخانه‌های کوهستانی نصب می‌گردد تا علاوه بر وظیفه هدایت آب به داخل کانال جمع آوری، مانع ورود آشغال‌ها، مواد زاید معلق و رسوبات به داخل کانال گردد.

امروزه کف‌های مشبک به عنوان یکی از اجزای مهم پروژه‌های برقایی کوچک شناخته می‌شوند که وظیفه آبیگری از رودخانه‌های کوهستانی و انتقال آن به منظور به حرکت در آوردن توربینهای نیروگاه را بر عهده دارند (شکل ۱). نیروگاه‌های برقایی کوچک در کنار رودخانه‌های کوهستانی با شیب زیاد ساخته می‌شوند. در اینگونه رودخانه‌ها آبگیرهای جانبی و جلویی جوابگو نیستند، چرا که به علت شیب زیاد رودخانه و وجود رسوبات درشت دانه، پایداری آنها به شدت در معرض خطر خواهد بود. در این رودخانه‌ها نقاط شکست^۱، محل‌های تغییر شیب و یا پایین افتادگی‌های ناگهانی بستر، محل‌های مناسبی برای نصب سازه‌های کف مشبک با شیب مناسب هستند. از دیگر مزایای احداث کفهای مشبک در مقایسه با سایر روش‌های آبیگری از

2. Orth
3. Kuntzmann

1. Knick Points



شکل ۱- آگیری از کف برای یک نیروگاه برقایی کوچک در یک رودخانه کو هستانی (۱)

جدول ۱- پروفیل‌های شکل گرفته بر روی کف مشبک بر اساس تحقیقات سوبرامانیا و شوکلا (۵)

نوع پروفیل	جریان در بالادست	جریان بر روی آبگیر	جریان در پایین دست
A1	زیر بحرانی	فوق بحرانی	پرش هیدرولیکی
A2	زیر بحرانی	در قسمتی فوق بحرانی	زیر بحرانی
A3	زیر بحرانی	زیر بحرانی	زیر بحرانی
B1	فوق بحرانی	فوق بحرانی	پرش هیدرولیکی
B2	فوق بحرانی	در قسمتی فوق بحرانی	زیر بحرانی

هیدرولیک جریان در آبگیرهای کفی

با توجه به نحوه قرارگیری کف مشبک، زمانی که جریان آب از روی آن می‌گذرد مقداری و یا تمامی دبی جریان در طول کف مشبک کاهش می‌یابد. با فرض شرایط پایدار برای جریان عبوری، می‌توان گفت که یک جریان ماندگار متغیر مکانی با کاهش دبی بر هیدرولیک آبگیر کفی حاکم است. تغییرات دبی و متعاقباً سطح آب در محل آبگیر، تابعی از شیب طولی آبگیر، طول آبگیر، دبی جریان و همچنین دبی منحرف شده است. معادله کلی حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی به صورت زیر است (۱):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - (\alpha Q / gA^2)(dQ/dx)}{1 - (\alpha Q^2 B / gA^3)} \quad (1)$$

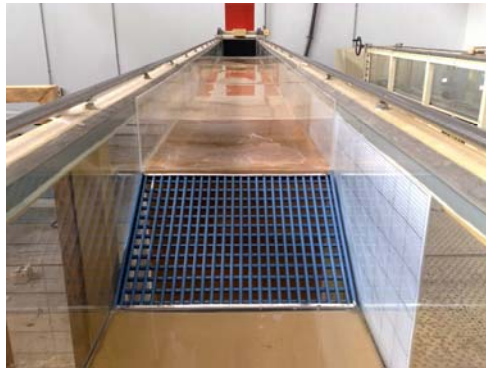
در این رابطه، y عمق جریان در طول کف مشبک، S_0 شیب طولی کف مشبک، S_f شیب خط انرژی در طول کف مشبک، Q دبی جریان عبوری، B عرض کف مشبک، A سطح مقطع جریان در طول کف مشبک، g شتاب ثقل و α ضریب تصحیح سرعت در معادله انرژی می‌باشد. همچنین عبارت dQ/dx میزان کاهش دبی در طول کف مشبک است که به شکل زیر و بر اساس رابطه دبی خروجی از روزنه به دست می‌آید:

$$-\frac{dQ}{dx} = C_d \cdot \epsilon \cdot B \cdot \sqrt{2gE} \quad (2)$$

روش محاسباتی را برای بدست آوردن پروفیل سطح آزاد آب بر روی کف مشبک با فرض انرژی مخصوص ثابت و معادلات معمول اریفیس ارایه نمودند (۱۴). درابیر^۱ با استفاده از مدلی با ابعاد واقعی، تحقیقاتی بر روی آبگیر کفی انجام داد. وی در این تحقیق شیب بهینه برای کف مشبک را بین ۲۰ و ۳۰ درصد به دست آورد (۱۵). سوبرامانیا و شوکلا^۲ نیز تحقیقات وسیعی در خصوص دسته بندی انواع جریان‌های شکل گرفته بر روی کف مشبک انجام دادند که نتایج آن در جدول (۱) آمده است (۱۶).

پس از تقسیم بندی جریان بر روی کف مشبک، تحقیقات وسیعی بر روی کف‌های مشبک انجام گرفت. کف‌های مشبک مورد مطالعه عمدتاً از میله‌های با مقطع دایره‌ای ساخته شده و در کانال‌های مستطیلی مورد آزمایش قرار گرفتند. یکی از گسترده ترین تحقیقات انجام شده اخیر در خصوص رفتار آبگیرهای کفی، توسط برونلا و همکاران^۳ (۱۷) در انجام گرفت. ایشان تحقیقاتی را با استفاده از کانال مستطیلی بر روی کف‌های مشبک انجام دادند که در نهایت به رسم پروفیل سرعت، استخراج معادله‌ای دیفرانسیلی برای تعیین پروفیل سطح آب، تخمین معادله ای برای تعیین میزان انحراف آب و روابطی برای جلوگیری از پس زدگی جریان در کانال آبگیر منجر شد.

1. Drobir
2. Subramanya and Shoukla
3. Brunella et al



شکل ۲- نمایی از پایین دست کف مشبک



شکل ۳- کانال دوطبقه اندازه گیری جریان

مشبک ساخته شده از میله‌های عرضی (عمود بر امتداد جریان) هستند (۲-۴). بر این اساس اکثر کف‌های مشبک نصب شده در رودخانه‌ها از نوع میله‌های طولی می‌باشند. اما زمانی که طول مورد نیاز کف مشبک برای انحراف مقدار مشخصی از جریان نسبتاً زیاد باشد، به دلیل عدم وجود مهاربندی جانبی، امکان ارتعاش و تغییر شکل میله‌های تشکیل دهنده کف مشبک وجود دارد. این نکته خصوصاً از آن جهت اهمیت پیدا می‌کند که کفهای مشبک عموماً در رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند و بار بستر درشت دانه نصب شده و همواره در معرض برخورد قله‌ی سنگ‌های بزرگ حمل شده توسط سیلاب‌ها قرار دارند. با توجه به این موضوع به نظر می‌رسد مهاربندی عرضی میله‌های طولی کف مشبک تا حدود زیادی بتواند باعث کاهش تغییر شکل‌های کف مشبک و تقویت سازه‌ای آبیگیر کفی گردد. بر مبنای این ایده، در این مقاله شکل جدیدی از آبیگیر کفی مورد مطالعه قرار گرفت که شامل میله‌های طولی در امتداد جریان، همراه با میله‌های عرضی جهت مهاربندی است.

