

بررسی آزمایشگاهی ضریب تخلیه در آبگیرهای کفی مشبک با میله‌های متقاطع

کیوان بینا^۱ محمود فغفور مغربی^۲ جلیل ابریشمی^۳

(دریافت ۸۸/۱۱/۲۶ پذیرش ۸۹/۹/۱۷)

چکیده

آبگیرهای کفی سازه‌های فلزی مشبکی هستند که به منظور انحراف آب در بستر جریان نصب می‌شوند. به کارگیری این سازه‌ها یکی از روشهای مطمئن و کارآمد در آبگیری از رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند و بار بستر درشت دانه به‌شمار می‌رود. یکی از شکل‌های آبگیرهای کفی که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته، آبگیر کفی ساخته شده از شبکه متقاطع میله‌های طولی و عرضی است. این شکل خاص که آبگیر کفی با میله‌های متقاطع نامیده می‌شود، نسبت به آبگیر کفی با میله‌های طولی و یا آبگیر کفی با میله‌های عرضی، به لحاظ سازه‌ای عملکرد بهتری در مقابل نیروهای وارده دارد. در این پژوهش تعداد ۳ کف مشبک از میله‌های طولی و عرضی متقاطع با درصد بازشدگی‌های مختلف ساخته شد و در فلومی با شیب‌های متفاوت نصب گردید. در مجموع ۸۱ سری آزمایش با عبور دادن دبی‌های مختلف آب زلال و طولهای متفاوت سازه کف مشبک انجام گرفت. در هر سری آزمایش، دبی منحرف شده توسط کف مشبک (Q_d) و دبی باقیمانده در کانال (Q_r) توسط یک کانال دو طبقه مجهز به دو عدد سرریز لبه تیز مستطیلی کالیبره شده، قرائت گردید. سپس ضریب تخلیه این نوع کف مشبک تحت تاثیر پارامترهای مختلف هیدرولیکی و هندسی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی، رابطه بی‌بعدی بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل استخراج شد و سپس بین داده‌های حاصل از ۸۱ سری آزمایش، روابط مختلف خطی و غیرخطی برازش داده شد و در انتها بر مبنای معیارهای آماری موجود، مناسب‌ترین رابطه برازنده داده‌های آزمایشگاهی انتخاب گردید. در نهایت عملکرد هیدرولیکی نوع جدید آبگیر کفی با نوع مرسوم آبگیرهای کفی دارای میله‌های طولی، از طریق محاسبه دبی منحرف شده توسط هر کدام در شرایط یکسان، مقایسه گردید.

واژه‌های کلیدی: آبگیر کفی، آنالیز ابعادی، برازش، جریان متغیر مکانی، ضریب تخلیه

Experimental Investigation of Discharge Coefficient in Mesh Panel Bottom Intakes

Keivan Bina¹

Mahmoud Faghfour Maghrebi²

Jalil Abrishami³

(Received Feb. 15, 2010 Accepted Dec. 8, 2010)

Abstract

Bottom racks is a hydraulic structure which is placed in the bed of stream through which, part of flow in the main channel is diverted. These structures have very wide application in industry, irrigation, drainage and etc. Of course much attention had been paid to the study of such structures, but characteristics of flow through bottom racks are complex. The present study was directed to estimate the discharge coefficient of a new kind of bottom racks including both transverse and longitudinal bars that named "mesh panel racks" without considering any solids in the fluid. This kind of bottom intake has advantages from structural point of view and has less deformation under static and dynamic loads. Laboratory setup with three mesh panel intakes was built and the effects of various parameters such as racks slope, porosity and geometry were explored. A dimensional analysis using Buckingham theory showed the effective hydraulic and geometric factors that affect the discharge coefficient (C_d) of bottom racks. Then, a statistical approach to determine the discharge coefficient of a rack structure was developed with linear and nonlinear regression using SPSS software. The efficiency of the proposed technique is high enough that the associated error is limited to 10%. Finally, hydraulic performance of mesh panel intakes was compared with regular type of bottom intakes, which consist of longitudinal bars. For this purpose, diverted discharge through both type of intakes calculated in same situation.

Keywords: Bottom Racks, Dimensional Analys, Regression, Spatial Varried Flow, Discharg
Coefficient.

1- Assist. Prof. of Civil Eng., Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad (Corresponding Author) (+98 511) 5230690 bina@khi.ac.ir
2. Prof. of Civil Eng., Ferdowsi University, Mashhad
3. Assoc. Prof. of Civil Eng., Ferdowsi University, Mashhad

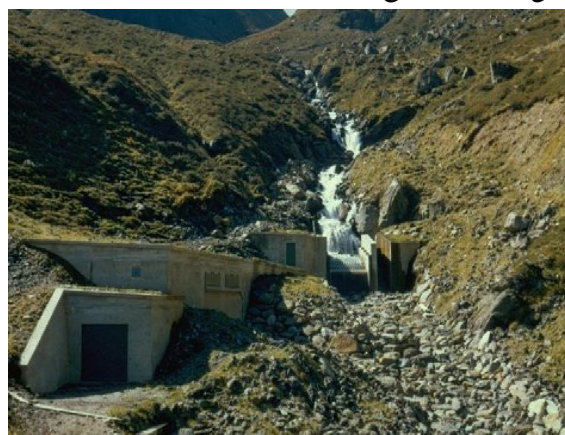
۱- استادیار گروه عمران، مؤسسه آموزش عالی غیر انتفاعی خاوران مشهد (نویسنده مسئول) (+98 511) 5230690 bina@khi.ac.ir

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۱- مقدمه

کف مشبک یا آبگیر کفی^۱ سازه‌ای است فلزی که از پروفیل‌های فولادی با مقاطع مختلف دایره‌ای، تسمه‌ای، T شکل و غیره ساخته شده و در بستر رودخانه نصب می‌گردد تا علاوه بر وظیفه هدایت آب به داخل کانال جمع‌آوری، مانع ورود آشغالها، مواد زائد معلق و رسوبات به داخل کانال گردد.

