

## مطالعه آزمایشگاهی جریان غیر داری درون مصالح متخلخل دانه‌ای

محمدباقر صلاحی<sup>۱</sup>، محمد صدقی اصل<sup>۲\*</sup>، منصور پرویزی<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد ژئوتکنیک دانشگاه یاسوج

۲. استادیار دانشکده کشاورزی گروه علوم خاک دانشگاه یاسوج

۳. استادیار دانشکده مهندسی گروه عمران دانشگاه یاسوج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۴/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۶/۸)

### چکیده

استفاده از مصالح درشت‌دانه سنگ‌ریزه‌ای در سازه‌های آبی، به دلیل خصوصیات ویژه آن‌ها، روزبه‌روز رو به افزایش است، طوری که امروزه از این مصالح برای ساخت فیلتراسیون و حوضچه‌های آرامش و سدهای پاره‌سنگی استفاده می‌شود. به دلیل اهمیت جریان درون مصالح سنگ‌ریز، مطالعه خصوصیات این نوع جریان اهمیت خاصی دارد. به منظور بررسی رفتار جریان درون مصالح دانه‌ای دستگاه پرمنازتری با بارثابتی طراحی و ساخته شد. آزمایش‌هایی روی سه نمونه از ذرات سنگ‌ریزه‌ای با قطرهای متوسط ۸/۶۹، ۱۳/۰۸، و ۱۶/۶۱۷ میلی‌متر انجام و خصوصیات آن‌ها ارزیابی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد رابطه بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی غیر خطی است و از قانون داری تبعیت نمی‌کند. مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، فاکتور اصطکاکی کاهش می‌یابد و با افزایش گرادیان هیدرولیکی عدد رینولدز نیز افزایش پیدا می‌کند. این وضعیت حاکی از متلاطم‌بودن جریان در گرادیان‌های بالاست. همچنین ارزیابی نتایج این پژوهش به وسیله شاخص آماری و مقایسه آن با روابط کادلک - نایت و ارگان نشان داد رابطه کادلک - نایت خطای کمتری نسبت به رابطه ارگان دارد.

کلیدواژگان: بار ثابت، خصوصیات جریان، دستگاه پرمنازتر، مصالح درشت‌دانه

### مقدمه

در مواردی مانند عبور آب از یک ستون ماسه‌ای جریان یک‌بعدی است و در شرایطی که هدایت هیدرولیکی و ابعاد هندسی ستون خاک معلوم باشد، از رابطه داری برای تخمین میزان جریان عبوری استفاده می‌شود. رابطه داری محدودیت‌های زیادی دارد؛ از جمله خطی‌بودن رابطه بین سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی و ماندگار بودن و آرام‌بودن جریان. در صورت تأمین نشدن شرایط فوق، رژیم جریان از حالت داری خارج و به مرحله‌ای وارد می‌شود که اصطلاحاً آن را غیر داری می‌نامند (Sedghi-Asl et al, 2014).

استفاده از مصالح درشت‌دانه سنگ‌ریزه‌ای در سازه‌های آبی، به دلیل خصوصیات ویژه آن‌ها، روزبه‌روز رو به افزایش است؛ طوری که امروزه از این مصالح برای فیلتراسیون، ساخت گابیون، پوشش کانال‌ها، حوضچه‌های آرامش، و سدهای پاره‌سنگی استفاده می‌شود. رفتار جریان در این محیط‌ها، به دلیل بزرگی اندازه ذرات و منافذ و بروز سرعت‌های بالا و

آشفته‌گی در جریان، بسیار پیچیده است. از این رو، برخلاف محیط‌های ریزدانه، که جریان در آن‌ها ورقه‌ای (آرام) و قانون داری در آن‌ها معتبر است، در محیط‌های درشت‌دانه نمی‌توان از قانون داری برای برآورد پارامترهای مختلف جریان استفاده کرد و برای این منظور اصولاً از روابط دیگری، که بیان‌کننده ارتباط غیر خطی بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی در این نوع محیط‌هاست و به روابط غیر داری معروف است، استفاده می‌شود (Salehi et al, 2005).

عمده پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه به صورت جریان یک‌بعدی است و در پرمنازترهای آزمایشگاهی مطالعه شده است. بررسی دقیق خصوصیات جریان آشفته در مصالح سنگ‌ریز، به دلیل پیچیدگی‌های محیط متخلخل، به صورت دوبعدی امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل در اغلب پژوهش‌های انجام‌شده جریان را به صورت یک‌بعدی در نظر گرفته‌اند. پرمنازتر ستون استوانه‌ای است که مصالح سنگ‌ریز درون آن ریخته و دو طرف آن به دو مخزن آب مرتبط می‌شود. با اندازه‌گیری افت فشار (اختلاف تراز آب مخزن بالادست و پایین دست) و دبی عبوری و خصوصیات فیزیکی ذرات سنگ‌ریز

است (Abelin et al, 1991). (Mc Corquodale et al, 1978) یک رابطه عمومی غیر داری برای محیط‌های متخلخل سنگ‌ریزه‌ای، با توجه به قطر و توزیع و اندازه ذرات سنگ‌ریزه و زبری سطح و تخلخل و اثر دیواره، ارائه کردند. این رابطه بی‌بعد بر اساس ۱۲۵۰ داده آزمایشگاهی به دست آمده از پرماتر با دامنه ذرات بین ۵۵ میلی‌متر تا ۷۹ میلی‌متر و نیز عدد رینولدز منفذی (Vd,nv) متغیر بین ۰/۰۰۱ تا ۲۰۰۰۰ برای دو رژیم جریان ارائه شده است. Sedghi-Asl and Rahimi (2011) با مطالعه شش قطر مصالح درشت‌دانه با دامنه ذرات بین ۲/۸۳ میلی‌متر تا ۵۶/۸ میلی‌متر رابطه‌ای درجه دومی بر اساس فاکتور اصطکاکی و فرمول مانینگ برای محیط‌های درشت‌دانه متخلخل ارائه کردند:

$$i = \frac{bv}{2gnd^2}V + \frac{a}{2gn^2d}V^2 \quad (\text{رابطه ۳})$$

(رابطه ۴)

$$i = 10.84b' \left( \frac{1-n}{n} \right)^{4/3} \frac{v}{d^{7/3}}V + \frac{10.84a'(1-n)^{4/3}}{n^{7/3}}V^2$$

از بین پژوهشگرانی که جریان‌های غیر خطی غیر ماندگار و ماندگار را در محیط‌های متخلخل مطالعه کرده‌اند Mc Corquodale et al (1978) فرض کردند ضرایب فرشه‌ایم، با غیر ماندگار شدن جریان، بدون تغییر باقی بماند. Hall et al (1994) نیز بدون توجه به رابطه فرشه‌ایم و به کمک آنالیز ابعادی به مطالعه این جریان‌ها پرداختند.

