



مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات جریان درون مصالح متخلخل گردگوشه

محمدباقر صلاحی^۱، منصور پرویزی^{۱*}، محمد صدقی اصل^۲

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲- استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۶ فروردین ۱۳۹۳
بازنگری: ۱۹ آذر ۱۳۹۳
پذیرش: ۱۵ تیر ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۹ تیر ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

جریان غیرداری
مصالح درشتدانه
دستگاه پرماتمر
بار ثابت

چکیده: استفاده از مصالح درشتدانه سنگریزه‌ای در سازه‌های آبی بدلیل خصوصیات ویژه آن‌ها روز به روز رو به افزایش است. به دلیل اهمیت جریان درون مصالح سنگریز، مطالعه خصوصیات این نوع از جریان اهمیت زیادی دارد. به‌منظور بررسی رفتار جریان درون مصالح دانه‌ای دستگاه پرماتمری طراحی و ساخته شد. آزمایش‌هایی بر روی سه نمونه ذرات سنگریزه‌ای گردگوشه با اندازه قطرهای متوسط ۱۰/۳۴۸، ۱۲/۱۲۷ و ۱۷/۷۸۵ میلی‌متر انجام شد و در زمان‌های مشخص دبی خروجی و هد بالادست و پایین‌دست ثبت شد و با انجام محاسبات و رسم نمودارهایی خصوصیات آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نمودارهای سرعت-گرادیان هیدرولیکی رسم شد که حاکی از غیر خطی بودن رابطه بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی می‌باشد و همین امر دلیل محکمی بر غیرداری بودن جریان است. ارزیابی نتایج حاصل از این تحقیق به‌وسیله شاخص آماری و مقایسه آن با روابط ارگان (۱۹۵۲)، کوکس (۱۹۸۱)، و سیدروپلو و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که رابطه سیدروپلو و همکاران از قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به دیگر معادلات برخوردار است. نتایج تحلیل نمودار عدد رینولدز-عامل اصطکاکی، نشان داد که هر چه قطر مصالح بزرگتر می‌شود عامل اصطکاکی کاهش و عدد رینولدز افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

در مواردی مانند عبور آب از یک ستون ماسه‌ای، جریان یک بعدی بوده و در شرایطی که هدایت هیدرولیکی و ابعاد هندسی ستون خاک معلوم باشد، از رابطه داری برای تخمین میزان جریان استفاده می‌گردد. رابطه داری دارای محدودیت‌های زیادی از جمله خطی بودن رابطه بین سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی و ماندگار بودن جریان و آرام بودن آن است. در صورت ارضا نشدن شرایط فوق، رژیم جریان از حالت داری خارج شده و به مرحله‌ای که اصطلاحاً غیرداری نامیده می‌شود، وارد می‌شود [۱].

استفاده از مصالح درشتدانه سنگریزه‌ای در سازه‌های آبی بدلیل خصوصیات ویژه آن‌ها روز به روز رو به افزایش است. بطوریکه امروزه از این مصالح برای فیلتراسیون، ساخت گابیون، پوشش کانال‌ها، حوضچه‌های آرامش و سدهای پاره‌سنگی استفاده می‌شود. رفتار جریان در این محیط‌ها بدلیل بزرگی اندازه ذرات و منافذ و بروز سرعت‌های بالا و آشفتگی در جریان بسیار پیچیده می‌باشد. از این رو برخلاف محیط‌های ریزدانه که جریان در آن‌ها ورق‌های (آرام) بوده 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 بیانگر یک ارتباط غیرخطی بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی در این نوع محیط‌ها بوده و به روابط غیرداری معروف هستند استفاده می‌شود [۲].

بیشتر تحقیقات انجام شده توسط محققان قبلی بصورت جریان یک بعدی بوده و در پرماتمرهای آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بررسی دقیق خصوصیات جریان آشفته در مصالح سنگریز، به دلیل پیچیدگی‌های محیط متخلخل بصورت دو بعدی امکانپذیر نیست به همین دلیل اغلب تحقیقات انجام شده قبلی، جریان را بصورت یک بعدی در نظر گرفته‌اند. پرماتمر، ستون استوانه‌ای است که مصالح سنگریز درون آن ریخته و دوطرف آن به دو مخزن آب مرتبط می‌شود. با اندازه‌گیری افت فشار (اختلاف تراز آب مخزن بالادست و پایین‌دست)، دبی عبوری و خصوصیات فیزیکی ذرات سنگریز یک رابطه غیرداری برای مصالح مورد آزمایش ارائه می‌شود. نسبت بین طول و قطر پرماتمر باید در حدود ۳ تا ۵ باشد تا شرایط جریان یک بعدی تامین گردد. برای صرفنظر از تاثیر جداره^۱ بر خصوصیات جریان، ضریب نسبت قطر پرماتمر به قطر متوسط مصالح مورد استفاده باید بزرگتر از ۱۰ باشد [۳].

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Msedghi@yu.ac.ir

^۱ Wall effect

وارد^۴ با تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی از ۲۰ محیط متخلخل مختلف معادلات ۴ و ۵ را برای برآورد A و B پیشنهاد داد [۸]:

$$A = \frac{36.0v}{gd^r} \quad (4)$$

$$B = \frac{10.44}{gd} \quad (5)$$

با گسترش مدل کلاسیک کوزنی کارمن، ارگان^۵ معادله ۶ و ۷ را پیشنهاد داد [۹]:

$$A = \frac{15.0v(1-\varepsilon)^r}{g\varepsilon^r d} \quad (6)$$

$$B = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{g\varepsilon^r d} \quad (7)$$