امروزه کفهای مشبک به‌عنوان یکی از اجزای مهم پروژه‌های برقابی کوچک شناخته می‌شوند که وظیفه آبگیری از رودخانه و انتقال آن به‌منظور به حرکت در آوردن توربین‌های نیروگاه را بر عهده دارند (شکل ۱). نیروگاههای برقابی کوچک در کنار رودخانه‌های کوهستانی با شیب زیاد ساخته می‌شوند. در این‌گونه رودخانه‌ها آبگیرهای جانبی و جلویی جوابگو نیستند زیرا به‌علت شیب زیاد رودخانه و وجود رسوبات درشت دانه، پایداری آنها به‌شدت در معرض خطر خواهد بود. در این رودخانه‌ها نقاط شکست^۲، 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 آبگیری از رودخانه‌ها می‌توان به عدم تغییر در توپوگرافی کف رودخانه به‌دلیل جلوگیری از تجمع رسوبات در مقابل سازه آبگیر، امکان آبگیری در تمام فصل‌های سال و پایداری در مقابل نیروهای دینامیکی ناشی از زلزله به‌دلیل قرار گرفتن در خاک و مقرون به‌صرفه بودن آنها اشاره نمود. در کنار مزایای مذکور، به‌کارگیری کفهای مشبک در آبگیری از رودخانه‌ها با مشکلاتی نیز همراه است که از آن جمله می‌توان به گرفتگی شبکه فلزی به‌دلیل تجمع رسوبات و یا یخ زدگی اشاره نمود.



شکل ۱- آبگیری از کف برای یک نیروگاه برقابی کوچک در یک رودخانه کوهستانی [۱]

اولین تعریف هیدرولیکی از آبگیرهای کفی توسط اورث و همکاران^۳ در سال ۱۹۵۴ ارائه گردید. آنها آزمایش‌هایی بر روی مدل فیزیکی کف مشبک در کانالی با شیب ۲۰ درصد و پنج مقطع با شکلهای هندسی متفاوت از میله‌های عرضی انجام دادند [۲]. بر اساس تحقیقات ایشان مشخص گردید که کمترین طول آبگیر با استفاده از میله‌هایی با مقطع تخم‌مرغی به‌دست آمده و کمترین دبی در هنگام به‌کارگیری مقاطع T شکل برای میله‌ها به‌دست می‌آید. در این تحقیق شیب کف، تنها تأثیر کمی در جلوگیری از مسدود شدن آبگیر داشته است. متعاقباً کونترزمان^۴ و بووارد^۵ در سال ۱۹۵۴ اولین روش محاسباتی را برای به‌دست آوردن پروفیل سطح آزاد آب بر روی کف مشبک با فرض انرژی مخصوص ثابت و معادلات معمول اوریفیس ارائه نمودند [۳]. درابیر^۶ در سال ۱۹۸۱ 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 به‌دست آورد [۴]. سوبرامانیا^۷ و شوکلا^۸ نیز در سال ۱۹۸۸ تحقیقات وسیعی در خصوص دسته‌بندی انواع جریان‌های شکل گرفته بر روی کف مشبک انجام دادند که نتایج آن در جدول ۱ آمده است [۵].

جدول ۱- انواع 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 از طول فوق بحرانی	زیر بحرانی
A3	زیر بحرانی	زیر بحرانی	زیر بحرانی
B1	فوق بحرانی	فوق بحرانی	پرش هیدرولیکی
B2	فوق بحرانی	در قسمتی از طول فوق بحرانی	زیر بحرانی

پس از تقسیم‌بندی 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

³ Orth et al.

⁴ Kuntzmann

⁵ Bouvard

⁶ Drobir

⁷ Subramanya

⁸ Shoukla

¹ Bottom Intake

² Knick Points

شتاب ثقل و α ضریب تصحیح سرعت در معادله انرژی است. همچنین عبارت dQ/dx میزان کاهش دبی در طول کف مشبک است که به شکل زیر و بر اساس رابطه دبی خروجی از اورفیس به دست می آید

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

که در این رابطه

E انرژی مخصوص جریان، C_d ضریب تخلیه یا ضریب آبگذری کف مشبک و ε درصد بازشدگی کف مشبک هستند [۷].

در مدل سازی جریان بر روی کف مشبک، مهم ترین 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 می باشد. در حالت کلی ضریب تخلیه کف مشبک را می توان 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 عمده ای از تحقیقات انجام شده بر روی کف مشبک مربوط به تخمین رابطه ای مناسب برای ضریب تخلیه کفهای مشبک بوده است. هر یک از محققان مختلف سعی نموده اند تا با دقت بیشتری عوامل مؤثر در ضریب تخلیه کف مشبک را شناسایی نموده و رابطه مناسب تری را برای تخمین ضریب مذکور برای هندسه های مختلف کف مشبک ارائه دهند. جدول ۲ خلاصه نتایج مطالعات برخی از جدیدترین تحقیقات انجام شده در خصوص تخمین ضریب تخلیه کف مشبک را نشان می دهد.

