

ارزیابی و تحلیل حساسیت معادلات افت اصطکاکی جریان با سطح آزاد درون محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای

امیر گردنوشهری^۱، ابراهیم امیری تکلدانی^{۲*} و محمد صدقی اصل^۳

۱ و ۲- به ترتیب: دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی؛ و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۵

چکیده

در این تحقیق، درستی معادلات مختلف افت اصطکاکی برای جریان آزاد غیر داری در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای ارزیابی شد که توزیع عمودی فشار در آنها غیر هیدرواستاتیک است. بیشتر معادلات ارائه شده برای جریان غیر داری بر اساس نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در دستگاه‌های نفوذسنج و برای جریان یک بعدی است در حالی که به دلیل افت زیاد انرژی و شیب سطح آب در جریان آزاد درون محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای، انتظار می‌رود جریان دو بعدی و توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک باشد. در این مطالعه با آزمایش‌هایی روی یک محیط متخلخل به طول ۱ متر و شامل سه نوع سنگریزه با قطرهای متوسط ۱/۶۸، ۲/۲۷ و ۴/۸۴ سانتی‌متر و در دو دمای متفاوت آب به بررسی درستی برآورد مقدار افت انرژی جریان توسط معادلات مختلف جریان غیر داری پرداخته شده است. با افزایش دبی و افزایش زاویه سطح آب از ۶ درجه، اختلاف بین عمق آب و فشار پیژومتری افزایش می‌یابد. همچنین، بر اساس تحلیل آماری، مناسب‌ترین معادله افت اصطکاکی در جریان غیر داری با سطح آزاد، معرفی و با تحلیل حساسیت نیز مشخص شد که معادله معرفی شده کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات مقادیر ورودی دارد و نیز اینکه تخلخل، سرعت ظاهری جریان، قطر متوسط ذرات و لزوجت سینماتیک به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نتایج دارند.

واژه‌های کلیدی

افت انرژی، توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک، جریان غیر داری

مقدمه

ساخت فیلترهای زهکشی و تصفیه آب و فاضلاب، گابیون‌ها و حوضچه‌های آرامش، سدهای سنگریزه‌ای و زهکش‌های سنگریزه‌ای استفاده می‌شود (Herrera & Felton, 1991).

مطالعات عبور آب از درون محیط متخلخل به دو دسته جریان داری و غیر داری تقسیم می‌شود. ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت ظاهری جریان اگر خطی باشد، آنگاه قانون داری صادق خواهد بود و فرمول داری رابطه ساختاری محیط متخلخل قلمداد می‌شود و

طبق تعریف لپس (Leps, 1972) درباره جریان آب از درون محیط‌های متخلخل، سنگریزه به قطعات سنگی متراکم غیر چسبیده‌ای گفته می‌شود که به‌طور طبیعی خرد شده‌اند و به لحاظ دانه‌بندی اندازه آنها بزرگ‌تر از ۱۲/۷ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) باشد و بیش از ۱۰ درصد وزنی آنها از الک ۴ آمریکایی (۴/۷۶ میلی‌متر) عبور نکند. این تعریف شامل محدوده‌ای وسیع از مصالح شنی تا قلوله سنگ، لاشه سنگ و تخته‌سنگ می‌شود. از سنگریزه‌ها در

که در آنها، ضرایب A ، B ، a و b تابعی از خصوصیات سیال و سنگریزه‌ها هستند.

محققانی مانند اسکانه (Escande, 1953)، ویلکینز (Wilkins, 1956)، اسلیپیکا (Slepicka, 1961)، پارکین (Parkin, 1963)، دودگون (Dudgeon, 1968) و مارتینز (Martins, 1990) از شکل توانی گرادیان هیدرولیکی بر حسب سرعت ظاهری جریان در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای استفاده کرده‌اند (Li, 1995; Abt et al., 1991; Hansen et al., 1995). به نقل از لی و همکاران (Li et al., 1998) فرشه‌ایمر در سال ۱۹۰۱ اولین کسی بود که گرادیان هیدرولیکی را بر اساس روابط درجه دوم با سرعت ظاهری جریان در محیط متخلخل مرتبط ساخت. بر این اساس، گرادیان هیدرولیکی جریان در محیط متخلخل با لزوجت سیال و اینرسی در ارتباط است. یعنی کل افت انرژی در محیط متخلخل درشت‌دانه از دو بخش تشکیل شده است. اگر سرعت سیال خیلی کم باشد، در این صورت مقدار عبارت دوم رابطه ۱ بسیار ناچیز خواهد بود و کل افت انرژی ناشی از لزوجت سیال در حال حرکت در محیط متخلخل است. اگر جریان در محیط سنگریزه شامل محدوده‌ای وسیع از رژیم جریان متلاطم (دامنه وسیع تغییرات عدد رینولدز) باشد، شکل درجه دوم بهتر از شکل توانی است. تا کنون مطالعات زیادی برای تعیین ارتباط بین ضرایب رابطه ۱ با خصوصیات سیال و محیط متخلخل صورت گرفته است. احمد و سونادا (Ahmed & Sunada, 1969)، بی‌یر (Bear, 1972)، هانورا و باریندز (Hannoura & Barends, 1981)، هانسن (Hansen, 1992)، هانسن و همکاران (Li et al., 1995)، لی و همکاران (Sedghi-Asl et al., 1998)، مرادی و امیری (Moradi-Tayyebi & Amiri, 2014) و توکالدانی (Tokaldany, 2015) روابط مختلف ارائه شده در تحقیقات را به خوبی مرور کرده‌اند.