فرم جدید هندسه کف مشبک که قبلاً مطالعه‌ای در خصوص آن انجام نگرفته است، آبیگیر کفی با میله‌های متقاطع نامیده شد. فرم جدید کف مشبک به لحاظ سازه‌ای عملکرد بهتری نسبت به آبیگیر کفی با میله‌های طولی دارد. در این تحقیق ضمن بررسی

در رابطه فوق E انرژی مخصوص جریان، C_d ضریب تخلیه یا ضریب آبیگری کف مشبک و ε درصد بازشدگی کف مشبک می‌باشد.

در شبیه‌سازی جریان بر روی کف مشبک، مهمترین هدف تعیین مقدار دبی منحرف شده در شرایط مختلف جریان و انواع متفاوت کف مشبک است. در این ارتباط یکی از نکات کلیدی، تعیین ضریب تخلیه کف مشبک می‌باشد. در حالت کلی ضریب تخلیه کف مشبک را می‌توان تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان در بالادست کف مشبک و پارامترهای هندسی کف مشبک در نظر گرفت. با توجه به اهمیت تخمین میزان دبی منحرف شده توسط کف مشبک، همواره بخش عمده‌ای از تحقیقات انجام شده بر روی کف مشبک مربوط به تخمین رابطه‌ای مناسب برای ضریب تخلیه کف‌های مشبک بوده است. هر یک از محققین مختلف سعی نموده‌اند تا با دقت بیشتری عوامل موثر در ضریب تخلیه کف مشبک را شناسایی نموده و رابطه مناسبتری را جهت تخمین ضریب مذکور برای هندسه‌های مختلف کف مشبک ارائه دهند.

مطابق تحقیقات انجام گرفته در خصوص وضعیت قرارگیری میله‌ها در کف مشبک، محققین همگی براین نکته اتفاق نظر دارند که کف‌های مشبک ساخته شده از میله‌های طولی (در امتداد جریان رودخانه) قادر به انحراف دبی بیشتری نسبت به کف‌های

هوادهی شده به ارتفاع ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر در انتها بود. لازم به ذکر است در ابتدای آزمایش‌ها هر یک از این سرریزها به روش حجمی و با برقراری ۱۰ دبی مختلف کالیبره شدند. با هدف حذف تلاطم سطح آب و افزایش دقت قرائت دبی‌های کانال‌های تحتانی و فوقانی، موانع آرام‌کننده جریان در بالادست سرریزهای مستطیلی نصب شدند. علاوه بر دبی‌های کانال‌های تحتانی و فوقانی، عمق آب در بالادست و بروی کف مشبک توسط اندازه‌گیر سوزنی عمق با دقت ± 0.5 میلی‌متر قرائت گردید. پارامترهای مختلف آزمایش‌ها و مقادیر هر یک در حالت بدون رسوب، در جدول (۲) آمده است. با توجه به مقادیر و تعداد پارامترهای جدول مذکور، در این حالت مجموعاً ۸۱ سری آزمایش بر روی کف مشبک با میله‌های متقاطع انجام گرفت. با راه اندازی مدل و عبور دادن دبی‌های مختلف جریان آب زلال (بدون رسوب)، دبی منحرف شده (Q_d) و دبی باقیمانده در کانال (Q_r) توسط سرریزهای مستطیلی لبه تیز اندازه‌گیری شده و در نهایت داده‌های خام برای ۸۱ سری آزمایش به دست آمدند.

در عمل استفاده از سازه‌های آبگیر کفی عمدتاً در رودخانه‌های کوهستانی که رسوبات درشت دانه دارند، رایج می‌باشد (۲-۴). لذا در این تحقیق رسوبات مورد استفاده و دبی آزمایش‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که با توجه به تنش برشی موجود در کف کانال و سرعت سقوط ذرات، رسوبات به صورت معلق در نیامده و حرکت آنها در بستر به صورت پخش یا جهش باشد. به عبارت دیگر رسوبات انتخاب شده فقط به صورت بار بستر منتقل گردند و نه بار معلق.

بدین منظور قطر ذرات رسوب بستر پس از سعی و خطا به گونه‌ای انتخاب می‌شود که تنش برشی موجود در بستر کانال در دبی‌های قابل برقراری در داخل کانال، در حدود تنش بحرانی که منجر به قرارگیری ذرات در آستانه حرکت می‌گردد (تنش بحرانی شیلدز)، قرار گیرد. در نهایت با توجه به موارد فوق، سه نوع دانه‌بندی به شرح جدول (۳) برای انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید. در این جدول d_{75} قطری از دانه‌های رسوب می‌باشد که ۷۵ درصد ذرات رسوب از آن ریزترند.

در خصوص آزمایش‌های با رسوب، کف کانال مطابق شکل‌های (۴) و (۵) طوری تغییر داده شد که بتوان لایه‌ای از رسوبات با دانه بندی مشخص را در بالادست کف مشبک قرار داد. این رسوبات در شرایط خاصی به صورت بار بستر شروع به حرکت به سمت کف مشبک می‌نمایند. لذا رسوبات به صورت بستر فعال در محفظه‌ای به طول سه متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر (تمام عرض کانال) و عمق هفت سانتی‌متر در بالا دست کف مشبک قرار گرفته و به صورت یکنواخت پخش شدند. همچنین جهت ایجاد هماهنگی بین زبری کف کانال و زبری بستر رسوبی و عدم ایجاد تغییر ناگهانی در زبری‌ها که ممکن است بر روی حرکت رسوب تأثیر گذارد، کف کانال در حد فاصل ورودی کانال تا بالادست کف

عوامل مؤثر بر ضریب تخلیه این نوع از کف‌های مشبک، ضریب تخلیه مذکور با استفاده از اصول آنالیز ابعادی در دو حالت جریان رسوبدار (بار بستر) و جریان بدون رسوب به دست آمده و با یکدیگر مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

جهت انجام آزمایش‌ها و ساخت مدل فیزیکی، از کانالی با اسکلت فلزی و دیواره‌های از جنس شیشه شفاف به طول ۸ متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده گردید. برای ایجاد واریانت‌های مختلف جهت انجام آزمایش‌ها، تعداد سه سازه کف مشبک به ابعاد ۳۰ در ۴۰ سانتی‌متر با میله‌های طولی و عرضی متقاطع از میلگردهای فولادی صاف با قطرهای ۸ و ۱۰ میلی‌متر ساخته شد. میزان بازشدگی این کف‌ها مطابق توصیه‌های محققین پیشین (۲، ۱۷ و ۳)، حدود ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۴۰ در نظر گرفته شد. همچنین بخشی از کف کانال در بالا دست محل نصب کف مشبک به میزان ۳۰ سانتی‌متر بالا آورده شد تا امکان ریزش آب بر روی کف مشبک و داخل کانال انحراف فراهم گردد.

