

بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان زلال در آبگیرهای کف متخلخل

سلمان پوراسماعیل^۱ - محموددغفور مغربی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱

چکیده

آبگیرهای کفی یکی از معمول ترین سازه‌های انحراف آب در رودخانه‌های با شیب تند می باشد. به دلیل مشکلاتی چون ناپایداری جریان، گرفتگی دهانه آبگیر توسط شاخ و برگ درختان یا رسوبات، یخ‌زدگی، پوسیدگی، لرزش و زنگ زدگی میله‌ها در آبگیرهای کف مشبک، پیشنهاد استفاده از آبگیرهای کف متخلخل به عنوان نوع جدیدی از آبگیرهای کفی مطرح گردیده است. در این پژوهش با ساخت مدل آزمایشگاهی، دبی منحرف شده در شرایط مختلف دبی کل، دانه بندی محیط متخلخل، شیب سطح فوقانی، طول و ارتفاع آبگیر، اندازه‌گیری و پارامترهای مؤثر شناسایی گردید. همچنین روابط ارائه شده در تحقیقات گذشته با نتایج حاصل از آزمایشات جدید مقایسه و علت عدم تطابق این روابط مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به عدم جوابگویی مدل‌های گذشته، با استفاده از روش تجزیه و تحلیل ابعادی و رگرسیون چند متغیره بین مشاهدات آزمایشگاهی، معادلات جدیدی برای تخمین دبی انحرافی و ضریب آبگذری، ارائه گردید. برخلاف مدل‌های پیشین، مدل ریاضی ارائه شده کاملاً با مبانی هیدرولیکی رفتار آبگیرهای کف متخلخل و نتایج آزمایشگاهی تطابق داشته و قابلیت تعمیم در شرایط واقعی را دارا می باشد.

واژه‌های کلیدی: جریان‌های متغیر مکانی، آبگیر کفی، آبگیر کف متخلخل، رودخانه‌های کوهستانی

مقدمه

سازه‌ها آبگیرهای کف مشبک گفته می‌شود. در یک پژوهش آماری توسط لاند، مشکلات ایجاد شده برای ۵۰ نیروگاه برق‌آبی کوچک در کشور نروژ - که در آن‌ها آبگیری از رودخانه با استفاده از آبگیرهای کف مشبک انجام شده است - بررسی گردیده است (جدول ۱) (۱۳). تحقیقات مشابه انجام شده توسط هوبر نیز مؤید مشکلات گزارش شده توسط لاند می‌باشد (۱۰). بر این اساس عمده‌ترین مشکل در آبگیرهای کف مشبک مربوط به گرفتگی آشغالگیر در اثر رسوبات، یخ و قطعات شناور موجود در آب و تجمع رسوبات رد شده از آشغالگیر در کانال انتقال آب در پایین دست آبگیر، می‌باشد.

برای غلبه بر مشکلات موجود در آبگیرهای کف مشبک، ایده جایگزینی یک محیط متخلخل بجای شبکه آشغالگیر مطرح گردیده است. این ایده اولین بار در طرح تحقیقاتی "سیستم جدید آبگیری از کف در رودخانه‌ها با محیط متخلخل" برای شرکت سه‌امی آب منطقه‌ای خراسان رضوی، تدوین گردیده است (۲ و ۵). در این نوع آبگیر، پس از حفر ترانشه‌ای در بستر رودخانه، مصالح با دانه‌بندی مناسب در داخل آن ریخته شده و سپس از طریق یک کانال زیرسطحی جریان عبوری از محیط متخلخل جمع آوری و به تاسیسات مربوطه منتقل می‌گردد. در شکل ۱ نمای کلی از یک آبگیر کف متخلخل ترسیم شده است.

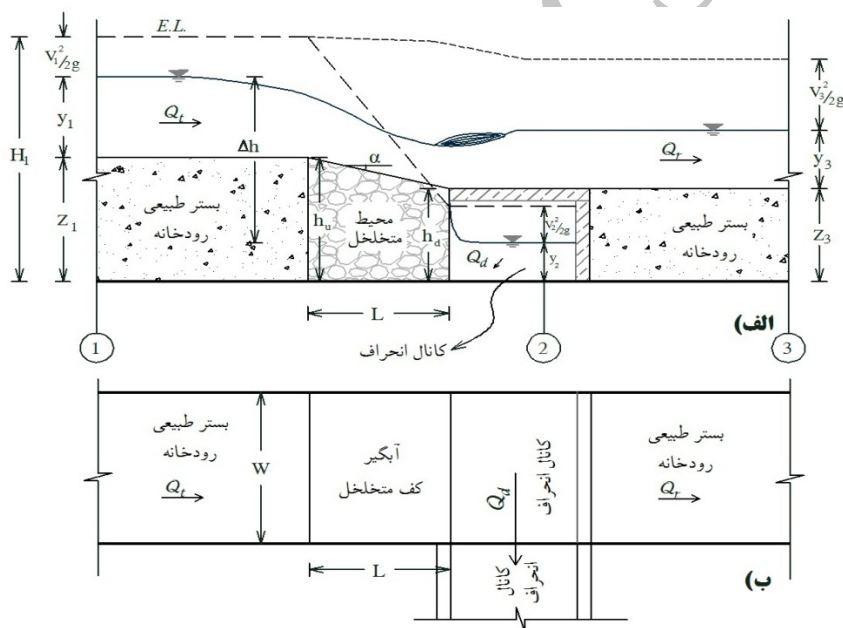
به دلیل عمق کم جریان و محدودیت شرایط برای احداث انواع آبگیر کناری و یا جلویی، در رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند و بار رسوبات درشت دانه، مناسب‌ترین نوع سازه آبگیری، آبگیر کفی می‌باشد (۱۶). از آنجا که نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در کنار رودخانه‌های کوهستانی با شیب زیاد ساخته می‌شوند، امروزه آبگیرهای کفی به عنوان یکی از اجزای مهم پروژه‌های برق آبی کوچک شناخته می‌شوند که وظیفه آبگیری از رودخانه و تامین دبی لازم برای به حرکت در آوردن توربین‌های نیروگاه را برعهده دارند (۱). همچنین در محل‌های تغییر شیب و یا پایین افتادگی‌های ناگهانی بستر رودخانه، استفاده از این آبگیرها به صورت شیب‌دار مقدور است. ساده‌ترین نوع آبگیرهای کفی، تعبیه یک کانال در کف مجرا و در راستای عمود بر جریان آب می‌باشد که کاربرد وسیعی در شبکه جمع آوری آبهای سطحی دارد. معمولاً برای جلوگیری از ورود رسوبات و آشغال به این مجرا از آشغالگیر استفاده می‌شود. در اینصورت به این

۱ و ۲ - دانشجوی دکتری و استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

* - نویسنده مسئول: (Email: maghrebi@ferdowsi.um.ac.ir)

جدول ۱- نتایج آمارگیری لاند در خصوص مشکلات ۵۰ نیروگاههای برقابی کوچک (۱۳)