رژیم جریان، آرام است. با افزایش سرعت جریان و آشفته شدن جریان در داخل محیط متخلخل، قانون داری دیگر معتبر نخواهد بود و رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت ظاهری جریان غیرخطی خواهد بود.

معیار تمایز رژیم جریان، عدد رینولدز است. محققان برای پارامتر طول مشخصه در عدد رینولدز از مقادیر مختلفی نظیر شعاع هیدرولیکی منافذ، قطر ذرات محیط متخلخل و غیره استفاده کرده‌اند. بر اساس نوع تعریف طول مشخصه، عده‌ای از محققان محدوده عدد رینولدز ۱ تا ۱۲ را به عنوان آستانه شروع جریان غیر داری ذکر کرده‌اند (Bear, 1972). دیگر محققان اعداد رینولدز بزرگ‌تر از ۱۲۰ را به عنوان نقطه شروع جریان غیر داری در محیط‌های سنگریزه‌ای گزارش کرده‌اند (McCorquodale et al., 1978).

با توجه به بالا بودن سرعت در محیط‌های سنگریزه‌ای، جریان بیشتر غیر داری خواهد بود. بنابراین لازم است ویژگی‌های جریان آشفته در محیط سنگریزه و مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی آنها به دقت بررسی شود. روابط مورد استفاده در جریان آشفته در محیط سنگریزه‌ای عموماً به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول روابطی هستند که بین عدد رینولدز (Re) و ضریب اصطکاک داری - ویسباخ (f) نوشته می‌شوند. در این روش، جریان درون خلل و فرج محیط متخلخل مشابه جریان در لوله‌ها فرض می‌شود. دسته دوم، روابط بین گرادیان هیدرولیکی (i) و سرعت ظاهری جریان (V) است. این روابط به دو شکل درجه دوم و توانی به صورت زیر ارائه شده‌اند (روابط ۱ و ۲):

$$i = A.V + B.V^2 \quad (1)$$

$$i = a.V^b \quad (2)$$

روابط گرادیان هیدرولیکی -سرعت نادرستی می‌انجامد. همچنین، اختلاف بین ارتفاع پیزومتری و عمق جریان در محاسبه گرادیان هیدرولیکی نیز ایجاد اشکال خواهد کرد زیرا اصولاً در تحقیقات پیشین از گرادیان فشار به‌جای i استفاده شده است که این فرض برای محیط‌های متخلخلی قابل قبول خواهد بود که بار آبی سرعت و شیب سطح آب در آنها ناچیز است. در حالی که در جریان‌های غیر داری به‌علت بالا بودن سرعت جریان، بار آبی سرعت قابل صرف نظر نیست و در نتیجه باید در محاسبه گرادیان هیدرولیکی در نظر گرفته شود که با توجه به اختلاف بین ارتفاع پیزومتری و عمق جریان، استفاده از ارتفاع پیزومتری به‌جای عمق جریان در نتایج تأثیرگذار خواهد بود.

در این تحقیق، ضمن اجرای آزمایش‌هایی روی سه نمونه سنگریزه رودخانه‌ای در دو دمای مختلف و ثبت هم‌زمان ارتفاع پیزومتری و عمق آب در طول محیط متخلخل، ابتدا به بررسی وجود شرایط توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک پرداخته می‌شود. پس از آن، با در نظر گرفتن شرایط توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک، مقادیر افت اصطکاکی محاسبه می‌شود و نتایج حاصل با روابط درجه دوم گرادیان هیدرولیکی - سرعت ظاهری که در تحقیقات پیشین ارائه شده‌اند، مقایسه و دقت آنها در تخمین نتایج آزمایشگاهی به‌صورت آماری تجزیه و تحلیل خواهد شد. تحلیل حساسیت روی پارامترهای ورودی روش‌های منتخب نیز انجام خواهد شد.

مواد و روش‌ها

معادلات منتخب برآورد افت اصطکاک

همان‌طور که اشاره شد، تا کنون روابط تجربی متعددی برای تحلیل جریان غیر داری در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای ارائه شده است. در این تحقیق در جدول ۱ برخی نتایج تحقیقات محققان مختلف برای

غالب روابط جریان غیر داری مربوط به آزمایش‌های اجرا شده در دستگاه نفوذسنج است که در آن یک ستون عمودی یا افقی بسته با مصالح سنگریزه‌ای پر شده و اختلاف فشار پیزومتری در طول آن برای محاسبه گرادیان هیدرولیکی استفاده شده است. در چنین شرایطی، جریان را می‌توان به‌صورت یک بعدی در نظر گرفت. از مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته روی محیط متخلخل سنگریزه‌ای در دستگاه نفوذسنج می‌توان به تحقیقات ارگان (Ergun, 1952)، انگلاند (Engelund, 1953)، وارد (Ward, 1964)، کواکس (Kovacs, 1981)، جنت (Gent, 1991)، کادلک و نایت (Kadlec & Knigh, 1996)، هیل و کوچ (Hill & Koch, 2002) و سیدیروپولو و همکاران (Sidiropoulou et al., 2007) اشاره کرد. اما تحقیقات روی محیط‌های متخلخل با سطح آزاد جریان بسیار اندک است. در شرایط جریان با سطح آزاد با توجه به اختلاف زیاد تراز سطح آب در دو طرف محیط متخلخل و شیب طولی نسبتاً شدید سطح آزاد در داخل محیط سنگریزه‌ای جریان عملاً دو بعدی خواهد بود.

