

## بررسی عوامل موثر بر آبگذری جریان از آبگیر کفی با محیط متخلخل در شرایط آب زلال

حسین شریعتی، سعیدرضا خدانشناس\* و کاظم اسماعیلی\*\*

\* نگارنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. تلفن: ۰۵۱)۳۸۸۰۵۷۲۰،

پایان‌نگار: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir

\*\* به‌ترتیب: دانشجوی دکترای علوم مهندسی آب- سازه‌های آبی؛ استاد؛ و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۲۶

### چکیده

به‌کارگیری محیط متخلخل به‌جای صفحات مشبک در آبگیری از کف رودخانه‌های کوهستانی، از روش‌های نوین آبگیری از رودخانه محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر با ساخت مدل آزمایشگاهی و اجرای آزمایش‌های متعدد، تأثیر عواملی مانند: اندازه و یکنواختی سنگدانه‌های داخل آبگیر، طول و ارتفاع مختلف آبگیر و دبی‌های ورودی متفاوت بر میزان دبی انحرافی آبگیر کفی با محیط متخلخل، بررسی شد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که هر چه اندازه سنگدانه‌های محیط متخلخل آبگیر بزرگتر و دانه‌بندی یکنواخت‌تر باشد میزان دبی انحرافی از آبگیر بیشتر خواهد بود. افزایش ضریب یکنواختی سنگدانه‌های داخل آبگیر موجب کاهش ۴ تا ۶ درصد از نسبت دبی انحرافی به دبی ورودی می‌شود. با افزایش طول و ارتفاع (ضخامت) آبگیر، میزان دبی انحرافی از آبگیر روند افزایشی دارد. برای مثال، افزایش طول آبگیر از ۱۵ به ۴۵ سانتی‌متر برای مدل آبگیری با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و سنگدانه‌های با متوسط قطر ۱۵/۳۰ میلی‌متر باعث افزایش ۲۵ درصد در نسبت دبی انحرافی به دبی ورودی برای دبی ورودی ۱۴/۸۲ لیتر بر ثانیه شد. حداقل و حداکثر نسبت دبی انحرافی به دبی ورودی در آزمایش‌های این تحقیق به‌ترتیب ۱۳ و ۹۰ درصد است. مقایسه نتایج این به‌دست آمده از این تحقیق با نتایج به‌دست آمده از تحقیقات پیشین حاکی از کاهش میزان دبی انحرافی در شرایط جدید است. با تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده و استفاده از آنالیز ابعادی و رگرسیون چند متغیره بین نتایج آزمایش‌ها، معادله‌ای جدید برای تخمین ضریب آبگذری برای این نوع آبگیر پیشنهاد شده است.

### واژه‌های کلیدی

آبگیر کفی، ضریب آبگذری، محیط متخلخل

### مقدمه

(Ghosh & Ahmad, 2006). آبگیرهای کفی در انحراف

آب به‌سمت توربین‌ها و در جمع‌آوری رواناب ناشی از بارندگی در خیابان‌ها، بزرگراه‌ها، عرشه پل‌های بزرگ و نیز در ته‌نشین کردن مواد جامد معلق در آب، که از فاصله بین میله‌های شبکه این نوع آبگیر بزرگتر باشند، کاربرد وسیعی دارند. با توجه به نحوه قرارگیری کف مشبک در مقطع رودخانه، زمانی که جریان آب از روی آن عبور می‌کند، قسمتی از دبی رودخانه در طول کف مشبک

انحراف آب از مسیر اصلی آن برای مقاصد مختلف از جمله کشاورزی، آبرسانی شهری، تولید برق و غیره به‌کمک آبگیرها صورت می‌گیرد. در رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند و بار رسوبات درشت‌دانه، آبگیر کفی گزینه‌ای مناسب محسوب می‌شود. آبگیر کفی مشبک سازه‌ای است استاندارد و متشکل از چند میله، معمولاً از جنس فولاد که در تراز بستر رودخانه قرار می‌گیرد

کاهش می‌یابد. به‌کارگیری شبکه فلزی مشکلاتی به‌همراه دارد که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به گرفتگی منفذها در اثر رسوبات، وجود یخ و قطعات شناور در آب، زنگ‌زدگی و پوسیدگی میله‌های شبکه و همچنین تجمع



شکل ۱- الف) آبیگر کفی با میله‌های مشبک (Castillo et al., 2016) و ب) گرفتگی مشبکها

درجه مناسب دانستند. کومار و احمد (Kumar & Ahmad, 2015) در کانالی به طول ۱۷، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۶۴ متر میزان رسوبات جمع شده در آبیگرهای کفی مشبک را بررسی کردند و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی‌شان معادله‌ای برای درصد رسوبات وارد شده از کانال اصلی به کانال انحراف ارائه دادند. نتایج این تحقیقات نیز نشان می‌دهد زمانی که نسبت قطر رسوبات به فاصله میله‌ای شبکه کمتر از ۰/۷۵ باشد تمامی رسوبات کانال اصلی وارد کانال انحراف می‌شود و برای نسبت‌های بزرگتر از ۰/۷۵ میزان رسوبات ورودی به کانال انحراف کاهش می‌یابد و به مقدار دبی انحرافی بستگی دارد. کاستیلو و همکاران (Castillo et al., 2016) به مطالعه آزمایشگاهی و عددی آبیگرهای کفی مشبک در جریان زلال و جریان رسوبدار پرداختند و در کانالی به طول ۵، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۳ متر برای آبیگری با سه نسبت بازشدگی متفاوت برای میله‌های آبیگر مشبک و چهار

یکی از گسترده‌ترین تحقیقات در خصوص رفتار آبیگرهای کفی را برونلا و همکاران (Brunella et al., 2003) ارائه داده‌اند. این محققان در تحقیقاتشان از کانال مستطیلی روی کف‌های مشبک استفاده کردند که منجر شد به رسم پروفیل سرعت، استخراج معادلات دیفرانسیلی برای تعیین پروفیل سطح آب، تخمین معادلات برای تعیین میزان انحراف آب و روابطی برای جلوگیری از پس‌زدگی جریان در کانال آبیگر. کمان‌به‌دست و شفافی‌بجستان (Kamanbedast & Shafai B-jestan, 2008) خصوصیات شیب و درصد بازشدگی کف مشبک با میله‌های دارای مقطع دایره‌ای را بررسی کردند و رابطه رگرسیون برای ضریب تخلیه کف مشبک را در حالت آب زلال پیشنهاد دادند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش شیب، میزان دبی جریان منحرف شده با کف مشبک کاهش می‌یابد. این محققان همچنین شیب بهینه نصب کف مشبک را از نظر حداقل رسوب ورودی در حدود ۳۰

ماندن در ریخت‌شناسی طبیعی رودخانه، تحمل شرایط مختلف جوی، مقابله با مشکل یخ‌زدگی، مقابله با فرسایش و زنگ‌زدگی، سهولت ساخت و قابلیت اجرا، ارزان و در دسترس بودن مصالح. با اینکه تحقیقات درباره کف‌های مشبک سابقه‌ای طولانی دارد اما در زمینه کف‌های متخلخل پژوهش‌های اندکی صورت پذیرفته است. شناخت هرچه بیشتر این نوع سازه با توجه به سادگی اجرا و هزینه نسبتاً کم و همچنین وجود مناطق بسیار زیاد در کشور که می‌توان این روش آبگیری از رودخانه را به کار برد تحقیق بیشتر را ضروری می‌سازد. به‌ویژه اینکه اطلاعات کافی جهت طراحی و ساخت این نوع آبگیر در دسترس نیست.