کواکس^۶ با تجزیه و تحلیل یک مجموعه از ۳۰۰ داده، معادلاتی مشابه معادلات ارگان ارائه کرد [۱۰]:

$$A = \frac{144v(1-\varepsilon)^r}{g\varepsilon^r d} \quad (8)$$

$$B = \frac{2.4(1-\varepsilon)}{g\varepsilon^r d} \quad (9)$$

کادلک و نایت^۷ معادلات ۱۰ و ۱۱ را پیشنهاد کردند [۱۱]:

$$A = \frac{225(1-\varepsilon)}{g\varepsilon^{r.v} d^r} \quad (10)$$

$$B = \frac{2(1-\varepsilon)}{g\varepsilon^r d} \quad (11)$$

سیدروپولو و همکاران^۸ (۲۰۰۷) با مطالعات خود معادلات ۱۲ و ۱۳ را پیشنهاد کردند [۱۲]:

$$A = \frac{0.0033n^{0.06}}{d^{1.5}} \quad (12)$$

$$B = \frac{0.194}{d^{1.265} n^{1.14}} \quad (13)$$

که در این روابط:

ε تخلخل، d قطر متوسط مصالح، v لزجت سینماتیکی و g شتاب جاذبه زمین است.

معروفترین رابطه توانی توسط ویلکینز^۹ ارائه گردیده است. این معادلات معمولاً بصورت روابطی از گرادیان هیدرولیکی و سرعت بیان می‌شوند.

محققان مختلف سعی کردند برای بررسی دقیق خصوصیات جریان، از جنبه نظری روابطی را ارائه دهند که در برگیرنده همه حالات جریان و از نظر کاربرد نیز ساده باشند. همه روابط ارائه شده در زمینه جریان درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه، بصورت یک معادله درجه دوم و یا رابطه توانی ارائه شده‌اند.

چنانچه جریان درون محیط سنگریز دربرگیرنده محدوده وسیعی از رژیم‌های جریان باشد، حالت درجه دوم نسبت به حالت توانی، جواب‌های بهتری می‌دهد. همه معادلات ارائه شده در این زمینه در ادامه کار فرشهایمر^۱ (۱۹۰۱) می‌باشند [۴]. معادله افت-فشار درجه دوم فرشهایمر بصورت زیر است:

$$i = AV + BV \quad (1)$$

که در آن V سرعت متوسط جریان، i گرادیان هیدرولیکی، A ضریب جریان غیرداریسی که به خواص جریان و محیط متخلخل بستگی دارد و B ضریب جریان غیرداریسی است که فقط به خواص محیط متخلخل بستگی دارد. روابط بسیاری به حالت درجه دوم ارائه شده‌اند که در اینجا به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد.

مککورکودال و همکاران^۲ یک رابطه عمومی غیرداریسی برای محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای با توجه به قطر، توزیع و اندازه ذرات سنگریزه، زبری سطح، تخلخل و اثر دیواره ارائه دادند. این معادله بی بعد براساس ۱۲۵۰ داده آزمایشگاهی بدست آمده از پرماتر با دامنه ذرات بین ۵۵ تا ۷۹ میلیمتر و نیز عدد رینولدز منفذی (nv/Vd) متغیر بین ۰/۰۰۱ تا ۲۰۰۰۰ ارائه شده است. همچنین این معادله برای دو رژیم جریان ارائه شده است [۵].

صدقی اصل و رحیمی (۲۰۱۱) با مطالعه بر روی ۶ قطر مصالح درشتدانه با دامنه ذرات بین ۲/۸۳ تا ۵۶/۸ میلیمتر رابطهای درجه دومی بر اساس عامل اصطکاکی و فرمول مانینگ برای محیط‌های درشتدانه متخلخل ارائه کردند [۶]:

$$i = \frac{bv}{rgnd^r} V + \frac{a}{rgnd} V^r \quad (2)$$

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

از بین محققانی که جریان‌های غیرخطی غیرماندگار و ماندگار را در محیط‌های متخلخل مطالعه کرده‌اند، مک کورکودال و همکاران (۱۹۷۸) فرض کردند که ضرایب فرشهایمر با غیرماندگار شدن جریان، بدون تغییر باقی بماند؛ حال و همکاران^۳ نیز بدون توجه به رابطه‌ی فرشهایمر و به کمک تحلیل ابعادی به مطالعه‌ی این جریان‌ها پرداخته‌اند [۷].

⁴ Ward

⁵ Ergun

⁶ Kovács

⁷ Kadlec, H.R., Knight, L.R.

⁸ Sidiropoulou et al

⁹ Wilkins

¹ Forchheimer

² Mc Corquodale et al

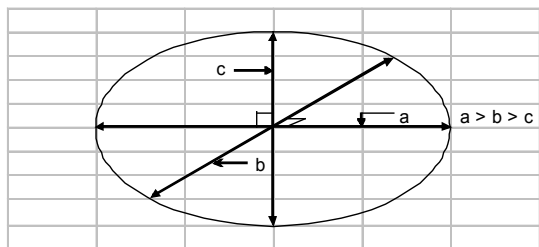
³ Hall et al

این تحقیق اهداف عمده عبارتند از: ۱- طراحی و ساخت یک پرماتمر برای مطالعات آزمایشگاهی جریان غیرداریسی ۲- بررسی ارتباط بین سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی (افت-فشار) درون مصالح درشتدانه بصورت آزمایشگاهی ۳- ارزیابی دقت روابط افت- فشار پر کاربرد از نوع درجه دوم.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح مورد آزمایش

در این تحقیق، از یک نوع سنگدانه با سه قطر متفاوت بعنوان محیط متخلخل برای پر کردن لوله آزمایشگاهی استفاده شده است. نمون‌های از مصالح در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور اندازه‌گیری خصوصیات هندسی از جمله متوسط قطر میانه سه محوری و اقطار آن‌ها تعداد ۱۲۰ دانه سنگی از هر یک از مصالح بطور تصادفی انتخاب شده و اقطار سه محوری (a, b and c) آن‌ها با دقت صدم میلیمتر به کمک یک کولیس برداشت گردید (شکل ۱).