در این تحقیق، برخی از مهم‌ترین معادلات درجه دوم محققان پیشین جمع‌آوری شده است که بر اساس نتایج آزمایشگاهی جریان آزاد عبوری از محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای به‌دست آمده‌اند؛ این معادلات در جدول ۱ در بخش مواد روش‌ها ارائه شده‌اند. بررسی تحقیقات نشان می‌دهد که به‌جز در تحقیق بازرگان و شعاعی (Bazargan & Shoaie, 2010) در سایر تحقیقات جریان غیر داری در محیط متخلخل با سطح آزاد، از ارتفاع پیزومتری به‌عنوان عمق جریان در مقاطع مختلف استفاده شده است که مطابق نتایج این دو محقق و با توجه به وجود شیب زیاد سطح جریان که در نتیجه باعث انحراف جریان از شرایط هیدرواستاتیک می‌شود، فرض غیرمنطقی خواهد بود. استفاده از ارتفاع پیزومتری برای عمق جریان در محاسبه سرعت ظاهری جریان باعث خطا خواهد شد و به

مشخصات دانه‌بندی سنگریزه‌ها هستند که از دو رابطه ۳ و ۴ به دست می‌آیند:

$$P_{cc} = \left(n + C_u + C_c + \frac{D_{100}}{D_{50}} \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$P_{cd} = \left(n + C_u + C_c + \frac{D_{50}}{D_0} \right)^{0.5} \quad (4)$$

که در آنها،

C_u و C_c = به ترتیب ضریب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی محیط متخلخل.

ضرایب A و B جریان غیر داری با سطح آزاد در داخل محیط متخلخل سنگریزه‌ای ارائه شده است. در این جدول، D_i قطری است که i درصد وزنی ذرات از آن کوچک‌تر هستند، L طول محیط متخلخل، g شتاب گرانش، n تخلخل محیط متخلخل، α و β ضرایب ثابت (برای ذرات گرد گوشه به ترتیب ۰/۸۸۶ و ۱/۸۰۶ و برای ذرات تیز گوشه به ترتیب ۱/۲۰۴ و ۱/۹۷۲ و Bazargan & Shoaiei, 2010)، K_t ضریب ثابت (برای ذرات کروی با سطح صاف، سنگ‌های گرد گوشه و سنگ‌های تیز و گوشه‌دار به ترتیب برابر با ۱، ۲ و ۴ (Stephenson, 1979))، σ انحراف استاندارد سنگریزه‌ها، P_{cc} و P_{cd} توابعی از

جدول ۱- روابط ارائه شده برای شکل درجه دوم رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت ظاهری جریان سطح آزاد در محیط متخلخل

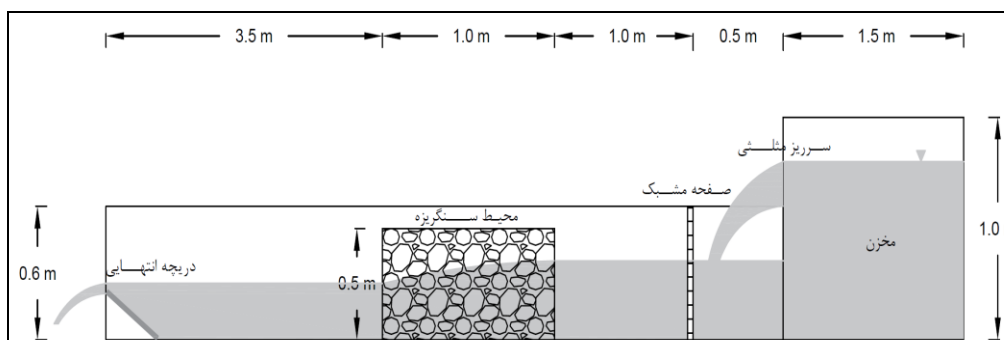
محقق/محققان	D_{50} (cm)	L (cm)	n(-)	Re (-)	B	A
(Stephenson, 1979)	۱۵/۰ - ۱/۶	۱۰۰	۰/۴۵	۱ - ۱۰ ^۵	$K_t / (gn^2 D_{50})$	$800v / (gnD_{50}^2)$
(Herrera & Felton, 1991)	۱/۵۹ و ۳/۱۸	۳۰ و ۷۶	۰/۴۴ - ۰/۴۶	۱۷۰۰ - ۱۰۰	$17.6 / (gD_{50})$	$3858v / (gD_{50}(D_{50} - \sigma))$
(Li et al., 1998)	۱۵/۰ - ۱/۶	-	۰/۴۵	۱ - ۱۰ ^۵	$3.84 / (gn^2 D_{50})$	$1300v / (gnD_{50}^2)$
(Ghazimoradi & Masumi, 1997)	۱۲/۵ - ۴/۲	۱۰۰	-	$(1-27) \times 10^2$	$14.4 / (gD_{50})$	$4670v / (gD_{50}(D_{50} - \sigma))$
(Jalal Aldin Korki, 1997)	۹/۳۷۵ - ۵/۶۲۵	۱۲۰	۰/۴۳ - ۰/۳۵	$(6-24) \times 10^2$	$7.855 / (gnD_{50})$	$15000v / (gD_{50}(D_{50} - \sigma))$
(Jafari, 2001)	۲۰ - ۱۰	۶۰، ۸۰ و ۱۰۰	۰/۴۸ - ۰/۴۶	$(8-34) \times 10^2$	$21.16 / (gD_{50})$	$29817v / (gD_{50}(D_{50} - \sigma))$
(Bazargan & Shoaiei, 2010)	۲/۶ - ۰/۷	۲۲۰	۰/۵۰ - ۰/۳۶	-	$1 / (gD_0 e^{(\alpha P_{cc} - \beta P_{cd})})$	$v / (gD_0^2 e^{(\alpha P_{cc} - 2\beta P_{cd})})$