Ward (1964) با تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی از ۲۰ محیط متخلخل مختلف رابطه‌های ۵ و ۶ را برای برآورد A و B پیشنهاد داد:

$$A = \frac{360v}{gd^2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$B = \frac{10.44}{gd} \quad (\text{رابطه ۶})$$

با گسترش مدل کلاسیک کوزنی کارمن، Ergun (1952) رابطه‌های ۷ و ۸ را پیشنهاد داد:

$$A = \frac{150v(1-\varepsilon)^2}{g\varepsilon^3d} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$B = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{g\varepsilon^3d} \quad (\text{رابطه ۸})$$

Kovács (1981) با تجزیه و تحلیل یک مجموعه از ۳۰۰ داده معادلاتی مشابه رابطه‌های ارگان (رابطه‌های ۹ و ۱۰) را ارائه کرد:

رابطه‌ای غیر داری برای مصالح مورد آزمایش ارائه می‌شود. نسبت بین طول و قطر پرماتر باید در حدود ۳ تا ۵ باشد تا شرایط جریان یک‌بعدی تأمین شود. برای صرف نظر کردن از تأثیر جداره بر خصوصیات جریان، نسبت قطر پرماتر به قطر متوسط مصالح استفاده شده باید بزرگ‌تر از ۱۰ باشد (Hansen, 1992).

پژوهشگران سعی کردند برای بررسی دقیق خصوصیات جریان از جنبه نظری روابطی را ارائه دهند که دربرگیرنده همه حالات جریان و از نظر کاربرد ساده باشند. همه روابط ارائه شده در زمینه جریان درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه به صورت یک معادله درجه دوم یا رابطه توانی ارائه شده‌اند (Sedghi-Asl et al, 2014).

### روابط درجه دوم

چنانچه جریان درون محیط سنگ‌ریز دربرگیرنده محدوده وسیعی از رژیم‌های جریان باشد، فرم درجه دوم نسبت به فرم توانی بهتر پاسخ می‌دهد. همه رابطه‌های ارائه شده در این زمینه در ادامه کار Forchheimer (1901) است. معادله افت- فشار درجه دوم فرشه‌ایم به صورت رابطه ۱ است:

$$i = AV + BV^2 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$V(m/s)$  سرعت متوسط جریان،  $i$  گرادیان هیدرولیکی،  $A(sm^{-1})$  ضریب جریان غیر داری که به خواص جریان و محیط متخلخل بستگی دارد، و  $B(s^{-2}m^{-2})$  ضریب جریان غیر داری که فقط به خواص محیط متخلخل بستگی دارد.

روابط بسیاری به فرم درجه دوم ارائه شده که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. Ahmed and Sunada (1969) روابط ناویر استوکس را برای توسعه جریان غیر داری به کار بردند. Ward (1964) رابطه ۲ را پیشنهاد داد:

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{v}{gk}V + \frac{c''}{g\sqrt{k}}V^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

$\phi(cm)$  تراز پیزومتریک،  $x(cm)$  فاصله در راستای جریان،  $V(cm/s)$  سرعت ظاهری،  $k(cm^2)$  نفوذپذیری ذاتی،  $v$  لزجت سینماتیکی، و  $C'$  ثابتی برابر ۰/۵۵ است.

Li et al (1998) با ارائه مقاله‌ای، با استفاده از داده‌های محققان مختلف، به بررسی روابط موجود جریان در سدهای سنگ‌ریز پرداختند. رابطه کلی بین هدایت هیدرولیکی و سرعت متوسط جریان برای جریان غیر داری از طریق قانون اصطکاکی به دست می‌آید. بر همین اساس، بین عدد رینولدز و فاکتور اصطکاکی رابطه‌ای وجود دارد که در منابع ارتباط بین این دو فاکتور مستقیم به کمک داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده

ثابت  $V_V$  سرعت منفذی جریان درون سنگریز،  $C$  ثابت تجربی که با توجه به شکل ذرات تعیین می‌شود،  $\eta$  لزجت آب، و  $a$  و  $b$  و  $\omega$  توان‌های تجربی است.

Wilkins (1956) بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده در یک پرماتر بزرگ رابطه ۱۴ را ارائه داد:

$$V_V = Wm^{0.5}i^{0.54} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$W$  ثابت ویلکینز است که با توجه به جدول ۱ به دست می‌آید. حاصل ضرب  $Wm^{0.5}$  را می‌توان هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در نظر گرفت. توان  $0.54$  گرادیان هیدرولیکی نشان‌دهنده این مطلب است که جریان به حالت کاملاً آشفته تبدیل شده است.

از آنجا که  $V_V = \frac{V}{n}$ ، با جای گذاری در رابطه ۱۴، رابطه ۱۵ به دست می‌آید:

$$i = \frac{1}{m^{0.93}} \left[ \frac{U}{W_n} \right]^{1.85} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$A = \frac{144v(1-\varepsilon)^2}{g\varepsilon^3d} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$B = \frac{2.4(1-\varepsilon)}{g\varepsilon^3d} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

Kadlec and Knight (1996) رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ را پیشنهاد کردند:

$$A = \frac{225(1-\varepsilon)}{g\varepsilon^{3.7}d^2} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$B = \frac{2(1-\varepsilon)}{g\varepsilon^3d} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$\varepsilon$  تخلخل،  $d$  (m) قطر متوسط مصالح،  $v$  لزجت سینماتیکی، و  $g$  (m/s<sup>2</sup>) شتاب جاذبه زمین است.