شکل ۱: تعریف اقطار سه محوری برای یک سنگدانه

Fig.1. Definition of three-axial diameters for a rock aggregates

برای تعریف شکل مصالح از دیاگرام زینگ استفاده می‌شود [۱۸]. با اندازه‌گیری سه قطر a, b و c میتوان براساس دیاگرام زینگ شکل و حجم هر سنگدانه را برآورد کرد. شکل‌های ۳ تا ۵ نمودار زینگ را برای این مصالح نشان میدهد.



شکل ۲: نمایی از مصالح مورد استفاده در تحقیق

Fig.2. View of aggregates used in this research

ویلیکینز بر اساس آزمایش‌های انجام شده در یک پرماتمر بزرگ، رابطه ۱۴ را ارائه داد:

$$V_v = Wm^{0.5} \cdot i^{0.54} \quad (14)$$

که در آن W ثابت ویلیکینز است که با توجه به جدول ۱ بدست می‌آید. حاصلضرب $Wm^{0.5}$ را میتوان بعنوان هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در نظر گرفت. توان ۰/۵۴ گرادیان هیدرولیکی است که نشاندهنده این مطلب می‌باشد که جریان به حالت کاملاً آشفته تبدیل شده است [۱۳]. از آنجا که $V_v = \frac{V}{n}$ ، با جایگذاری در معادله ویلیکینز رابطه ۱۵ بدست می‌آید:

$$i = \frac{1}{m^{0.93}} \left[\frac{U}{W_n} \right]^{1.85} \quad (15)$$

جدول ۱: مقادیر ثابت ویلیکینز برای انواع مصالح سنگریز [۱۳].

Table1. Constant values of Wilkins for different size of aggregates [13]

واحد‌های سرعت منفذی و شعاع هیدرولیکی	ثابت ویلیکینز W	
	شن شکسته	گلوله‌های شیشه‌ای صیقلی
m/sec & m	$5/m^{1/2}/sec^{24}$	$7/m^{1/2}/sec^{33}$
in/sec & in	$32/in^{1/2}/sec^9$	$46/in^{1/2}/sec^5$

استفنسون^۱ با شبیه‌سازی جریان در لوله‌ها فرض کرد که افت هیدرولیکی سطح آب با $n^2 gm / V^2$ ارتباط داشته باشد. از آنجا که شعاع متوسط هیدرولیکی با اندازه ذرات متناسب است، او گرادیان هیدرولیکی جریان درون سنگریزه را بصورت معادله ۱۶ بیان کرد [۱۴]:

$$i = \frac{K_{st} V^2}{gdn^2} \quad (16)$$

که در آن K_{st} فاکتور استفنسون می‌باشد و از رابطه ۱۷ تعیین می‌گردد:

$$K_{st} = \frac{100}{R_e} + K_t \quad (17)$$

که در آن K_t برای سنگ‌های با سطح صاف برابر با ۱، برای سنگ‌های نیمه صاف ۲ و برای سنگ‌های تیز و گوشهدار ۴ می‌باشد. برای جریان کاملاً آشفته $K_t = K_{st}$ است و می‌توان از آن بعنوان فاکتور مقاومت هیدرولیکی نام برد که عکس هدایت هیدرولیکی می‌باشد.

اخیراً تحقیقات دیگری درخصوص مشخصات جریان‌های متلاطم و غیرداریسی درون محیط‌های متخلخل درشتدانه چه در حالت ماندگار و چه در حالت غیرماندگار انجام گردیده است [۱۷-۱۵]. هر چند تاکنون تحقیقات متعددی در مورد جریان غیرداریسی انجام شده است اما کم‌کم نیاز به تحقیقات بیشتر برای تشریح و تبیین خواص جریان وجود دارد. در

¹ Stephenson

از روابط ریاضی چگالی و وزن و حجم ذرات سنگریز می‌باشد. روش دوم اندازه‌گیری مستقیم است که در تحقیق حاضر از این روش استفاده شده است. در روش اندازه‌گیری مستقیم، ابتدا ذرات سنگریز به درون یک محفظه با حجم مشخص ریخته می‌شوند. حجم محفظه بعنوان حجم کل (حجم سنگدانه‌ها و فضای خالی) در نظر گرفته می‌شود. بعد از پر کردن محفظه با سنگدانه‌ها، به درون آن آب ریخته می‌شود تا حجم منافذ خالی پر گردد. با تقسیم حجم منافذ خالی (حجم آب ریخته شده به درون محفظه) به حجم کل محفظه مقدار تخلخل بصورت زیر بدست می‌آید:

$$n = \frac{V_V}{V_B} \quad (20)$$

که در آن، n تخلخل مصالح، V_V حجم منافذ خالی که همان حجم آب ریخته شده به درون محفظه است و V_B حجم کل محفظه می‌باشد (جدول ۲).

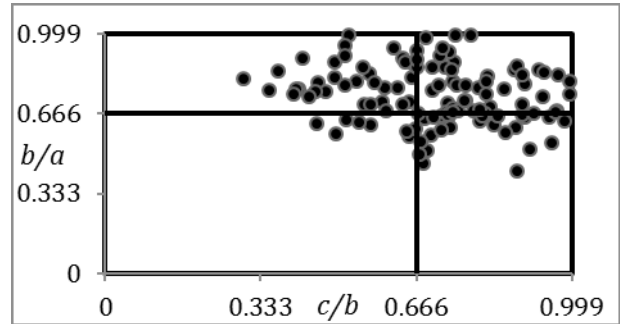
جدول ۲: تخلخل مصالح مورد استفاده در تحقیق