کانال های مستطیلی مورد آزمایش قرار گرفته اند. یکی از گسترده ترین تحقیقات انجام شده اخیر در خصوص رفتار آبگیرهای کفی، توسط برونلا و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۳ انجام گرفت [۶]. ایشان تحقیقاتی را با استفاده از کانال مستطیلی بر روی کفهای مشبک انجام دادند که در نهایت به رسم پروفیل سرعت، استخراج معادله ای 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.

۲- هیدرولیک جریان در آبگیرهای کفی

با توجه به نحوه قرارگیری کف مشبک، زمانی که جریان آب از روی آن می گذرد مقداری و یا تمام دبی جریان در طول کف مشبک کاهش می یابد. با فرض شرایط پایدار برای جریان عبوری، می توان 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 جریان های متغیر مکانی با کاهش دبی به صورت زیر است

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

که 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

¹ Brunella et al.

جدول ۲- خلاصه برخی از مطالعات اخیر انجام شده در خصوص برآورد ضریب تخلیه کفهای مشبک

محققان	سال	نوع کف مشبک	مقطع میله ها	رابطه به دست آمده برای تخمین ضریب تخلیه
شفاعی بجزستان و شکوهی راد [۸]	۱۳۷۶	میله های طولی	دایره ای	$C_d = 0.22 \cdot \varepsilon^{-0.79} \cdot Fr_1^{-0.286} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0.05}$
رزاز و مغربی [۹]	۱۳۸۷	میله های طولی	دایره ای	$C_d = 0.352 + 0.549 \log\left(\frac{d}{e_L}\right) + 0.162 \left(\frac{Re}{10^5}\right)^{1.659}$
		میله های عرضی	دایره ای	$C_d = 0.021 + 0.696 \log\left(\frac{d}{e_r}\right) + 0.723 \left(\frac{Re}{10^5}\right)^{0.548}$
کمان بدست و شفاعی بجزستان [۱۰]	۱۳۸۷	میله های طولی	دایره ای	$C_d = 0.752 - 0.141 Fr_1 + 0.118 \left(\frac{e}{L}\right) + 0.14 S_0$

۳- مواد و روشها

به منظور انجام آزمایش‌ها و ساخت مدل فیزیکی، از کانالی با اسکلت فلزی و دیواره‌هایی 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 برای انجام آزمایش‌ها، تعداد ۳ سازه کف مشبک به ابعاد ۳۰ در ۴۰ سانتی‌متر با میله‌های طولی و عرضی متقاطع از میلگردهای فولادی صاف با قطرهای ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر ساخته شد. میزان بازشدگی این کفها مطابق توصیه‌های محققان پیشین، حدود ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد در نظر گرفته شد [۹]. مطابق شکل ۲ بخشی از کف کانال در بالادست 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 ۵ متری از ابتدای کانال آزمایشگاهی نصب شد. برای 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 کالیبره شده برداشت شد و با یکدیگر مقایسه گردید. برداشت سرعت‌ها در هر مقطع عرضی در ۶ تراز ارتفاعی و ۱۱ موقعیت جانبی در کانال صورت گرفت. به عبارت دیگر برداشت سرعت‌ها در شبکه‌ای شامل ۶۰ نقطه انجام شد و پروفیل سرعت‌های به دست آمده در مقاطع مختلف با یکدیگر مقایسه گردید. از یکسان بودن توزیع سرعت‌ها در ۲ 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 [۱۱].

در پایین دست کف مشبک، کانال اصلی با استفاده از ورق‌های پلکسی گلاس^۱ به ضخامت ۶ 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، ۳ و ۴ اجزای مدل آزمایشگاهی ساخته شده را نشان می‌دهند.

ارتفاع مورد نیاز برای هر یک از کانال‌ها با توجه به حداکثر

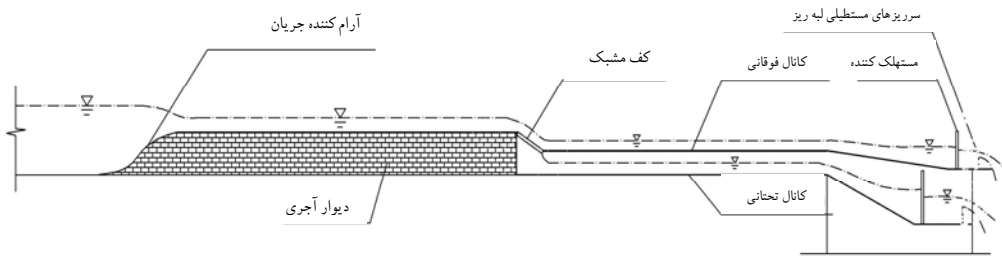
ضریب تخلیه کف مشبک، ε درصد بازشدگی کف مشبک، FF_1 عدد فرود در ابتدای کف مشبک، d قطر میله‌های کف مشبک، L طول کف مشبک در امتداد جریان، e_L فاصله آزاد خالص بین میله‌های طولی، e_T فاصله آزاد خالص بین میله‌های عرضی، R_e عدد رینولدز جریان و S_0 شیب طولی کف مشبک می‌باشند.

مطابق تحقیقات انجام گرفته در خصوص وضعیت قرارگیری میله‌ها در کف مشبک، محققان همگی بر این نکته اتفاق نظر دارند که کفهای مشبک ساخته شده از میله‌های طولی (در امتداد جریان رودخانه) قادر به انحراف دبی بیشتری نسبت به کفهای مشبک ساخته شده از میله‌های عرضی (عمود بر امتداد جریان) هستند [۸، ۹ و ۱۰]. بر این اساس اکثر کفهای مشبک نصب شده در رودخانه‌ها از نوع میله‌های طولی هستند.