#### روابط توانی

این روابط معمولاً به صورت روابطی از گرادیان هیدرولیکی و سرعت ارائه می‌شوند. معروف‌ترین رابطه این دسته از روابط را Wilkins (1956) به صورت رابطه ۱۳ ارائه کرد:

$$V_V = C\eta^a m^b i^\omega \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

جدول ۱. مقادیر ثابت ویلکینز برای انواع مصالح سنگریز [۳]

واحدای سرعت منفذی و شعاع هیدرولیکی	ثابت ویلکینز W	
	شن شکسته	گلوله‌های شیشه‌ای صیقلی
m/sec and m	۵,۲۴ m <sup>1/2</sup> /sec	۷,۳۳ m <sup>1/2</sup> /sec
in/sec and in	۳۲,۹ in <sup>1/2</sup> /sec	۴۶,۵ in <sup>1/2</sup> /sec

Martins (1990) رابطه ۱۸ را برای جریان یک‌بعدی غیر داری پیشنهاد داد:

$$V_V = \frac{K_M}{C_U} \sqrt{2gedi} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$\psi$  ثابت تجربی برابر  $0.26$ ،  $C_U$  ضریب یکنواختی برابر  $d_{60}/d_{10}$ ،  $K_M$  ضریبی تجربی است که مقدار آن برابر  $0.56$  و  $0.75$  به ترتیب برای سنگریزه‌های گوشه‌دار و صاف پیشنهاد شده است،  $g$  (m/s<sup>2</sup>) شتاب جاذبه زمین،  $e$  نسبت پوک،  $d$  (m) قطر مصالح،  $i$  گرادیان هیدرولیکی است.

رابطه Martins (1990) برای اعداد رینولدز بزرگ‌تر از  $300$  به کار می‌رود. وی عدد رینولدز را به صورت رابطه ۱۹ تعریف کرد:

$$Re_m = \frac{4V_V m}{v} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

روابط توانی، به دلیل تک‌جمله‌ای بودن، از نظر کاربردی راحت‌تر از روابط درجه دوم‌اند. به همین دلیل بیشتر مهندسان

Stephenson (1969) با شبیه‌سازی جریان در لوله‌ها فرض کرد افت هیدرولیکی سطح آب با  $V^2/n^2gm$  ارتباط داشته باشد. از آنجا که شعاع متوسط هیدرولیکی با اندازه ذرات متناسب است، وی گرادیان هیدرولیکی جریان درون سنگریزه را به صورت رابطه ۱۶ بیان کرد:

$$i = \frac{K_{st} V^2}{gdn^2} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$K_{st}$  فاکتور Stephenson (1969) است و با رابطه ۱۷ تعیین می‌شود:

$$K_{st} = \frac{800}{R_e} + K_t \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$K_t$  برای سنگ‌های با سطح صاف برابر با ۱، برای سنگ‌های نیمه‌صاف برابر ۲، و برای سنگ‌های تیز و گوشه‌دار برابر ۴ است. برای جریان کاملاً آشفته  $K_{st} = K_t$  است و می‌توان آن را فاکتور مقاومت هیدرولیکی دانست که عکس هدایت هیدرولیکی است.



a

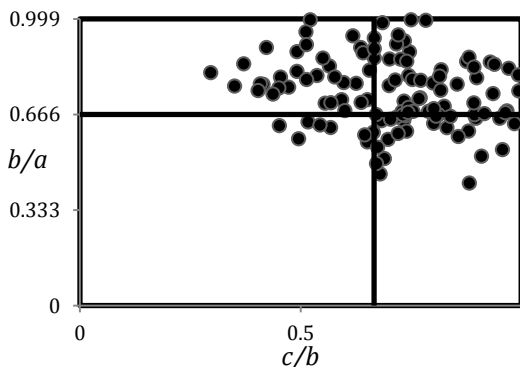


b



c

شکل ۱. مصالح درشت‌دانه شکسته گوشه‌دار  $d_{50a}=16.61mm$ ،  $d_{50c}=8.69mm$  و  $d_{50b}=13.08mm$



شکل ۲. نمودار زینگ برای ۱۲۰ سنگ‌دانه شکسته گوشه‌دار با قطر متوسط ۱۶/۶۱ میلی‌متر

تمایل دارند از روابط توانی استفاده کنند. عیب اصلی روابط توانی این است که تک‌جمله‌ای بودن رابطه سبب می‌شود فقط در دامنه محدودی از تغییرات اعداد رینولدز یا سرعت قابل استفاده باشد. تفکیک آثار خصوصیات جریان و ویژگی‌های مصالح متخلخل و حتی خواص سیال در رابطه دوجمله‌ای امکان‌پذیر است؛ در حالی که در رابطه توانی چنین نیست. رابطه دوجمله‌ای به شکل رابطه داری و ویسباخ و با استفاده از عدد رینولدز و ضریب اصطکاک جریان قابل تعریف است؛ در حالی که رابطه نمای چنین نیست (Stephenson, 1969; Leps, 1973). اخیراً پژوهش‌های دیگری در زمینه خصوصیات جریان‌های متلاطم و غیر داری درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه، در حالت ماندگار و غیر ماندگار، انجام شده است (Hosseini and Joy, 2006; Samani et al, 2004). هر چند پژوهش‌های متعددی در زمینه جریان غیر داری انجام شده، کماکان نیاز به پژوهش‌های بیشتر برای تشریح و تبیین خواص جریان وجود دارد. اهداف عمده این پژوهش عبارت‌اند از ۱. طراحی و ساخت یک پرماتر برای مطالعات آزمایشگاهی جریان غیر داری؛ ۲. بررسی ارتباط بین سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی (افت- فشار) درون مصالح درشت‌دانه به صورت آزمایشگاهی؛ ۳. ارزیابی دقت روابط افت- فشار پرکاربرد از نوع درجه دوم.

## مواد و روش‌ها

### مصالح آزمایش‌شده

در این پژوهش، از یک نوع سنگ‌دانه با سه قطر متفاوت، به منزله محیط متخلخل، برای پرکردن لوله آزمایشگاهی استفاده شد. نمونه‌ای از هر سه مصالح در شکل ۱ می‌آید. به منظور اندازه‌گیری خصوصیات هندسی، از جمله متوسط قطر میانه سه‌محوری و اقطار آن‌ها، تعداد ۱۲۰ دانه سنگی از هر یک از مصالح به طور تصادفی انتخاب و اقطار سه‌محوری (a و b و c) آن‌ها با دقت صدم میلی‌متر به کمک یک کولیس برداشت شد. اگر یک بیضی به صورت سه‌بعدی تصور شود، a نشان‌دهنده قطر بزرگ، b نشان‌دهنده قطر میانه، و c نشان‌دهنده قطر کوچک‌تر آن است.

