

بررسی جریان آشفته درون محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای تحت فشار

رضا صالحی^۱، حسن رحیمی^۲ و محمدحسین امید^۳

۱، ۲، ۳، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استاد و استادیار پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله ۸۳/۳/۲۰

خلاصه

بمنظور بررسی رفتار جریان درون مصالح سنگریزه‌ای تحت فشار و تعیین تفاوت یا تشابه جریان در این حالت با جریان آزاد درون این مصالح آزمایش‌هایی بر روی شش نمونه ذرات سنگریزه‌ای با اندازه‌های ۲/۸۳ تا ۵۶/۸ میلی‌متر با استفاده از دو مدل فیزیکی استوانه‌آزمایش (برای بررسی جریان تحت فشار) و کانال آزمایشگاهی (برای بررسی جریان آزاد)، صورت گرفت. با مقایسه نتایج مربوط به جریان درون هر دو مدل مشخص گردید که: با افزایش میزان فشار اولیه در آزمایش‌های جریان تحت فشار، به ازای یک سرعت یکسان، میزان افت انرژی در نمونه‌ها، بیشتر از نمونه‌های درحالت جریان آزاد می‌باشد. همچنین با مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط ارائه شده توسط استفسون (۱۹۷۹) و فلتون و هره‌را (۱۹۹۱)، مشاهده شد که نتایج مربوط به جریان درحالت آزاد با این منحنی‌ها تطابق خوبی داشته، درحالی‌که داده‌های مربوط به جریان تحت فشار، مقادیر فاکتور اصطکاک بیشتری را نسبت به این منحنی‌ها نتیجه می‌دهند. نتایج آزمایش‌ها همچنین نشان داد که شکل منحنی‌های فاکتور اصطکاک - عدد رینولدز برای رینولدزهای کمتر از ۲۰۰ و بیشتر از ۲۰۰ در جریان تحت فشار با یکدیگر متفاوت بوده، بطوریکه می‌توان نتایج را به دو بخش جداگانه برای محدوده رینولدزهای ذکر شده تقسیم نمود. با توجه به تفاوت رفتار جریان تحت فشار درون لوله آزمایش با جریان آزاد درون کانال آزمایشگاهی، دو رابطه جداگانه برای ارتباط گرادیان هیدرولیکی با سرعت و دبی تراوش در جریان درون لایه‌های درشت‌دانه تحت فشار در محدوده رینولدزهای ذکر شده بدست آمد و نتایج با آزمایش‌های انجام شده بر روی ذراتی با اندازه ۷/۱ میلی‌متر، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از روابط بدست آمده تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. انتظار می‌رود از نتایج این تحقیق و روابط بدست آمده بتوان در جهت تعیین پارامترهایی از قبیل دبی تراوش و گرادیان هیدرولیکی جریان درون لایه‌های درشت‌دانه تحت فشار در محدوده اندازه ذرات و رینولدزهای ذکر شده استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: سنگریزه، جریان آشفته، جریان تحت فشار، عدد رینولدز، عامل اصطکاک

مقدمه

اندازه ذرات و منافذ و بروز سرعت‌های بالا و آشفتنگی 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 درشت دانه 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

استفاده از مصالح درشت دانه سنگریزه‌ای در سازه‌های آبی دلیل خصوصیات ویژه آنها روز به روز رو به افزایش می‌باشد. بطوریکه امروزه از این مصالح جهت فیلتراسیون، ساخت گابیون، پوشش کانال‌ها، حوضچه‌های آرامش و سدهای پاره سنگی استفاده می‌شود. رفتار جریان در این محیط‌ها بدلیل بزرگی

لایه‌های درشت دانه آزاد صورت گرفته و یا چنانچه از یک لایه محصور برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است، بدون اینکه استدلال منطقی در مورد دقت و یا چگونگی استفاده از روابط بدست آمده در هر حالت برای حالت دیگر صورت گیرد، از این روابط برای هر دو حالت جریان استفاده کرده‌اند. در واقع هیچگونه تفاوتی بین رفتار جریان درون این لایه‌ها در دو حالت جریان آزاد و تحت فشار منظور نشده است. از این‌رو در تحقیق حاضر از دو مدل آزمایشگاهی استوانه تحت فشار و کانال جریان آزاد جهت اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز، به منظور مقایسه جریان در دو حالت آزاد و تحت فشار درون مصالح سنگریزه‌ای و تعیین یک رابطه مناسب برای جریان تحت فشار درون مصالح سنگریزه‌ای استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