Table 2. Porosity of different aggregates used in this study

تخلخل (%)	حجم منافذ خالی (میلیلیتر)	حجم کل (میلیلیتر)	مصالح با قطر متوسط (میلیمتر)
۴۰/۷۱	۲۸۵۰	۷۰۰۰	۱۷/۷۸۵
۳۹/۷۸	۲۷۸۵	۷۰۰۰	۱۲/۱۲۷
۳۸/۶۴	۲۷۰۵	۷۰۰۰	۱۰/۳۴۸

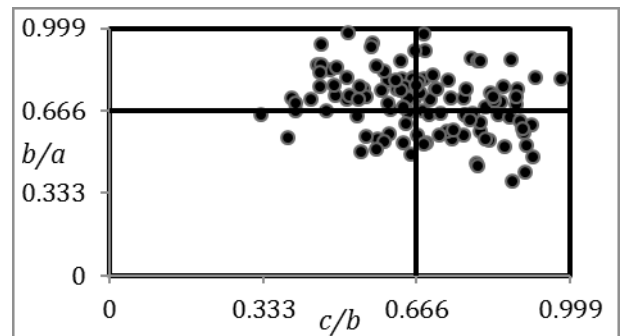
۲-۳- مدل آزمایشگاهی

پرماتر متشکل از ۵ قسمت کلی، شامل مخزن بالادست، مخزن پایین‌دست، لوله مصالح، تابلو پیژومتری و مخزن اندازه‌گیری دبی می‌باشد (شکل ۶). از مخزن بالادست برای ذخیره کردن آب برای انجام آزمایش استفاده می‌شود. ابعاد آن $۱۰۰ \times ۵۰ \times ۵۰$ سانتی‌متر می‌باشد. جنس این مخزن از شیشه به ضخامت ۸ میلی‌متر می‌باشد و درون یک قاب فلزی قرار گرفته است. به منظور خواندن تغییرات هد از روی مخزن، خط‌کشی به طول یک متر روی بدنه آن از کف مخزن تا لبه بالای آن 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 $۵۰ \times ۵۰ \times ۵۰$ سانتی‌متر است. این مخزن نیز مانند مخزن بالادست از شیشه و قاب فلزی تشکیل شده است. به منظور خواندن اختلاف هد با مخزن بالادست خط‌کشی به طول ۵۰ سانتی‌متر از کف مخزن تا لبه بالای آن نصب شده است. در لوله‌های به قطر ۲۰ سانتی‌متر، از جنس پلکسی، مصالح مورد نظر قرار داده شده و برای جلوگیری از ریختن مصالح به بیرون با توری دو سر آن مسدود گردید. در لوله گفته شده، ۱۰ سوراخ به قطر ۸ میلی‌متر، در دو ردیف موازی و هم راستای ۵ تایی برای اتصال لوله‌های تخته پیژومتری ایجاد شده است و برای



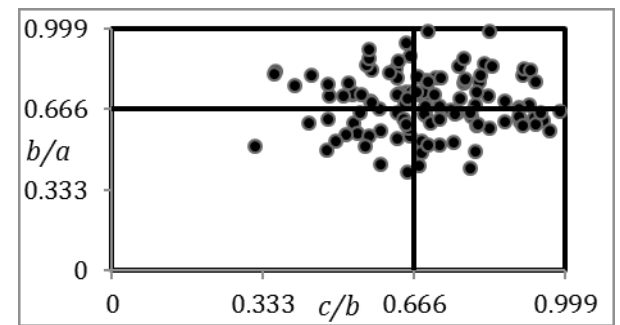
شکل ۳: نمودار زینگ برای ۱۲۰ سنگدانه شکسته گوشه دار ۱۷/۷۸۵

Fig.3. Zing diagram for 120 crushed aggregates with 17.85 mm



شکل ۴: نمودار زینگ برای ۱۲۰ سنگدانه شکسته گوشه دار ۱۲/۱۲۷ میلی‌متری

Fig.4. Zing diagram for 120 crushed aggregates with 12.137 mm

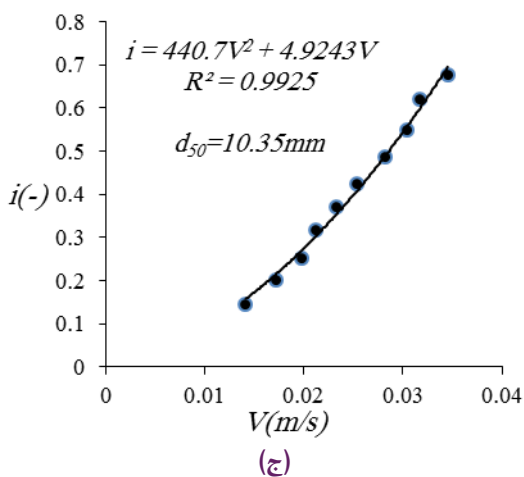
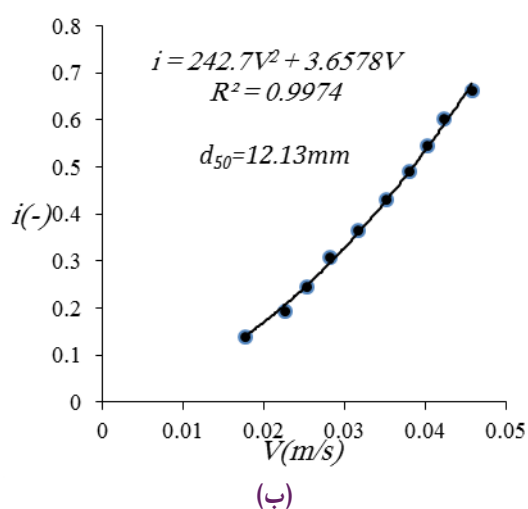
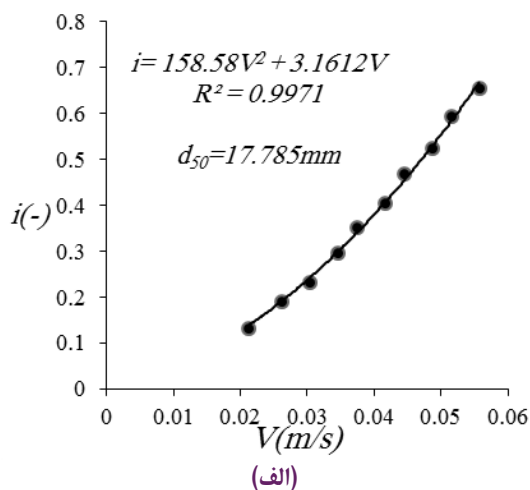