برای تعریف شکل مصالح از دیاگرام زینگ استفاده می‌شود (Zingg, 1935). با اندازه‌گیری سه قطر a و b و c می‌توان بر اساس دیاگرام زینگ شکل و حجم هر سنگ‌دانه را برآورد کرد که قطر متوسط آن جهت محاسبه عدد رینولدز و حجم آن جهت محاسبه تخلخل استفاده می‌شود (شکل‌های ۲، ۳ و ۴).

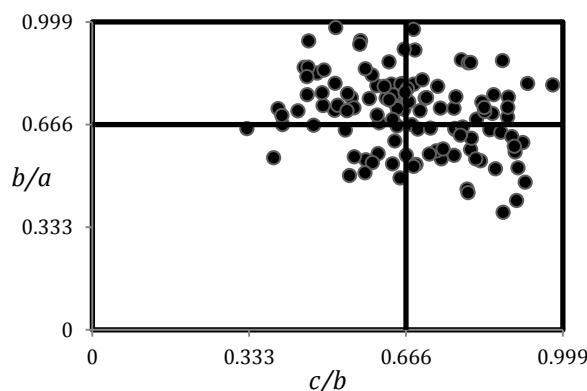
ذخیره کردن آب به منظور انجام دادن آزمایش استفاده می‌شود. ابعاد آن  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$  است. جنس این مخزن شیشه با ضخامت ۸ میلی‌متر است و درون آن قابی فلزی وجود دارد. برای قرائت تغییرات هد از روی مخزن، خط‌کشی به طول ۱ متر روی بدنه آن، از کف مخزن تا لبه بالا، تعبیه شده است. از مخزن پایین‌دست برای جمع‌آوری آب خروجی از لوله مصالح و هدایت آن به مخزن اندازه‌گیری دبی استفاده می‌شود. ابعاد این مخزن  $50 \times 50 \times 50$  سانتی‌متر است. این مخزن نیز، مانند مخزن بالادست، از شیشه و قاب فلزی تشکیل شده و برای قرائت اختلاف هد با مخزن بالادست خط‌کشی به طول ۵۰ سانتی‌متر از کف مخزن تا لبه بالا نصب شده است. مصالح مورد نظر در لوله‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر، از جنس پلکسی، قرار داده شد و برای جلوگیری از ریختن مصالح به بیرون دو سر آن با توری مسدود شد. در لوله یادشده ۱۰ سوراخ به قطر ۸ میلی‌متر، در ۲ ردیف موازی و هم‌راستای ۵ تایی، برای اتصال لوله‌های تخته پیژومتری ایجاد شد و برای هواگیری ۲ سوراخ روی لوله ایجاد گردید. تابلوی پیژومتری متشکل از ۱۰ عدد لوله پیژومتر است و خط‌کشی به طول ۱ متر کنار آن‌ها، برای قرائت هد از روی پیژومتر، تعبیه شده است. از این پیژومترها در آزمایش هد ثابت استفاده می‌شود. مخزن اندازه‌گیری دبی جریان به ابعاد  $52 \times 62 \times 96$  سانتی‌متر برای جمع‌آوری آب خروجی از مخزن پایین‌دست و اندازه‌گیری دبی خروجی از جنس آهن گالوانیزه تهیه و آماده شد.



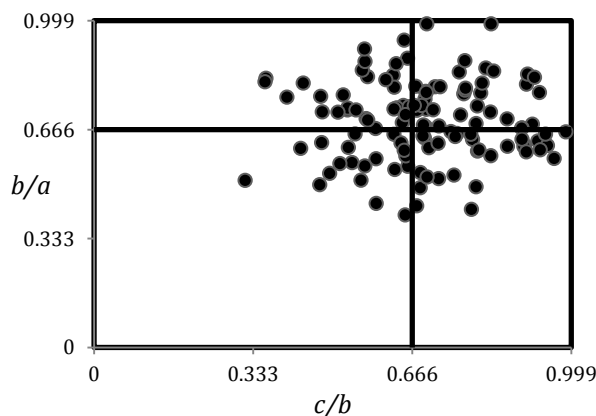
شکل ۵. تصویر مدل آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش همراه اجزای آن

#### نحوه آزمایش بار ثابت

پس از تعیین قطر نمونه‌ها، مصالح درون استوانه (لوله پلکسی) دستگاه آزمایش بار ثابت ریخته شد. انتهای نمونه با صفحه توری پوشانده و مخزن بالادست به آرامی از آب پر شد. البته مدتی صبر لازم است تا محیط متخلخل اشباع و آب از



شکل ۳. نمودار زینگ برای ۱۲۰ سنگ‌دانه شکسته گوشه‌دار با قطر متوسط ۱۳/۰۸ میلی‌متر



شکل ۴. نمودار زینگ برای ۱۲۰ سنگ‌دانه شکسته گوشه‌دار با قطر متوسط ۸/۶۹ میلی‌متر

#### تعیین تخلخل مصالح سنگ‌ریز

تخلخل یکی از مشخصه‌های مهم مصالح سنگ‌ریز است که در محاسبات و مدل‌سازی پروفیل سطح آب نقش اصلی دارد. در واقع تخلخل نقطه تمایز مدل‌سازی پروفیل سطح آب درون کانال‌های باز و مصالح سنگ‌ریز است. بنابراین، تعیین آن اهمیت به‌سزایی در دقت محاسبات دارد. برای تعیین تخلخل از روش اندازه‌گیری مستقیم استفاده شد. در روش اندازه‌گیری مستقیم، ابتدا ذرات سنگ‌ریز درون محفظه‌ای با حجم مشخص ریخته می‌شوند. بعد از پرکردن محفظه با سنگ‌دانه‌ها، درون آن آب ریخته می‌شود تا منافذ خالی پر شود. با تقسیم حجم منافذ خالی (حجم آب ریخته‌شده درون محفظه) به حجم کل محفظه مقدار تخلخل به ترتیب بزرگ‌ترین قطر به کوچک‌ترین قطر  $46/92$ ،  $43/92$ ، و  $41/14$  درصد به دست آمد.