با استفاده از دو مدل آزمایشگاهی استوانه تحت فشار (شکل ۱) و کانال جریان آزاد، ۶ نمونه از مصالح سنگریزه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. مصالح مورد استفاده برای آزمایش‌ها از نوع مصالح سنگریزه‌ای گردگوشه رودخانه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت و اندازه‌های تقریباً یکسان ۲/۸۳، ۵/۵، ۸/۷، ۱/۶، ۳۱/۱۵ و ۵۶/۸ میلی‌متر که با استفاده از روش الک کردن بوسیله دستگاه شیکر و الک‌های استاندارد آمریکایی تهیه شده بود انتخاب گردید. برای انجام آزمایش‌ها، مصالح مورد نظر با تراکم مناسب در داخل محفظه آزمایش ریخته می‌شود. جریان توسط یک پمپ و با فشار ثابت به داخل مخزن بالادست برقرار شده و تا ارتفاع سرریز بالادست بالا می‌آید. قسمتی از جریان بسته به میزان قدرت انتقال جریان نمونه مورد آزمایش از داخل نمونه عبور کرده و وارد مخزن پایین دست می‌شود و جریان اضافی داخل مخزن بالادست با یک تراز ثابت (تراز سرریز بالادست) از مخزن به خارج از دستگاه آزمایش منتقل می‌شود. جریان عبوری از داخل نمونه به مخزن پایین دست وارد شده و پس از آن با یک تراز ثابت (تراز سرریز پایین دست) از مخزن پایین دست به داخل مخزن اندازه‌گیری دبی وارد می‌شود. بدین ترتیب با ایجاد ترازهای مختلف جریان در مخزن بالادست، گرادیان‌های مختلف هیدرولیکی بین ابتدا و انتهای نمونه‌ها برقرار می‌گردد. برداشت داده‌ها بایستی زمانی صورت گیرد که جریان بصورت پایدار

سرعت و گرادیان هیدرولیکی در این نوع محیط‌ها بوده و به روابط غیرداری معروف هستند استفاده می‌شود. جریان در این محیط‌ها را می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم کرد:

الف: جریان آزاد از درون و روی لایه‌های درشت دانه مانند گابیون‌ها و سدهای سنگریزه‌ای (در این لایه‌ها جریان از یک طرف با محیط آزاد در تماس می‌باشد).

ب: جریان تحت فشار از درون لایه‌های درشت دانه مانند فیلترهای درشت‌دانه سدهای خاکی و لایه‌های درشت دانه محصور بین قسمت‌های بتنی و ریزدانه سازه‌های هیدرولیکی (در این لایه‌ها جریان از همه طرف با یک لایه غیر قابل نفوذ یا لایه با نفوذ پذیری بسیار کم نسبت به مصالح سنگریزه‌ای در تماس می‌باشد).

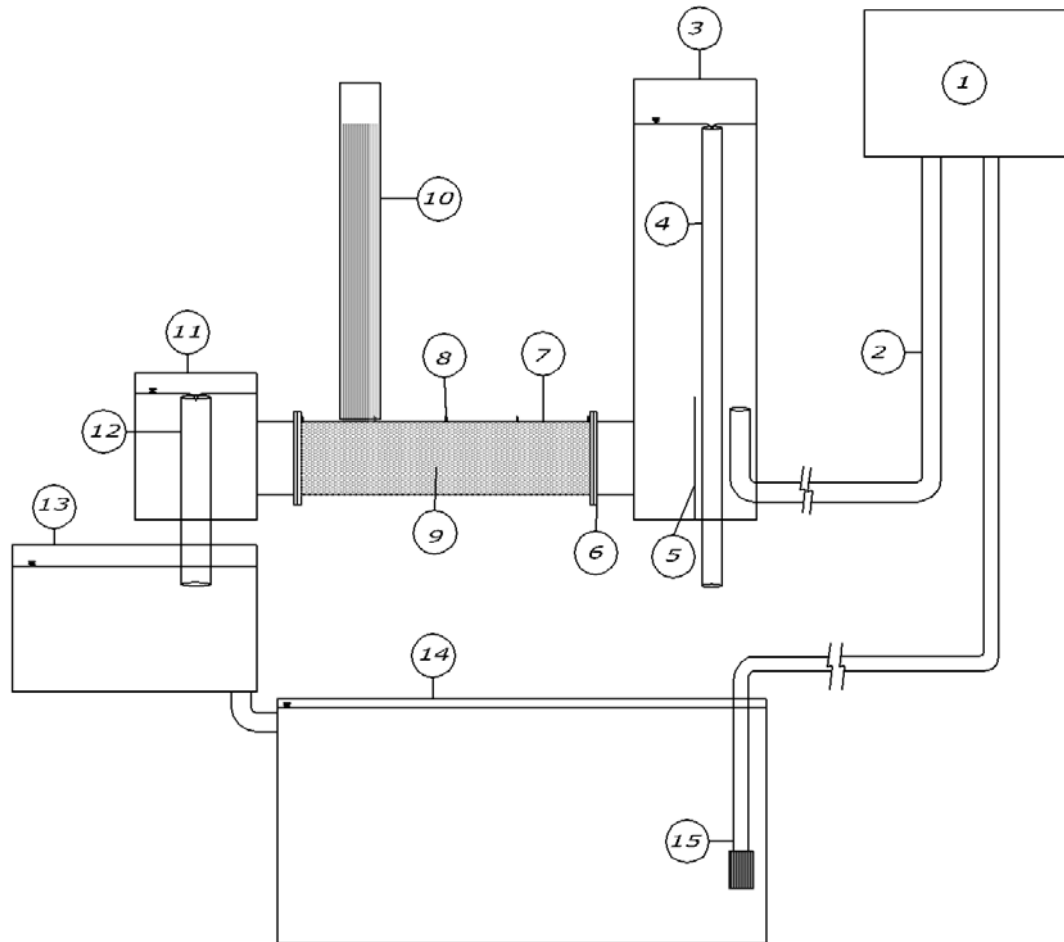
طی یک قرن گذشته تحقیقات متعددی توسط محققین مختلف روی جریان درون مصالح درشت دانه صورت گرفته است. اولین بار در سال (۱۹۰۱) فرشهایمر با توجه به این حقیقت که با افزایش سرعت جریان افت انرژی علاوه بر لزجت از نیروی اینرسی نیز تأثیر زیادی می‌گیرد، رابطه‌ای را بصورت $i = aV + bV^2$ ارائه داد که به رابطه دوجمله‌ای فرشهایمر معروف شد.