کوروش‌وحید و همکاران (Kooroshvahid *et al.*, 2010) با بررسی گذردهی جریان در آبگیرهای کفی با محیط متخلخل و با استفاده از چهار نوع دانه‌بندی با قطر مشخص برای محیط آبگیر، ضمن بررسی تاثیر اندازه ذرات بر میزان آبگذری از محیط متخلخل، نشان دادند که ضریب آبگذری محیط متخلخل در حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد ضریب آبگذری با کف مشبک است. آنان همچنین برای تخمین ضریب دبی انحرافی پس از ایجاد آبگیر، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و رابطه انرژی بین کانال بالادست و کانال انحراف روابطی را ارائه دادند.

پوراسماعیل و مغربی (Pouresmaeil & Maghrebi, 2014) با بررسی روابط تخمین دبی انحرافی که کوروش‌وحید و همکاران (Kooroshvahid *et al.*, 2010) ارائه داده‌اند و با در نظر گرفتن عملکرد شبه روزنه‌ای برای آبگیر، رابطه‌ای برای تعیین ضریب دبی انحرافی شده با آبگیر کف متخلخل پیشنهاد کردند. احمدی و فرارویی (Ahmadi & Fararoei, 2016) بر اساس نتایج بررسی‌های کوروش‌وحید و همکاران (Kooroshvahid *et al.*, 2010) و با ارزیابی عددی سیستم آبگیر کفی محیط متخلخل توسط مدل سه بعدی MIKE

شیب مختلف آبگیر آزمایش‌هایی را دنبال کردند. این محققان نتایج آزمایشگاهی خود را با روش‌های عددی مورد استفاده در دینامیک سیالات محاسباتی ارزیابی و مقایسه و اعلام کردند که بین این دو همخوانی مناسبی برقرار است؛ همچنین، شیب بهینه ۳۰ درصد را برای کفی مشبک‌ها پیشنهاد کردند.

قرنجیک و همکاران (Gharanjik *et al.*, 2016) شکل نوینی از سازه آبگیر کفی مشبک را با هندسه جدید به فرم خط جریان معرفی کردند و به بررسی عملکرد این سازه در اثر کاهش عرض پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان می‌دهد که سازه آبگیر پیشنهادی در شیب صفر درصد و دبی بزرگتر از ۱۲ لیتر بر ثانیه با عرضی معادل ۵۵ درصد عرض کانال اصلی عملکرد بهتری دارد. مدنی و همکاران (Madani *et al.*, 2016) عملکرد هیدرولیکی این نوع آبگیر کفی را تحت اثر تغییر شیب میله‌ها در جریان زلال و رسوب‌دار بررسی کردند و نشان دادند که در شرایط جریان زلال، آبگیر پیشنهادی با شیب میله‌های ۲۴/۶ درصد بهترین عملکرد را دارد و در شرایط جریان رسوب‌دار نیز آبگیر با شیب میله‌های ۱۲/۳ درصد و صفر درصد عملکرد قابل قبولی در مقایسه با فرم سابق دارد.

بیشتر گفته شد که استفاده از شبکه‌های فلزی در آبگیرهای کفی با مشکلاتی همراه است و بر میزان دبی انحرافی از رودخانه تاثیر مستقیمی دارد. برای غلبه بر این مشکلات می‌توان از یک محیط متخلخل با دانه‌بندی مشخص، به‌جای شبکه فلزی، استفاده کرد. بدین‌گونه که بعد از حفر ترانشه در کف رودخانه، مصالحی با دانه‌بندی مناسب در ترانشه ریخته و پس از آن از طریق یک کانال انحراف از رودخانه آبگیری شود. مقداری از آب وارد محیط متخلخل می‌شود و بخش دیگری از آب از روی آبگیر می‌گذرد و به رودخانه هدایت می‌شود. از مزایای این نوع آبگیر می‌توان به این موارد اشاره کرد: تأمین آب فاقد رسوب و مواد معلق، رعایت موارد زیست محیطی، بی‌تغییر

۲. ضریب تصحیح انرژی جنبشی  $\alpha = 1/0$  منظور می‌گردد.

۳. انرژی مخصوص  $E$  در طول کف مشبک ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۴. هد مؤثری که باعث ایجاد جریان در کف مشبک می‌گردد، برابر با انرژی مخصوص  $E$  است (Hosseyini & Abrishmi, 2007).

معادلات دیفرانسیلی جریان متغیر مکانی با خروجی جانبی با در نظر گرفتن فرضیات فوق به صورت رابطه ۱ درمی‌آید:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Qy \left( -\frac{dQ}{dx} \right)}{gB^2 y^3 - Q^2} \quad (1)$$

که در آن،

$Q$  = دبی جاری در کانال قبل از سرریز؛  $B$  = عرض کانال مستطیلی؛  $y$  = عمق جریان؛ و  $g$  = شتاب ثقل. این رابطه با تقریب مناسبی برای کانال‌های مستطیلی در آبگیرهای کفی با شیب طبیعی رودخانه، قابل پذیرش خواهد بود. بر این اساس، تحقیقات مختلفی برای تعیین  $\frac{dQ}{dx}$  در انواع آبگیرهای کفی انجام پذیرفته است. به‌طور کلی میزان نرخ تغییر دبی انحرافی در واحد عرض با رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$\frac{dq}{dx} = C_q \omega \sqrt{2gY} \quad (2)$$

که در آن،

$dq$  = دبی انحرافی در طول بخشی از شبکه طولی؛  $dx$  = در واحد عرض؛  $\omega$  = نسبت منفذ یعنی نسبت مساحت بازشدگی به مساحت کل؛ و  $Y$  = مقدار مربوط به بار آبی. این ضریب به خصوصیات هیدرولیکی جریان عبوری، هندسه شبکه (طول، شیب، جهت) و میله‌های شکل‌دهنده شبکه (شکل، اندازه، فاصله) بستگی دارد. اگرچه انحراف آب از طریق کف مشبک و انحراف جریان از محیط متخلخل با یکدیگر متفاوت است، این دو

به این نتیجه رسیدند که نرم‌افزار MIKE3 گذردهی نسبی را با خطای ۲/۳۵ درصد پیش‌بینی می‌کند.