تجهیزات آزمایشگاهی

دیواره‌ها از جنس شیشه است که مشاهده جریان را امکان‌پذیر می‌کند. برای ثبت بار آبی فشار از ۲۴ پیزومتر با فواصل تقریبی ۸ سانتی‌متری در کف و به منظور ایجاد محیط متخلخل سنگریزه‌ای، از محفظه‌ای به طول ۱/۰ و عرض و ارتفاع ۰/۵ متر استفاده شد که از شبکه توری با منافذ مربعی ۱/۰ سانتی‌متری ساخته شده

در این تحقیق از یک فلوم آزمایشگاهی شیب‌پذیر با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۵، طول ۶ و ارتفاع ۰/۶ متر استفاده شد (شکل ۱). در این فلوم، دبی جریان با استفاده از سرریز مثلثی موجود در ابتدای فلوم اندازه‌گیری می‌شود. کف فلوم از جنس پلاکسی گلاس و

است. وجه بالادست و پایین‌دست این محفظه به صورت عمودی است و وجود قاب فلزی در اطراف آن عاملی است تا محفظه در خلال آزمایش‌ها شکل خود را حفظ کند.

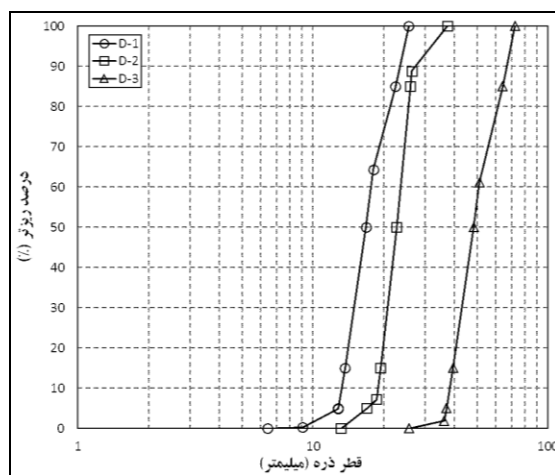


شکل ۱- نمای نیم‌رخ طولی مدل آزمایشگاهی

می‌شود. از هر یک از سه نوع مصالح، چندین نمونه سنگریزه به صورت تصادفی تهیه و از آنها عکس برداری شد. پس از آنالیز عکس‌ها با نرم‌افزار فوق، نتایج به دست آمده متوسط‌گیری شدند تا منحنی دانه‌بندی برای هر یک از سه نوع سنگریزه مطابق شکل ۲ به دست آید.

بر اساس نتایج حاصل از پردازش تصویرهای ذرات سنگریزه، قطر متوسط ذرات برای سه نوع سنگریزه برابر با ۱/۶۸، ۲/۲۷ و ۴/۸۴ سانتی‌متر تعیین شد که به ترتیب D-1، D-2 و D-3 نام‌گذاری شده‌اند. بر اساس این نتایج، مقادیر انحراف استاندارد (σ) سه نوع سنگریزه D-1، D-2 و D-3 به ترتیب معادل ۰/۳۷، ۰/۴ و ۱/۰۱ سانتی‌متر تعیین شد.

در این تحقیق از ۳ نوع مصالح رودخانه‌ای گردگوشه به‌عنوان سنگریزه‌های محیط متخلخل و برای دانه‌بندی یکنواخت سنگریزه‌ها از روش الک کردن استفاده شد. با تکنیک عکس‌برداری و تحلیل عکس با ابزار تحلیل دانه‌بندی رسوبات و سنگریزه‌ها در نرم‌افزار Hydraulic Toolbox - تهیه شده در شرکت Aquaveo - منحنی دانه‌بندی و قطر متوسط نمونه سنگریزه‌ها تعیین شد. در این ابزار از تکنیک پردازش عکس‌های دیجیتالی برای تعیین اندازه ذرات استفاده می‌شود. افزایش وضوح تصویر و همچنین مشخص و متمایز بودن ذرات نسبت به تصویر پس زمینه و نورپردازی به شکلی که کمترین سایه در اطراف ذرات تشکیل شود، باعث افزایش دقت نتایج



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی سنگریزه‌های مورد استفاده

مختلف از درون محیط متخلخل عبور داده می‌شود و پس از متعادل شدن جریان و برقراری شرایط جریان ماندگار در فلوم، بار آبی معادل فشار در داخل بدنه و طرفین محفظه حاوی سنگریزه‌ها، با استفاده از پیژومترهای موجود قرائت می‌شود. برای تعیین عمق جریان در داخل محیط سنگریزه، از روش عکس‌برداری از دیواره کناری فلوم با دوربین دیجیتال کانن مدل Powershot SX410 IS با دقت مؤثر حس گر ۲۰ مگاپیکسل استفاده شد. به این صورت که روی دیواره شیشه‌ای کناری فلوم با مازیک سطح آب علامت‌گذاری و پس از عکس‌برداری با استفاده از نرم‌افزار Grapher رقومی‌سازی می‌شد (شکل ۳).