تعداد آبیگرهای کفی دارای مشکل	نوع مشکل پیش آمده	طبقه‌بندی مشکلات
۱۹	گرفتگی ناشی از شاخه‌ها و برگ‌های درختان، زباله‌ها	اشغال‌های شناور
۲	مشکلات دیگر	
۵	ایجاد گردابه، محبوس شدن هوا در آب	هوا
۱	وجود حباب‌های هوا در لوله	
۱۱	تجمع رسوب در حوضچه آبیگر	رسوبات
۲	تجمع رسوب بر روی پره‌های توربین	
۳	کریستال‌های یخ روی توری کف مشبک	یخ
۴	تجمع کریستال‌های یخ در ورودی جریان به آبیگر	
۱	گیرکردن قطعات یخ شناور بین میله‌های توری	
۱	صدمات ناشی از قطعات یخ شناور	
۱	مشکلات یخ‌زدگی در محدوده سرریز آبیگر	
۱	یخ زدگی دریچه‌ها	
۴	سایر مشکلات غیرقابل تشخیص ناشی از یخ‌زدگی	
۰	-	مشکلات زیست محیطی



شکل ۱- الف) مقطع طولی از موقعیت آبیگر کف متخلخل همراه با مشخصات هیدرولیکی جریان و ب) پلان آبیگر کف متخلخل و کانال انحراف

طرفی به دلیل کارایی این آبیگرها و امکان استفاده آنها بخصوص در نیروگاههای کوچک برقابی، لزوم انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری است. با توجه به بررسی به عمل آمده در رابطه با تحقیقات گذشته، مشکلاتی در روابط ارائه شده برای تخمین دبی منحرف شده توسط این آبیگرها و عدم تطابق روابط با مبانی هیدرولیکی مورد انتظار ملاحظه گردید. بر این اساس در این پژوهش با ساخت یک مدل آزمایشگاهی، رفتار هیدرولیکی آبیگرهای کف متخلخل و تاثیر

از مهم‌ترین مزایای استفاده از این روش جلوگیری از ورود رسوبات به شبکه انتقال، در دسترس بودن مصالح، عدم نیاز به احداث سازه‌های جانبی پیچیده، هزینه کم طراحی، اجرا و نگهداری و می‌باشد. در عین حال باید اذعان نمود که آبیگرهای کف متخلخل، نسبت به کف‌های مشبک، گذردهی کمتری دارند (۳). با توجه به تازگی ایده استفاده از آبیگرهای کف متخلخل، تحقیقات انجام شده در رابطه با این آبیگرها بسیار اندک است. از

زاویه سطح آبگیر نسبت به افق برابر با $\tan^{-1}(S_p)$ ، S_p شیب سطح آبگیر، g شتاب جاذبه زمین، y_1 عمق جریان در بالادست، y_2 عمق جریان در کانال تحتانی، z_1 اختلاف تراز کف کانال تحتانی و بالادست آبگیر می‌باشد (شکل ۱). همچنین Re عدد رینولدز جریان، Θ تنش برشی بدون بعد (فاکتور شیلدز)، σ نسبت ته نشینی رسوبات، d_{50} قطر متوسط مصالح متخلخل درون آبگیر، R_{50} نسبت قطر متوسط مصالح آبگیر به رسوبات، n ضریب پوکی مصالح موجود در آبگیر - نسبت حجم فضای خالی (∇_v) به حجم کل مصالح (∇_t) - و H_1 هد کل جریان در بالادست آبگیر نسبت به تراز کف کانال تحتانی می باشد که با رابطه:

$$H_1 = z_1 + y_1 + \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

تعریف می گردد. پارامتر C_d نیز ضریب آبگذری آبگیر نامیده شده و برای جبران افت‌ها و سایر فرضیات ساده‌کننده در نظر گرفته شده است.

با توجه به بررسی های به عمل آمده و مقایسه روابط ارائه شده با مبانی هیدرولیکی عملکرد آبگیرهای کف متخلخل، لزوم بازنگری و توجه به موارد ذیل ضروری می نماید:

۱- در روابط ارائه شده در جدول ۲ عبارت $WLn/\cos \alpha$ واقع برابر مساحت فضای خالی در سطح فوقانی آبگیر کفی (A_F) می باشد که جریان آب از آن وارد آبگیر کفی می‌گردد. می دانیم که دبی برابر با ضرب داخلی بردار سرعت و بردار سطح می‌باشد ($Q = \mathbf{V} \cdot \mathbf{A}$). بر این اساس بخش باقیمانده در معادله تخمین Q_d ، در واقع سرعت جریان در مجاری آبگیر را محاسبه می‌کند (۱۱). همچنین، با توجه به اینکه جریان منحرف شده از کانال اصلی به درون آبگیر، در راستای قائم می باشد، لذا در نظر گرفتن عامل مساحت بصورت سطح مایل، موجب برآورد اشتباه در میزان دبی انحرافی می گردد.

بر این اساس بهتر است بجای سطح مایل از سطح عمود بر بردار سرعت که با توجه به تعاریف پارامترهای ذکر شده برابر با $A = WLn$ می‌باشد، استفاده گردد.

۲- برای تخمین سرعت در معادلات فوق الذکر از رابطه برنولی بین کانال اصلی و کانال انحراف با فرضیات ساده شونده، استفاده شده است. در معادلات تیپ C و D از عمق جریان در کانال انحراف صرف نظر شده است. همچنین هد سرعت در کلیه معادلات بجز معادله تیپ C اندک فرض شده است. علاوه بر این افت هد بین جریان در کانال اصلی و کانال انحراف در معادله تیپ B برابر اختلاف ارتفاع بین کانال بالادست و انحراف (z_1) فرض شده و در سایر معادلات از آن صرف نظر شده است.

عوامل مختلف بر میزان دبی منحرف شده توسط آن بررسی گردید. همچنین بر اساس رگرسیون غیر خطی روی داده های آزمایشگاهی و با استفاده از مبانی هیدرولیکی و تجزیه و تحلیل ابعادی، روابط مناسبی برای تخمین دبی انحراف یافته و ضریب آبگذری آبگیر، ارائه گردیده است.