شکل ۵: نمودار زینگ برای ۱۲۰ سنگدانه شکسته گوشه دار ۱۰/۳۴۸ میلی‌متری

Fig.5. Zing diagram for 120 crushed aggregates with 10.348 mm

۲-۲- تعیین تخلخل مصالح سنگریز

تخلخل یکی از مهمترین مشخصه‌های مصالح سنگریز می‌باشد که در محاسبات و مدلسازی پروفیل سطح آب دارای نقش اصلی می‌باشد. در واقع تخلخل نقطه تمایز مدلسازی پروفیل سطح آب درون کانال‌های باز و مصالح سنگریز است. بنابراین تعیین آن اهمیت بسزائی در دقت محاسبات دارد. معمولاً برای تعیین تخلخل دو روش وجود دارد. روش اول استفاده



شکل ۷: ارتباط غیر خطی بین گرادیان و سرعت جریان مصالح گردگوشه، رابطه درجه ۲ (الف، ب و ج)

Fig.7. Non-linear relationships (quadratic form) between hydraulic gradient and velocity by use of Forchheimer equation for rounded material

هواگیری ۲ سوراخ بر روی لوله ایجاد گردید. تابلو پیزومتری متشکل از ۱۰ عدد لوله پیزومتر می‌باشد و یک خطکش به طول یک متر در کنار آن‌ها برای قرائت هد از روی پیزومتر تعبیه شده است. از این پیزومترها در آزمایش هد ثابت استفاده می‌شود. مخزن اندازه‌گیری دبی جریان به ابعاد $۵۲ \times ۶۲ \times ۹۶$ سانتی‌متر برای جمع‌آوری آب خروجی از مخزن پایین‌دست و اندازه‌گیری دبی خروجی از جنس آهن گالوانیزه تهیه و آماده گردید.



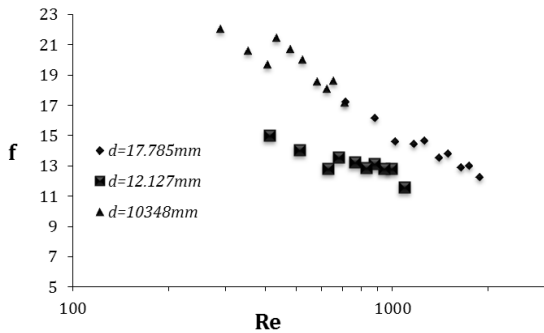
شکل ۶: تصویر مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق به همراه اجزای آن

Fig.6. General view of the experimental set-up used in this study with its components

۳- نتایج اجرای آزمایش بار ثابت

پس از تعیین قطر مصالح، مصالح درون استوانه (لوله پلکسی) دستگاه آزمایش بار ثابت ریخته شدند. انتهای نمونه با صفحه توری پوشانده شده و مخزن بالادست به آرامی از آب پر شد. البته مدتی لازم است تا محیط متخلخل اشباع و آب از پایین دست سرریز شود. پس از اشباع کردن نمونه عبور جریان ورودی از لوله مصالح را قطع نمی‌شود و جریان در نمونه برقرار است. به مخزن بالادست اجازه داده شد تا در تراز ثابت بماند. در یک تراز خاص بعنوان زمان شروع آزمایش، آزمایش آغاز گردید. باید توجه داشت که تراز مخزن بالادست با گذشت زمان، ثابت است. پیزومترها در تابلوی پیزومتری نصب و تعبیه شده بودند و بوسیله روش عکس‌نگاری تراز آب درون پیزومترها در هدهای مختلف ثبت گردید. میزان دبی عبوری جریان نیز به روش حجمی در خروجی پرماتر بدست آمد. سرعت درون محیط متخلخل از تقسیم دبی جریان بر سطح مقطع عمود بر جریان بدست آمد. در این تحقیق برای محاسبه عدد رینولدز از رابطه رینولدز منفذی تعریف شده بوسیله مک کورکودال و همکاران (۱۹۷۸) و برای محاسبه عامل اصطکاکی از رابطه دارسی-وایسباخ استفاده گردید. ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان (رابطه افت-فشار) حاصل از انجام این تحقیق در شکل ۷ و ۸ به تصویر کشیده شده‌اند.