که در آن: i = گرادیان هیدرولیکی، V = سرعت جریان (m/s) و a و b ضرایب آزمایشگاهی می‌باشند.

بعد از وی نیز تحقیقات زیادی توسط محققین دیگر در این زمینه صورت گرفت و روابط متعددی نیز بدست آمد، که از آن جمله می‌توان به تحقیقات وارد (۱۹۶۴) پارکینز (۱۹۶۶) احمد و سونادا (۱۹۶۹) استفنسون (۱۹۷۹) و فلتون و هرهرا (۱۹۹۱) اشاره کرد. تقریباً تمام این محققین در این نکته اتفاق نظر دارند که، مقدار عدد رینولدز عامل بسیار مهمی در بروز جریان‌های متلاطم در مصالح درشت دانه می‌باشد و مقادیری را نیز به عنوان مرز جدایی جریان آرام از جریان آشفته درون مصالح درشت دانه ارائه داده‌اند که محدوده‌ای بین ۱ تا ۱۲ را شامل می‌شود. اکثر روابط ارائه شده توسط محققین از پارامترهای مربوط به محیط سنگدانه‌ای و سیال و ضرایب آزمایشگاهی تشکیل شده و گاهی دارای مبانی تئوری محکمی نیز می‌باشند. با این حال تحقیقات انجام شده در این زمینه همگی یا بر روی

ورودی مشاهده شود. بدلیل بزرگی اندازه ذرات می‌توان مشاهده نمود که پس از گذشت چند دقیقه حباب‌های هوا از داخل نمونه و پیزومترها خارج شده و جریان رفته رفته بحالت پایدار درمی‌آید.

درآمده باشد. از اینرو باید کلیه حباب‌های هوا از داخل نمونه مورد آزمایش و پیزومترها خارج شده و به اصطلاح نمونه به حالت کاملاً اشباع درآید. همچنین نباید هیچگونه نوسانی در مقادیر فشار پیزومتریک درون لوله‌های پیزومتریک و جریان



- | | | |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| ۱- مخزن هوایی تأمین جریان | ۶- فلنج اتصال | ۱۱- مخزن پایین دست |
| ۲- لوله ورود جریان به مخزن | ۷- استوانه آزمایش | ۱۲- سرریز پایین دست |
| ۳- مخزن بالادست | ۸- پیزومترها | ۱۳- مخزن اندازه‌گیری دبی جریان |
| ۴- سرریز بالادست | ۹- محیط متخلخل | ۱۴- مخزن زمینی جمع آوری جریان |
| ۵- صفحه مشبک آرام کننده جریان | ۱۰- تابلوی پیزومتری | ۱۵- پمپ و لوله انتقال جریان به مخزن هوایی |

شکل ۱- استوانه آزمایش

پس از پایدار شدن جریان مقادیر دبی جریان، فشارهای پیژومتریک و درجه حرارت آب در چندین مرحله اندازه‌گیری و متوسط آنها تعیین گردید. برای تعیین مقادیر دبی جریان از روش اندازه‌گیری حجمی استفاده گردید. برای این منظور، مدت زمان پر شدن حجم معینی از یک مخزن اندازه‌گیری با استفاده از کرنومتر اندازه‌گیری شده و بدین ترتیب دبی جریان برای هر یک از آزمایش‌ها تعیین گردید. همچنین مقادیر فشار پیژومتریک، با استفاده از پیژومترهایی که در ابتدا، انتها و طول محفظه آزمایش بصورت یک سری ۳ تایی با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر در هر مقطع نصب گردیده بود از روی یک تابلوی پیژومتری قرائت گردید.