#### مدل آزمایشگاهی

اجزای پرماتر متشکل از ۵ قسمت کلی است؛ شامل مخزن بالادست، مخزن پایین‌دست، لوله مصالح، تابلوی پیژومتری، و مخزن اندازه‌گیری دبی (شکل ۵). از مخزن بالادست برای

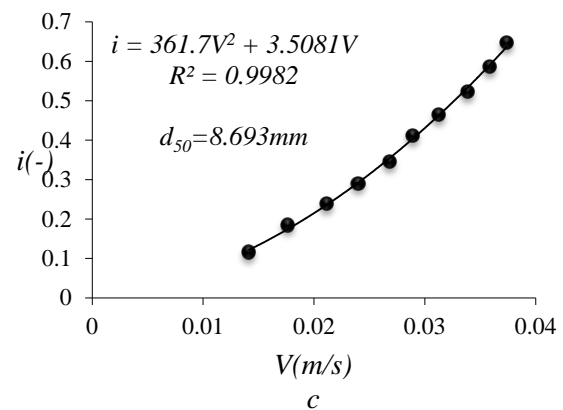
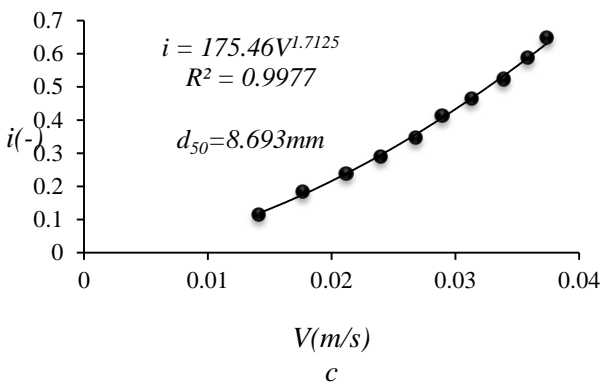
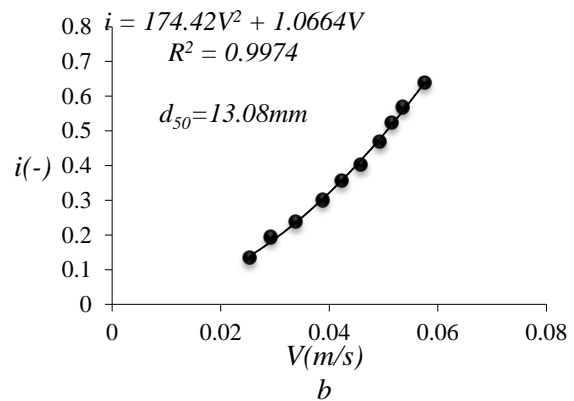
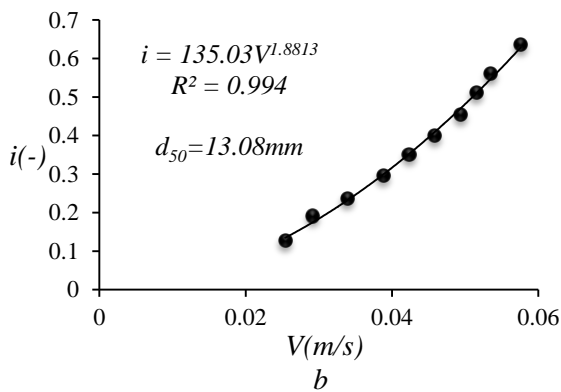
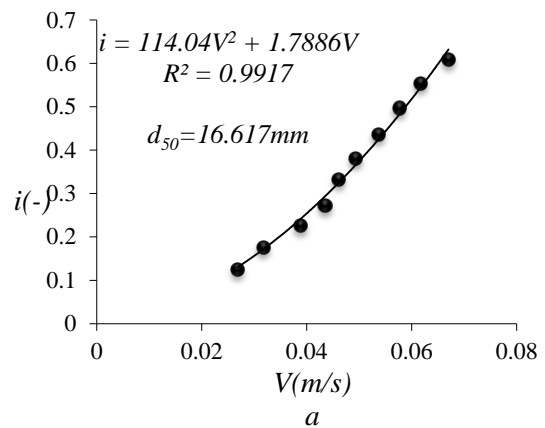
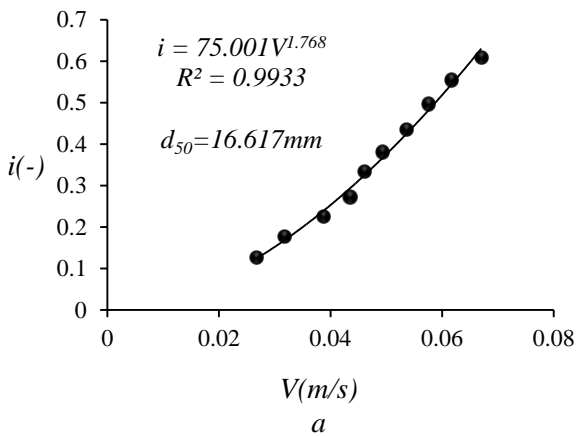
سطح مقطع عمود بر جریان به دست آمد. در این پژوهش برای محاسبه عدد رینولدز از رابطه رینولدز منفذی، که  $Mc$  فاکتور اصطکاکی از رابطه داریسی- ویسباخ استفاده شد.

### یافته‌ها و بحث

#### نتایج اجرای آزمایش بار ثابت

ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان (رابطه افت- فشار) حاصل این پژوهش در شکل‌های ۶ و ۷ می‌آید.

پایین دست سرریز شود. پس از اشباع کردن نمونه، جریان ورودی و خروجی از لوله مصالح قطع نشد. به مخزن بالادست اجازه داده شد در تراز ثابت بماند. در تراز خاص، به منزله زمان شروع آزمایش، آزمایش آغاز شد. باید توجه داشت که تراز مخزن بالادست با گذشت زمان ثابت بماند. پیزومترها در تابلوی پیزومتری نصب و تعبیه شدند و به وسیله تکنیک عکس‌نگاری تراز آب درون پیزومترها در هدهای مختلف ثبت شد. میزان دبی عبوری جریان نیز به روش حجمی در خروجی پرماتر به دست آمد. سرعت درون محیط متخلخل از تقسیم دبی جریان بر