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 می‌شوند و همواره در معرض برخورد قله 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 آبگیر کفی گردد. بر مبنای این ایده، در این پژوهش شکل جدیدی از آبگیر کفی مورد مطالعه قرار گرفت که شامل میله‌های طولی در امتداد جریان همراه با میله‌های عرضی جهت مهاربندی بود.

فرم جدید هندسه کف مشبک که قبلاً مطالعه‌ای در خصوص آن انجام نگرفته است، آبگیر کفی با میله‌های متقاطع است. فرم جدید کف مشبک به لحاظ سازه‌ای عملکرد بهتری نسبت به آبگیر کفی با میله‌های طولی دارد اما در خصوص برتری و یا عدم برتری هیدرولیکی فرم جدید، در این تحقیق سعی شد با در نظر گرفتن ضریب تخلیه دو نوع آبگیر کفی با میله‌های طولی و دیگری با میله‌های متقاطع، توانایی آنها در انحراف جریان عبوری از بستر اصلی در شرایط هیدرولیکی و هندسی یکسان، محاسبه شده و از این طریق عملکرد هیدرولیکی آنها مقایسه گردد. در نهایت با دانستن مزایا و معایب سازه‌ای و هیدرولیکی آبگیرهای کفی با میله‌های متقاطع و آبگیرهای کفی با میله‌های طولی، طراحان سازه‌های هیدرولیکی با توجه به شرایط پروژه، امکان به‌کارگیری یکی از دو نوع کف مشبک مورد اشاره را خواهند داشت.

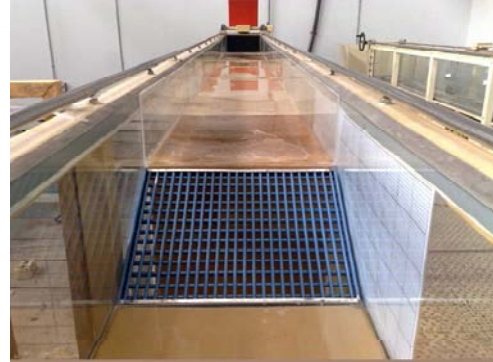
¹ Plexiglass



شکل ۲- نمایی کلی از مدل آزمایشگاهی ساخته شده

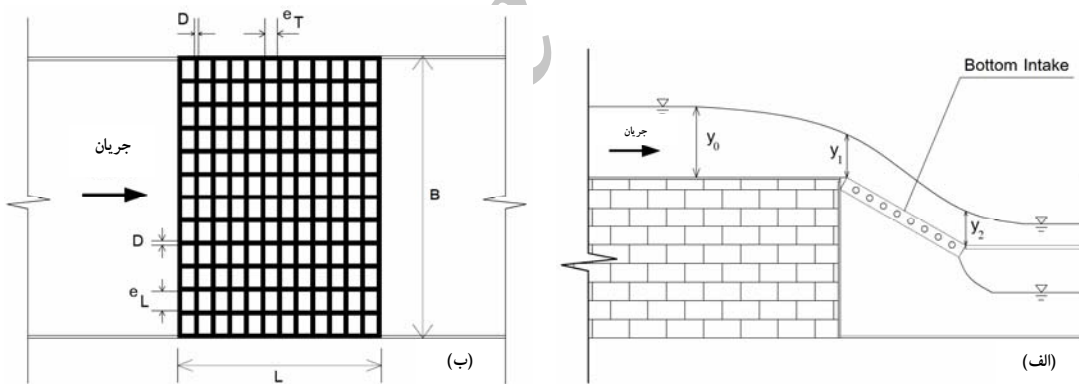


(ب)



(الف)

شکل ۳- الف- نمایی از کانال و کف مشبک با میله‌های متقاطع ب- سازه ۲ طبقه اندازه‌گیری جریان واقع در انتهای کانال اصلی



شکل ۴- الف- مقطع طولی و ب- پلان کف مشبک نصب شده داخل کانال و پارامترهای هندسی مدل

۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر در انتها بود. لازم به ذکر است در ابتدای آزمایش‌ها هر یک از این سرریزها به روش حجمی کالیبره شدند. به منظور کالیبراسیون سرریزهای مستطیلی ابتدا معادله جریان عبوری از روی سرریز به شکل زیر نوشته شد [۷]

$$Q_w = K.H_d^n \quad (۳)$$

که در این رابطه

ظرفیت پمپاژ و شرط عدم گرفتگی و انسداد جریان کانال تحتانی و عدم سرریزی از کانال فوقانی در دبی حداکثر، تعیین گردید. در انتهای کانال اصلی، کانال کوتاهی به صورت دو طبقه با چارچوب فلزی و بدنه پلکسی‌گلاس ساخته شد تا امکان اندازه‌گیری دبی جریان در هر یک از کانال‌های تحتانی و فوقانی، به صورت جداگانه فراهم گردد (شکل ۴- ب). کانال دو طبقه مذکور شامل موانع آرام کننده جریان و دو سرریز مستطیلی لبه تیز هوادهی شده به ارتفاع