به منظور اجتناب از دخالت آشفتگی‌ها بر روی جریان منحرف شده توسط آبگیر کفی که در ورودی کانال ایجاد می‌گردد، کف مشبک در فاصله‌ای که توسعه یافتگی جریان محقق شده و فاصله کافی از اغتشاشات ورودی کانال دارد، نصب گردید. بر این اساس کف مشبک در فاصله پنج متری از ابتدای کانال آزمایشگاهی نصب شد. جهت اطمینان از توسعه یافتگی جریان ورودی به کف مشبک، پروفیل سرعت‌های یک بعدی (در امتداد طولی کانال) در مقاطع مختلف کانال در بالادست کف مشبک توسط میکرومولینه واسنجی شده برداشت شد و با یکدیگر مقایسه گردید. از یکسان بودن توزیع سرعتها در دو مقطع متوالی به فاصله ۳۰ سانتی‌متری و ۶۰ سانتی‌متری در بالادست کف مشبک، همچنین تقارن توزیع سرعت‌ها در مقطع عرضی کانال، گسترش کامل لایه مرزی و توسعه یافتگی جریان ورودی به کف مشبک نتیجه‌گیری گردید (۵). در پایین دست کف مشبک، کانال اصلی با استفاده از ورق‌های پلکسی گلاس به ضخامت شش میلی‌متر به صورت دو طبقه اصلاح گردید. طبقه تحتانی وظیفه جمع‌آوری و هدایت دبی منحرف شده توسط کف مشبک و طبقه فوقانی وظیفه هدایت دبی باقیمانده در مسیر کانال اصلی (دبی عبوری از روی کف مشبک) را بر عهده داشت. شکل‌های (۲) و (۳) اجزای مدل آزمایشگاهی ساخته شده را نشان می‌دهند.

در انتهای کانال اصلی، کانال کوتاهی به صورت دو طبقه با چارچوب فلزی و بدنه پلکسی گلاس ساخته شد تا امکان اندازه‌گیری دبی جریان در هر یک از کانال‌های تحتانی و فوقانی، به صورت جداگانه فراهم گردد (شکل ۳). کانال دو طبقه مذکور شامل موانع آرام‌کننده جریان و دو سرریز مستطیلی لبه تیز

جدول ۲- پارامترهای آزمایش‌های بدون رسوب

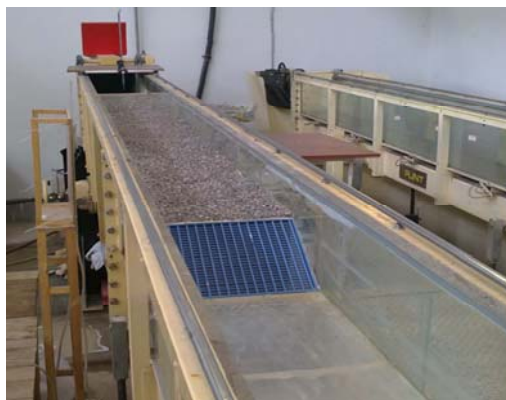
نام پارامتر	علامت اختصاری	مقادیر پارامتر در هر آزمایش
شیب طولی کف مشبک (%)	S_0	۵۶، ۳۰، ۲۰
درصد بازشدگی کف مشبک (%)	ε	۴۰، ۳۵، ۳۰
طول کف مشبک (cm)	L	۳۰، ۲۳، ۱۵
دبی کل آزمایش (l/s)	Q	سه دبی در محدوده ۱۰ الی ۳۰

جدول ۳- دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده

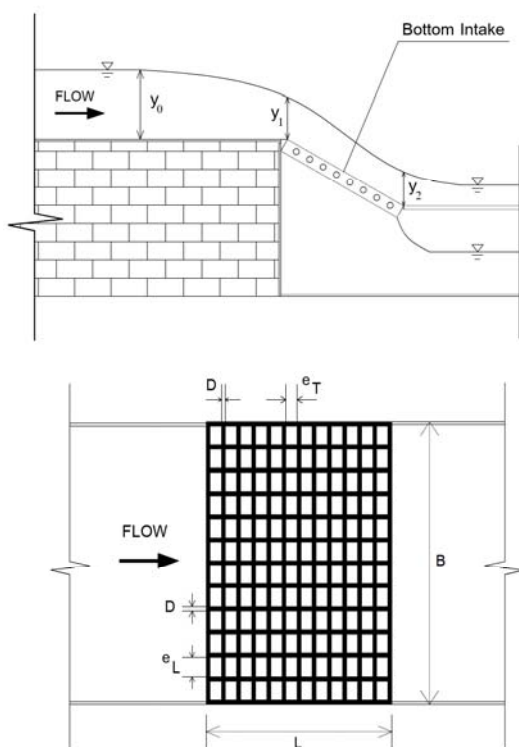
نوع دانه بندی	d_{75}	انحراف معیار هندسی ذرات (σ_g)
شماره ۱	۵ میلی‌متر	۱/۴۱
شماره ۲	۸ میلی‌متر	۱/۴۵
شماره ۳	۷ میلی‌متر	۲/۵۸



شکل ۴- نمای جانبی رسوبات بالادست کف مشبک



شکل ۵- نمای کلی از کانال و رسوبات بالادست



شکل ۶- نمای جانبی (بالا) و پلان کف مشبک و پارامترهای هندسی مورد استفاده در این تحقیق

$$C_d = f_1 \left(\rho, \mu, g, \varepsilon, S_0, L, \frac{e_T}{e_L}, y_0, V_0 \right) \quad (3)$$

در رابطه فوق ρ چگالی سیال، μ لزجت دینامیکی سیال، g شتاب ثقل، ε درصد بازشدگی کف مشبک، S_0 شیب طولی کف مشبک، L طول کف مشبک، y_0 عمق جریان نزدیک شونده به کف مشبک، V_0 سرعت جریان نزدیک شونده، e_T فاصله آزاد خالص بین میله‌های عرضی، e_L فاصله آزاد خالص بین میله‌های طولی و (e_T/e_L) ضریب بی-بعدی است که به نحوی نشان دهنده هندسه چشمه‌های کف مشبک می‌باشد و می‌توان آن را ضریب کشیدگی چشمه‌های کف مشبک نامید.