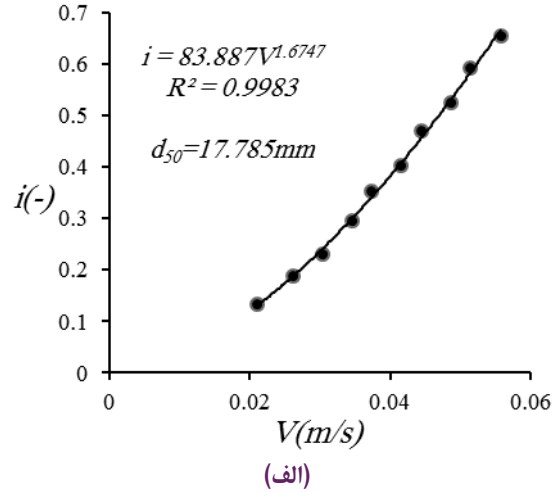
ایجاد آن وجود یک رابطه غیرخطی بین سرعت جریان و گرادیان است. این ارتباط در قالب شکل های ۷ و ۸ برای مصالح مختلف نشان داده شده است. این شکل ها بهوضوح بیانگر غیرخطی بودن رابطه بین سرعت و گرادیان میباشند که همین امر دلیل محکمی بر غیرداری بودن جریان است. همبسته شدن روابط درجه دوم و توانی با ضریب تبیین به نسبت بالا حاکی از برقراری و حاکم بودن جریان غیرداری در این محدوده از دانه بندی ذرات است. معادلات و روابط افت-فشار بدست آمده در این تحقیق میتوانند برای محاسبات پروفیل سطح آب درون سدها و زهکش های سنگریز بکار روند. شکل ۹ ارتباط بین عدد رینولدز و عامل اصطکاکی بدست آمده در استوانه مصالح تحت فشار را نشان می دهد (پریماتر). همانطور که در شکل دیده می شود، با افزایش عدد رینولدز، فاکتور اصطکاکی کاهش می یابد. در واقع با افزایش سرعت جریان، تلاطم بیشتر شده و نیروی جنبشی بر نیروهای لزوجتی غلبه می نماید و بنابراین عامل اصطکاکی مطابق با نمودار مودی کاهش می یابد.



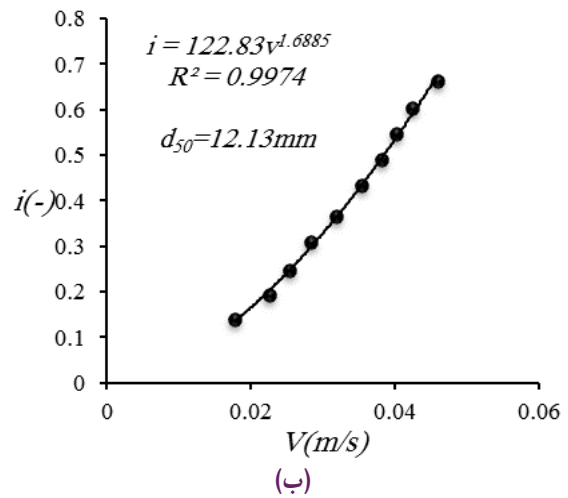
شکل ۹: رابطه بین عدد رینولدز و عامل اصطکاکی در پریماتر

Fig.9. The relationship between Reynolds number and friction factor in the packed column test

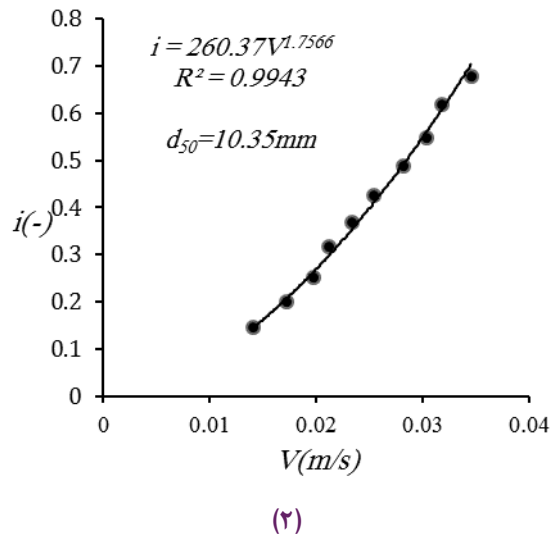
همانطور که مشاهده می شود، به ازای هر دانه بندی خاص، با افزایش عدد رینولدز، فاکتور اصطکاکی به مقدار ثابتی میل می کند که این امر مطابق نمودار مودی است [۱۹]. همچنین دیده می شود که هر چه قطر مصالح بزرگتر می شود فاکتور اصطکاکی کاهش و عدد رینولدز افزایش می یابد. تا جایی که تغییرات فاکتور اصطکاکی کم می شود. این تغییرات کم فاکتور اصطکاکی در اعداد رینولدز بالا نشانگر وابسته بودن آن به قطر مصالح می باشد و مستقل از عدد رینولدز می باشد. بطور کلی میتوان بیان داشت که با افزایش دبی و سرعت جریان، عدد رینولدز جریان افزایش می یابد و متعاقب آن فاکتور اصطکاکی داری-ویسباخ کاهش می یابد تا اینکه در اعداد رینولدز نسبتاً بالا مستقل از عدد رینولدز می گردد. اعتقاد بر این است که در جریانهای متلاطم با سطح بالا، فاکتور اصطکاکی مستقل از عدد رینولدز و خصوصیات جریان خواهد بود. میتوان اینگونه توجیه کرد هر چه عدد رینولدز افزایش یابد درجه یا سطح تلاطم افزایش می یابد



(الف)



(ب)



(۲)

شکل ۸: ارتباط غیرخطی بین گرادیان و سرعت جریان مصالح گردگوشه، رابطه توانی (الف، ب و ج)

Fig.8. Non-linear relationships (power form) between hydraulic gradient and velocity by use of Forchheimer equation for rounded material

بررسی جریان غیرداری هدف اصلی این تحقیق می باشد و شرط

۴- ارزیابی روابط ارگان، کوکس و سیدروپلو

در این بخش با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به ارزیابی معادلات ارگان (۱۹۵۲)، کوکس (۱۹۸۱) و سیدروپلو (۲۰۰۷) برای قطرهای مختلف مصالح پرداخته می‌شود. برای مقایسه روابط از تابع هدف نرمال شده (NOF) مبتنی بر شیب رگرسیون استفاده می‌گردد. تابع هدف نرمال شده به صورت نسبت ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) به میانگین X کلی داده‌های آزمایشگاهی تعریف شده است:

$$NOF = \frac{RMSE}{X} \quad (21)$$

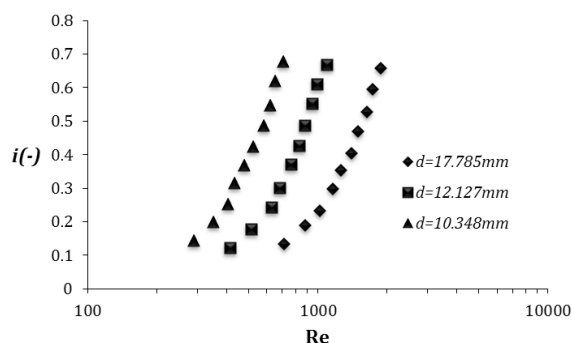
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (22)$$