برای اندازه‌گیری تخلخل مصالح سنگریزه از یک ظرف با حجم مشخص استفاده شد. این ظرف با سنگریزه پر و درون آن آب ریخته شد. با تقسیم کردن حجم آب ریخته شده بر حجم کل ظرف، مقدار تخلخل محیط سنگریزه‌ای محاسبه گردید. این فرآیند برای هر یک از سه نوع سنگریزه D-1، D-2 و D-3، سه بار تکرار شد و سرانجام میانگین تخلخل برای این سه نوع سنگریزه به ترتیب برابر با ۳۹/۱، ۳۹/۷ و ۴۱/۸ درصد به دست آمد.

روش اجرای آزمایش‌ها

ابتدا محفظه نگه‌دارنده در داخل فلوم قرار داده و با سنگریزه مورد نظر پر می‌شود. جریان آب با دبی‌های



شکل ۳- عکس دیواره کناری فلوم برای تعیین عمق جریان عبوری از داخل محیط متخلخل

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{q^2}{2gn^2y^2} \quad (5)$$

که در آن،

H = بار آبی کل جریان؛ z = بار آبی معادل انرژی پتانسیل یا تراز آب نسبت به سطح مبنای دلخواه؛ p = فشار؛ γ = وزن مخصوص آب؛ q = دبی جریان در واحد عرض؛

برای اندازه‌گیری دمای آب در خلال آزمایش‌ها، از دماسنج جیوه‌ای با دقت ۰/۵ درجه استفاده شد که در داخل جریان قرار گرفته بود.

مبانی نظری

بر اساس رابطه برنولی برای جریان دائمی سیالی تراکم‌ناپذیر، انرژی جریان با سطح آزاد در یک محیط متخلخل به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود (شکل ۴):

شیب بستر ناچیز و از بار انرژی جنبشی صرف نظر شود، داریم (رابطه ۷):

$$S_f = S_w = i \quad (7)$$

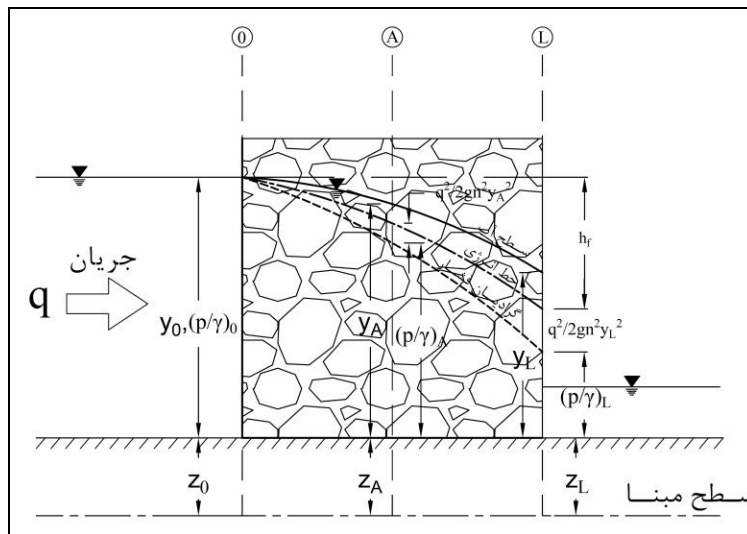
این تساوی در توسعه روابط تجربی جدول ۱ استفاده و فرض شده است که تلفات انرژی معادل گرادیان هیدرولیکی خواهد بود. اما در جریان غیر داریسی اغلب شیب سطح آب قابل توجه و از این رو توزیع عمودی فشار غیر هیدرواستاتیک است و نمی توان از عمق جریان به جای بار آبی فشار استفاده کرد. همچنین، به علت زیاد بودن سرعت جریان از بار انرژی جنبشی نیز نمی توان صرف نظر کرد. در نتیجه در این تحقیق برای تعیین تلفات انرژی از شکل کامل معادله انرژی استفاده شد.

$\gamma =$ عمق جریان؛ $p/\gamma =$ بار آبی معادل انرژی فشاری و $q^2/(2gn^2y^2) =$ بار آبی معادل انرژی جنبشی جریان. با مشتق گیری از رابطه ۵ در جهت طولی، گرادیان انرژی به دست می آید (رابطه ۶):

$$S_f = i - \frac{q^2}{gn^2y^3} S_w \quad (6)$$

که در آن،

$S_f =$ شیب خط انرژی؛ $i =$ گرادیان هیدرولیکی (مجموع شیب بستر و گرادیان فشار) و $S_w =$ شیب سطح آب. چنانچه خطوط جریان موازی و مستقیم باشند و شتاب عمودی صفر باشد، توزیع فشار هیدرواستاتیک و عبارت p/γ برابر با عمق جریان y خواهد بود. همچنین اگر



شکل ۴- انرژی جریان آزاد غیر داریسی درون محیط متخلخل

افت انرژی محاسبه می شوند. RMSE به صورت رابطه ۸ تعریف می شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N (E_m - C_m)^2}{N}} \quad (8)$$

آنالیز آماری

برای ارزیابی درستی معادلات مختلف جدول ۱ در برآورد نتایج آزمایشگاهی حاصل از این تحقیق، از دو روش زیر استفاده می شود:

۱- خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و تابع هدف نرمال شده (NOF) مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی

معادله مقادیر را به ترتیب کمتر یا بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای برآورد می‌کند. پارامتر دیگری که درستی تطابق را بررسی می‌کند، ضریب تشخیص R^2 است که مبین میزان انطباق داده‌ها بر یک خط رگرسیون مستقیم است. هرچه R^2 به ۱ نزدیک‌تر باشد، میزان پراکندگی نقاط حول خط مستقیم کمتر است.