استفاده از اصول آنالیز ابعادی و عاملهای بدون بعد، پارامترهایی که ضریب تخلیه آبیگر کفی به آنها وابسته بود، به دست آمدند. در حالت کلی اگر تابعی برای ضریب تخلیه کف مشبک نیاز باشد، این تابع می تواند شامل متغیرهایی به شکل زیر باشد

$$C_d = f_1 \left(\rho, \mu, g, \varepsilon, S_0, L, \frac{e_T}{e_L}, y_0, V_0 \right) \quad (5)$$

که در این رابطه 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_L فاصله آزاد خالص بین میله های عرضی، e_T فاصله آزاد خالص بین میله های طولی و e_T/e_L ضریب بی بعدی است که به نحوی نشان دهنده هندسه چشمه های کف مشبک است و می توان آنرا ضریب کشیدگی چشمه های کف مشبک نامید. براساس 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 گروه های بدون بعد $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_6$ (بدون در نظر گرفتن متغیر وابسته C_d) چنین می توان نوشت

$$C_d = f_2 \left(Re^{-1}, Fr_0^{-2}, \varepsilon, S_0, \frac{e_T}{e_L}, \frac{L}{y_0} \right) \quad (6)$$

که در این رابطه Re عدد رینولدز جریان و Fr_0 عدد فرود جریان نزدیک شونده به کف مشبک است. پارامترهای هندسی روابط مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است.

با توجه به آشفتگی جریان در مطالعات حاضر ($Re > 30000$) می توان از تأثیر عدد رینولدز صرف نظر نمود [۱۲ و ۱۳]. لذا رابطه ۶ به شکل زیر در می آید

$$C_d = f_2 \left(Fr_0^{-2}, \varepsilon, S_0, \frac{e_T}{e_L}, \frac{L}{y_0} \right) \quad (7)$$

به منظور شناخت دقیق رفتار هیدرولیکی کف مشبک با میله های 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 ۵ متغیر مستقل به دست آمده از آنالیز ابعادی با استفاده از روشهای آماری و به کارگیری نرم افزار تخصصی SPSS محاسبه گردید

¹ Buckingham

Q_w دبی عبوری از روی سرریز، H_h ارتفاع تیغه آب عبوری از روی سرریز و پارامترهای n و k مقادیر ثابتی هستند. سپس با لگاریتم گیری از طرفین رابطه بالا رابطه زیر به دست آمد

$$\text{Log} Q_w = \text{Log} K + n \text{Log} H_h \quad (4)$$

رابطه بالا معادله یک خط راست است که شیب و عرض از مبدأ آن به ترتیب برابر مقادیر n و $\text{Log} K$ است. در این تحقیق با داشتن ۱۰ دبی مختلف که هر یک با اندازه گیری حجمی جریان آب عبوری از روی سرریز مستطیلی محاسبه شده بود و همچنین اندازه گیری ارتفاع تیغه آب عبوری در فاصله حداقل H_h ۳ از لبه سرریز برای هر یک از دبی های مذکور، ضرایب n و k برای هر یک از دو سرریز مستطیلی مورد استفاده، محاسبه گردید.

با هدف حذف تلاطم سطح آب و افزایش دقت قرائت دبی های کانال های تحتانی و فوقانی، موانع آرام کننده جریان در بالادست سرریزهای مستطیلی نصب شدند. علاوه بر دبی های کانال های تحتانی و فوقانی، عمق آب در بالادست و بر روی کف مشبک توسط اندازه گیر سوزنی عمق با دقت ± 0.5 میلی متر قرائت گردید. پارامترهای مختلف آزمایش و مقادیر هر یک در جدول ۳ ذکر گردید. با توجه به مقادیر و تعداد پارامترهای جدول مذکور، مجموعاً ۸۱ سری آزمایش بر روی کف مشبک با میله های متقاطع انجام گرفت. با راه اندازی مدل و عبور دادن دبی های مختلف جریان آب زلال (بدون رسوب)، دبی منحرف شده Q_h و دبی باقیمانده در کانال Q_f توسط سرریزهای مستطیلی لبه تیز اندازه گیری شده و در نهایت داده های خام برای ۸۱ سری آزمایش به دست آمدند.

جدول ۳- پارامترهای آزمایش

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	۳ دبی در محدوده ۱۰ تا ۳۰

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی رفتار هیدرولیکی کف مشبک با میله های متقاطع و به دست آوردن تابعی برای تخمین ضریب تخلیه کف مشبک، با

[۱۴]. 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 $\frac{L}{y_0}$ ، S_0 ، ε و Fr_0^{-2} دارد. به عبارت دیگر متغیرهای مستقل مورد اشاره، بیشترین سهم را در برآورد مقادیر مشاهداتی متغیر وابسته C_d به خود اختصاص داده‌اند. به منظور 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 غیرخطی انجام گرفت. با استفاده از برازش خطی به روش گام هوشمند^۱ که شامل دخالت همزمان متغیرها و بررسی همبستگی تک تک متغیرهای مستقل با متغیر وابسته و کنار گذاشتن متغیرهای مستقل با سطح معنی داری بیش از ۵ درصد بود، رابطه شماره ۱ از جدول ۴ به دست آمد.

برخلاف برازش خطی که محدود به مدل‌های خطی است، در برازش غیرخطی می توان مدل‌هایی با ضابطه‌های دلخواه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته برقرار کرد. به دلیل تنوع مدل‌های غیرخطی عملاً امکان برآورد پارامترهای تمام مدل‌ها به روش تحلیلی وجود ندارد اما به کمک روشهای عددی این کار میسر است. یکی از روشهای مرسوم برازش غیرخطی، تغییر متغیر و تبدیل تابع برازشی غیرخطی 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 می آید که متغیرهای آن، لگاریتم متغیرهای مستقل مسئله هستند [۱۵ و ۱۶]. 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 هوشمند انجام شد. رابطه برازشی لگاریتمی

به دست آمده از این روش به عنوان رابطه شماره ۲ در جدول ۴ آمده است.