در آزمایش‌های پیشین، برای تفکیک جریان عبوری از محیط متخلخل و جریان باقیمانده کانال در قسمت پایین دست آبگیر، از کانالی دیگر استفاده شده که به صورت موازی و زیر کانال اصلی است (کانال تحتانی)؛ در اینجا جریان انحراف یافته با جریان اصلی هم‌جهت است اما در عمل کانال انحراف در آبگیرهای کفی عمود بر کانال اصلی اجرا می‌شود که این مسئله پارامترهای هیدرولیکی جریان و در نتیجه میزان دبی انحرافی با آبگیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این‌رو، در این تحقیق سعی شده است تا با اجرای کانالی عمود بر کانال اصلی، به‌عنوان کانال انحراف، قسمتی از کاستی‌های پژوهش‌های قبلی بررسی شود که در شرایط طبیعی رودخانه‌ها رخ می‌دهند. همچنین، با توجه به ثابت بودن ضخامت محیط متخلخل در آزمایش‌های پیشین، در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر این عامل در کنار سایر عوامل مؤثر بر آبگذری محیط متخلخل پرداخته شده است.

## مبانی هیدرولیکی جریان در آبگیر کفی و تحلیل ابعادی

جریان در آبگیرهای کفی از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش دبی است. جریان متغیر مکانی عبارت است از جریان متغیر تدریجی دائمی با دبی متغیری که در طول کانال و در جهت جریان، دبی آن تغییر می‌کند. از این‌رو در هر مقطع، تغییرات عمق جریان و دبی نسبت به زمان صفر ( $\frac{dy}{dt} = 0$  و  $\frac{dQ}{dt} = 0$ ) است ولی مقادیر مذکور در طول مسیر تغییر می‌یابند ( $\frac{dy}{dx} \neq 0$  و  $\frac{dQ}{dx} \neq 0$ ).  
موسستکو (Mostkow, 1975)، روابطی را برای پروفیل سطح آب در حالت جریان متغیر مکانی با در نظر گرفتن فرضیاتی ارائه داده است که عبارت‌اند از:

۱. کانال مستطیلی و منشوری شکل است.

بررسی عوامل موثر بر آبگذری جریان از آبگیر کفی...

مقدار ضریب شدت جریان در آزمایشگاه، از تقسیم دبی انحرافی واقعی  $(Q_d)_a$  بر دبی انحرافی قابل محاسبه از رابطه تئوری  $(Q_d)_t$  به دست می آید (رابطه ۷).

$$C_d = \frac{(Q_d)_a}{(Q_d)_t} = \frac{Q_d}{n\sqrt{2gy_1}Lw} \quad (7)$$

روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان به‌طور مستقیم از قوانین حاکم بر حرکت سیالات و تئوری‌های موجود به دست آورد. در چنین مواردی برای استخراج رابطه ریاضی، ابتدا همه متغیرهای موثر بر پدیده فهرست می‌شوند، پس از آن با روش آنالیز ابعادی، گروه‌های بدون بعد مؤثر تعیین و تغییرات آنها از طریق نتایج آزمایشگاهی بررسی خواهند شد. پارامترهای موثر در دبی انحراف یافته با آبگیر کفی با محیط متخلخل را می‌توان به‌صورت رابطه ۸ تعریف کرد:

$$f(Q_d, V_1, \rho, y_1, g, n, D_{50}, Cu, L, H, w) = 0 \quad (8)$$

که در آن،

$Q_d$  = دبی انحرافی با آبگیر؛  $V_1$  = سرعت جریان بالادست؛  
 $y_1$  = عمق جریان آب بالادست؛  $g$  = شتاب جاذبه؛  
 $n$  = تخلخل محیط متخلخل؛  $D_{50}$  = قطر متوسط سنگدانه‌های داخل آبگیر؛  $Cu$  = ضریب یکنواختی سنگدانه‌های داخل آبگیر؛  $L$  = طول آبگیر؛  $H$  = ارتفاع آبگیر؛ و  $w$  = عرض کانال بالادست. با به‌کار بردن تئوری باکینگهام و فرض پارامترهای  $y_1$ ،  $g$  و  $\rho$  به‌عنوان متغیرهای تکراری، رابطه کلی برای تعیین دبی انحرافی از آبگیر به صورت رابطه ۹ حاصل می‌شود:

$$\frac{Q_d}{\sqrt{gy_1}Lw} = f\left(\frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}, \frac{D_{50}}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{H}{y_1}, n, Cu\right) \quad (9)$$

با مقایسه رابطه فوق با رابطه ۷ می‌توان نوشت (رابطه ۱۰):

$$C_d = f\left(\frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}, \frac{D_{50}}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{H}{y_1}, n, Cu\right) \quad (10)$$

شبهت‌هایی نیز دارند. از آنجا که جریان روی آبگیر از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش دبی است، پروفیل‌های تشکیل شده روی دو نوع آبگیر بسیار شبیه هم‌اند.

در هیدرولیک جریان محیط سنگدانه‌ای، سرعت جریان به دو صورت تعریف شده است: سرعت ظاهری و سرعت واقعی. سرعت ظاهری  $V$  از تقسیم دبی جریان بر سطح مقطع کلی جریان (سطح عمود بر جریان شامل فضای خالی و سنگدانه) به دست می‌آید. چون در محیط متخلخل سطح مقطع جریان ثابت نیست، مقدار متوسط آن در محاسبات استفاده می‌شود و سرعت متوسط ظاهری به دست می‌آید (رابطه ۳):

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

سرعت واقعی جریان  $V_n$  از تقسیم سرعت ظاهری بر تخلخل به دست می‌آید (رابطه ۴).

$$V_n = \frac{V}{n} = \frac{Q}{nA} \quad (4)$$

طبق رابطه پیوستگی و با در نظر گرفتن سرعت واقعی در محیط متخلخل، دبی انحرافی در واحد طول و عرض آبگیر را می‌توان به صورت رابطه ۵ نوشت:

$$\frac{dq}{dx} = C_d n V \quad (5)$$

که در آن،

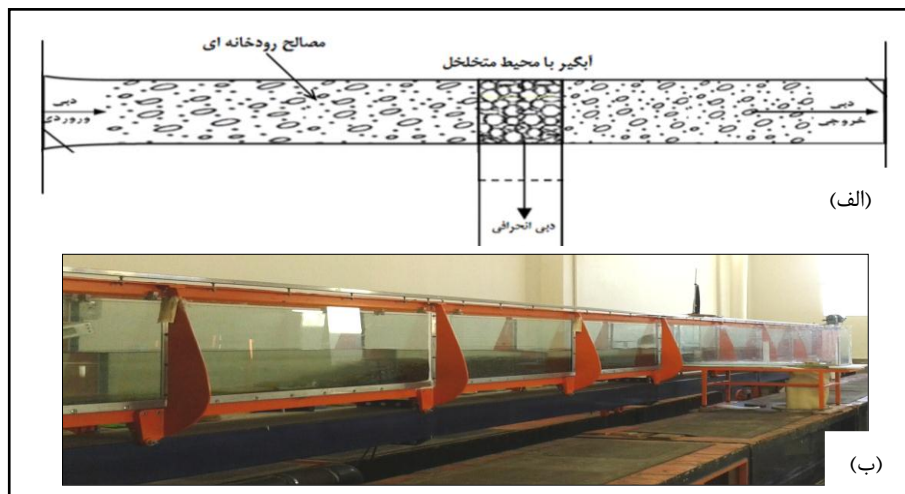
$n$  = تخلخل محیط متخلخل؛  $C_d$  = ضریب آبگذری؛  
 $V$  = سرعت تئوری جریان عبوری از محیط متخلخل.  
 با انتگرال‌گیری از رابطه فوق و استفاده از رابطه ۲ میزان دبی انحرافی با آبگیر کفی به‌صورت رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$Q_d = C_d n V L w = C_d n \sqrt{2gy_1} L w \quad (6)$$