آنالیز حساسیت

هدف از تحلیل حساسیت بررسی حساسیت نتایج خروجی معادلات به تغییرات پارامترهای ورودی معادلات است. برای رسیدن به این هدف، از نمایه حساسیت زیر (رابطه ۱۲) استفاده می‌شود (Akbari & Barati, 2012):

$$SI = \frac{(O_2 - O_1)/(O_2 + O_1)}{(I_2 - I_1)/(I_2 + I_1)} \times 100 \quad (12)$$

که در آن،

SI = نمایه حساسیت؛ I_1 و I_2 = به ترتیب حد پایینی و بالایی پارامتر ورودی و O_1 و O_2 = به ترتیب مقادیر گرادیمان هیدرولیکی متناظر با مقادیر I_1 و I_2 . بی‌بعد بودن نمایه حساسیت معیاری مفید برای مقایسه حساسیت پارامترهاست. منفی بودن این نمایه، معرف رابطه معکوس بین پارامتر ورودی و خروجی است (یعنی مقدار خروجی، با افزایش مقدار ورودی، کاهش می‌یابد).

نتایج و بحث

نتایج آزمایشگاهی

در این تحقیق در مجموع ۶۶ آزمایش روی سه نمونه سنگریزه با قطرهای متوسط ۱/۶۸، ۲/۲۷ و ۴/۸۴ سانتی‌متر دنبال شده است که به ترتیب D-1، D-2 و D-3 نام‌گذاری شده‌اند.

آزمایش‌ها در محدوده دبی ۰/۴۸ تا ۷/۱۵ لیتر در ثانیه و اعداد رینولدز ۵۱۸ تا ۱۷۷۹۶ اجرا شده‌اند که از

که در آن، E_m = مقادیر آزمایشگاهی؛ C_m = مقادیر محاسباتی بر اساس معادلات جدول ۱ و N = تعداد کل نقاط. پارامتر RMSE باید تا حد امکان نزدیک به صفر باشد تا تخمین خوبی صورت گیرد. NOF نسبت RMSE به میانگین کل داده‌های آزمایشگاهی X است و به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$NOF = \frac{RMSE}{X} \quad (9)$$

که در آن،

X = مقدار میانگین داده‌های آزمایشگاهی است و از رابطه ۱۰ تعیین می‌شود:

$$X = \frac{\sum_{m=1}^N E_m}{N} \quad (10)$$

NOF باید تا حد امکان نزدیک به صفر باشد. اما کمتر بودن NOF از یک، نشان از آن دارد که این روش از اطمینان و صحت کافی برخوردار است.

۲- اعتبار معادلات با ترسیم نمودار مقادیر محاسباتی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی افت انرژی نیز بررسی می‌شود. بهترین انطباق زمانی رخ می‌دهد که تمام نقاط روی خط با شیب ۱:۱ قرار گیرد. انحراف از این خط با برازش یک خط رگرسیونی مستقیم از میان نقاط به صورت رابطه ۱۱، تعیین می‌شود:

$$C = \lambda E \quad (11)$$

که در آن،

C معرف مقادیر محاسباتی و E معرف مقادیر آزمایشگاهی است. شیب λ این خط مستقیم برای انطباق مناسب باید معادل ۱ باشد. اگر شیب λ کمتر یا بیشتر از ۱ باشد،

قطر ذرات به عنوان طول مشخصه برای محاسبه عدد رینولدز استفاده شده است. آزمایش‌ها همچنین در دو دمای متفاوت و در فصل‌های زمستان و بهار اجرا شده که دامنه تغییرات دمای آب از ۱۰ تا ۲۹ درجه سلسیوس بوده است. جزییات محدوده تغییر متغیرها در جدول ۲ ارائه شده است.

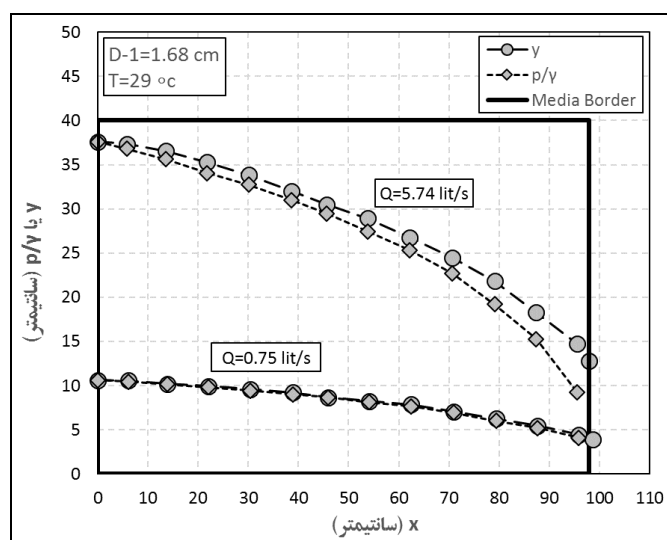
جدول ۲- دامنه تغییرات متغیرها در آزمایش‌ها