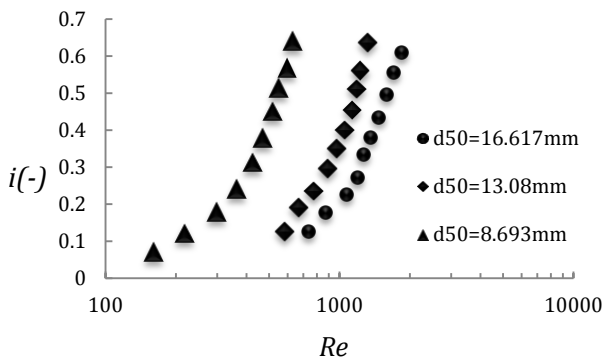


شکل ۷. رابطه گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان درون مصالح تیز گوشه (رابطه توانی)

شکل ۶. رابطه گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان درون مصالح تیز گوشه (رابطه درجه دو)

چه عدد رینولدز افزایش یابد درجه یا سطح تلاطم افزایش می‌یابد تا اینکه به سطح نهایی جریان متلاطم کاملاً توسعه یافته می‌رسد. در این سطح از تلاطم، توان سرعت در معادلات توانی به عدد ۲ نزدیک می‌شود. چنانچه توان معادلات افت- فشار کمتر از ۲ باشد، به سطح تلاطم جریان، جریان متلاطم نیمه توسعه یافته می‌گویند.

شکل ۹ ارتباط گرادیان هیدرولیکی و عدد رینولدز را برای سه دانه‌بندی استفاده شده در پژوهش نشان می‌دهد. با افزایش گرادیان هیدرولیکی عدد رینولدز نیز افزایش پیدا می‌کند. این وضعیت حاکی از آشفته بودن جریان در گرادیان‌های بالاست. نکته مهم دیگر این است که اعداد رینولدز بالاتر برای هر دانه‌بندی شیب افزایش گرادیان نسبت به عدد رینولدز به سرعت افزایش می‌یابد.



شکل ۹. رابطه عدد رینولدز و گرادیان هیدرولیکی در پرماتمر

#### ارزیابی روابط ارگان و کادلیک- نایت

در این قسمت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به ارزیابی روابط ۱۰ و ۱۱ و ۱۴ و ۱۵، برای قطرهای مختلف مصالح، پرداخته می‌شود. برای مقایسه روابط از تابع هدف نرمال شده (NOF) مبتنی بر شیب رگرسیون استفاده می‌شود. تابع هدف نرمال شده نسبت ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) به میانگین  $\bar{X}$  کلی داده‌های آزمایشگاهی تعریف شده است.

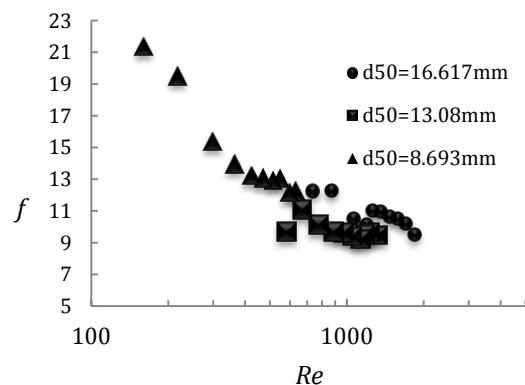
$$NOF = \frac{RMSE}{\bar{X}} \quad (\text{رابطه } ۲۰)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (\text{رابطه } ۲۱)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{رابطه } ۲۲)$$

N تعداد داده‌های آزمایشگاهی،  $\bar{X}$  میانگین داده‌های آزمایشگاهی،  $x_i$  مقادیر پیش‌بینی شده با روابط، و  $y_i$  مقادیر مشاهداتی نام است.

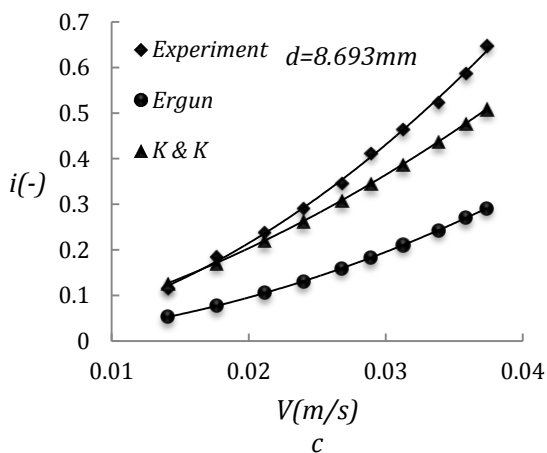
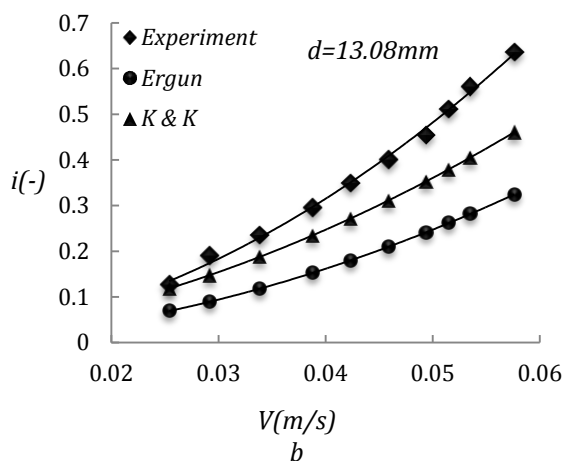
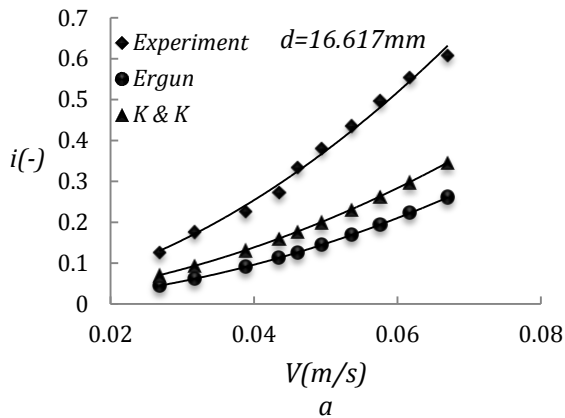
قبلاً اشاره شد که بررسی جریان غیر داری هدف اصلی این پژوهش است و شرط ایجاد آن وجود رابطه‌ای غیر خطی بین سرعت جریان و گرادیان است. این ارتباط در شکل‌های ۶ و ۷ برای مصالح مختلف قابل مشاهده است؛ که به وضوح غیر خطی بودن رابطه سرعت و گرادیان را نشان می‌دهند. این وضعیت دلیلی محکم بر غیر داری بودن جریان است. همبسته شدن روابط درجه دوم و توانی با ضریب تبیین نسبتاً بالا حاکی از برقراری جریان غیر داری در این محدوده از دانه‌بندی ذرات است. شکل ۸ ارتباط عدد رینولدز و فاکتور اصطکاکی به دست آمده در استوانه مصالح تحت فشار را نشان می‌دهد (پرماتمر). همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، فاکتور اصطکاکی کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش سرعت جریان، تلاطم بیشتر می‌شود و نیروی جنبشی بر نیروهای لزوجتی غلبه می‌کند و به این ترتیب فاکتور اصطکاکی مطابق نمودار مودی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۸. رابطه عدد رینولدز و فاکتور اصطکاکی در پرماتمر