مروری بر تحقیقات گذشته

سابقه تحقیقات در آبگیرهای کف مشبک از سال ۱۹۳۹ توسط گاروت و ۱۹۴۷ توسط دومارچی آغاز می‌گردد و تاکنون نیز ادامه دارد (۸، ۹ و ۱۲). با وجود این سابقه طولانی برای تحقیقات در کف‌های مشبک، در رابطه با کف‌های متخلخل پژوهش‌های اندکی انجام شده است. بر اساس تحقیقات انجام شده و پژوهش حاضر معادله حاکم بر پروفیل سطح آب در کانال تحت تاثیر آبگیرهای کفی از نوع معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی می‌باشد. فرم کلی این معادله به صورت رابطه ۱ می باشد:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right) \left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \frac{\alpha Q^2 T}{gA^3}} \quad (1)$$

در معادله فوق S_o شیب کف کانال، S_f گرادیان افت انرژی و T عرض کانال در تراز سطح آب در هر مقطع می‌باشد. این معادله حالت کلی محاسبه پروفیل سطح آب در کانال اصلی، در حالت جریان متغیر مکانی ($S.V.F$) و با در نظر گرفتن فرضیات ۷ گانه مربوطه می‌باشد. با استفاده از فرضیات ساده شونده موستکو، مبنی بر کانال با مقطع مستطیلی، جریان یکنواخت و ثابت بودن انرژی مخصوص E در طول آبگیر کفی، معادله ۱ به صورت رابطه زیر بدست می‌آید (۱۴):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Qy \left(-\frac{dQ}{dx}\right)}{gB^2 y^3 - Q^2} \quad (2)$$

در این رابطه B عرض کانال مستطیلی می‌باشد. این معادله با تقریب مناسبی برای کانال‌های مستطیلی در آبگیرهای کفی با شیب طبیعی رودخانه، قابل پذیرش می‌باشد. میزان دبی منحرف شده توسط آبگیر نیز برابر با $Q_d = \int_0^L \frac{dQ}{dx} dx$ می باشد. در جدول ۲ کلیه روابطی که تاکنون برای تخمین Q_d در آبگیرهای کف متخلخل، پیشنهاد گردیده، ارائه شده است.

در این روابط W عرض آبگیر، L طول تصویر افقی آبگیر، α

جدول ۲- روابط ارائه شده در تحقیقات مختلف برای تخمین Q_d در آبگیرهای کف متخلخل

تیپ معادله	Q_d	C_d	مرجع
A	$C_d \frac{WL}{\cos \alpha} n \sqrt{2g(y_1 + z_1 - y_2)}$	$\propto \frac{Fr_1^{1.092} \Theta^{0.968} Re^{0.572} \sigma^{0.269}}{i^{3.157} R_{50}^{0.284} (S_p + y_1/L)^{0.074}} *$	نقوی و همکاران، (۱۵)
B	$C_d \frac{WL}{\cos \alpha} n \sqrt{2g(y_1 - y_2)}$	$\propto \frac{Fr_1^{0.739} (y_1/d_{50})^{0.509}}{n^{8.518} (S_p + y_1/L)^{0.363}}$	کوروش وحید و همکاران، (۱۱)
B	$C_d \frac{WL}{\cos \alpha} n \sqrt{2g(y_1 - y_2)}$	$\propto \frac{Fr_1^{0.5} \Theta^{0.7} Re^{0.45} \sigma^{0.261} (S_p + y_1/L)}{i^{2.8} R_{50}^{0.356}} *$	نقوی و همکاران، (۷)
C	$C_d \frac{WL}{\cos \alpha} n \sqrt{2gH_1}$	$\propto \frac{Fr_1^{0.664} (y_1/d_{50})^{0.440}}{n^{7.877} (S_p + y_1/L)^{0.332}}$	کوروش وحید و همکاران، (۴)
D	$C_d \frac{WL}{\cos \alpha} n \sqrt{2g(y_1 + z_1)}$	$\propto \frac{Fr_1^{0.447} (y_1/d_{50})^{0.719}}{n^{9.565} (S_p + y_1/L)^{0.219}} \quad \text{If } Fr_1 < 1$	کوروش وحید و همکاران، (۴)
D	$C_d \frac{WL}{\cos \alpha} n \sqrt{2g(y_1 + z_1)}$	$\propto \frac{Fr_1^{0.932} (y_1/d_{50})^{0.523}}{n^{8.872} (S_p + y_1/L)^{0.490}} \quad \text{If } Fr_1 > 1$	کوروش وحید و همکاران، (۴)

*- رابطه برای تخمین Q_d در جریان رسوبدار ارائه شده است.

که مصالح درشت تر از شن می باشد، از نظر تئوریک می باید رابطه ضریب آبگذری با عدد فرود معکوس و با ضریب پیوکی و قطر ذرات، مستقیم باشد.

بر این مبنا به نظر می رسد نتایج تحقیقات گذشته قابلیت تعمیم به شرایط کلی را نداشته و صرفاً بر نتایج رگرسیون داده های آزمایشگاهی محدود بنا گردیده است. در پژوهش انجام شده نتایج آزمایشات با فرمولهای ارائه شده در مراجع گذشته مورد مقایسه قرار گرفت. بر این اساس کمترین خطا در حالتی که $y_1 \geq y_2$ است، مربوط به معادله تیپ B می باشد. با این وجود دبی حاصل از این رابطه نیز بطور متوسط، دو برابر میزان دبی انحرافی واقعی می باشد و در سایر روابط میزان خطا بیشتر است.

مواد و روش ها

با توجه به پیچیدگی رفتار هیدرولیکی جریان در آبگیرهای کف متخلخل و عدم امکان تولید مدل‌های تحلیلی، در این پژوهش ساخت مدل آزمایشگاهی و طراحی آزمایشات لازم برای استخراج یک رابطه ریاضی مد نظر قرار گرفته است. بر این اساس اولین گام تجزیه و تحلیل ابعادی برای شناخت پارامترهای بدون بعد مؤثر بر مساله می باشد. عمومیت و دقت رابطه هیدرولیکی حاکم بر پدیده انحراف جریان از محیط متخلخل وابسته به در نظر گرفتن کلیه عوامل مؤثر در عملکرد این نوع آبگیر دارد و در غیر اینصورت محدوده کاربرد این روابط محدود و تعمیم آنها به شرایط جدید غیر قابل قبول خواهد بود.

مشاهدات آزمایشگاهی این پژوهش حاکی از عدم تطابق این فرضیات با واقعیت بود. در پژوهشهای گذشته عنوان گردیده است خطای حاصل از این فرضیات در ضریب آبگذری آبگیر اعمال می گردد (۱۱ و ۱۵).

۳- به دلیل عبور جریان از محیط متخلخل سنگدانه‌ای، به نظر می رسد افت انرژی در جریان قابل توجه باشد و صرف نظر از افت هد خطای زیادی را به معادلات تیپ A، C و D تحمیل نماید.

۴- از نظر تحلیلی دلیلی برای برابری افت هد در محیط متخلخل با اختلاف تراز کف کانالهای فوقانی و تحتانی در معادلات تیپ B وجود ندارد و بررسی خاصی نیز برای اثبات این فرضیه انجام نشده است. همچنین در بسیاری موارد از جمله حالت پس زدگی جریان در کانال جمع آوری یا وجود جریان فوق بحرانی در کانال اصلی و جریان زیر بحرانی در کانال انحراف، عمق y_2 از عمق y_1 بیشتر خواهد بود، که در این صورت معادله فوق دارای جواب نخواهد بود.