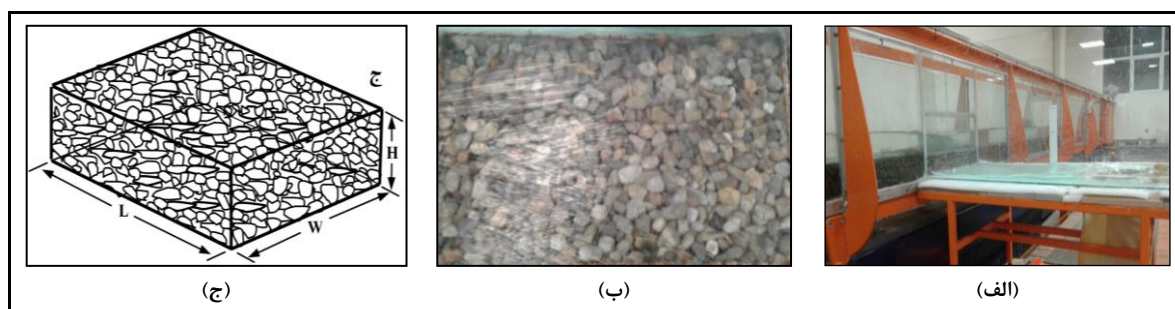
## مواد و روش‌ها

در داخل آبگیر بود و از آنجا که در این تحقیق شرایط جریان زلال بررسی می‌شود، روی بستر بالادست و حرکت نداشته باشند و شرایط جریان رسوبی ایجاد نشود. برای اندازه‌گیری جریان ورودی از پمپ به کانال اصلی از سرریز لبه‌تیز مستطیلی نصب شده در ورودی جریان به کانال استفاده شد که قبلاً به صورت وزنی واسنجی شده بود. همچنین، با نصب یک سرریز مستطیلی لبه‌تیز دیگر در انتهای کانال اصلی، دبی عبور نکرده از آبگیر کفی نیز قابل اندازه‌گیری بود. جریان انحرافی از آبگیر محیط متخلخل از تفاوت جریان ورودی به کانال اصلی و جریان عبور کرده از روی سرریز پایین دست محاسبه می‌شود. محدوده دبی‌های ورودی به کانال بین ۵ تا ۱۷ لیتر بر ثانیه و شیب کانال اصلی در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر  $0/005$  انتخاب و عمق جریان نیز با عمق سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

برای مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق، از کانال موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شد؛ طول، عرض، و ارتفاع این کانال به ترتیب ۱۰، ۰/۳، و ۰/۵ متر است. جنس دیواره کانال شیشه‌ای است که مشاهده جریان ممکن می‌شود. برای آبگیری از سازه آبگیر کفی محیط متخلخل، از کانالی به طول ۱ متر و عرض ۰/۴۵ متر از جنس شیشه و نصب شده به صورت عمود بر کانال اصلی استفاده شد (شکل‌های ۲ و ۳). برای قراردادن مواد سنگدانه‌ای در کانال، یک فضای خالی با سه طول و سه ارتفاع مختلف در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال تعبیه شد. بستر کانال در بالادست و پایین دست آبگیر با مصالح رودخانه‌ای موجود در آزمایشگاه بالا آورده شد. این رسوبات از جنس مشابه اما با دانه‌بندی متفاوت با سنگدانه‌های به کار رفته



شکل ۲- الف) نمایی شماتیک از مدل کانال و ب) کانال آزمایشگاهی



شکل ۳- الف) کانال انحراف عمود بر کانال اصلی، ب) آبگیر کفی با محیط متخلخل و ج) نمایی سه بعدی از آبگیر کفی

بررسی عوامل موثر بر آبگذری جریان از آبگیر کفی...

سنگدانه‌ها نیز بر دبی انحرافی آبگیر قابل مشاهده باشد. همچنین، با در نظر گرفتن سه طول ( $L_2=30$ ،  $L_3=45$ )،  $L_1=15$  سانتی‌متر) و سه ارتفاع متفاوت ( $H_2=15$ ،  $H_3=20$ )،  $H_1=10$  سانتی‌متر) برای آبگیر کفی تاثیر این دو عامل بر میزان گذردهی جریان نیز بررسی شد. محدوده تغییرات پارامترهای مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

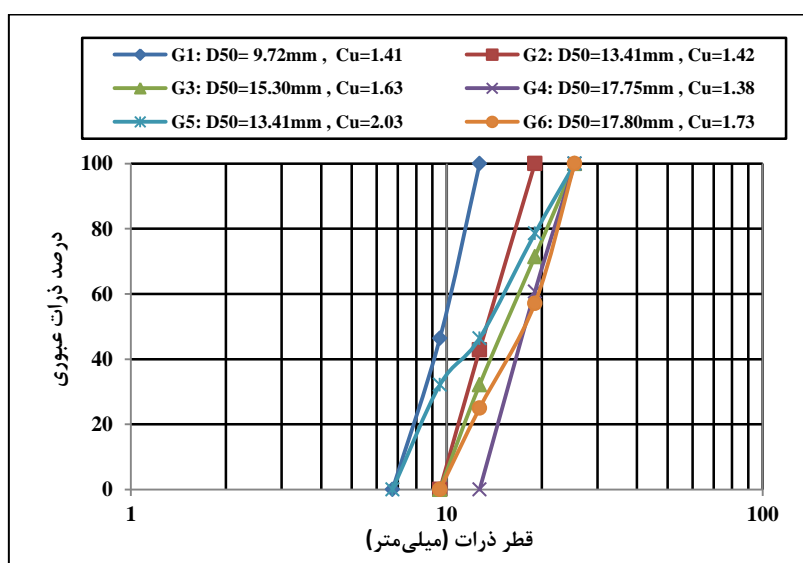
برای بررسی تاثیر دانه‌بندی محیط متخلخل بر میزان گذردهی جریان، از ۶ نوع مصالح سنگدانه‌ای با دانه‌بندی مشخص استفاده شد. منحنی دانه‌بندی مصالح محیط آبگیر در شکل ۴ رسم شده است. سنگدانه‌های  $G_5$  و  $G_6$  به گونه‌ای انتخاب شد که به ترتیب دارای قطر متوسطی برابر و ضریب یکنواختی متفاوت با سنگدانه‌های  $G_2$  و  $G_4$  باشند تا تأثیر ضریب یکنواختی

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای مورد آزمایش

محدوده تغییرات	پارامتر
۵ - ۱۷	دبی ورودی به آبگیر (لیتر بر ثانیه)
۳۱ - ۹۸	عمق جریان (میلی‌متر)
۰/۵ - ۱/۴	عدد فرود
۹/۷۲ - ۱۷/۸۰	متوسط قطر سنگدانه‌های آبگیر (میلی‌متر)
۰/۳۸۷ - ۰/۴۱۳	تخلخل محیط آبگیر
۱۵ - ۴۵	طول آبگیر (سانتی‌متر)
۱۰ - ۲۰	ارتفاع آبگیر (سانتی‌متر)

اندازه‌گیری و با تغییر طول و ارتفاع و نیز تعویض سنگدانه‌های محیط آبگیر، آزمایش‌ها در شرایط جدید تکرار می‌شد.