عدد رینولدز	دبی (لیتر بر ثانیه)	۱۰-۶ سرعت (متر مربع بر ثانیه $\times 10^{-6}$)	دما (درجه سلسیوس)	سنگریزه
۵۱۸-۴۷۱۶	۰/۷۵-۵/۷۴	۰/۸۲ و ۱/۳۱	۲۹ و ۱۰	D-1
۷۶۴-۶۰۱۹	۱/۰-۴/۵۱	۰/۹۰ و ۱/۳۱	۲۵ و ۱۰	D-2
۱۸۲۰-۱۷۷۹۶	۰/۴۸-۷/۱۵	۰/۸۷ و ۱/۱۸	۲۶/۵ و ۱۴	D-3

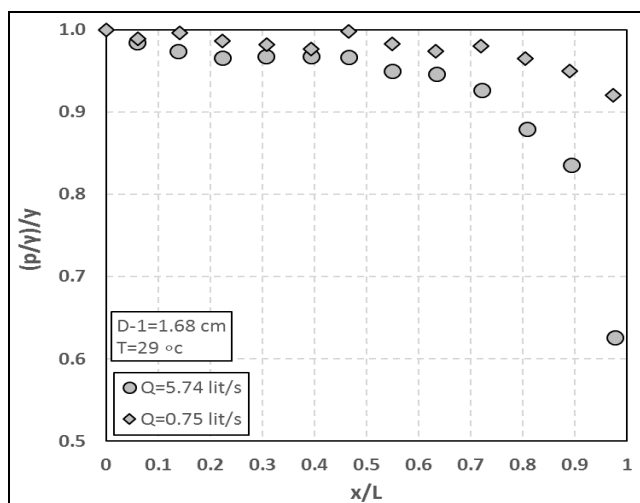
شرایط فشار غیر هیدرواستاتیک

محیط‌های متخلخل افت انرژی زیادی رخ می‌دهد، اختلاف تراز زیادی بین دو انتهای بالادست و پایین دست محیط متخلخل به وجود می‌آید تا امکان عبور جریان فراهم شود. از این رو شیب سطح آب در این شرایط زیاد است و انتظار می‌رود شرایط غیر هیدرواستاتیک برقرار شود. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، اختلاف بین نیمرخ طولی سطح آب و فشار پیژومتری وارد بر کف کاملاً مشهود است و با افزایش دبی و شیب سطح آب به سمت پایین دست این اختلاف افزایش می‌یابد.

شرایطی که فشار در هر نقطه از مقطع عرضی جریان آب معادل عمق جریان در آن نقطه باشد، به معنای آن است که اثر نیروی گرانش بر توزیع فشار در مقطع جریان اندک و توزیع فشار مشابه حالتی است که آب ساکن است و در واقع توزیع فشار از قانون هیدرواستاتیک تبعیت می‌کند. شیب زیاد سطح آب و یا بستر و همچنین انحناى خطوط جریان از عواملی هستند که باعث بروز شرایط توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک می‌شوند. از آنجا که در



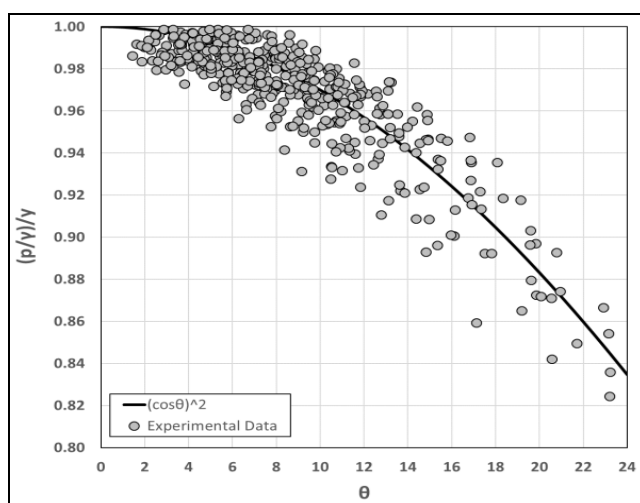
شکل ۵- پروفیل طولی سطح آب و فشار در داخل محیط متخلخل برای دو دبی مختلف



شکل ۶- نیمرخ بی بعد فشار پیزومتری در داخل محیط متخلخل برای دو دبی مختلف

انحنای دارد و در نتیجه در مقدار نهایی فشار پیزومتری مؤثر خواهد بود. اما به علت کم بودن سرعت جریان در داخل محیط متخلخل، تأثیر انحنای خطوط جریان بسیار ناچیز است. برای بررسی درستی این مطلب، در شکل ۷ مقادیر نسبت بار فشاری به عمق آب در مقابل زاویه سطح آب و همچنین تابع $\cos^2\theta$ در مقابل زاویه سطح آب رسم شده است. در شکل ۷ دیده می‌شود که تقریباً از زاویه سطح آب معادل ۶ درجه، میزان کاهش فشار پیزومتری نسبت به فشار هیدرواستاتیک بیشتر از ۱ درصد است و منحنی $\cos^2\theta$ انطباق خوبی بر مقادیر مشاهده‌ای دارد که نشان‌دهنده تأثیر ناچیز انحنای جریان بر نیمرخ فشار است.