با داشتن مقادیر دبی جریان، فشارهای پیژومتریک در طول نمونه و ابعاد محیط متخلخل، مقادیر سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی تعیین گردیده و پارامترهای فاکتور اصطکاک و عدد رینولدز جریان برای هر یک از آزمایش‌ها با استفاده از روابط زیر بدست آمد.

$$R_e = \frac{Vd}{\nu} \quad (۱)$$

$$f = \frac{igdn^2}{V^2} \quad (۲)$$

در اینجا: R_e = عدد رینولدز، f = فاکتور اصطکاک، d = اندازه ذرات (m)، V = لزجت سیال (m^2/s)، n = تخلخل محیط و g = شتاب ثقل (m/s^2) می‌باشد.

در مجموع ۱۷ سری آزمایش در حالت جریان تحت فشار و ۱۰ سری آزمایش در حالت جریان آزاد بر روی هر نمونه با گرادیان‌های هیدرولیکی متفاوت انجام گرفت. وضعیت جریان در آزمایش‌های جریان تحت فشار بگونه‌ای بود، که اعمال گرادیان هیدرولیکی تا حدود ۱ به نمونه‌های آزمایشگاهی و دستیابی به سرعت‌های زیاد و اعداد رینولدز بالا برای کلیه نمونه‌ها وجود داشت.

نتایج

با توجه به موضوع مورد بحث در ادامه بیشتر به بررسی نتایج مربوط به آزمایش‌های جریان تحت فشار پرداخته می‌شود.

جریان درون محیط‌های متخلخل درشت دانه را می‌توان همانند جریان درون لوله‌ها به سه بخش کلی جریان آرام، انتقالی و آشفته کامل تقسیم کرد (شکل ۴). با این تفاوت که انتقال از جریان آرام به آشفته در درون محیط‌های درشت‌دانه برخلاف جریان درون لوله‌ها به آرامی رخ می‌دهد و علت آن این است که با وجود اینکه جریان درون بعضی از منافذ متلاطم است ولی در دیگر منافذ جریان هنوز بصورت آرام بوده و در اثر تقابل این دو حالت جریان به آرامی از حالت آرام به آشفته تبدیل می‌شود. آنچه که با اطمینان میتوان در مورد نتایج آزمایش‌ها گفت آن است که توان سرعت در رابطه گرادیان هیدرولیکی - سرعت ($i = V^B$)، مربوط به جریان درون محیط‌های درشت دانه سنگریزه‌ای بر خلاف جریان آرام درون ذرات ریزدانه خاک همواره بزرگتر از ۱ بوده و اندازه ذرات و منافذ اثر مستقیم در اندازه توان سرعت در این رابطه دارد و با افزایش اندازه ذرات و منافذ این توان افزایش یافته و به ۲ که توان سرعت در جریان درون لوله‌هاست نزدیکتر می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که منافذ درون محیط‌های سنگریزه‌ای درشت دانه بهنگام عبور جریان همانند لوله‌های پیچ و خم دار عمل می‌کنند.