در این آزمایش‌ها در هر طول و ارتفاع آبگیر و برای هر یک از دانه‌بندی‌های محیط متخلخل، دبی منحرف شده با آبگیر ( $Q_d$ ) با عبور ۵ دبی مختلف از روی آبگیر



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های داخل آبگیر

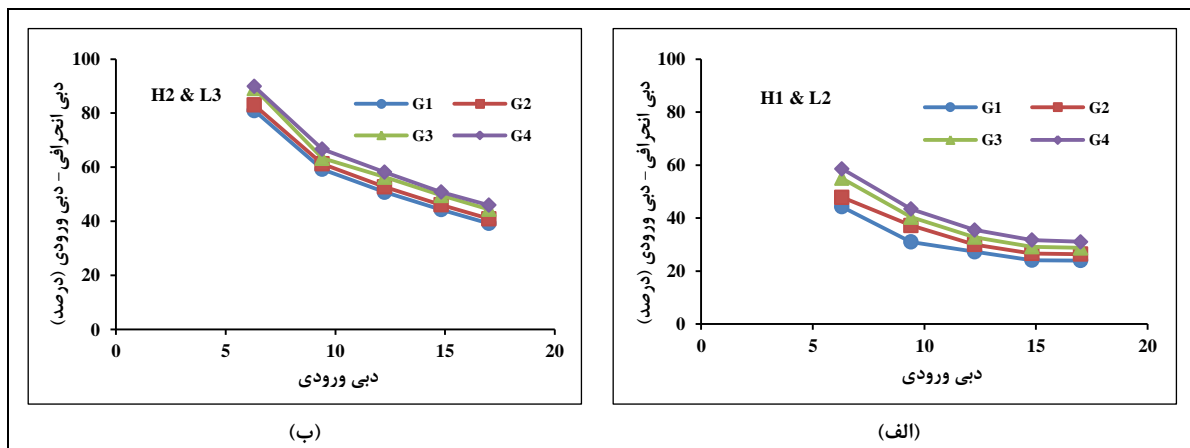
## نتایج و بحث

۱۷ لیتر بر ثانیه برای دانه‌بندی  $G_1$  و  $G_4$  در طول  $L_2$  و ارتفاع  $H_1$  (شکل ۵-الف) به ترتیب برابر ۲۴ و ۳۱/۰۶ درصد است که این امر ناشی از بیشتر بودن فضاهای خالی در دانه‌بندی نوع  $G_4$  است. روند تغییرات دبی انحرافی در برابر دبی ورودی و رودی حاکی از آن است که با افزایش دبی ورودی میزان دبی انحرافی افزایش می‌یابد اما درصد دبی انحرافی نسبت به دبی ورودی روند کاهشی دارد. برای مثال در آبیگر با طول  $L_3$  و ارتفاع  $H_2$  (شکل ۵-ب) در دانه‌بندی  $G_2$  و دبی ورودی  $(Q_i)$  برابر ۶/۳ لیتر بر ثانیه، دبی انحرافی نسبت به دبی ورودی  $(Q_d/Q_i)$  برابر ۸۳/۰۵ درصد و همین نسبت در دبی ورودی ۱۷ لیتر بر ثانیه برابر ۴۰/۹۴ درصد است که این امر می‌تواند به دلیل افزایش سرعت در دبی‌های بالا و کاهش درگیری جریان آب با محیط متخلخل در دبی‌های بالاتر باشد که منجر به کاهش نسبت دبی انحراف به دبی ورودی در دبی‌های بالای ورودی می‌شود.

با آنالیز نتایج به دست آمده از ۲۰۰ آزمایش و ثبت مقادیر اندازه‌گیری شده، دبی انحرافی بر اثر آبیگر کفی محیط متخلخل و تأثیر عوامل مختلف بر میزان دبی منحرف شده آبیگر بررسی شد. برای این کار نسبت‌های دبی منحرف شده  $(Q_d/Q_i)$  در مقابل دبی کل جریان بالادست  $(Q_i)$  برای انواع مدل‌های مختلف آبیگر رسم گردید.

## تأثیر اندازه سنگدانه‌های محیط آبیگر بر میزان دبی منحرف شده

در شکل ۵ تغییرات درصد دبی انحرافی به دبی ورودی در برابر دبی ورودی برای دانه‌بندی‌های مختلف محیط آبیگر رسم شده است. دیده می‌شود که برای طول‌ها و ارتفاع‌های مختلف آبیگر، افزایش قطر سنگدانه‌های محیط آبیگر افزایش دبی انحرافی از آبیگر را به همراه دارد، به گونه‌ای که دبی انحرافی در دبی ورودی



شکل ۵- روند تغییرات دبی انحرافی به دبی ورودی برای دانه‌بندی‌های مختلف آبیگر

میزان دبی انحرافی از سنگدانه‌های  $G_2$  و  $G_5$  استفاده شد که قطر متوسطی برابر ۱۳/۴ میلی‌متر و ضریب یکنواختی متفاوت، به ترتیب برابر ۱/۴۲ و ۲/۰۳ داشتند. نتایج بررسی‌ها نشان داد با افزایش ضریب یکنواختی، دبی انحرافی نسبت به دبی ورودی بین ۴ تا ۶ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۶-الف). در واقع با افزایش ضریب

## تأثیر ضریب یکنواختی سنگدانه‌های محیط آبیگر بر میزان دبی منحرف شده

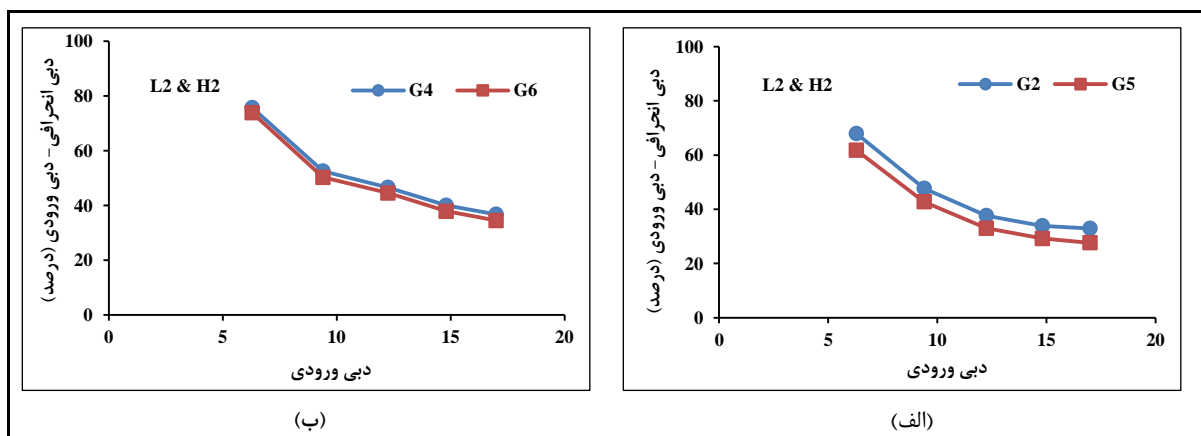
ضریب یکنواختی از تقسیم  $D_{60}$  سنگدانه‌ها به  $D_{10}$  آنها به دست می‌آید و بر این اساس هرچه ضریب یکنواختی به عدد یک نزدیک‌تر باشد مصالح یکنواخت‌تر است. برای بررسی تأثیر ضریب یکنواختی محیط سنگدانه‌ای آبیگر بر



بررسی عوامل موثر بر آبگذری جریان از آبگیر کفی...