بر اساس تئوری باکینگهام^۱ با انتخاب متغیرهای ρ (پارامتر خصوصیات سیال)، V_0 (پارامتر سینماتیکی جریان) و y_0 (پارامتر هندسی جریان بالادست) به عنوان متغیرهای تکراری و پس از تشکیل گروه‌های بدون بعد $\pi_6, \dots, \pi_2, \pi_1$ (بدون در نظر گرفتن متغیر وابسته) چنین می‌توان نوشت:

$$C_d = f_2 \left(\text{Re}, F_{r0}, \varepsilon, S_0, \frac{e_T}{e_L}, \frac{L}{y_0} \right) \quad (4)$$

مشبک با استفاده از رسوبات دانه‌بندی شده که به وسیله چسب آهن بر روی پلکسی گلاس کف کانال چسبیده بودند، زیر گردید. در نهایت پارامترهای مختلف آزمایشات و مقادیر هر یک در حالت جریان رسوبدار، در جدول (۴) آمده است. با توجه به مقادیر و تعداد پارامترهای جدول مذکور، در این حالت مجموعاً ۱۰۸ سری آزمایش بر روی کف مشبک با میله‌های متقاطع انجام گرفت. با راه اندازی مدل و عبور دادن دبی‌های مختلف جریان، دبی منحرف شده (Q_d) و دبی باقیمانده در کانال (Q_r) توسط سرریزهای مستطیلی لبه تیز اندازه گیری شد.

نتایج و بحث

جهت بررسی رفتار هیدرولیکی کف مشبک با میله‌های متقاطع و به دست آوردن تابعی جهت تخمین ضریب تخلیه کف مشبک، با استفاده از اصول آنالیز ابعادی و عامل‌های بدون بعد، پارامترهایی که ضریب تخلیه آبگیر کفی به آنها وابسته بود، به دست آمدند.

در حالت کلی و در جریان بدون رسوب اگر تابعی برای ضریب تخلیه کف مشبک نیاز باشد، این تابع می‌تواند شامل متغیرهایی به شکل زیر باشد:

جدول ۴- پارامترهای آزمایشات جریان رسوبدار

نام پارامتر	علامت اختصاری	مقادیر پارامتر در هر آزمایش
شیب طولی کف مشبک (%)	S_0	۲۰، ۳۰ و ۵۶
درصد بازشدگی کف مشبک (%)	ε	۳۰، ۳۵ و ۴۰
طول کف مشبک (cm)	L	۱۵ و ۳۰
دانه بندی رسوب	-	سه نوع
دبی کل آزمایش (l/s)	Q	دو دبی در محدوده ۱۶ الی ۳۰

انجام گرفت. با استفاده از برازش خطی به روش گام به گام^۱ که شامل دخالت همزمان متغیرها و بررسی همبستگی تک تک متغیرهای مستقل با متغیر وابسته و کنار گذاشتن متغیرهای مستقل با سطح بیش از ۵ درصد می‌باشد، رابطه (۶) از جدول (۵) به دست آمد.

برخلاف برازش خطی که محدود به مدل‌های خطی است، در برازش غیر خطی می‌توان مدل‌هایی با ضابطه‌های دلخواه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته برقرار کرد. یکی از روش‌های مرسوم برازش غیر خطی تغییر متغیر و تبدیل تابع برازشی غیر خطی به یک تابع خطی است. در این روش با فرض برقراری رابطه توانی بین متغیرهای مستقل و لگاریتم‌گیری از طرفین معادله، رابطه برازشی خطی به دست می‌آید که متغیرهای آن، لگاریتم متغیرهای مستقل مساله هستند (۹ و ۱۰). در این تحقیق با فرض برقراری رابطه توانی بین متغیرهای مستقل، ابتدا از طرفین رابطه مذکور لگاریتم‌گیری شده و سپس برازش خطی متغیرهای جدید به روش گام به گام انجام شد. رابطه برازشی لگاریتمی به دست آمده از این روش به عنوان رابطه (۷) در جدول (۵) آمده است.

در نهایت روابط برازش داده شده بر نتایج آزمایشگاهی در دو حالت خطی چندگانه و غیر خطی با تغییر متغیر همراه با ضرایب تعیین (R^2) مربوطه و ریشه متوسط مربعات خطا^۲ در جدول (۵) ارائه گردید. مطابق جدول مذکور رابطه برازشی خطی (رابطه ۷) دارای ضریب تعیین بالاتری نسبت به مدل دیگر برازش یافته می‌باشد. از سوی دیگر ریشه متوسط مربعات خطا در رابطه برازشی خطی کمتر است که به معنی انطباق مناسبتر مدل با داده‌ها است. در نهایت رابطه (۷) از جدول (۵) به عنوان برازنده ترین رابطه برای اطلاعات آزمایشگاهی موجود در این تحقیق انتخاب گردید. مطابق جدول (۵)، عدد فرود جریان در هیچکدام از روابط انتخابی به عنوان متغیر مستقل مؤثر دیده نمی‌شود. این موضوع به دلیل بازه کوچک تغییرات عدد فرود در آزمایش‌های این تحقیق به دلیل محدودیت شیب کف کانال بوده است.

در رابطه فوق Re عدد رینولدز جریان و Fr_0 عدد فرود جریان نزدیک شونده به کف مشبک می‌باشد. لازم به ذکر است که محدوده تغییرات عدد رینولدز جریان در آزمایش‌های این تحقیق $26000 < Re < 88000$ و محدوده تغییرات عدد فرود جریان، $1.50 < Fr < 1.61$ بوده تا امکان برقراری رژیم جریان فوق بحرانی فراهم گردد. توضیحات کامل پارامترهای مورد استفاده در روابط فوق در جدول علائم و نشانه‌های موجود در انتهای مقاله آمده است. علاوه بر آن پارامترهای هندسی روابط مذکور در شکل (۶) نشان داده شده است.

با توجه به آشفتگی جریان در مطالعات حاضر می‌توان از تأثیر عدد رینولدز صرف‌نظر نمود (۶ و ۷). لذا رابطه (۴) به شکل زیر در می‌آید:

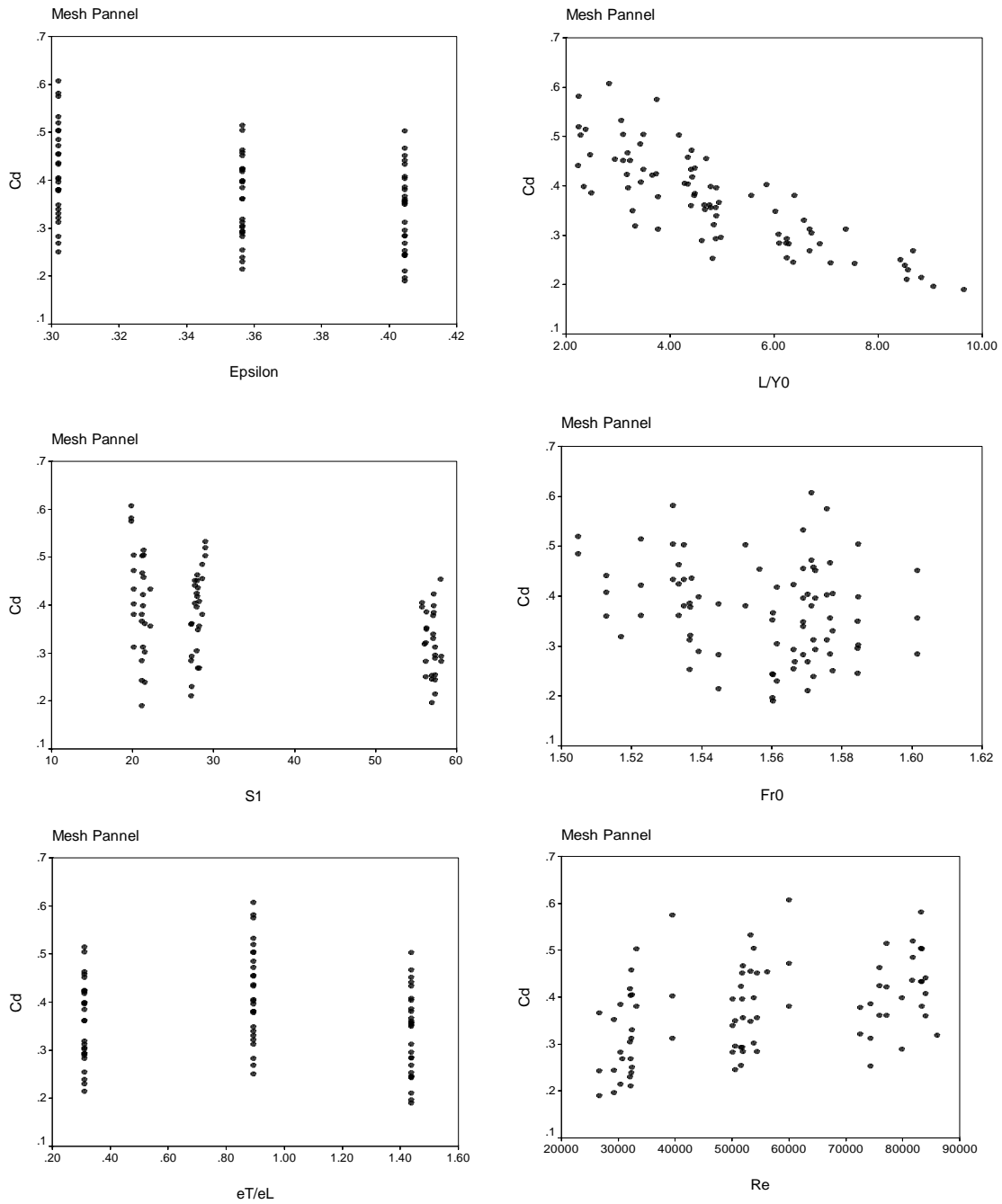
$$C_d = f_2 \left(Fr_0, \varepsilon, S_0, \frac{e_T}{e_L}, \frac{L}{y_0} \right) \quad (5)$$

جهت شناخت دقیق رفتار هیدرولیکی کف مشبک با میله‌های متقاطع، ابتدا لازم است میزان تأثیر هر یک از پارامترهای هندسی و هیدرولیکی به دست آمده از تحلیل ابعادی، مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا میزان همبستگی متغیر وابسته (C_d) با هر یک از پنج متغیر مستقل به دست آمده از آنالیز ابعادی با استفاده از روش‌های آماری و به کارگیری نرم افزار تخصصی SPSS محاسبه گردید (۸).

نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که متغیر وابسته C_d از میان تمامی متغیرهای مستقل به دست آمده از تحلیل ابعادی، بیشترین همبستگی را با متغیرهای L/y_0 ، S_0 ، ε و Fr_0 دارد. به عبارت دیگر متغیرهای مستقل مورد اشاره، بیشترین سهم را در برآورد مقادیر مشاهداتی متغیر وابسته C_d به خود اختصاص داده‌اند. شکل (۷) مقادیر ضریب تخلیه کف مشبک دارای میله‌های متقاطع را در مقابل تک تک متغیرهای مستقل مذکور در شرایط جریان آب زلال نشان می‌دهد. نمودارهای مذکور در محدوده تغییرات پارامترهای مستقل در آزمایش‌های این تحقیق رسم شده‌اند.

جهت بررسی توأم عوامل مؤثر بر روند تغییرات ضریب تخلیه کف مشبک، با استفاده از نرم افزار SPSS، بین متغیرها و پارامترهای بی بعد موجود، برازش خطی چندگانه و غیر خطی

1. Step wise
2. Root of Mean Square Error



شکل ۷- پراکندگی مقادیر متغیر وابسته (C_d) در مقابل متغیرهای مستقل در کف مشبک دارای میله‌های متقاطع و جریان آب زلال

جدول ۵- معادله‌های برازش داده شده برای کف مشبک با میله‌های متقاطع در حالت جریان بدون رسوب

شماره رابطه	رابطه برازشی بدست آمده	R^2 (%)	RMSE (%)
(۶)	$C_d = 1.017 - 0.678(\varepsilon) - 0.049\left(\frac{L}{y_0}\right) - 0.002(S_0)$	۹۲/۶۰	۷/۹۳
(۷)	$\log C_d = 0.637 - 0.715 \log(\varepsilon) - 0.654 \log\left(\frac{L}{y_0}\right) - 0.208 \log(S_0)$	۹۰/۶۰	۸/۱۸

گفت رابطه برازشی خطی (۶) قابل قبول و برازنده داده‌های آزمایشگاهی موجود است. در خصوص مقدار خطای برآورد رابطه برازشی به دست آمده داریم:

$$\text{خطای نسبی} = \frac{(C_d)_c - (C_d)_a}{(C_d)_a} \times 100 \quad (۸)$$

با استفاده از رابطه (۸)، میزان خطای نسبی بین $(C_d)_a$ به عنوان ضریب تخلیه اندازه گیری شده و $(C_d)_c$ به عنوان ضریب تخلیه تخمین زده شده کف مشبک به کمک رابطه برازشی خطی (۶) محاسبه می‌گردد. میانگین و انحراف استاندارد خطای نسبی محاسبه شده از رابطه برازشی خطی (۶) به ترتیب ۰/۱۶ درصد و ۶/۳۷ محاسبه شد. همچنین برای تخمین بازه مطمئن خطای نسبی، از رابطه زیر استفاده گردید (۱۱):

$$X \approx N(\mu, \sigma^2) \quad (۹)$$

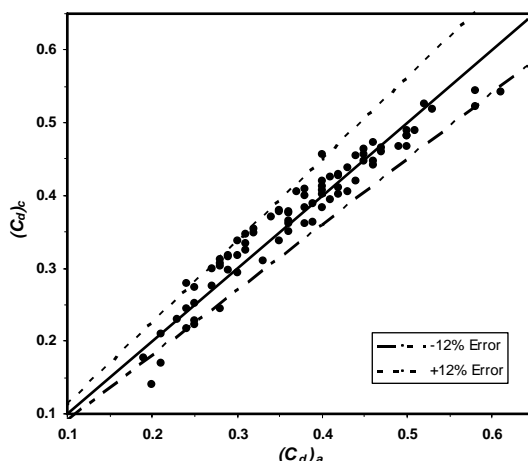
$$P[\mu - Z_{\alpha/2}\sigma \leq X \leq \mu + Z_{\alpha/2}\sigma] = (1 - \alpha)\%$$