۵- برای جبران فرضیات ساده شونده و خطاهای ذکر شده در مدلها، از ضریب آبگذری (C_d) استفاده شده است. در جدول ۲ بر حسب نوع رابطه مورد استفاده برای تخمین دبی انحرافی، روابطی نیز برای تخمین ضریب آبگذری ارائه گردیده است. در روابط ارائه شده برای جریان زلال، ضریب آبگذری رابطه معکوس با n از توانهای $7/8$ تا $9/57$ ، نسبت مستقیم نزدیک به خطی با عدد فرود Fr و رابطه معکوس با d_{50} از توانهای $0/5$ تا $0/7$ دارد (۴، ۶ و ۱۱). این در حالی است که با توجه به نوع دانه بندی مصالح محیط متخلخل

محاسبه می گردد. بر این اساس و با در نظر گرفتن رابطه ۵ به عنوان مبنای رابطه سازی، در معادله حاکم بر جریان در آبگیر کف متخلخل می توان نوشت:

$$C_d = f \left(Fr_1, \frac{y_1 \cos^2 \alpha}{L}, \frac{h_d}{L}, C_u, \frac{d_{50}}{L}, \frac{y_2}{h_d}, S_0 \right) \quad (۸)$$

از آنجا که پارامتر S_0 در سایر پارامترهای جریان یعنی Fr_1 و y_1 مؤثر می باشد و با توجه به تحقیقات گذشته مبنی بر عدم تاثیر S_0 در روابط ارائه شده، به دلیل محدودیت در تعداد آزمایشات، طراحی آزمایشها برای مقدار S_0 ثابت و برابر ۱٪ در نظر گرفته شد. برای سنجش میزان تاثیر سایر پارامترها، طراحی آزمایشات بر مبنای سه شیب برای سطح فوقانی آبگیر شامل $S_p = 0$ ، 10 و 20 درصد، سه حالت برای طول آبگیر شامل $L = 20$ ، 40 و 60 سانتیمتر و حداقل ۶ دبی کل متفاوت در کانال اصلی ($Q_t = 3 \sim 60 \text{ lit/s}$) انجام گردید. برای تعیین اثر مشخصات مصالح سنگی درون آبگیر سه نوع دانه بندی متفاوت ریزدانه، درشت دانه و مخلوط در نظر گرفته شد که پارامترهای مربوط به دانه بندی این مصالح در جدول ۳ ارائه گردیده است. همچنین با استفاده از تغییر عمق پایاب آبگیر به وسیله تنظیم ارتفاع سرریز پایین دست کانال انحراف، آزمایشاتی به منظور تعیین محدوده تاثیر پارامتر y_2/h_d در عملکرد آبگیر انجام شد.

بر این اساس تعداد ۳۹۶ آزمایش طراحی گردید که در هر کدام می باید پارامترهای مختلفی چون دبی کل، دبی منحرف شده، دبی باقیمانده در کانال اصلی، عمق آب در کانال اصلی و کانال انحراف، سرعت جریان و ... اندازه گیری شود. همچنین فرض جریان شبه روزنه در آبگیر با اندازه گیری فشارهای پیزومتریک در داخل آبگیر کنترل گردید. برای نیل به این هدف فلولم آزمایشگاهی دو طبقه به طول ۱۰ متر، عرض ۴۰ سانتیمتر و ارتفاع متغیر بین ۵۰ تا ۱۰۰ سانتیمتر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، آماده گردید.

در این راستا با استفاده از قضیه پی باکینگهام می توان نوشت:

$$q_d = \phi(L, n, y_1, g, V_1, \alpha, d_{50}, h_d, C_u, y_2, S_0) \quad (۴)$$

در این رابطه q_d دبی انحراف یافته توسط آبگیر در واحد عرض آبگیر، C_u ضریب یکنواختی دانه بندی مصالح آبگیر، h_d ارتفاع پایین دست آبگیر، d_{50} قطر متوسط مصالح آبگیر و V_1 سرعت در بالادست آبگیر می باشد. سایر پارامترها پیش از این تعریف گردیده اند. از آنجا که تعداد متغیرهای رابطه ۴ برابر ۱۲ عدد و تعداد ابعاد اصلی برابر ۲ عدد می باشد، لذا می بایست ۱۰ پارامتر بدون بعد قابل استخراج باشد.

$$\frac{q_d}{L \sqrt{g y_1}} = \phi \left(n, \frac{y_1}{L}, \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}, \alpha, \frac{d_{50}}{L}, \frac{h_d}{L}, C_u, \frac{y_2}{h_d}, S_0 \right) \quad (۵)$$

عبارت $V_1/\sqrt{g y_1}$ در واقع برابر عدد فرود بالادست آبگیر (Fr_1) و q_d دبی منحرف شده در واحد عرض آبگیر و برابر Q_d/W می باشد.

میزان دبی عبوری از هر مقطع، با رابطه $Q = A.V$ محاسبه می گردد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی جریان در آبگیرهای کف متخلخل دارای عملکرد شبه روزنه ای است. با در نظر گرفتن عملکرد شبه روزنه ای برای آبگیر، میزان سرعت در هر نقطه از آبگیر را می توان بر اساس رابطه زیر بیان نمود:

$$V \approx \sqrt{2g y \cos^2 \alpha} \quad (۶)$$

که در این رابطه، ترم $y \cos^2 \alpha$ در واقع میزان هد فشار در سطح آبگیر با شیب تند می باشد. همچنین مجموع سطح فضای خالی بین سنگدانه ها در راستای افق برابر $A = W L n$ می باشد.

با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده در عمل مقدار دبی عبوری از آبگیر کف متخلخل از حاصل ضرب مقادیر سرعت و مساحت فرض شده، کمتر می باشد و وابسته به پارامترهای مختلفی چون نسبت ابعاد آبگیر، مشخصات هیدرولیکی جریان و دانه بندی مصالح درون آبگیر می باشد. با معرفی ضریب C_d به عنوان ضریب آبگذری آبگیر، میزان دبی منحرف شده توسط آبگیر کف متخلخل با رابطه