یکنواختی، خلل و فرج ذرات درشت‌دانه با مصالح ریزدانه پر می‌شود و این امر به کاهش تخلخل و به تبع آن کاهش مجاری عبور جریان و تقلیل دبی انحرافی از آبگیر می‌انجامد. این روند همچنین در سنگدانه‌های  $G_4$  و  $G_6$  نیز قابل مشاهده است که دارای قطر متوسطی مشابه و

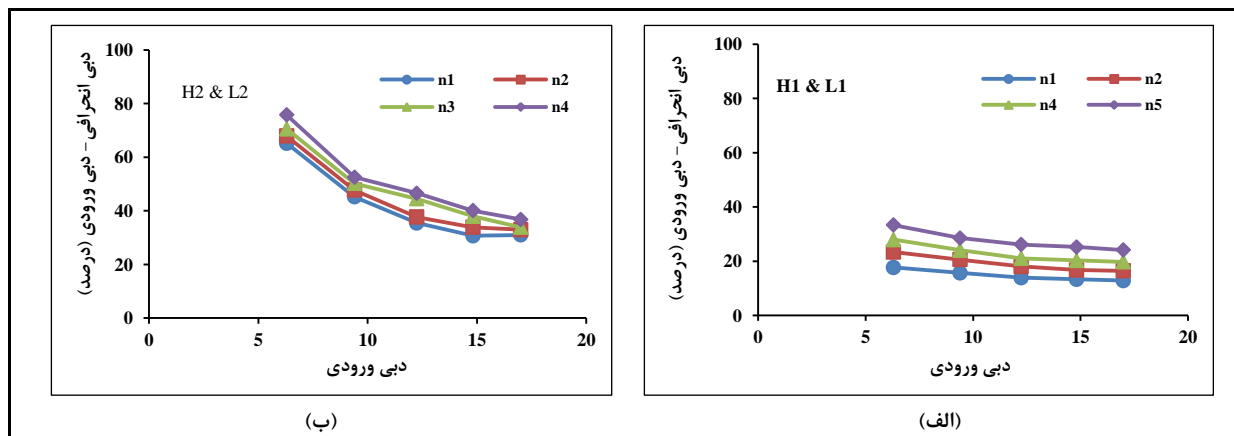
ضرایب یکنواختی متفاوتی (به ترتیب  $1/38$  و  $1/73$ ) هستند، هرچند با توجه به نزدیک بودن ضریب یکنواختی در این حالت نسبت دبی انحرافی به دبی ورودی در این دو نمونه نزدیک به هم بود. روند این تغییرات در شکل (۶-ب) نشان داده شده است.



شکل ۶- روند تغییرات دبی انحرافی به دبی ورودی برای دانه‌بندی‌های با ضریب یکنواختی متفاوت

خالی بین ذرات یا همان حجم حفره‌ها افزایش یافته که این امر به نوبه خود موجب افزایش دبی انحرافی از آبگیر شده است. شکل (۷ب) تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی ورودی را برای آبگیری با ارتفاع  $H_2$  و طول  $L_2$  نشان می‌دهد. همچنین، مقایسه دو مدل آبگیر در حالت الف و ب در شکل ۷ نشان‌دهنده تأثیر مستقیم طول و ارتفاع آبگیر بر میزان دبی انحرافی است که در ادامه به بررسی تأثیر جداگانه این عوامل پرداخته می‌شود.

جهت بررسی اثر تخلخل سنگدانه‌های داخل آبگیر بر میزان دبی انحرافی، در شکل ۷ دو حالت مختلف آبگیر رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل از  $n_1=0/387$  به  $n_4=0/413$  میزان دبی انحرافی توسط آبگیر افزایش می‌یابد. این افزایش برای مدل آبگیری با طول  $L_1$  و ارتفاع  $H_1$  (شکل ۷-الف) در دبی ورودی  $9/4$  لیتر بر ثانیه ۱۳ درصد است. با افزایش تخلخل، یعنی با افزایش نسبت حجم فضای خالی ذرات به حجم کل، فضای

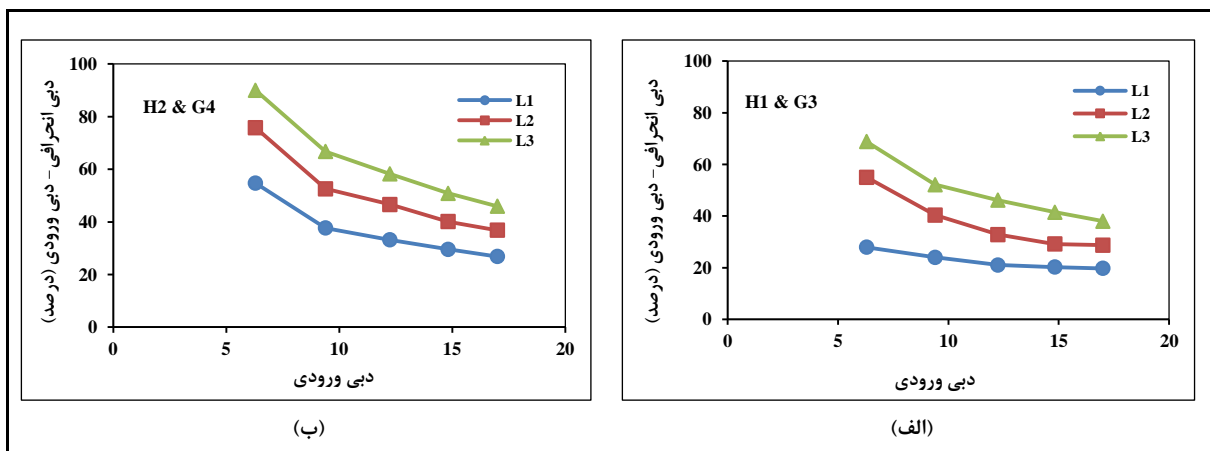


شکل ۷- روند تغییرات دبی انحرافی به دبی ورودی برای سنگدانه با تخلخل متفاوت

### تأثیر طول آبگیر بر میزان دبی منحرف شده

در شکل ۸، نسبت دبی انحراف به دبی ورودی برای دبی‌های مختلف ورودی در طول‌های متفاوت آبگیر رسم شده است. مشاهده می‌شود که افزایش طول آبگیر از  $L_1$  به  $L_3$  موجب افزایش دبی انحرافی از آبگیر شده است، به‌گونه‌ای که افزایش طول از  $L_1$  به  $L_3$  برای آگیری با سنگدانه‌های  $G_3$  در ارتفاع  $H_1$

(شکل ۸-الف) موجب افزایش ۲۵ درصد ( $Q_d/Q_i$ ) در دبی ورودی ۱۴/۸۲ لیتر بر ثانیه شده است. این روند با توجه به رابطه ۶ و افزایش مساحت آبگیر در اثر افزایش طول قابل پیش‌بینی بود. در شکل ۸-ب، همچنین تأثیر افزایش طول آبگیر بر میزان دبی انحرافی برای سنگدانه‌های  $G_4$  با ارتفاع  $H_2$  نشان داده شده است.