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (23)$$

که در آن N تعداد داده‌های آزمایشگاهی، X میانگین داده‌های آزمایشگاهی، x_i مقادیر هر مرحله معادلات و y_i مقادیر هر مرحله داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در ارزیابی روابط این محققین، از تحقیق‌های آماری ساده استفاده شد که نتایج آن‌ها در جدول (۳) خلاصه شده است. همچنین نتایج مقایسه روش‌های ارگان (۱۹۵۲)، کوکس (۱۹۸۱) و سیدروپلو (۲۰۰۷) نسبت به داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر در جدول (۴) آورده شده است.

تا اینکه به سطح نهائی جریان متلاطم کاملاً توسعه یافته برسد. 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 گفته می‌شود.

شکل ۱۰ ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و عدد رینولدز را برای سه دانه‌بندی مورد استفاده در تحقیق حاضر نشان می‌دهد. با افزایش گرادیان هیدرولیکی عدد رینولدز نیز افزایش می‌یابد که این حاکی از آشفته بودن جریان در گرادیان‌های بالا است. نکته مهم دیگر این است که در اعداد رینولدز بالاتر برای هر دانه‌بندی، شیب افزایش گرادیان نسبت به عدد رینولدز به سرعت افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰: رابطه بین عدد رینولدز و گرادیان هیدرولیکی در پرماتر
Fig.10. The relationship between Reynolds number and hydraulic gradient in the packed column test

جدول ۳: محاسبه مقادیر A و B از روش‌های ارگان (۱۹۵۲)، کوکس (۱۹۸۱)، سیدروپلو (۲۰۰۷) و داده‌های آزمایشگاهی

Table 3. Evaluation of coefficient A and B of Forchheimer Equation by various methods for both crushed and rounded Materials

مصالح (میلی‌متر)	ارگان (۱۹۵۲)		کوکس (۱۹۸۱)		سیدروپلو (۲۰۰۷)		آزمایشگاهی	
	A	B	A	B	A	B	A	B
d=۱۷/۷۸۵	۰/۳۲۷	۸۸/۱۴	۰/۳۱۴	۱۲۰/۸۸	۱/۳۳	۸۸/۳۹	۳/۳۱۶	۱۵۸/۶
d=۱۲/۱۲۷	۰/۷۷۸	۱۴۰/۷۲	۰/۷۴۷	۱۹۲/۹۹	۲/۳۶	۱۴۷/۳۱	۳/۶۶	۲۴۲/۷
d=۱۰/۳۴۸	۱/۲۱۱	۱۸۳/۳۵	۱/۱۶۳	۲۵۱/۴۵	۲/۹۹	۱۸۶/۱۱	۴/۹۲	۴۴۰/۷

جدول ۴: تحلیل‌های آماری مربوط به روش‌های ارگان (۱۹۵۲)، کوکس (۱۹۸۱)، سیدروپلو (۲۰۰۷) و داده‌های آزمایشگاهی

Table 4. Evaluation of theoretical relation for estimating of A and B (the Forchheimer coefficients) for rounded aggregates

	مصالح (میلی‌متر) d=۱۷/۷۸۵			مصالح (میلی‌متر) d=۱۲/۱۲۷			مصالح (میلی‌متر) d=۱۰/۳۴۸		
	ارگان	کوکس	سیدروپلو	ارگان	کوکس	سیدروپلو	ارگان	کوکس	سیدروپلو
RMSE	۰/۳۱	۰/۲۷۲	۰/۲۰	۰/۳۰۲	۰/۲۶	۰/۱۶۸	۰/۲۸۱	۰/۲۶۶	۰/۲۳۰
X	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۹۷	۰/۳۷۵	۰/۳۷۵	۰/۴۰۴	۰/۴۰۴	۰/۴۰۴
NOF	۰/۸۰	۰/۷۰۸	۰/۵۲۷	۰/۷۶۰	۰/۶۵۴	۰/۴۲۴	۰/۶۹۷	۰/۶۵۸	۰/۵۷۱

می‌شود. نتایج شاخص‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق مندرج در جدول ۴ بیانگر این است که برای همه دانه‌بندیها رابطه سیدروپولو (۲۰۰۷) دقت بیشتری در برآورد ضرایب معادله درجه دوم فرشه‌ایمر دارد زیرا میزان خطای بدست آمده آن در مقایسه با دو رابطه دیگر کمتر است. بنابراین برای استفاده مهندسان طراح و دیگر محققان توصیه می‌شود از رابطه سیدروپولو (۲۰۰۷) برای مطالعه شرایط جریان غیرداری و تعیین رابطه افت-فشار استفاده شود.

۵- نتیجه گیری

با افزایش سرعت جریان، آشفتگی جریان بیشتر می‌شود و نیروی جنبشی بر نیروهای لزوجتی غلبه کرده و بنابراین عامل اصطکاکی مطابق با نمودار مودی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، عامل اصطکاکی به مقدار ثابتی میل می‌نماید و این نشان می‌دهد که عامل اصطکاکی در جریان‌های کاملاً آشفته مستقل از عدد رینولدز می‌باشد.