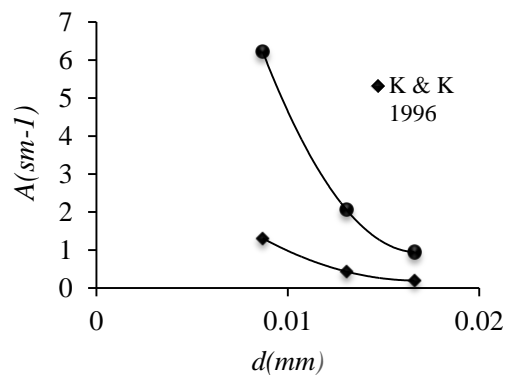
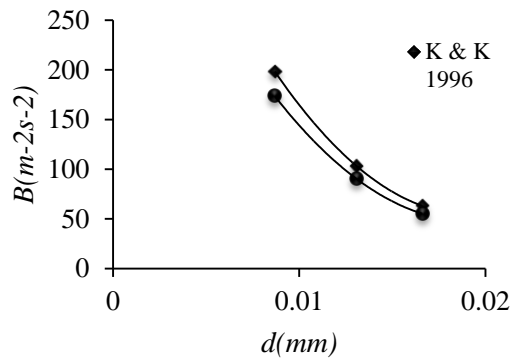
همان‌طور که مشاهده می‌شود، به ازای هر دانه‌بندی خاص، با افزایش عدد رینولدز، فاکتور اصطکاکی به مقدار ثابتی میل می‌کند؛ که این وضعیت مطابق نمودار مودی است. همچنین هر چه قطر مصالح بزرگ‌تر می‌شود فاکتور اصطکاکی کاهش و عدد رینولدز افزایش می‌یابد؛ تا جایی که تغییرات فاکتور اصطکاکی کم می‌شود. تغییرات کم فاکتور اصطکاکی در اعداد رینولدز بالا نشان‌دهنده وابسته بودن آن به قطر مصالح و مستقل از عدد رینولدز است. به طور کلی، می‌توان گفت با افزایش دبی و سرعت جریان عدد رینولدز جریان افزایش و متعاقب آن فاکتور اصطکاکی داری- و سیساک کاهش می‌یابد تا اینکه در اعداد رینولدز نسبتاً بالا مستقل از عدد رینولدز می‌شود. نظر Sedghi- Asl and Rahimi (2011) این است که در جریان‌های متلاطم با سطح بالا فاکتور اصطکاکی مستقل از عدد رینولدز و خصوصیات جریان می‌شود. می‌توان این‌گونه توجیه کرد که هر

دوم فرشه‌ایمر برای همه دانه‌بندی‌ها رابطه Kadlec and Knight (1996) دقت بیشتری دارد. زیرا میزان خطای به‌دست‌آمده آن در مقایسه با رابطه Ergun (1952) کمتر است. بنابراین به مهندسان طراح و دیگر پژوهشگران توصیه می‌شود از رابطه Kadlec and Knight (1996) برای مطالعه شرایط جریان غیر داری و تعیین رابطه افت- فشار استفاده شود.



شکل ۱۱. مقایسه رابطه غیر خطی سرعت و گرادیان هیدرولیکی از روش ارگان و کادلک- نایت با داده‌های آزمایشگاهی

در ارزیابی روابط ارگان و کادلک- نایت از معیارهای نکویی برازش نتایج روابط استفاده شد. نتایج این آنالیز در شکل ۱۰ خلاصه شده است. همچنین نتایج مقایسه روابط Ergun (1952) و Kadlec and Knight (1996) نسبت به داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر در جدول ۲ می‌آید.



شکل ۱۰. رابطه قطر مصالح و ضرایب فرشه‌ایمر

شکل ۱۰ روابط ضرایب فرشه‌ایمر و متوسط قطر دانه مصالح تیزگوشه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر متوسط سنگ‌دانه ضرایب فرشه‌ایمر  $A$  و  $B$ ، تا رسیدن به مقداری ثابت برای هر ضریب، کاهش می‌یابد که  $A$  ضریب جریان غیر داری وابسته به ویژگی‌های جریان و محیط متخلخل است و  $B$  ضریب جریان غیر داری که فقط وابسته به محیط متخلخل است.

شکل ۱۱ تغییرات  $V$  در مقابل  $i$  را برای سه گروه داده‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گرادیان هیدرولیکی محاسبه‌شده با رابطه Kadlec and Knight (1996) به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. ولی گرادیان هیدرولیکی محاسبه‌شده بر اساس رابطه ارگان خطای بیشتری نسبت به رابطه ارگان دارد. در سرعت‌های بالاتر این خطا بیشتر می‌شود. نتایج معیارهای آماری استفاده‌شده در این پژوهش (جدول ۲) بیانگر آن است که در برآورد ضرایب معادله درجه



جدول ۲. معیارهای خطای روابط ارگان (۱۹۵۲) و کادلک- نایت (۱۹۹۶) برای قطرهای مختلف مصالح

	مصالح (میلی متر) d=۱۶۶۱۷		مصالح (میلی متر) d=۱۳۰۰۸		مصالح (میلی متر) d=۸۶۹۳	
	ارگان	کادلک- نایت	ارگان	کادلک- نایت	ارگان	کادلک- نایت
RMSE	۰٫۲۳۵۴	۰٫۱۷۸۲	۰٫۱۹۸۶	۰٫۱۰۲۰	۰٫۲۲۶۸	۰٫۰۷۱۴
X	۰٫۳۶۰۶	۰٫۳۶۰۶	۰٫۳۷۵۷	۰٫۳۷۵۷	۰٫۳۸۰۷	۰٫۳۸۰۷
NOF	۰٫۶۵۲۹	۰٫۴۹۴۱	۰٫۵۲۸۶	۰٫۲۷۱۶	۰٫۵۹۵۸	۰٫۱۸۷۷

پژوهش می‌توانند برای محاسبات پروفیل سطح آب درون سدها و زهکش‌های سنگ‌ریز به کار روند.