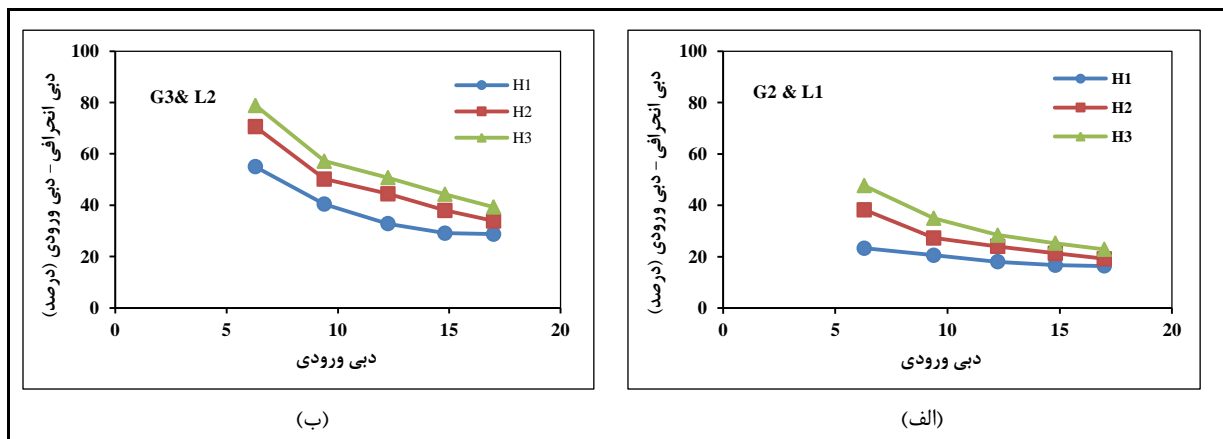


شکل ۸- روند تغییرات دبی انحرافی به دبی ورودی برای آبگیر با طول متفاوت

### تأثیر ارتفاع آبگیر بر میزان دبی منحرف شده

به‌منظور بررسی تأثیر ارتفاع آبگیر بر میزان دبی انحرافی، تغییرات دبی انحرافی نسبت به دبی ورودی برای دانه‌بندی‌های  $G_2$  و  $G_3$  و طول‌های  $L_1$  و  $L_2$  در ارتفاع‌های

مختلف بررسی شد (شکل ۹). در اینجا نیز دیده می‌شود که به‌ازای یک دبی ثابت، با افزایش ارتفاع آبگیر از  $H_1$  به  $H_3$  دبی انحرافی افزایش می‌یابد که میزان این افزایش در دبی‌های پایین بیشتر است.



شکل ۹- روند تغییرات دبی انحرافی به دبی ورودی برای آبگیر با ارتفاع متفاوت

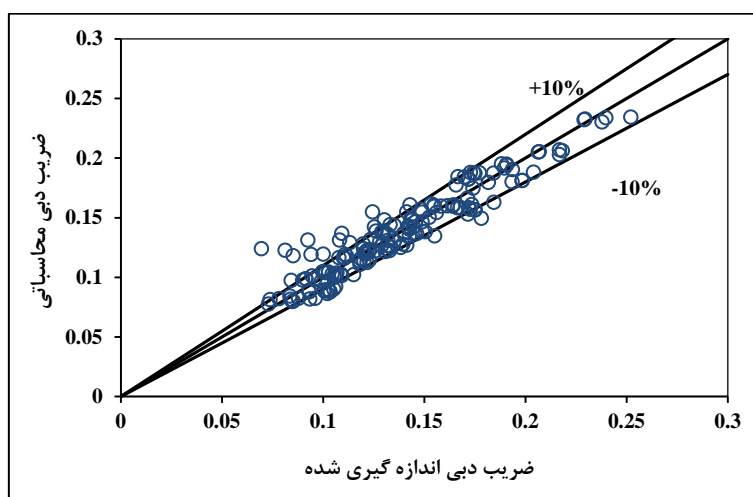
بررسی عوامل موثر بر آبگذری جریان از آبگیر کفی...

$$C_d = 1.824n^{2.406} \left(\frac{d_{50}}{y_1}\right)^{0.077} \left(\frac{L}{y_1}\right)^{-0.445} \left(\frac{H}{y_1}\right)^{0.477} Fr^{0.476} \quad (11)$$

$$R^2 = 0.897$$

در شکل ۱۰، مقادیر  $C_d$  به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از رابطه ۱۱ مقایسه شده است. پراکنش نقاط حول خط ۴۵ درجه، انطباق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و مقادیر تخمینی رابطه فوق را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج به دست آمده و به منظور بررسی توأم عوامل موثر بر ضریب دبی آبگیر کفی متخلخل، به کمک نرم افزار SPSS بین متغیرها و پارامترهای بی بعد موجود، برازش چند متغیره اجرا شد و رابطه ۱۱ بدین منظور به دست آمد. برای ارزیابی روابط ارائه شده از شاخص‌های آماری ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

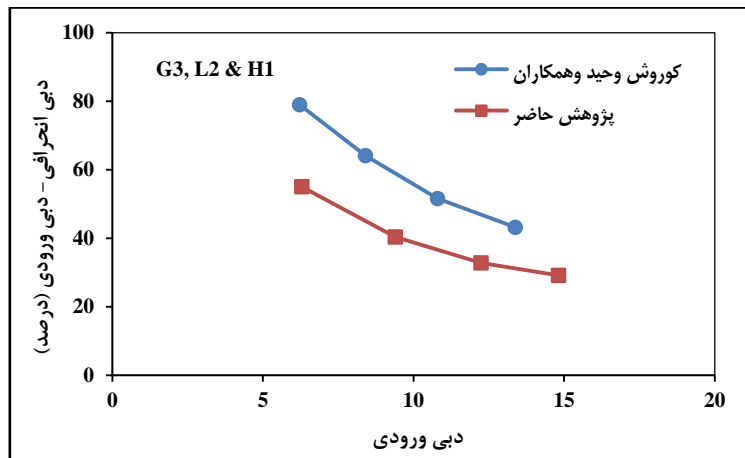


شکل ۱۰ - مقایسه نتایج ضریب دبی اندازه گیری شده با نتایج محاسباتی

در شکل ۱۰ نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های کوروش‌وحید و همکاران (Kooroshvahid et al., 2010) به گونه‌ای مقایسه شده است که شرایط آزمایش و نوع دانه بندی محیط متخلخل برای هر دو آزمایش مشابه باشد. در شکل ۱۰ دیده می‌شود که نسبت دبی انحراف به دبی ورودی در تحقیق حاضر نسبت به دبی انحراف به دبی ورودی در تحقیقات قبلی کاهش یافته است. نسبت دبی انحراف به دبی ورودی در مطالعات کوروش‌وحید و همکاران (Kooroshvahid et al., 2010) بین ۴۳ تا ۸۰ درصد بوده که در پژوهش حاضر به ۲۹ تا ۵۵ درصد تقلیل یافته است.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای نسبی برآورد رابطه ۱۱ به ترتیب برابر ۱/۲ و ۱/۴ درصد محاسبه شد.