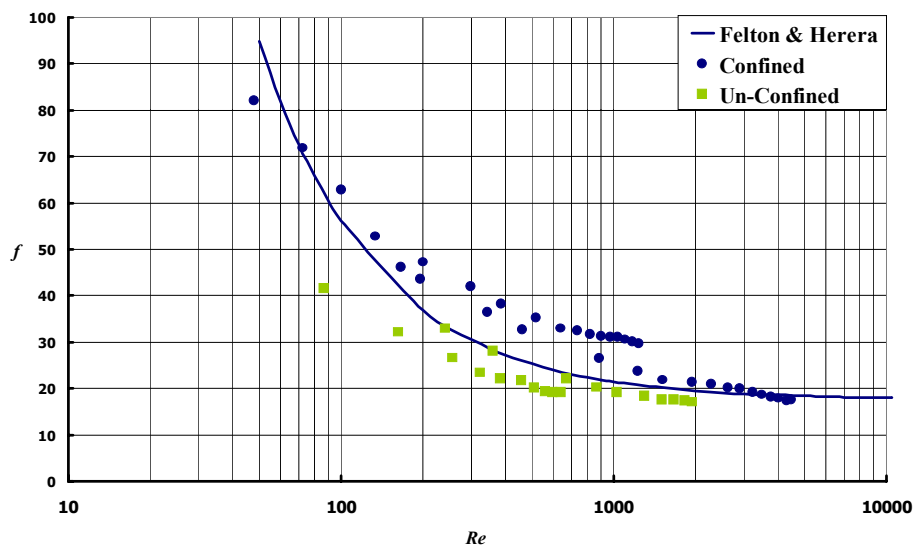
مقایسه منحنی‌های گرادیان هیدرولیکی - سرعت مربوط به جریان تحت فشار درون مصالح سنگریزه‌ای با منحنی‌های مربوط به جریان آزاد درون این مصالح، نشان داد که مقادیر گرادیان هیدرولیکی برای سرعت‌های جریان پائین برای هر دو جریان تقریباً یکسان می‌باشد و با افزایش سرعت جریان، مقادیر افت انرژی در شرایط جریان تحت فشار، برای یک سرعت یکسان بیشتر از حالت جریان آزاد می‌باشد. این مسئله به این دلیل است که، با افزایش گرادیان هیدرولیکی در اطراف لایه تحت‌فشار، بر خلاف جریان آزاد که تلاطم‌های درون جریان در اثر تماس با سطح آزاد تعدیل می‌شوند، در حالت جریان تحت فشار این تلاطم‌ها به خود جریان بازگشته و باعث ایجاد مقاومت بیشتری در سر راه جریان و افت انرژی بیشتر می‌شوند. منحنی‌های فاکتور اصطکاک - عدد رینولدز بدست آمده از هر دو سری آزمایش‌ها نیز موید این موضوع می‌باشند در این سری از منحنی‌ها به ازای مقادیر یکسان عدد رینولدز، مقادیر فاکتور

مربوط به رابطه فلتون و هرهرا با استفاده از سرعت ظاهری یعنی بدون در نظر گرفتن تاثیر عامل تخلخل بدست آمده است. در حالیکه این مقادیر برای رابطه استفنسون با در نظر گرفتن تخلخل و سرعت واقعی بدست آمده اند.

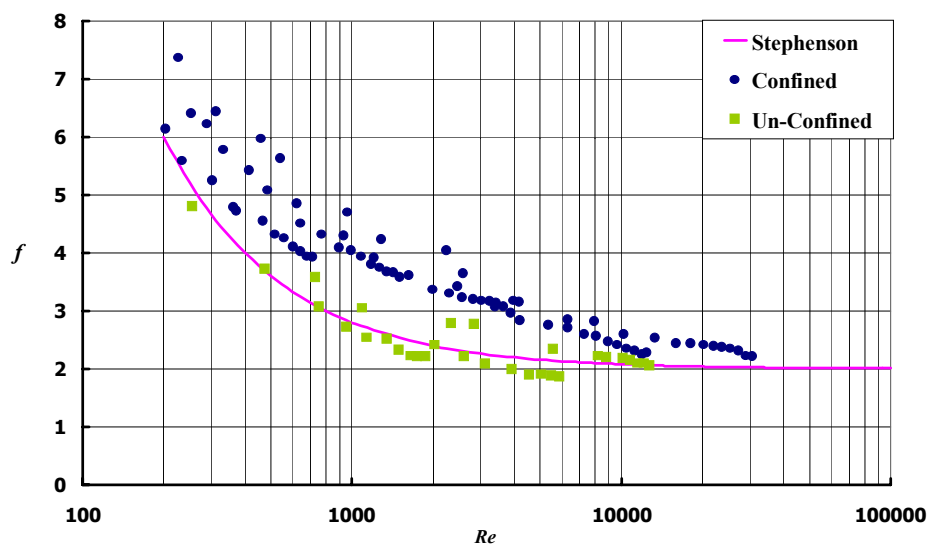
$$f = \frac{3858}{R_e} + 17.6 \quad (۴)$$

$$f = \frac{800}{R_e} + 2 \quad (۵)$$

اصطکاک بدست آمده برای جریان تحت فشار بزرگتر از مقادیر بدست آمده برای جریان آزاد می‌باشد. مقایسه نتایج آزمایش‌ها با روابط معروف فلتون و هرهرا (۱۹۹۱) (رابطه ۴) و استفنسون (۱۹۷۹) (رابطه ۵) نشان داد که مقادیر فاکتور اصطکاک مربوط به جریان آزاد تطابق خوبی با این منحنی‌ها داشته در حالیکه مقادیر فاکتور اصطکاک مربوط به جریان تحت فشار بیشتر از مقادیر مربوط به این دو منحنی می‌باشد (شکل‌های ۲ و ۳). لازم به توضیح است که مقادیر فاکتور اصطکاک و عدد رینولدز



شکل ۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با منحنی فاکتور اصطکاک - عدد رینولدز فلتون و هرهرا (۱۹۹۱)



شکل ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با منحنی فاکتور اصطکاک - عدد رینولدز استفنسون (۱۹۷۹)

در این رابطه K_t را اصطلاحاً ضریب هدایت هیدرولیکی جریان تحت فشار محیط سنگریزه‌ای می‌نامند، $V_n = \frac{V}{n}$ سرعت واقعی جریان و α توان گرادیان هیدرولیکی است که مقدار آن در جریان آرام برابر ۱ می‌باشد. و M و N ضرایب آزمایشگاهی هستند.