$$Q_d = C_d W L n \sqrt{2g y_1 \cos^2 \alpha} \quad (۷)$$

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سنگدانه ها

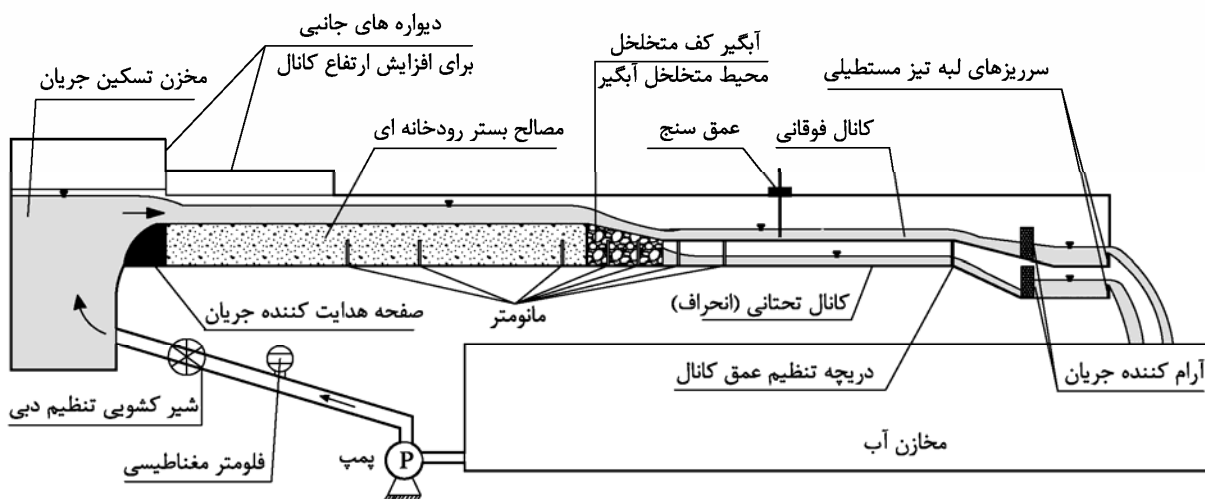
نام مصالح آبگیر	حداکثر اندازه ذرات	حداقل اندازه ذرات	قطر متوسط ذرات	وزن مخصوص خشک	ضریب یکنواختی	ضریب یوکی
	$d_{\max} (mm)$	$d_{\min} (mm)$	d_{50}	$\gamma_d (gr / cm^3)$	C_u	$n = (\nabla_v / \nabla_r)$
P_D	۲۵	۱۶	۱۹	۱/۵	۱/۲۲۲	۰/۴۴۵
P_R	۱۲/۵	۸	۹/۵	۱/۵۴	۱/۲۱۷	۰/۴۲۸
P_M	۲۵	۸	۱۴/۲۵	۱/۶	۱/۸۲۹	۰/۴۰۲

تشخیص داده شد. بستر کانال در این طول با استفاده از مصالح رودخانه‌ای پر گردیده و سطح بستر برای جلوگیری از جابجایی ذرات با استفاده از توری پوشش داده شد (شکل ۳).

همچنین با توجه به طول آبگیر و شیب سطح آن در هر آزمایش، ارتفاع پائین دست آبگیر محاسبه و فریم‌های فلزی با شبکه میله‌های موازی به فاصله ۱ سانتیمتر و قطر ۱ میلی‌متر تعبیه گردید. برای ایجاد شیب رویه آبگیر، شیشه‌هایی به قطر ۸ میلی‌متر (مطابق با ضخامت فریم فلزی) که مطابق ابعاد آبگیر آماده شده بودند، نصب و داخل این باکس با مصالح دانه‌بندی شده پر گردید. برای تثبیت سطح سنگ دانه‌ها و جلوگیری از جابجایی آنها در اثر جریان آب، سطح رویه به وسیله توری با چشمه‌های درشت پوشیده شد.

در این فلوم دبی کل با استفاده از فلومتر مغناطیسی با دقت ± 0.15 لیتر بر ثانیه و دبی باقیمانده در کانال اصلی و دبی جریان منحرف شده نیز با استفاده از سرریزهای لبه تیز مستطیلی به دقت ± 0.2 لیتر بر ثانیه، اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری عمق آب در کانال اصلی با پوننت گیج به دقت ± 0.1 میلی‌متر و در کانال انحراف با مانومتر به دقت ± 0.5 میلی‌متر انجام شد. همچنین در تعدادی از آزمایشات پروفیل‌های سرعت با استفاده از پروپلر (سرعت سنج پروانه-ای مدل *Armfiled H33-1*) به دقت $\pm 1/5$ سانتیمتر بر ثانیه، اندازه‌گیری گردید.

طول مورد نیاز برای ایجاد شرایط جریان توسعه یافته قبل از آبگیر کنترل و با استفاده از برداشت پروفیل سرعت، طول ۵ متر برای ایجاد شرایط توسعه یافته در کلیه دبی‌های مورد آزمایش، مناسب



شکل ۲- نمای شماتیک اجزای فلوم مورد آزمایش



شکل ۳- فلوم آزمایش الف) آبگیر کف متخلخل و کانال بالادست آن و ب) نمای آبگیر کف متخلخل

نتایج و بحث

آبگیرهای با طول ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر می‌باشند نیز، ملاحظه می‌گردد. از نظر تئوریک دبی منحرف شده می‌باید رابطه مستقیمی با ضریب پوکی و ضریب نفوذپذیری داشته باشد. با در نظر گرفتن اینکه میزان تراکم مصالح یکسان باشد و مصالح از نوع درشت دانه هستند، ضرایب نفوذپذیری و پوکی رابطه مستقیمی با d_{50} و رابطه معکوسی با Cu دارند. بر این اساس عملکرد مشاهده شده در آزمایشات دارای تطابق خوبی با مبانی هیدرولیکی جریان، می‌باشد.

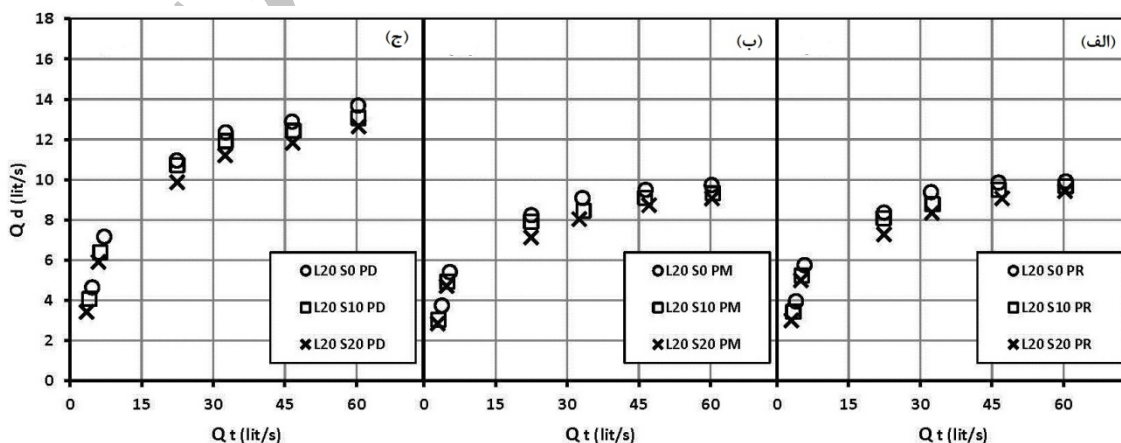
هد فشاری جریان در سطح فوقانی آبگیر رابطه مستقیمی با دبی منحرف شده توسط آبگیر دارد. بر این اساس عمق جریان و انحنا خطوط جریان به عنوان دو عامل افزایشدهنده و کاهشدهنده دبی منحرف شده، می‌باشند. در اشکال ۴ الی ۶ تاثیر شیب سطح فوقانی جریان در مصالح و طولهای مختلف ارائه شده است. در هر سری از آزمایشها، عمق جریان مستقیماً تابع دبی کل جریان می‌باشد. بر این اساس بدیهی است که دبی انحرافی می‌باید رابطه مستقیمی با دبی کل جریان داشته باشد.