مقایسه نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر با نتایج بررسی‌های کوروش‌وحید و همکاران (Kooroshvahid et al., 2010) حاکی از کاهش دبی انحرافی در شرایط جدید است، به گونه‌ای که میانگین ضریب دبی محاسبه شده با استفاده از روابط محققان مذکور حدود ۰/۳۵ است که این عدد در تحقیق حاضر به ۰/۱۴ کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند ناشی از تغییر شرایط آزمایش‌ها و ایجاد کانال انحرافی به صورت عمود بر کانال اصلی باشد.



شکل ۱۱- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های کوروش‌وحید و همکاران (Kooroshvahid et al., 2010)

شد نحوه ساخت مدل آزمایشگاهی به شرایط طبیعی نزدیک‌تر باشد. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش جریان ورودی بالادست، دبی انحرافی افزایش می‌یابد اما روند افزایش آن به تدریج با افزایش دبی کاهش خواهد یافت. با افزایش اندازه ذرات، طول و ارتفاع محیط متخلخل، میزان دبی انحرافی از آبگیر افزایش می‌یابد. سرانجام اینکه با استفاده از تحلیل داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها رابطه‌ای برای تخمین ضریب آبگذری پیشنهاد شد.

نظر به اینکه آزمایش‌های پژوهش حاضر در شرایط آب زلال صورت پذیرفته است، لزوم تحقیقات بیشتر در خصوص این نوع آبگیر در شرایط جریان رسوبی و بررسی میزان دبی انحراف در این شرایط ضروری به نظر می‌رسد که این امر می‌تواند در تحقیقات آتی در نظر گرفته شود.

## نتیجه‌گیری

از روش‌های آبگیری که تا کنون توسعه یافته‌اند هر یک برای رودخانه‌های خاص و شرایط جریان ویژه‌ای مناسب است. در رودخانه‌های کوهستانی، آبگیرهای کفی مشبک با اینکه روشی مناسب برای آبگیری محسوب می‌شوند، مشکلات و محدودیت‌هایی هم دارند که استفاده از روش جدید آبگیر کفی با محیط متخلخل می‌تواند جایگزین مناسبی برای آبگیرهای مشبک باشد. در پژوهش حاضر به بررسی آزمایشگاهی گذردهی جریان در آبگیرهای کفی با محیط متخلخل پرداخته و با در نظر گرفتن طول، ارتفاع و دانه‌بندی مختلف برای محیط متخلخل، ویژگی‌های این نوع آبگیر بررسی شد. همچنین، با توجه به متفاوت بودن مدل‌سازی جریان در آبگیر با شرایط طبیعی در تحقیقات پیشین، در این پژوهش سعی

## مراجع

- Ahmadi, H. and Fararoei, A. R. 2016. Numerical simulation of bottom intake by three-dimensional model MIKE. 3<sup>th</sup> Conference on Recent Innovations in the Field of Civil Engineering, Architecture and Urrban Planning. Tehran, Iran. (in Persian)
- Brunella, S., Hager, W. H. and Minor, H. E. 2003. Hydraulics of bottom rack intake. J. Hydraul. Eng. 129(1): 2-10.

- Castillo, L. G., García, J. T. and Carrillo, J. M. 2016. Experimental and numerical study of bottom rack occlusion by flow with gravel-sized sediment. Application to ephemeral streams in semi-arid regions. *Water*. 8(4), 166. doi: 10.3390/w8040166.
- Gharanjik, A., Khodashenas, S. R. and Akbarzadeh, M. R. 2016. Hydraulic evaluation of new system bottom intake under reduce width. 1<sup>th</sup> National Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management. Sharif University. Thran, Iran. (in Persian)
- Ghosh, S. and Ahmad, Z. 2006. Characteristics of flow over bottom racks. *Water Energy Int. CBIP*. 63(2): 47-55.
- Hosseyini, S. M. and Abrishami, J. 2007. *Open Channel Hydraulics*. 17<sup>th</sup> Ed. Emam Reza University Pub. (in Persian)
- Kamanbedast, A. A. and Shafai-Bejestan, M. 2008. Effects of slope and area opening on the discharge ratio in bottom intake structures. *J. Appl. Sci*. 8(14): 2631-2635.
- Kooroshvahid, F., Esmaili, K., Maghrebi, M. F., Alizadeh, A. and Naghavi, B. 2010. Flow discharge in bottom intakes with porous media. *J. Water Soil*. 24(2): 347-358. (in Persian)
- Kumar, S. and Ahmad, Z. 2015. Experimental investigation on ingestion of sediment into trench weirs. *ISH J. Hydraul. Eng*. 21, 343-352.
- Madani, F. S., Khodashenas, S. R. and Esmaili, K. 2016. Hydraulic performance investigation of new system bottom intakes under different slop racks. 15<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference. Imam Khomeini International University. Ghazvin, Iran. (in Persian)
- Mostkow, M. 1957. Theoretical study of bottom type water intake. *La Houille Blanche*. 4, 570-580.
- Pouresmaeil, S. and Maghrebi, M. F. 2014. Experimental study on hydraulic characteristics of porous bottom intake in clear water. *J. Water Soil*. 28(1): 35-45. (in Persian)

## **Evaluation of Effective Factors on Flow Discharge in Bottom Intakes with Porous Media in Clear Water**

**H. Shariati, S. R. Khodashenas\* and K. Esmaili**

\* Corresponding Author: Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir

Received: 18 October 2016, Accepted: 15 April 2017

Applying bottom racks to divert water from the river bed is one of the most common methods in water diversion works. Problems due to rack installation on diversion channel have led to propose new idea of bottom intake with porous media. In the present paper by using laboratory equipment and carry out many experiments, diverted discharge were measured for different grain size distributions of porous media, three lengths and three heights for intake and rates of flow. According to the obtained results, by increasing the grain size, diverted flow increases, but by increasing the uniform coefficient grain of intake, diverted flow decreases between 4 to 6 percent. Diverted discharge will increase if increase the length and height intake. For example increasing intake length from 15 cm to 45 cm for intake model with  $H=10$  cm,  $d_{50}=15.3$  mm and  $Q_t=14.82$  lit/s, causes 25% increase in relative diverted discharge. Minimum and maximum values of relative diverted discharge in research was 13 and 90 percent respectively. To compare the results of this research with previous research, show that the rate of diverted discharge in new condition has decreased. by analytical analysis on experimental data and using dimensional analysis and multivariate regression, a new equation to estimated discharge coefficient with coefficient of determination  $R^2=0.897$  was suggested.

**Key Words:** Bottom Intake, Discharge Coefficient, Porous Media