علاوه بر روش مذکور برازش غیرخطی واقعی (بدون تغییر متغیر) با مدل توانی مابین متغیر وابسته C_d و آن دسته از متغیرهای مستقلی که بر اساس نتایج تحلیل همبستگی دارای بیشترین همبستگی با متغیر وابسته بودند، به صورت دستی و تکراری انجام گردید. به این معنی که تابع توانی با توان‌های مجهول در نرم افزار SPSS تعریف گردید و در هرگام انجام برازش، با توجه به حد پایین و بالای فاصله اطمینان ۹۵ درصد، ضرایب مربوط به متغیرهای مستقلی که در سطح ۵ درصد معنی دار نبودند، حذف گردید و سپس برازش غیرخطی جدیدی با متغیرهای مستقل باقیمانده صورت پذیرفت [۱۴]. در نهایت روابط برازش داده شده بر نتایج آزمایشگاهی در سه حالت خطی چندگانه، غیرخطی با تغییر متغیر و غیرخطی واقعی همراه با ضرایب تعیین R^2 مربوطه و ریشه متوسط مربعات خطا^۲ در جدول ۴ ارائه گردید. مطابق جدول ۴ رابطه برازشی غیرخطی (رابطه شماره ۳) به دلیل در نظر گرفتن همبستگی‌های غیرخطی جزئی بین متغیر مستقل و متغیرهای وابسته دارای ضریب تعیین بالاتری نسبت به مدل‌های دیگر برازش یافته بود. از سوی دیگر، ریشه متوسط مربعات خطا در رابطه برازشی غیرخطی حداقل است که به معنی انطباق مناسب‌تر مدل با داده‌ها است. در نهایت رابطه شماره ۳ از جدول ۴ به عنوان برانده‌ترین رابطه برای اطلاعات آزمایشگاهی موجود در این تحقیق انتخاب گردید. در این تحقیق برای اطمینان از صحت و مناسب بودن مدل برازشی غیرخطی پیشنهادی، یا به عبارت دیگر برای تأیید نیکویی برازش، صحت فرضیات زیر بررسی گردید [۱۴ و ۱۵].

² Root of Mean Square Error (RMSE)

¹ Step Wise

جدول ۴- معادلات برازش داده شده، ضرایب تعیین مربوطه و ریشه متوسط مربعات خطا

شماره رابطه	رابطه برازشی به دست آمده	R^2	RMSE
۱	$C_d = 1.170 - 0.042\left(\frac{L}{y_0}\right) - 0.719(\varepsilon) - 0.002(S_0) - 0.636(Fr_0^{-2})$	۰/۸۹۴	۰/۰۳۲
۲	$\text{Log}C_d = -0.514 - 0.597\text{Log}\left(\frac{L}{y_0}\right) - 0.713\text{Log}(\varepsilon) - 0.198\text{Log}(S_0) - 1.142\text{Log}(Fr_0^{-2})$	۰/۹۰۳	۰/۰۳۱
۳	$C_d = 0.2746\left(\frac{L}{y_0}\right)^{-0.5495} .(\varepsilon)^{-0.9888} .(S_0)^{-0.7018} .(Fr_0^{-2})^{-1.2815}$	۰/۹۰۴	۰/۰۳۰

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 پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی برای متغیر وابسته (C_d) و مقادیر واقعی به دست آمده از آزمایش‌ها برای همان متغیر است.

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 نرم‌افزار SPSS، تأیید گردید.

ثابت بودن واریانس باقیمانده‌های مدل برازشی پیشنهادی به معنی بی‌اعتباری مساوی برای تمام باقیمانده‌ها است. 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 پیش‌بینی شده همان متغیر به کمک نرم‌افزار 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 به دلیل پراکنندگی نامنظم مانده‌ها، ثابت بودن واریانس باقیمانده‌های مدل پیشنهادی تأیید گردید [۱۵ و ۱۶].

فرض استقلال باقیمانده‌ها نیز با استفاده از آماره دوربین-واتسون^۱ کنترل گردید. مقدار این آماره برای رابطه برازشی موجود که توسط نرم‌افزار SPSS محاسبه شد، برابر $2/081$ بود که مقدار قابل قبولی است و نشان دهنده مستقل بودن مقادیر این باقیمانده‌ها است [۱۵].

با توجه به تأیید فرضیات نرمال بودن باقیمانده‌های مدل پیشنهادی، ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها، استقلال واریانس باقیمانده‌ها، ضریب تعیین و RMSE به دست آمده، می‌توان گفت رابطه برازشی غیرخطی پیشنهاد شده در جدول ۴ قابل قبول و برازنده داده‌های آزمایشگاهی موجود است. اما در خصوص مقدار خطای برآورد رابطه برازشی غیرخطی به دست آمده، رابطه ۸ برقرار است

$$\text{خطای نسبی} = \frac{(C_d)_c - (C_d)_a}{(C_d)_a} \times 100 \quad (8)$$

که در این رابطه

میزان خطای نسبی بین $(C_d)_a$ به عنوان ضریب تخلیه اندازه‌گیری شده و $(C_d)_c$ به عنوان ضریب تخلیه تخمین زده شده کف مشبک به کمک رابطه برازشی غیر خطی، محاسبه می‌گردد. میانگین و

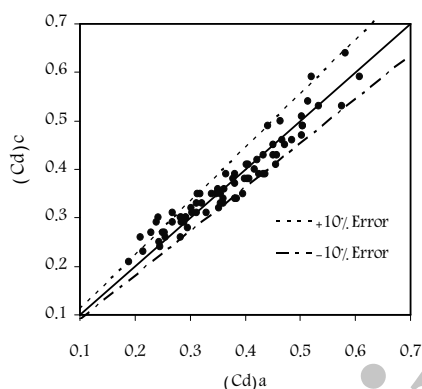
انحراف استاندارد خطای نسبی محاسبه شده از رابطه برازشی غیرخطی به ترتیب $0/81$ و $8/4$ درصد محاسبه شد.