### Notation

- $A, B =$  Coefficients (T/L) and ( $T^2/L^2$ )  
 $a, b =$  Coefficients (-)  
 $a', b' =$  Coefficients ( $T^2/L^2$ )  
 $d =$  Mean particle diameter (L)  
 $f =$  Friction factor (-)  
 $g =$  Acceleration due to gravity ( $L/T^2$ )  
 $h_f =$  Head-loss (L)  
 $i =$  Hydraulic gradient (-)  
 $L =$  Length (L)  
 $n =$  Porosity (-)  
 $Re =$  Reynolds number (-)  
 $V =$  Bulk velocity ( $L/T$ )  
 $\bar{X} =$  the mean of experimental data  
 $x_i =$  the values of every step of equations  
 $y_i =$  the values of every step of the experimental data  
 $\nu =$  Kinematic viscosity of water ( $L^2/T$ )  
 NOF = Normalized Objective Function  
 RMSE = Root Mean Square Error

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با افزایش سرعت جریان، آشفتگی جریان بیشتر می‌شود و نیروی جنبشی بر نیروهای لزوجتی غلبه می‌کند. بنابراین فاکتور اصطکاکی مطابق نمودار مودی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز فاکتور اصطکاکی به مقدار ثابتی میل می‌کند و این نشان می‌دهد فاکتور اصطکاکی در جریان‌های کاملاً آشفته مستقل از عدد رینولدز است. یافته‌های پژوهش‌های انجام‌شده حاکی از آن است که می‌توان عوامل نفوذپذیری هر محیط متخلخل درشت‌دانه‌ای را بر اساس برخی ویژگی‌های فیزیکی مصالح تشکیل‌دهنده آن محیط‌ها تعیین کرد. نمودارهای ارائه‌شده در زمینه رابطه سرعت و گرادیان هیدرولیکی غیر خطی بودن رابطه سرعت و گرادیان را نشان می‌دهد. این موضوع دلیل محکمی بر غیر داری بودن جریان است. همبسته‌شدن روابط درجه دوم و توانی با ضریب تبیین نسبتاً بالا حاکی از برقراری جریان غیر داری در این محدوده از دانه‌بندی ذرات است. ارزیابی نتایج این پژوهش به وسیله شاخص آماری استفاده‌شده نشان داد رابطه Kadlec and Knight (1996) نسبت به رابطه Ergun (1952) خطای کمتری دارد. و سرانجام اینکه روابط افت فشار به‌دست‌آمده در این

### REFERENCES

- Abelin, H., Birgersson, L., Moreno, L., Widen, H., Agren, Th., And Neretnieks, I. (1991) A Large-Scale Flow and Tracer Experiment in Granite: 2. *Results and Interpretation. Water Resour. Res.* 27, 3110-3135.
- Ahmed, N. and Sunada, D. K. (1969). Nonlinear Flow in Porous Media. *Journal of the Hydraulics Division, Am. Soc. Civil Engrs.*, Vol. 95, NO. HY 6. 1847.
- Ergun S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 48(2), 89-94.
- Forchheimer, P. (1901). Wasserbewegung durch boden, *Zeit. Ver. Deutsch. Ing.* 45, 1781-1788.
- Hall, K. R., Smith, G. M., and Turcket, D. J. (1994). Development of a non-linear porous media flow relationship for oscillatory unsteady flow. *J. of Coastal Research*, 10(1), 158-169.
- Hansen, D. (1992). The behavior of flowthrough rockfill dams. Ph. D. thesis, Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Ottawa, Ontario, p. 103 - 111.
- Hosseini, S. M. and Joy, D. M. (2006). Calibration of Hydraulic Parameters for Flows Through Rockfill Structures. *Dam Engineering*, 17(2), 85-111.
- Kadlec, H. R. and Knight, L. R. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers.
- Kovács, G. (1981). *Seepage Hydraulics, Development in Water Sciences*. Elsevier, NY.
- Leps, T. M. (1973). "Flow through rockfill-embankment dam engineering, Casagrande volume", edited by Hirschfield, R. C. and

- Paulo's, S.J., John Wiley and Sonse, New York, PP.87-107.
- Li, B., Garga, V. K., and Davies, M. H. (1998). "Relationships for non-Darcy flow in rockfill." *J. Hydraul. Eng.*, 124(2), 206–212.
- Martins, R. (1990). "Turbulent seepage flow through rockfill structures". *Water Power & Dam Construction*, March 1990, p. 41-45.
- Mc Corquodale, J. A., Hannoura, A., and Nasser, M. S. (1978). Hydraulic conductivity of rockfill. *Journal of Hydraulic Research*, 16(2), 123 - 137.
- Salehi, R., Rahimi, H., and Omid, M. H. (2005). An Empirical study of turbulent flow through confined coarse porous media. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*. 36 (2), 263 -2 71.(In Farsi)
- Samani, J. M. V., Samani, H. M. V., and Shaiannejad, M. (2004). Reservoir routing with outflow through rockfill dams. *J. Hydraulic. Res.* 42(4), 435–439.
- Sedghi-Asl, M. and Rahimi, H. (2011). adoption of Manning equation for 1-D non-Darcy flow Problems. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), 814-817.
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., and Salehi, R. (2014). Non-Darcy flow of water through a packed column test. *Transport in Porous Media* 101(2), 215-227.
- Stephenson, D. (1969). *Rockfill in Hydraulic Engineering*, Elsevier scientific, Amsterdam.
- Ward, J. C. (1964). Turbulent flow in porous media, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ.*90(HYD5).
- Wilkins, J. K. (1956). Flow of water through rockfill and its application to the design of dams. *Proceedings of the 2nd Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Canterbury University College, Christchurch, New Zealand.
- Zingg, T. (1935). Beitrag zur Schotteranalyse. *Schweizerische Mineralogische und Petrologische Mitteilungen* 15, 39–140.