همانطور که مشاهده می‌شود، رابطه فوق از پارامترهای معین و قابل اندازه‌گیری مربوط به محیط سنگریزه‌ای و سیال و ضرایب آزمایشگاهی تشکیل شده است. مقدار N در این رابطه همواره بین صفر و ۱- می‌باشد. چنانچه در این رابطه مقدار N برابر ۱- باشد، رابطه فوق به رابطه داری برای جریان آرام تبدیل خواهد شد.

برای تعیین مقادیر ضرایب آزمایشگاهی M و N ، بهترین روش این است که ارتباط این ضرایب را با پارامترهای معینی از قبیل اندازه و شکل ذرات و تخلخل محیط متخلخل و ویسکوزیته سیال با استفاده از آزمایش‌های متعدد بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی تعیین نمود. ولی با توجه به محدود بودن شرایط آزمایشگاهی در تحقیق حاضر این ضرایب با استفاده از منحنی فاکتور اصطکاک - عدد رینولدز (شکل ۴) که دارای معادله کلی $f = MR_e^N$ می‌باشد تعیین گردید. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای برازش بهتر منحنی‌ها بر داده‌های آزمایشگاهی، این منحنی‌ها به دو قسمت برای اعداد رینولدز کمتر از ۲۰۰ و بزرگتر از ۲۰۰ تقسیم شده است. با توجه به مقادیر M و N در هر قسمت روابط زیر بدست آمد

$$V_n = \left[\frac{g v^{-0.49} d^{1.49}}{78.93} \right]^{0.662} i^{0.662} \quad Re < 200$$

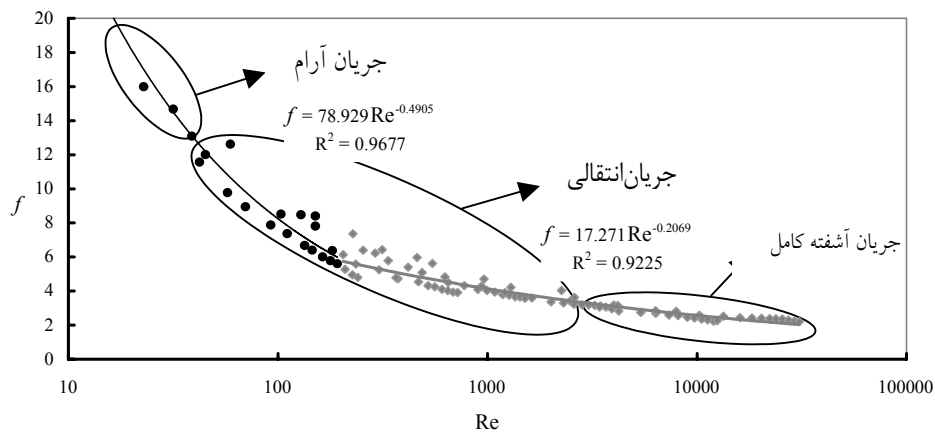
$$V_n = \left[\frac{g v^{-0.207} d^{1.207}}{17.27} \right]^{0.558} i^{0.558} \quad Re > 200$$

بدین ترتیب مشاهده می‌شود که، گرادیان هیدرولیکی در جریان درون مصالح درشت دانه تحت فشار برای اعداد رینولدز کمتر از ۲۰۰ با توان ۱/۵ و برای اعداد رینولدز بزرگتر از ۲۰۰ با توان ۱/۸ سرعت متناسب می‌باشد.