همچنین برای تخمین بازه مطمئن خطای نسبی، از رابطه زیر استفاده می‌شود

$$X \approx N(\mu, \sigma^2) \quad (9)$$

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

رابطه بالا بیانگر این است که اگر X از توزیع نرمال با میانگین μ و واریانس σ^2 پیروی کند، آنگاه در سطح اعتماد $(1-\alpha)\%$ ، X بین مقادیر $\mu - Z_{a/2}\sigma$ و $\mu + Z_{a/2}\sigma$ قرار خواهد گرفت. با توجه به رابطه ۹ و سطح اعتماد ۹۵ درصد، خطای رابطه برازشی غیر خطی در بازه $\pm 10\%$ قرار می‌گیرد [۱۷]. در نهایت شکل ۵ مقادیر C_d مشاهده شده را در مقابل مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه برازشی غیر خطی پیشنهادی، نشان می‌دهد.



شکل ۵- ترسیم مقادیر C_d مشاهده شده در مقابل مقادیر C_d به دست آمده از رابطه برازشی غیرخطی پیشنهادی و نمایش بازه خطا

به منظور مقایسه عملکرد هیدرولیکی آبگیرهای کفی با میله‌های متقاطع و آبگیرهای کفی با میله‌های طولی می‌توان در شرایط هندسی یکسان (طول، عرض، شیب طولی و درصد بازشدگی یکسان کفهای مشبک) و شرایط هیدرولیکی یکسان، مقادیر دبی‌های انحراف یافته توسط هر یک از این دو نوع کف مشبک را با یکدیگر مقایسه نمود.

برای این منظور داده‌های مربوط به ۸۱ سری آزمایش انجام شده بر روی کف مشبک با میله‌های متقاطع مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا مقادیر ضریب تخلیه کف مشبک با میله‌های متقاطع به کمک رابطه شماره ۳ از جدول ۴ محاسبه گردید، سپس دبی جریان انحراف یافته توسط این نوع کف مشبک به کمک رابطه شماره ۲ محاسبه گردید.

در مرحله بعد ضریب تخلیه کف مشبک با میله‌های طولی با

¹ Durbin-Watson

استفاده از همان داده‌های ۸۱ سری آزمایش انجام شده بر روی کف مشبک با میله‌های متقاطع و به‌کارگیری جدیدترین روابط پیشنهادی توسط شفافی بجستان و شکوهی راد، کمان بدست و شفافی بجستان و رزاز و مغربی که در جدول ۲ ارائه شدند، محاسبه گردید [۸، ۹ و ۱].

لازم به‌ذکر است پارامترهای هندسی مربوط به کف مشبک با میله‌های طولی که در روابط مذکور وجود دارند (قطر و فاصله آزاد خالص بین میله‌ها) به‌نحوی استخراج شدند که اولاً درصد بازشدگی دو نوع کف مشبک یکسان باشد و ثانیاً قطر میله‌های مورد استفاده در دو نوع کف مشبک تفاوت کمی داشته باشد. پس از محاسبه ضریب تخلیه آبگیر کفی با میله‌های طولی، دبی انحراف یافته توسط آن به‌کمک رابطه شماره ۲ محاسبه گردید.

در نهایت نسبت دبی منجر شده توسط کف مشبک با میله‌های طولی به کف مشبک با میله‌های متقاطع به‌کمک روابط مختلف تخمین ضریب تخلیه کفهای مشبک، برای ۸۱ سری داده‌های آزمایشگاهی موجود محاسبه گردید. میانگین و انحراف استاندارد نسبت‌های دبی منجر شده در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵- مقایسه نسبت دبی منجر شده توسط کف مشبک با میله‌های طولی به کف مشبک با میله‌های متقاطع

رابطه مورد استفاده در تخمین ضریب تخلیه کف مشبک با میله‌های طولی	شفافی بجستان و شکوهی راد [۸]	کمان بدست و شفافی بجستان [۱۰]	رزاز و مغربی [۹]
میانگین نسبت دبی منجر شده توسط کف مشبک با میله‌های طولی به کف مشبک با میله‌های متقاطع	۱/۲۵	۱/۲۹	۱/۳۳
انحراف استاندارد	۶/۰۸	۴/۵۶	۳/۳۴

از جدول ۵ می‌توان دریافت کفهای مشبک با میله‌های طولی در مقایسه با کفهای مشبک با میله‌های متقاطع که در این تحقیق معرفی گردید، در شرایط یکسان هندسی و هیدرولیکی می‌توانند به میزان

۲۵ تا ۳۳ درصد دبی بیشتری را منحرف نمایند. لذا به لحاظ هیدرولیکی کفهای مشبک با میله‌های طولی عملکرد بهتری نسبت به کفهای مشبک با میله‌های متقاطع دارند. اما در پروژه‌های انحراف بزرگ، به‌دلایلی از قبیل طول زیاد کف مشبک و یا وجود رسوبات درشت دانه و سیلابهای شدید، امکان به‌کارگیری آبگیرهای کفی با میله‌های طولی با محدودیتهای سازه‌ای و اجرایی همراه است. در این موارد با احتساب کاهش ۲۵ تا ۳۳ درصد در میزان دبی انحراف یافته می‌توان از آبگیر کفی با میله‌های متقاطع استفاده نمود.