در این رابطه X مقادیر خطای نسبی برآورد ضریب تخلیه کف مشبک با استفاده از رابطه (۷)، μ میانگین خطاها، σ^2 واریانس مقادیر متوسط خطا، σ انحراف معیار مقادیر متوسط خطا، $Z_{\alpha/2}$ نقطه بحرانی توزیع نرمال استاندارد خطای $\alpha/2$ یا فاصله اطمینان $(1 - \alpha)\%$ است. رابطه فوق بیانگر این است که اگر X از توزیع نرمال با میانگین μ و واریانس σ^2 پیروی کند، آنگاه در سطح اعتماد $(1 - \alpha)\%$ ، مقادیر X بین $\mu + Z_{\alpha/2}\sigma$ و $\mu - Z_{\alpha/2}\sigma$ قرار خواهد گرفت. با انتخاب $\alpha = 0.05$ ، آنگاه سطح اعتماد ۹۵ درصد خواهد بود و $Z_{\alpha/2}$ از جداول توزیع نرمال برابر ۱/۹۶ به دست می‌آید. لذا با توجه به رابطه فوق، مقادیر میانگین و انحراف معیار میانگین خطاهای نسبی و همچنین سطح اعتماد ۹۵ درصد، بازه مطمئن خطای نسبی برای رابطه برازشی (۷) در محدوده ± 11 درصد قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر با احتمال ۹۵ درصد مقادیر خطاهای نسبی در محدوده ± 12 درصد قرار می‌گیرد. شکل (۷) مقادیر C_d مشاهده شده در مقابل مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه برازشی خطی (۶) را نشان می‌دهد.

در این تحقیق برای اطمینان از صحت و مناسب بودن مدل برازشی خطی پیشنهادی، یا به عبارت دیگر برای تایید نکویی برازش، صحت فرضیات زیر بررسی گردید (۸-۱۰):
الف- فرض نرمال بودن باقیمانده‌های مدل پیشنهادی.
ب- فرض ثابت بودن واریانس باقیمانده‌های مدل پیشنهادی.
ج- فرض استقلال واریانس باقیمانده‌های مدل پیشنهادی.
منظور از باقیمانده‌های مدل پیشنهادی، تفاضل مقادیر پیش بینی شده توسط مدل پیشنهادی برای متغیر وابسته (C_d) و مقادیر واقعی به دست آمده از آزمایش‌ها برای همان متغیر می‌باشد.
صحت فرض نرمال بودن باقیمانده‌ها از طریق رسم توزیع نرمال مقادیر باقیمانده‌ها (نمودار هیستوگرام) و همچنین توزیع مقادیر نرمال شده باقیمانده‌های مدل پیشنهادی در مقابل مقادیر مشاهده شده باقیمانده‌ها (نمودار Q-Q)، به کمک نرم افزار SPSS، تایید گردید.

ثابت بودن واریانس باقیمانده‌های مدل برازشی پیشنهادی به معنی بی‌اعتباری مساوی برای تمام باقیمانده‌ها می‌باشد. به منظور کنترل اینکه آیا واریانس متغیر وابسته برای تمامی مقادیر مستقل ثابت است، نمودار باقیمانده‌های مدل پیشنهادی برای متغیر وابسته (C_d) در مقابل مقادیر پیش بینی شده همان متغیر به کمک نرم افزار SPSS رسم گردید. در نمودار مذکور توزیع تصادفی باقیمانده‌ها اطراف خط افقی صفر ($y = 0$) و عدم وجود الگوی خاص (از قبیل الگوی قیفی و پیکانی شکل)، مشاهده گردید. لذا بدلیل پراکندگی نامنظم مانده‌ها، ثابت بودن واریانس باقیمانده‌های مدل پیشنهادی تایید گردید (۹ و ۱۰).
فرض استقلال باقیمانده‌ها نیز با استفاده از آماره دوربین-واتسون^۱ کنترل گردید. مقدار این آماره برای رابطه برازشی موجود که توسط نرم افزار SPSS محاسبه شد، برابر ۲/۱۷ بوده که مقدار قابل قبولی است و نشان دهنده مستقل بودن مقادیر این باقیمانده‌ها است (۹).

با توجه به تایید فرضیات نرمال بودن باقیمانده‌های مدل پیشنهادی، ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها، استقلال واریانس باقیمانده‌ها، ضریب تعیین و $RMSE$ به دست آمده، می‌توان



شکل ۸- مقادیر اندازه گیری شده در مقابل مقادیر محاسبه شده ضریب تخلیه کف مشبک با میله‌های متقاطع از رابطه (۶) در حالت جریان بدون رسوب

جدول ۶- معادلات برازش داده شده برای کف مشبک با میله‌های متقاطع در حالت جریان رسوبدار

شماره رابطه	رابطه برازشی به دست آمده	R^2 (%)	RMSE (%)
(۱۲)	$C_d = 1.047 - 0.626(\varepsilon) - 0.048\left(\frac{L}{y_0}\right) - 0.003(S_0)$	۸۴/۳۰	۱۱/۲۷
(۱۳)	$\log C_d = 1.406 - 0.686 \log(\varepsilon) - 0.607 \log\left(\frac{L}{y_0}\right) - 0.293 \log(S_0)$	۸۴/۷۰	۱۱/۰۵

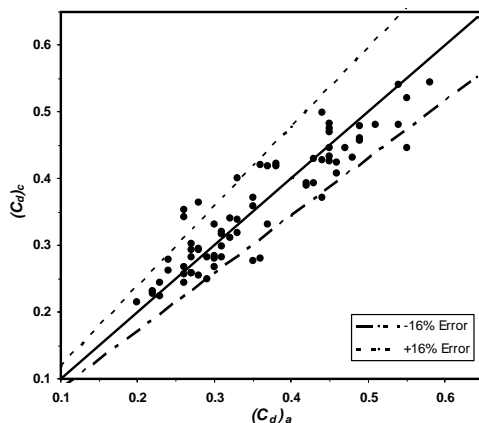
هستند. همچنین d_{50} و σ_g به ترتیب انحراف معیار هندسی ذرات و قطر متوسط ذرات رسوب هستند که معرف شکل و نحوه دانه‌بندی ذرات رسوب می‌باشند. همانند حالت قبل، بر اساس تئوری باکینگهام با انتخاب متغیرهای ρ (پارامتر خصوصیات سیال)، V_0 (پارامتر سینماتیکی جریان) و y_0 (پارامتر هندسی جریان بالادست) به عنوان متغیرهای تکراری و پس از تشکیل گروه‌های بدون بعد، چنین می‌توان نوشت:

$$C_d = f_2\left(Fr_0, \varepsilon, S_0, \frac{L}{y_0}, \theta, Re_*, \frac{e_T}{e_L}, \sigma_g, \frac{d_{50}}{y_0}\right) \quad (11)$$