یافته‌های تحقیقات انجام شده توسط نگارندگان مقاله حاضر، حاکی از آن است که میتوان عوامل نفوذپذیری هر محیط متخلخل درشتان‌های را بر اساس برخی ویژگی‌های فیزیکی مصالح تشکیل‌دهنده آن محیطها تعیین کرد.

نمودارهای ارائه شده از رابطه بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی نشانگر غیرخطی بودن رابطه بین سرعت و گرادیان است که همین امر دلیل محکمی بر غیرداری بودن جریان است. همبسته شدن روابط درجه دوم و توانی با ضریب تبیین بهنسبت بالا حاکی از برقراری و حاکم بودن جریان غیرداری در این محدوده از دانه‌بندی ذرات است.

ارزیابی نتایج حاصل از این تحقیق بوسیله شاخص آماری مورد استفاده نشان داد که رابطه سیدروپولو و همکاران (۲۰۰۷) نسبت به معادلات دیگر قابل اعتمادتر است.

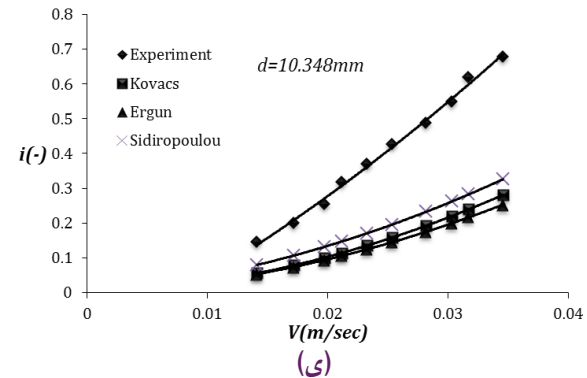
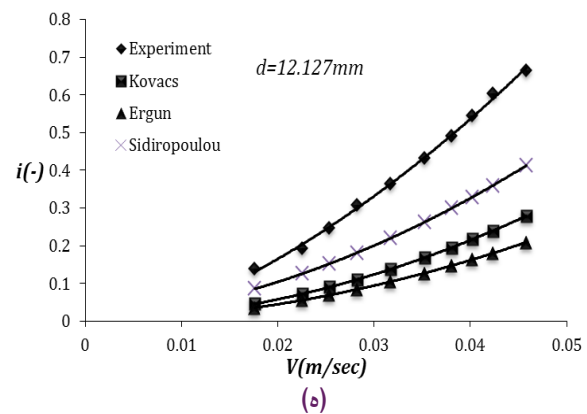
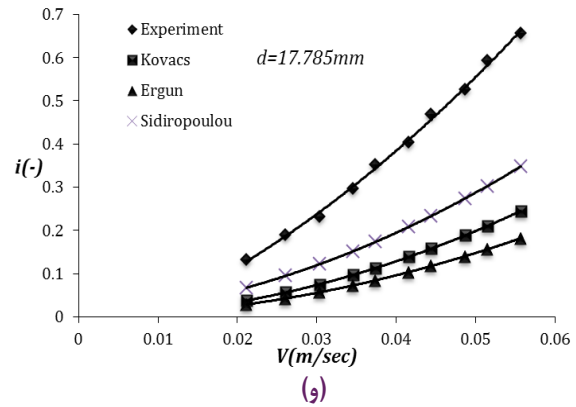
و در پایان اینکه معادلات و روابط افت فشار بدست آمده در این تحقیق میتوانند برای محاسبات پروفیل سطح آب درون سدها و زهکش‌های سنگریز بکار روند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از تمامی کسانی که در تهیه و ساخت وسیله آزمایشگاهی همکاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] Izbash, S.V., O filtracii v krupnozernistom materiale. Izv. Nauchno-Issled. Inst. Gidro-Tekh. (N.I.LG.), Leningrad, 1931.
- [2] Forchheimer, P., Wasserbewegung durch boden. Zeit.



شکل ۱۱: مقایسه رابطه غیر خطی سرعت و گرادیان هیدرولیکی از روش ارگان، کوکس و سیدروپولو و داده‌های آزمایشگاهی با قطرهای مختلف (و، ه، ی)

Fig.11. Comparison between hydraulic gradient and flow velocity using Ergun, Kovacs, Sidiropoulou methods and experimental data with different sizes

با توجه به داده‌های جدول ۳، شکل ۱۱ ترسیم شده است که تغییرات V در مقابل i را برای چهار گروه داده‌ها نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود گرادیان هیدرولیکی محاسبه شده از رابطه سیدروپولو به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است ولی گرادیان هیدرولیکی محاسبه شده بر اساس دو رابطه دیگر خطای بیشتری نسبت به رابطه سیدروپولو دارد. در سرعت‌های بالاتر این خطا بیشتر

- [5] Ward, J., Turbulent flow in porous media. *Journal of the Hydraulics Division*, 1964. 90(5): p. 1-12.
- [6] Hansen, D., The behaviour of flowthrough rockfill dams. 1992: *University of Ottawa* (Canada).
- [7] Ergun, S., Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.*, 1952. 48: p. 89-94.
- Ver. Duetch Ing., 1901. 45: p. 1782-1788.
- [3] Mccorquodale, J.A., A.-A.A. Hannoura, and M. Sam Nasser, Hydraulic conductivity of rockfill. *Journal of Hydraulic Research*, 1978. 16(2): p. 123-137.
- [4] Sedghi-Asl, M., Investigation of the limits of the Dupuit analogue for steady gradually varied flow through coarse porous media. 2010, Ph. D. thesis, Irrigation and Reclamation Engineering, Univ. of Tehran, Tehran (in Persian.)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M.B Salahi, M. Parvizi, M. Sedghi-Asl, "Laboratory Investigation of Non-Darcy Flow through Rounded Porous Materials". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2) (2017) 295-303.

DOI:10.22060/ceej.2015.407