علاوه بر این بررسی اشکال ۴-الف الی ۴-ج بیانگر کاهش دبی انحرافی در اثر افزایش شیب سطح فوقانی در آبگیرهای با طول ۲۰ سانتیمتر، می‌باشد. این عملکرد در سایر آبگیرها با طول ۴۰ و ۶۰ سانتیمتری نیز مشاهده می‌گردد (اشکال ۵-الف الی ۵-ج و ۶-الف الی ۶-ج). این کاهش ناشی از افزایش انحنا خطوط جریان در اثر افزایش شیب سطح آبگیر، ایجاد شده است.

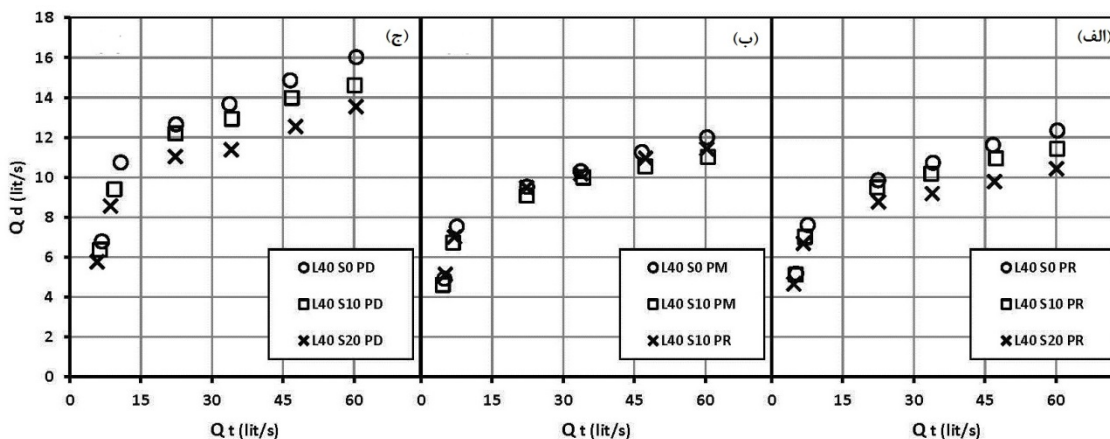
در حالت کلی افزایش طول آبگیر به دلیل رابطه مستقیم دبی و مساحت عبور جریان، می‌باید موجب افزایش دبی انحرافی گردد. با این وجود در آبگیرهای کف متخلخل این مساله تابع پارامترهای دیگری نیز می‌باشد.

با دقت در فرایند بدون بعد سازی پارامترهای مؤثر بر عملکرد آبگیر کفی، این عوامل را می‌توان به سه دسته عوامل مربوط به هندسه آبگیر، دانه بندی مصالح درون آبگیر و مشخصات جریان در کانال اصلی تقسیم کرد. در این بین دو دسته عوامل هندسه و مصالح درون آبگیر قابل انتخاب توسط طراح می‌باشد اما مشخصات جریان در کانال اصلی در واقع مربوط به رژیم طبیعی رودخانه است.

در این پژوهش تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان دبی منحرف شده توسط آبگیر کف متخلخل بر اساس نتایج آزمایشها مورد بررسی قرار گرفته و با مبانی هیدرولیکی عملکرد آبگیرهای کف متخلخل نیز مقایسه شده است. در شکل ۴ دبی منحرف شده در برابر دبی کل، برای مصالح مختلف در آبگیر با طول ۲۰ سانتیمتر رسم شده است. با مقایسه میزان دبی منحرف شده در مصالح ریزدانه و درشت دانه (P_R و P_D)، که ضریب یکنواختی دانه بندی آنها تقریباً یکسان است، رابطه مستقیم قطر متوسط ذرات (d_{50}) با میزان دبی منحرف شده توسط آبگیر مشخص می‌گردد. این مساله به دلیل افزایش ضریب پوکی و افزایش ابعاد مجاری جریان در اثر افزایش قطر ذرات می‌باشد. از طرفی با مقایسه مصالح با دانه بندی ریز و مصالح مخلوط ملاحظه می‌گردد که با وجود بزرگتر بودن قطر متوسط ذرات در مصالح مخلوط (P_M)، اما به دلیل بزرگی ضریب یکنواختی دانه بندی (Cu)، میزان دبی انحرافی در مصالح مخلوط کمتر از مصالح ریزدانه می‌باشد. این مساله به دلیل تاثیر افزایش ضریب یکنواختی مصالح در کاهش ضریب پوکی و ابعاد مجاری عبور جریان می‌باشد. بر این اساس عملکرد آبگیر نسبت مستقیم با قطر متوسط ذرات و رابطه معکوس با ضریب یکنواختی دانه بندی (Cu) دارد. علاوه بر این، این روند در اشکال ۵ و ۶ که مربوط به تغییرات دبی منحرف شده در



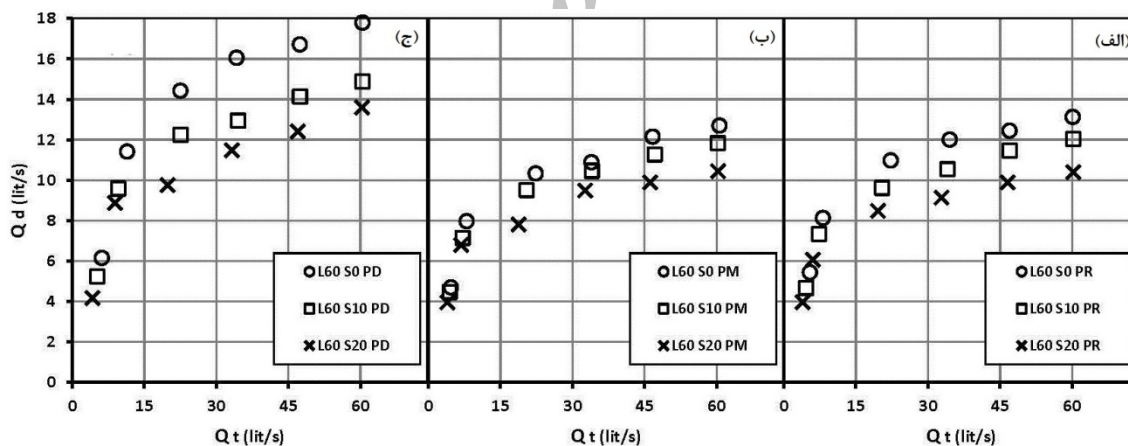
شکل ۴- تغییرات دبی منحرف شده توسط آبگیر به طول ۲۰ سانتیمتر در الف) مصالح ریز دانه (ب) مصالح مخلوط و ج) مصالح درشت دانه



شکل ۵- تغییرات دبی منحرف شده توسط آبگیر به طول ۴۰ سانتیمتر در الف) مصالح ریز دانه (ب) مصالح مخلوط و ج) مصالح درشت دانه

است که افزایش دبی منحرف شده در اثر افزایش طول جریان نهایتاً به حدی می رسد که با وجود افزایش طول آبگیر، تغییری در میزان دبی منحرف شده ایجاد نمی گردد. این حد تابعی از سایر پارامترها مانند مشخصات مصالح و شیب سطح فوقانی آبگیر می باشد. بزرگی عدد فرود بیانگر عدم تمایل جریان به تغییر راستای خود می باشد. بر این اساس از نظر تئوریک بین دبی منحرف شده توسط آبگیر و عدد فرود جریان در کانال اصلی، رابطه معکوسی وجود دارد.