جهت مقایسه عملکرد هیدرولیکی آبگیرهای کفی با میله‌های متقاطع در دو حالت جریان بدون رسوب و جریان رسوبدار، می‌توان در شرایط هندسی یکسان (طول، عرض، شیب طولی و درصد بازشدگی یکسان کف‌های مشبک) و شرایط هیدرولیکی یکسان، مقادیر ضریب تخلیه به دست آمده در دو حالت مذکور را با یکدیگر مقایسه نمود. بدین منظور ضریب تخلیه کف مشبک با میله‌های متقاطع در حالت جریان رسوبدار را می‌توان بصورت تابعی از متغیرهای زیر نوشت:

$$C_d = f_1\left(\rho, \mu, g, \varepsilon, S_0, L, y_0, V_0, \frac{e_T}{e_L}, \sigma_g, d_{50}, \theta, Re_*\right) \quad (10)$$

در رابطه مذکور θ و Re_* به ترتیب پارامتر شیلدز و عدد رینولدز مرزی بوده و معرف شرایط هیدرولیکی و آستانه حرکت رسوب



شکل ۹- مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر محاسبه شده ضریب تخلیه کف مشبک با میله‌های متقاطع از رابطه (۱۳) در حالت جریان رسوبدار

جدول ۷- خطای استفاده از روابط ضریب تخلیه کف مشبک در حالت بدون رسوب و رسوبدار

انحراف	میانگین درصد	نوع رابطه
معیار	خطای نسبی	
۱۱/۳۵	۲/۶۱	رابطه جریان بدون رسوب
۸/۴۲	۰/۵۳	رابطه جریان رسوبدار

±16 درصد تعیین گردید. شکل (۸) بازه خطای نسبی مذکور را نشان می‌دهد.

در این تحقیق مقادیر ضریب تخلیه کف مشبک با میله‌های متقاطع با هندسه و شرایط هیدرولیکی یکسان در دو حالت جریان فاقد رسوب و جریان دارای بار بستر با یکدیگر مقایسه گردید. به کمک نتایج مقایسه فوق می‌توان دریافت که عدم در نظر گرفتن رسوبات جریان، باعث ایجاد چه مقدار خطا در برآورد مقدار ضریب تخلیه کف‌های مشبک می‌گردد. بر این اساس رابطه (۷) برای کف‌های مشبک با میله‌های متقاطع در جریان فاقد رسوب، با رابطه (۱۲) مربوط به جریان رسوبدار مقایسه گردید.

جهت انجام این مقایسه از اطلاعات مربوط به ۱۰۸ سری آزمایش در جریان رسوبدار استفاده شد. برای انجام مقایسه، ابتدا مقادیر ضریب تخلیه کف مشبک در هر دو حالت جریان بدون رسوب و رسوبدار به ترتیب به کمک روابط (۷) و (۱۲) و با استفاده از اطلاعات آزمایش‌های جریان رسوبدار محاسبه گردید. سپس درصد خطای نسبی برآورد ضریب تخلیه به دست آمده از هر یک از روابط مذکور، نسبت به ضریب تخلیه اندازه‌گیری شده در آزمایش، به کمک رابطه (۸) محاسبه گردید. در نهایت مقادیر خطای نسبی محاسبه شده برای هر یک از دو حالت جریان رسوبدار و بدون رسوب، جهت مقایسه با یکدیگر در جدول (۷) ارائه گردید.

بر اساس جدول (۷) برآورد ضریب تخلیه کف‌های مشبک در شرایط آزمایشگاهی بدون رسوب (در نظر نگرفتن اثر رسوبات

در ادامه میزان همبستگی متغیر وابسته (C_d) با هر یک از متغیرهای مستقل به دست آمده از آنالیز ابعادی با استفاده از روش‌های آماری و به کارگیری نرم افزار تخصصی SPSS محاسبه گردید (۱۴). نتایج تحلیل همبستگی نشان داد متغیرهای مستقل $Fr_0, \varepsilon, S_0, L/y_0$ به ترتیب بیشترین سهم را در برآورد مقادیر مشاهداتی متغیر وابسته (C_d) ، به خود اختصاص داده‌اند. همچنین مانند حالت جریان بدون رسوب، جهت بررسی توأم عوامل موثر بر روند تغییرات ضریب تخلیه کف مشبک، با استفاده از نرم افزار SPSS بین متغیرها و پارامترهای بی‌بعد موجود، برازش چند متغیره خطی و غیر خطی انجام گرفت که نتایج آن در جدول (۶) آمده است.

مطابق جدول (۶)، در هر دو رابطه ضریب تعیین و مقدار ریشه متوسط مربعات خطا ($RMSE$) بسیار به یکدیگر نزدیک است اما در نهایت رابطه برازشی غیرخطی (۱۲) به عنوان برازنده ترین رابطه برای تخمین ضریب تخلیه کف مشبک با میله‌های متقاطع در جریان رسوبدار، بر مبنای اطلاعات آزمایشگاهی موجود در این تحقیق، انتخاب شد.

مراحل تحقیق صحت برازش برای مدل غیرخطی رابطه (۱۲) مطابق آنچه در خصوص نتایج حالت جریان بدون رسوب گفته شد، انجام گرفت و صحت رابطه مذکور بر مبنای معیارهای آماری موجود تأیید گردید. در ادامه میانگین و انحراف معیار خطای نسبی رابطه (۷) با استفاده از رابطه (۸) به ترتیب برابر ۰/۴۷ و ۴/۹۲ به دست آمد و به کمک آن بازه مطمئن خطای نسبی در محدوده

مشبک کاهش خواهد یافت، ولی در این تحقیق گرفتگی قابل ملاحظه‌ای رخ نداد.

نتیجه گیری

کف‌های مشبک سازه‌های فلزی هستند که جهت انحراف آب در بستر رودخانه‌های عمدتاً کوهستانی نصب می‌شوند. در این تحقیق نوع جدیدی از کف‌های مشبک که از میله‌های متقاطع طولی و عرضی ساخته شده است، معرفی گردید. تعداد ۱۸۹ سری آزمایش بر روی کف مشبک ساخته شده از میله‌های متقاطع با درصدهای بازشدگی، شیب‌ها، طول‌ها و دبی‌های مختلف جریان آب زلال (بدون رسوب) و جریان رسوبدار با سه نوع دانه‌بندی متفاوت رسوب انجام گرفت و در هر مورد ضریب تخلیه کف مشبک با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی محاسبه گردید. جهت مطالعه عوامل موثر بر ضریب تخلیه این نوع از کف‌های مشبک، ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی تعدادی پارامتر هندسی و هیدرولیکی بی‌بعد به دست آمد. سپس با دخالت همزمان متغیرها و انجام برازش به کمک نرم افزار SPSS، روابط برازشی خطی و غیر خطی چندگانه جهت تخمین مقادیر ضریب تخلیه کف مشبک بدست آمده و صحت آن با توجه به معیارهای آماری موجود بررسی گردید. در انتها به منظور مقایسه رفتار هیدرولیکی نوع جدید کف مشبک در مقابل جریان رسوبدار و بدون رسوب، مقادیر ضریب تخلیه به کمک روابط به دست آمده در دو حالت مذکور با یکدیگر مقایسه شد. نتیجه این مقایسه نشان داد در حالتی که گرفتگی کف مشبک در اثر رسوبات ناچیز باشد، جریان بار بستر منجر به تغییرات ناچیزی در مقدار دبی منحرف شده توسط کف مشبک می‌گردد.