مطالب فوق بیانگر آن است که چنانچه یک لایه درشت دانه در بین دو لایه ریزدانه بصورت تحت فشار قرار گرفته باشد، رفتاری متفاوت با لایه‌های درشت دانه‌ای که جریان در آنها بصورت آزاد است (سدهای سنگریزه‌ای) خواهد داشت. بطور مثال در فیلتر سدهای خاکی از آنجایی که این مصالح درشت‌دانه در بین لایه‌های ریزدانه و بصورت تحت فشار قرار دارند، بدلیل آنکه با افزایش گرادیان هیدرولیکی، مقدار افت انرژی بیشتر از حالت جریان آزاد است، در واقع مقدار سرعت جریان کمتر از حالت جریان آزاد خواهد بود و در حالیکه نیاز به قدرت حمل جریان بالایی توسط لایه فیلتر می‌باشد، این لایه توانایی حمل جریان را نخواهد داشت. در این صورت خطر انتقال جریان به داخل لایه‌های ریزدانه اطراف و اشباع شدن این لایه‌ها وجود دارد، که این خود باعث بالا رفتن فشار منفذی و افزایش خطر ناشی از ناپایداری شیب‌های بدنه سد خاکی و لغزش آنها در اثر کاهش مقاومت برشی خواهد شد. لذا برای تأمین ظرفیت حمل جریان لازم توسط لایه فیلتر در چنین شرایطی، باید این لایه دارای ضخامتی بیشتر از مقدار بدست آمده توسط معیارهای طراحی جریان آزاد درون مصالح درشت‌دانه باشد و یا اینکه مصالح مورد استفاده جهت این لایه باید دارای هدایت هیدرولیکی بیشتری است که این امر مستلزم استفاده از مصالح درشت‌دانه تر می‌باشد. از اینرو می‌توان دریافت که باید بین جریان تحت فشار درون لایه‌های سنگریزه‌ای درشت‌دانه و جریان آزاد درون این لایه‌ها تفاوت قائل شد. با توجه به این تفاوت، تعیین یک رابطه مناسب برای جریان تحت فشار درون لایه‌های سنگریزه‌ای ضروری بنظر می‌رسد. یک رابطه مناسب برای این منظور، رابطه گرادیان هیدرولیکی - سرعت است که با استفاده از رابطه نمایی فاکتور اصطکاک - عدد رینولدز (رابطه ۶) و تعاریف مربوط به این دو پارامتر (روابط (۲) و (۳)) بصورت زیر بدست می‌آید.

$$f = MR_e^N \quad (۶)$$

$$V_n = \left[\frac{g v^N d^{1-N}}{M} \right]^{\frac{1}{N+2}} i^{\frac{1}{N+2}} = K_t i^\alpha \quad (۷)$$



شکل ۴- تعیین مقادیر N و M با استفاده از منحنی فاکتور اصطکاک - عدد رینولدز

ریزدانه و قسمت‌های بتنی سازه‌های هیدرولیکی قرارگیرد، رفتاری متفاوت نسبت به لایه‌های درشت‌دانه آزاد مانند سدهای سنگریزه‌ای خواهد داشت.

با استفاده از پارامترهای فیزیکی قابل اندازه‌گیری محیط متخلخل و سیال و ضرایب آزمایشگاهی می‌توان یک رابطه مناسب برای برآورد ضریب هدایت هیدرولیکی غیرداری لایه‌های درشت‌دانه با استفاده از رابطه‌ی نمایی فاکتور اصطکاک - عدد رینولدز، بدست آورد. در این تحقیق روابط مربوط به ضریب هدایت هیدرولیکی غیرداری در جریان تحت فشار بصورت زیر بدست آمد.

$$K_t = \left[\frac{g v^{-0.49} d^{1.49}}{78.93} \right]^{0.662} \quad Re < 200$$

$$K_t = \left[\frac{g v^{-0.207} d^{1.207}}{17.27} \right]^{0.558} \quad Re > 200$$

از این روابط می‌توان برای تعیین مقادیر سرعت و عدد رینولدز جریان، میزان دبی تراوش از درون لایه‌های درشت‌دانه تحت فشار، ضخامت لایه‌ها و اندازه ذرات مورد نیاز برای طراحی فیلتر درشت‌دانه سدهای خاکی در محدوده اندازه ذرات و اعداد رینولدز ذکر شده در این تحقیق استفاده کرد.

سپاسگزاری

از آنجا که امکانات فنی و مالی برای انجام این تحقیق توسط معاونت محترم پژوهشی دانشکده کشاورزی و دانشگاه تهران فراهم آمده است، لذا محققین بدینوسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را اعلام می‌دارند.

با ترکیب این روابط با رابطه پیوستگی می‌توان رابطه گرادیان هیدرولیکی - دبی را به صورت زیر بدست آورد.

$$Q = \left[\frac{g v^{-0.49} d^{1.49}}{78.93} \right]^{0.662} i^{0.662} A \quad Re < 200$$

$$Q = \left[\frac{g v^{-0.207} d^{1.207}}{17.27} \right]^{0.558} i^{0.558} A \quad Re > 200$$

در اینجا: Q = دبی جریان و A = سطح مقطع جریان می‌باشد.