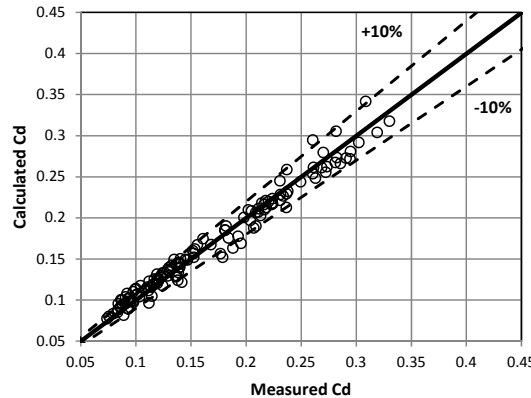
مقایسه بین نمودارهای اشکال ۵-ج و ۶-ج نشان می دهد که در شرایط شیب رویه ۱۰ و ۲۰ درصد و مصالح P_D ، با وجود افزایش طول از ۴۰ سانتیمتر به ۶۰ سانتیمتر، دبی منحرف شده تغییری نکرده است. شرایط مشابهی در رابطه با عدم تغییر دبی منحرف شده علی رغم افزایش طول آبگیر برای مصالح P_M و P_R در شیب ۲۰ درصد وجود دارد (اشکال ۵-الف و ۶-الف و اشکال ۵-ب و ۶-ب). علاوه بر این مقایسه نتایج آزمایشات مندرج در جدول ۴ نیز بیانگر آن



شکل ۶- تغییرات دبی منحرف شده توسط آبگیر به طول ۶۰ سانتیمتر در الف) مصالح ریز دانه (ب) مصالح مخلوط و ج) مصالح درشت دانه

جدول ۴- نتایج منتخب آزمایشها در شرایط مختلف برای $Q_i = 60 (lit / s)$

دبی منحرف شده (lit / s)									طول آبگیر (cm)
$S_p = 20 \%$			$S_p = 10 \%$			$S_p = 0 \%$			
P_R	P_M	P_D	P_R	P_M	P_D	P_R	P_M	P_D	
9.42	9.06	12.64	9.68	9.32	13.06	9.91	9.73	13.68	20
10.42	10.11	13.54	11.43	11.03	14.60	12.34	11.99	16.02	40
10.39	10.02	11.09	12.03	11.82	14.89	13.12	12.70	17.79	60



شکل ۷- مقایسه نتایج ضریب دبی جریان اندازه گیری شده با نتایج محاسباتی

بر این اساس برای تخمین ضریب آبگذری آبگیر کف متخلخل، رابطه ۱۰ با ضریب تعیین $R^2 = 0.958$ ، ارائه گردید. با توجه به محدوده آزمایشات انجام شده این رابطه در شرایط $y_2/h_d \leq 0.4$ و $1.0 \leq Fr_1 \leq 2.5$ معتبر می باشد:

در شکل ۷ مقادیر اندازه گیری شده ضریب آبگذری در آزمایشات با مقادیر تخمین زده شده از معادله ۱۰ مقایسه شده است. همانگونه که در این شکل نیز مشخص است، عمده داده‌ها در راستای خط ۴۵ درجه که به معنای خط انطباق کامل است، قرار دارند و همبستگی خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر ریاضی تخمین شده، وجود دارد.

بر اساس رابطه ۱۰ ضریب آبگذری آبگیر با عمق جریان (y_1)، نسبت عکس دارد که مشابه با عملکرد ضریب فشردگی در روزه‌ها می باشد. همچنین رابطه معکوس ضریب آبگذری با Fr_1 و α نیز به دلیل عدم تمایل جریان به تغییر جهت در اثر افزایش سرعت و افزایش میل به جداشدگی از کف می باشد. رابطه معکوس ضریب آبگذری با C_u و نسبت مستقیم با d_{50} نیز به دلیل تاثیر این پارامترها در میزان پوکی و ابعاد کانال‌های عبور جریان می باشد و با مبانی تحلیلی مطابقت دارد.

$$C_d = 0.445 Fr_1^{-0.217} \left(\frac{y_1 \cos^2 \theta}{L} \right)^{-0.18} \left(\frac{h_D}{L} \right)^{0.539} C_u^{-0.222} \left(\frac{d_{50}}{L} \right)^{0.333} \quad (10)$$

جدیدی برای تخمین دبی قابل انحراف توسط این آبگیرها ارائه گردد. نتایج این پژوهش حاکی است میزان دبی منحرف شده توسط آبگیرهای کف متخلخل با پارامترهای طول، عرض و ارتفاع آبگیر، عمق آب در شروع آبگیر، ضریب پوکی و قطر متوسط مصالح درون آبگیر رابطه مستقیم و با عدد فرود جریان قبل از آبگیر، شیب سطح فوقانی آبگیر و ضریب یکنواختی دانه بندی مصالح آبگیر رابطه

در هر رابطه ریاضی برای تخمین عملکرد آبگیرهای کفی، تاثیر عوامل فوق الذکر می بایست با مبانی تحلیلی و آزمایشگاهی ذکر شده، مطابقت داشته باشد.

همچنین بر اساس آزمایشات انجام شده مشخص گردید در شرایط $y_2/h_d \leq 0.4$ ، عمق پایاب آبگیر تاثیری در عملکرد آن ندارد. بر این اساس برای لزوم بهینه آبگیر و جلوگیری از وقوع پس زدگی، این نسبت به عنوان یکی از معیارهای طراحی در آبگیرهای کف مشبک پیشنهاد می گردد.