بستر)، تنها منجر به ایجاد خطای قابل اغمازی به میزان ۲/۶۱ درصد می‌گردد.

در خصوص مقایسه عملکرد هیدرولیکی کف‌های مشبک دارای میله‌های متقاطع در شرایط جریان بدون رسوب و رسوبدار، علاوه بر مقایسه میانگین خطای نسبی ضریب تخلیه محاسباتی (یا همان خطای نسبی دبی منحرف شده محاسباتی) نسبت به ضریب تخلیه واقعی، می‌توان درصد کاهش یا افزایش ضریب تخلیه کف مشبک مذکور را در حالت جریان رسوبدار و بدون رسوب نسبت به یکدیگر مشخص نمود. برای این کار ابتدا با استفاده از داده‌های ۱۰۸ سری آزمایش و به کارگیری روابط (۶) و (۱۳) مقادیر ضریب تخلیه برای کف مشبک در شرایط جریان رسوبدار و بدون رسوب محاسبه شده و سپس نسبت ضریب تخلیه محاسباتی کف مشبک در جریان رسوبدار به ضریب تخلیه محاسباتی جریان بدون رسوب بر حسب درصد به دست آمد. بر اساس این محاسبات، میانگین نسبت ضریب تخلیه در حالت جریان رسوبدار به جریان بدون رسوب برابر ۹۷/۲۵ درصد بدست آمد. به عبارت دیگر وجود رسوبات به صورت بار بستر در آزمایش‌های این تحقیق باعث کاهش ضریب تخلیه (و به همان نسبت کاهش دبی منحرف شده) به میزان متوسط ۲/۷۵ درصد نسبت به حالت جریان بدون رسوب گشته است.

لازم به ذکر است در آزمایش‌های انجام گرفته بر روی کف مشبک این تحقیق به دلیل شیب‌های نسبتاً زیاد کف مشبک، گرفتگی شبکه بسیار ناچیز و در پایان هر آزمایش کمتر از ۱۰ درصد مساحت کف مشبک بود. در صورت گیرکردن رسوبات لابلای شبکه و گرفتگی کف مشبک مسلماً ضریب تخلیه کف

منابع

۱. حسینی، س. م. و ج. ابریشمی. ۱۳۸۶. هیدرولیک کانالهای باز. انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ هفدهم.
۲. شفاعی بجزستان، م. و غ. ج. شکوهی راد. ۱۳۷۶. بررسی آزمایشگاهی ضوابط هیدرولیکی و رسوب در آبگیرهای کفی. مجله بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد هشتم، شماره ۱، صفحات ۴۱-۵۳.
۳. رزاز، م. و م. فغفور مغربی. ۱۳۸۷. بررسی عددی و آزمایشگاهی رفتار هیدرولیکی آبگیرهای کفی. مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، جلد ۳۶، شماره ۳، صفحات ۳۵-۲۳.
۴. کمان بدست، ا. ع. و م. شفاعی بجزستان. ۱۳۸۷. بررسی خصوصیات شیب و درصد بازشدگی کف مشبک در آبگیرهای کفی با استفاده از مدل فیزیکی. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۵. بنکداری، ح.، زینتی‌زاده لرستانی، ع. و ع. پناهیان. ۱۳۸۷. محاسبه طول توسعه یافتگی در کانالهای روباز با تحلیل سه بعدی جریان. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
۶. فرقانی... آبادی، ر. ۱۳۷۴. بررسی پارامترهای موثر بر شدت جریان کف ریزها. پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
۷. حیدری‌نژاد، ق. ۱۳۷۶. مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

۸. اسماعیلیان، م. ۱۳۸۴. راهنمای جامع SPSS12، انتشارات ناقوس، چاپ دوم.
۹. رضایی، ع. ب. و ا. سلطانی. ۱۳۸۷. مقدمه‌ی بر تحلیل رگرسیون کاربردی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ سوم.
۱۰. رضایی پزند، ح. و ا. بزرگ نیا. ۱۳۸۱. تحلیل رگرسیون غیر خطی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، چاپ اول.
۱۱. فغفور مغربی، م. و م. س. رضایی نسب. ۱۳۸۴. برآورد دبی فاضلابروهای مدور با استفاده از مدل ترکیبی سرریز - دریچه. فصلنامه علمی- پژوهشی آب و فاضلاب، شماره ۵۵، صفحات ۶۸-۶۰.
12. Andaroodi, M. 2005. Standardization of civil engineering works of small hydropower plants and development of an optimization tool. Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), Switzerland.
13. Orth, J., Chardonnet, E., and G. Meynardi. 1954. Etude de Grilles pour Prises d'eau dutype. E n-dessous, La Houille Blanche, 9(6): 343-351. (in French).
14. Kuntzmann, J. and M. Bouvard. 1954. Etude théorique des grilles de prises d'eau du type. En-dessous, La Houille Blanche, 9(9-10): 569-574. (in French).
15. Drobir, H. 1981. Entwurf von wasserfassungen im hochgebirge. Osterr, Wasserwirtsch, 33: 243-253. (in German).
16. Subramanya, K. and S. K. Shukla. 1988. Discharge diversion characteristics of trench weirs. J. of Institution of Engineering (India), 6: P. 163.
17. Brunella, S., Hager, W. H. and H. E. Minor. 2003. Hydraulics of bottom rack intake. Int. J. of Hydraulic Engineering. 129(1).

ضمیمه: علائم و نشانه‌های به کار رفته در مقاله

علامت اختصاری	توضیح پارامتر	علامت اختصاری	توضیح پارامتر
Q	دبی کل جریان در بالادست کف مشبک	A	سطح مقطع جریان در طول کف مشبک
Q _d	دبی منحرف شده توسط کف مشبک	B	عرض کف مشبک
Q _r	دبی باقیمانده در کانال اصلی	C _d	ضریب تخلیه یا ضریب گذر دهی کف مشبک
Q _w	دبی عبوری از روی سرریز مستطیلی	(C _d) _a	ضریب تخلیه اندازه گیری شده کف مشبک
H _d	ارتفاع تیغه آب روی سرریز مستطیلی	(C _d) _c	ضریب تخلیه تخمین زده شده کف مشبک
S ₀	شیب طولی کف مشبک	ε	درصد بازشدگی کف ریز
S _f	شیب خط انرژی در طول کف مشبک	e _T	فاصله آزاد خالص بین میله های عرضی
x	فاصله افقی از ابتدای کف مشبک	e _L	فاصله آزاد خالص بین میله های طولی
y _o	عمق جریان نزدیک شونده	E ₀	انرژی مخصوص جریان نزدیک شونده
V ₀	سرعت جریان نزدیک شونده	Fr ₀	عدد فرود جریان نزدیک شونده
α	ضریب تصحیح سرعت در معادله انرژی	Fr ₁	عدد فرود جریان در ابتدای کف مشبک
ρ	چگالی آب	Re	عدد رینولدز جریان نزدیک شونده
g	شتاب ثقل	L	طول کف مشبک
μ	لزجت دینامیک آب	d	قطر میله های کف مشبک