۵- نتیجه‌گیری

کفهای مشبک، سازه‌های فلزی هستند که به‌منظور 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 ۸۱ سری آزمایش بر روی کف مشبک ساخته شده از میله‌های متقاطع با درصدهای بازشدگی، شیب‌ها، طولها و دبی‌های مختلف جریان آب زلال (بدون رسوب) انجام گرفت و در هر مورد ضریب تخلیه کف مشبک محاسبه گردید. برای مطالعه عوامل مؤثر بر ضریب تخلیه این نوع از کفهای مشبک، ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی تعداد ۵ پارامتر هندسی و هیدرولیکی بی‌بعد به‌دست آمد. سپس با دخالت همزمان متغیرها و انجام برازش به کمک نرم‌افزار SPSS، رابطه برازشی غیر خطی به‌منظور تخمین مقادیر ضریب تخلیه کف مشبک به‌دست آمد و صحت آن با توجه به معیارهای آماری موجود بررسی گردید. در انتها به‌منظور مقایسه رفتار هیدرولیکی نوع جدید کف مشبک با کفهای مشبک مرسوم که دارای میله‌های طولی هستند، دبی قابل انحراف توسط هر یک با استفاده از روابط موجود برای ضریب تخلیه در شرایط یکسان به‌دست آمد. نتایج این مقایسه نشان داد اگرچه کفهای مشبک دارای میله‌های متقاطع به لحاظ سازه‌ای عملکرد بهتری در مقابل نیروهای وارده و تغییر شکلهای ناشی از آن دارند، ولی در شرایط یکسان نسبت به کفهای مشبک دارای میله‌های طولی، دبی کمتری را به‌داخل کانال آبگیر منحرف می‌کنند.

۶- مراجع

- 1- Andaroodi, M. (2005). "Standardization of civil engineering works of small hydropower plants and development of an optimization tool." *Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH)*, Switzerland.
- 2- Orth, J., Chardonnet, E., and Meynardi, G. (1954). "Study of bottom type water intake grids." *J. of white coal*, 9 (6), 343-351. (In French)
- 3- Nosedá, G. (1955). "Operation and design of bottom intake racks." *Proc. VI General Meeting IAHR*, 1-11.
- 4- Righetti, M., and Lanzoni, S. (2008). "Experimental study of the flow field over bottom intake racks." *J. of Hydraulic Eng.*, 134, (1), 15-22.

- 5- Subramanya, K., and Shukla, S. K. (1988). "Discharge diversion characteristics of trench weirs." *J. of Institution of Eng.*, 6, 163-178.
- 6- Brunella, S., Hager, W. H., and Minor, H. E. (2003). "Hydraulics of bottom rack intake." *Int. J. of Hydraulic Eng.*, 129 (1), 2-10.
- 7- Hosseini, S. M., and Abrishami, J. (2007). *Open channel hydraulics.* 17th Ed., Emam Reza Univ. Pub., Mashhad. (In Persian)
- 8- Shafaei Bajestan, S. M., and Shokohirad, Gh. (1997). "Experimental investigation of hydraulic and sediment specifications of bottom intakes." *Int. J. of Eng. Science*, 8, 41-53. (In Persian)
- 9- Razaz, M., and Faghfor Maghrebi, M. (2008). "Experimental and numerical investigation of bottom intakes." *J. of Tabriz University*, 36 (3), 23-35. (In Persian)
- 10- Kamanbedast, A., and Shafaei Bajestan, S. M. (2008). "Investigation of rack slope and porosity in bottom intakes using physical model." *9nd National Conference on Management of Irrigation and Drainage Networks*, Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Persian)
- 11- Bonakdari, H., Zinatizadeh Lorestani, A., and Panahiyan, A. (2008). "Calculation of developing length in open channel with 3D fluid analysis." *4th National Civil Eng. Congress*, Tehran University, Tehran, Iran. (In Persian)
- 12- Forghani Alahabadi, R. (1995). "Investigation of effective parameters on bottom racks discharge." MSc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)
- 13- Heydari Nezhad, Gh. (1997). *Physical and hydraulic models*, 2nd Ed., Chamran University Pub., Ahvaz, Iran. (In Persian)
- 14- Esmaeliyan, M. (2005). *Handbook of SPSS12*, 2nd Ed., Naghoos Pub., Tehran, Iran. (In Persian)
- 15- Rezayi, M., and Soltani, A. (2008). *Introduction to applied regression analysis*, 3rd Ed., Isfahan University of Technology Pub., Isfahan, Iran. (In Persian)
- 16- Bitz Duglos, M. (2002). *Non-Linear Regression analysis*, Ferdowsi Universty of Mashhad Pub., Mashhad, Iran. (In Persian)
- 17- Faghfour Maghrebi, M., and Rezai Nasab, M.S. (2005). "Discharge estimation of circular sewer using combined device of weir-sluice gate." *J. of Water and Wastewater*, 55, 60-68. (In Persian)