ارائه رابطه ریاضی برای تخمین دبی منحرف شده توسط آبگیر

در روابط ۷ و ۸ فرم کلی رابطه ریاضی برای تخمین دبی منحرف شده توسط آبگیرهای کف متخلخل، بر اساس مبانی هیدرولیکی و تجزیه و تحلیل ابعادی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رابطه ریاضی برای تخمین ضریب آبگذری آبگیر (C_d) ارائه گردید. در این راستا از رگرسیون چند متغیره در شکل زیر استفاده گردید:

$$C_d = c_1 Fr_1^{c_2} \left(\frac{y_1 \cos^2 \alpha}{L} \right)^{c_3} \left(\frac{h_D}{L} \right)^{c_4} C_u^{c_5} \left(\frac{d_{50}}{L} \right)^{c_6} \quad (9)$$

نتیجه گیری

با توجه به گستردگی روزافزون آبگیرهای کفی و مشکلات آبگیرهای کف مشبک، انجام تحقیقات وسیع در رابطه با سیستم جدید آبگیرهای کف متخلخل بسیار ضروری است. در این پژوهش سعی گردید تا ضمن تبیین رفتار هیدرولیکی آبگیرهای کف متخلخل، روابط

ضریب آبگذری آن پیشنهاد می گردد. با توجه به محدوده آزمایشات انجام شده این روابط در محدوده اعداد فرود ۱ تا ۲/۵ و در شرایط عدم پس زدگی جریان ($y_2/h_d \leq 0.4$) قابلیت تعمیم دارند. نتایج این آزمایشات با توجه به مزایای استفاده از آبگیرهای کف متخلخل، حاکی از امکان استفاده عملی از این نوع آبگیر، به ویژه در پروژه های نیروگاههای برق آبی می باشد.

معکوس دارد. با توجه به بررسی کلیه روابط مربوط به محاسبه دبی منحرف شده در کفهای متخلخل که در پژوهشهای گذشته ارائه شده است، به نظر می رسد که این روابط به دلیل تناقض با مبانی تحلیلی در چگونگی اثر پارامترهای هیدرولیکی بر عملکرد کف متخلخل، قابلیت تعمیم در شرایط واقعی را ندارند. بر این اساس با ایجاد مبانی تحلیلی و هیدرولیکی، رابطه ۷ برای تخمین میزان دبی منحرف شده توسط آبگیر کف متخلخل و رابطه ۱۰ برای تخمین

منابع

- ۱- بینا ک، فغفورمغربی م. و ابریشمی ج. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی ضریب تخلیه در آبگیرهای کفی مشبک با میله های متقاطع، نشریه آب و فاضلاب، ۸۱: ۲۴-۳۳.
- ۲- فغفورمغربی م. ۱۳۸۸ سیستم جدید آبگیری از کف در رودخانه ها با استفاده از محیط متخلخل، شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان رضوی.
- ۳- کورش وحید ف، نقوی ب، اسماعیلی ک. و فغفورمغربی م. ۱۳۸۸. ضریب دبی جریان در روش جدید آبگیری از رودخانه از طریق آبگیر کفی با محیط متخلخل، سومین کنفرانس ملی تجربه های ساخت تاسیسات آبی و شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران.
- ۴- کورش وحید ف، اسماعیلی ک، فغفورمغربی م، علیزاده ا. و نقوی ب. ۱۳۸۹. بررسی گذردهی جریان در آبگیرهای کفی با محیط متخلخل. نشریه آب و خاک (۲)۲۴: ۳۵۸-۳۴۷.
- ۵- کورش وحید ف، نقوی ب، اسماعیلی ک. و فغفورمغربی م. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی تاثیر خصوصیات هیدرولیکی جریان بر میزان آب انحرافی از رودخانه از طریق آبگیر کفی با محیط متخلخل، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز.
- ۶- نقوی ب، فغفورمغربی م، اسماعیلی ک، خداشناس س. و کورش وحید ف. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی میزان آبگذری سیستم آبگیری از کف با استفاده از محیط متخلخل تحت اثر جریان رسوبدار. نشریه آب و خاک (۲)۲۳: ۱۲۲-۱۳۵.
- ۷- نقوی ب، فغفورمغربی م، اسماعیلی ک، خداشناس س. و کورش وحید ف. ۱۳۸۸. مقایسه آبگذری آبگیر کفی با محیط متخلخل در جریان های زلال و رسوبدار. نشریه آب و خاک (۳)۲۳: ۱۱۵-۱۲۶.
- 8- De Marchi G. 1947. Profili longitudinali della superficie libera delle correnti permanenti lineari con portata progressivamente crescente e progressivamente decrescente entro canali a sezione costante.
- 9- Garot F. 1939. De Watervang met liggend rooster. Ing. Ned. Indie 7.
- 10- Huber D. 2005. BEDUIN Project, pp. Norwegian University of Science and Technology (N.T.N.U), Trondheim, Norway.
- 11- Kooroshvahid F., Esmaili K. and Naghavi B. 2011. Experimental Study on Hydraulic Characteristics of Bottom Intake with Granular Porous Media. Special Topics & Reviews in Porous Media-An International Journal 2: 301-311.
- 12- Kumar S., Ahmad Z., Kothari U.C. and Mittal M.K. 2010 Discharge Characteristics of a Trench Weir. Flow Measurement and Instrumentation 21: 80-87.
- 13- Lund S. 2005. Inntak til Småkraftverk, pp. in Department of Hydraulic and Environmental Engineering. Norwegian University of Science and Technology (N.T.N.U), Trondheim, Norway.
- 14- Mostkow M. 1957. Sur le calcul des grilles de prise d'eau (Theoretical study of bottom type water intake). Houille Blanche 4: 570-580.
- 15- Naghavi B., and Maghrebi M.F. 2010. Experimental Study of Sediment Flow Discharge in New System of Bottom Intakes with Porous Media. Transp Porous Media 85: 867-884.
- 16- Righetti M., and Lanzoni S. 2008. Experimental Study of the Flow Field over Bottom Intake Racks. Journal of Hydraulic Engineering 134: 15-22.

Experimental Study on Hydraulic Characteristics of Porous Bottom Intake in Clear Water

S. Pouresmaeil¹ - M.F. Maghrebi^{2*}

Received: 07-01-2013

Accepted: 22-12-2013

Abstract

Bottom intakes are hydraulic structures widely adopted for diverting water in steep rivers. The problems of vibration, corrosion, deformity, and clogging of the bottom racks by sediment, freezing and foliage inspire a new system of bottom intake in which a filled trench of porous media replaces the bottom racks. In the present paper we have analyzed the data obtained from a systematic series of experiments carried out in a laboratory two-story flume. Measurements of the diverted discharge were performed for different rates of flow, grain size distributions, surface slopes and dimensions of intake as well as important factors. Also the relationships presented in previous studies, are compared with the results of new experiments and the characteristics of the physical behavior of these equations are investigated. Due to lack of the validity in previous models, a new equation for estimating discharge coefficient and flow diversion in porous bottom intake is presented, by using dimensional analysis and multivariate regression with experimental observations. The robustness of the proposed relationship is confirmed by the principles of hydraulic behavior of this intake and the comparison between the calculated discharges through the proposed relationship and those measured in an extensive series of experiments, characterized by ranges of the relevant flow parameters much larger than those investigated in the present contribution.

Keywords: Bottom intake, Porous bottom intake, Discharge coefficient, Spatially varied flow

1,2 - PhD Student and Professor of Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

(* - Corresponding Author Email: maghrebi@ferdowsi.um.ac.ir)