برای اطمینان از دقت روابط بدست آمده، این روابط با نتایج آزمایشگاهی مربوط به ذراتی با قطر متوسط ۷/۱ میلی‌متر مقایسه شده که تطابق بسیار خوبی را نشان داد.

نتیجه‌گیری

جریان درون لایه‌های درشت‌دانه اغلب متلاطم بوده و گرادیان هیدرولیکی با توان‌های بزرگتر از ۱ سرعت جریان متناسب می‌باشد. این توان با افزایش اندازه ذرات به مقدار ۲ که توان سرعت در جریان درون لوله‌ها است نزدیکتر می‌شود و این نشان دهنده آن است که منافذ درون مصالح درشت‌دانه سنگریزه‌ای به هنگام عبور جریان همانند لوله‌های پیچ و خم مدار عمل می‌کنند.

میزان افت انرژی در لایه‌های درشت‌دانه تحت فشار نسبت به لایه‌های درشت‌دانه آزاد در مقادیر سرعت یکسان به دلیل بروز تلاطم‌های قوی در جریان و بازگشت اثرات ناشی از این تلاطم‌ها به خود جریان بیشتر می‌باشد. بدین ترتیب با توجه به نتایج این تحقیق مشخص می‌گردد که چنانچه یک لایه متشکل از ذرات درشت‌دانه مانند فیلتر سدهای خاکی در بین لایه‌های

REFERENCES

1. Ahmed N. & D.K. Sunada. 1969. *Nonlinear flow in porous media*. ASCE Journal of the Hydraulics Division, vol.95, HY6, Nov., p.1847-1857.
2. Felton G.K. & N.M. Herrera. 1995. *Design procedure for rockfill dams*. Applied Engineering in Agriculture, Applied Engr. in Agri. Vol.11, no.5, p.653-657.
3. Li D. & T.W. Engler. 2001. *Literature review on correlations of the non-Darcy coefficient*. paper SPE 70015, Proc., the 2001 SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, TX, May 15-17.
4. Li B. & V.K. Garga. 1998. *Relationships for non-darcian flow in rockfill*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering. Vol.124, no.2, p206-212.
5. Martins R. 1990. *Turbulent seepage flow through rockfill structures*. Water Power and Dam Construction, March, 90:41-45.
6. McCorquodale J. A. 1978. *Hydraulic conductivity of rockfill*. ASCE Journal of Hydraulic Research, vol.16, no.2, p.123-137.
7. Raymond, E. 1975. *Solution for Unconfined Non-Darcy Seepage*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, vol.101, IR1, March., p. 53-65.
8. Stephenson, D. 1979. *Rockfill in hydraulic engineering*. Elsevier Scientific, Amsterdam, 215 pp.
9. Venkataraman P. & P. R. Rao. 1998. *Darcian, Transitional, and Turbulent Flow through porous media*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering. Vol.124, no.8, p.840-846.
10. Ward J.C. 1964. *Turbulent flow in porous media*. ASCE Journal of the Hydraulics Division, vol.92, HY4, Sept., p.1-12.

An Empirical Study on Turbulent Flow through Confined Coarse Porous Media

R. SALEHI¹, H. RAHIMI² AND M.H. OMID³

**1, 2, 3, MSc Student, Professor and Assistant Professor, University College of
Agriculture & Natural Resources (UCAN), University of Tehran, Karaj, Iran**

Accepted June. 8, 2004

SUMMARY

To investigate turbulent flow through confined gravelly porous media and to determine the differences between this type of flow and flow through un-confined gravelly porous media, two physical models under confined and unconfined conditions were designed and an experimental program carried out. The first model was made of a cylindrical tube filled with coarse material to study flow in a confined state and the second was a flume with free surface for study in unconfined conditions. Using these two models, experiments were carried out for a wide range of coarse material gradations from 2.83 to 56.8 mm and under different hydraulic conditions. The results show that, when primary pressure is increased, with similar velocities in both models, energy losses in the confined condition are greater than those in unconfined states. A comparison between the experimental data and the equations proposed by Stephenson (1979) and Felton - Herrera (1991), shows good agreement for free surface conditions, while the results in confined flow show greater friction factors than those predicted by the equations. The results also indicate that hydraulic conditions may be classified between two regions for the Reynolds numbers below and above 200. As a result, two sets of relationships were adopted between hydraulic gradient-velocity and discharge for different hydraulic conditions. The equations were then verified by experimental data obtained from a different series of tests, conducted for particle sizes of 7.1mm diameter, which had not been employed in the derivation of the equations. It is believed that the results obtained in this research could be applied for determination of seepage discharge as well as hydraulic gradient in coarse-grained materials in a range of diameters and hydraulic gradients given in this paper.

Key words: Gravel, Turbulent flow, Confined flow, Reynolds number, Friction factor