در جریان یکنواخت در یک مجرای روباز شیب‌دار که زاویه کف نسبت به افق معادل θ است، بار فشاری در هر نقطه از مقطع عمودی جریان معادل حاصل ضرب عمق جریان در ضریب تصحیح $\cos^2\theta$ است. از این رو چنانچه زاویه θ کوچک باشد، این ضریب تقریباً برابر با ۱ خواهد بود و می‌توان شرایط را هیدرواستاتیک در نظر گرفت. در زاویه θ کمتر از ۶ درجه، این ضریب تصحیح باعث کاهش بار فشاری به مقداری کمتر از ۱ درصد می‌شود. اما در شرایط موجود در داخل محیط متخلخل این تحقیق، از آنجا که شیب بستر ناچیز و تقریباً صفر است و تنها سطح آب دارای شیب است، به همین دلیل خطوط جریان نیز



شکل ۷- تغییرات نسبت $(p/\gamma)/y$ بر حسب زاویه سطح آب در محیط متخلخل

ارزیابی روابط مختلف درجه دوم جریان غیر داریسی (Herrera & Felton, 1991) نتایج تحلیل دو روش آنالیز آماری به ترتیب در جداول های ۳ و ۴ ارائه شده است. بهترین درستی بر اساس آنالیز صورت گرفته در جدول های بالا رنگی نمایش داده شده است. مشاهده می شود که به جز در آزمایش های مرتبط با دمای ۲۹ درجه سلسیوس در دانه بندی با قطر متوسط $D-1=1.68$ سانتی متر که معادله هررا و فلتون (Stephenson, 1979) است، در دیگر آزمایش ها معادله لی و همکاران (Li et al., 1998) دارای بهترین انطباق است. نتایج به دست آمده همچنین نشان می دهد که معادله لی و همکاران (Li et al., 1998) مقادیر افت انرژی را برای هر دو دمای آب در زمان اجرای آزمایش ها با دقتی قابل قبول برآورد می کند.

ارزیابی روابط مختلف درجه دوم جریان غیر داریسی (Herrera & Felton, 1991) نتایج تحلیل دو روش آنالیز آماری به ترتیب در جداول های ۳ و ۴ ارائه شده است. بهترین درستی بر اساس آنالیز صورت گرفته در جدول های بالا رنگی نمایش داده شده است. مشاهده می شود که به جز در آزمایش های مرتبط با دمای ۲۹ درجه سلسیوس در دانه بندی با قطر متوسط $D-1=1.68$ سانتی متر که معادله هررا و فلتون (Stephenson, 1979) است، در دیگر آزمایش ها معادله لی و همکاران (Li et al., 1998) دارای بهترین انطباق است. نتایج به دست آمده همچنین نشان می دهد که معادله لی و همکاران (Li et al., 1998) مقادیر افت انرژی را برای هر دو دمای آب در زمان اجرای آزمایش ها با دقتی قابل قبول برآورد می کند.

جدول ۳- نتایج تحلیل RMSE و NOF روش های مختلف

D-3		D-2				D-1				مأخذ		
T=26.5 °C		T=14 °C		T=25 °C		T=10 °C		T=29 °C			T=10 °C	
NOF	RMSE	NOF	RMSE	NOF	RMSE	NOF	RMSE	NOF	RMSE		NOF	RMSE
۰/۱۳۶	۰/۰۱۸	۰/۱۷۶	۰/۰۲۱	۰/۱۵۸	۰/۰۲۰	۰/۱۱۷	۰/۰۱۸	۰/۱۷۸	۰/۰۳۵	۰/۱۳۷	۰/۰۲۴	(Stephenson, 1979)
۰/۲۵۵	۰/۰۳۴	۰/۱۶۱	۰/۰۱۹	۰/۲۹۹	۰/۰۳۹	۰/۲۶۱	۰/۰۴۱	۰/۱۴۴	۰/۰۲۸	۰/۲۵۳	۰/۰۴۴	(Herrera & Felton, 1991)
۰/۱۲۹	۰/۰۱۷	۰/۱۵۹	۰/۰۱۹	۰/۱۵۶	۰/۰۲۰	۰/۱۰۹	۰/۰۱۷	۰/۱۸۹	۰/۰۳۷	۰/۱۲۷	۰/۰۲۲	(Li et al., 1998)
۰/۴۰۸	۰/۰۵۵	۰/۲۸۹	۰/۰۳۵	۰/۳۸۹	۰/۰۵۰	۰/۳۳۷	۰/۰۵۳	۰/۲۴۳	۰/۰۴۸	۰/۳۰۶	۰/۰۵۴	(Ghazimoradi & Masumi, 1997)
۰/۱۴۰	۰/۰۱۹	۰/۳۱۵	۰/۰۳۸	۰/۴۸۰	۰/۰۶۲	۰/۶۵۶	۰/۱۰۲	۰/۷۸۶	۰/۱۵۵	۱/۰۱۶	۰/۱۷۸	(Jalal Aldin Korki, 1997)
۰/۴۷۴	۰/۰۶۴	۰/۸۴۰	۱/۰۱	۱/۳۰۵	۰/۱۶۹	۱/۷۱۴	۰/۲۶۸	۱/۸۵۱	۰/۳۶۴	۲/۴۷۴	۰/۴۳۴	(Jafari, 2001)
۰/۴۸۵	۰/۰۶۵	۰/۳۱۶	۰/۰۳۸	۰/۵۰۱	۰/۰۶۵	۰/۴۰۶	۰/۰۶۳	۲/۵۰۸	۰/۴۹۴	۴/۳۲۹	۰/۷۶۰	(Bazargan & Shoaiei, 2010)

جدول ۴- نتایج تحلیل R^2 و λ روش های مختلف

D-3		D-2				D-1				مأخذ		
T=26.5 °C		T=14 °C		T=25 °C		T=10 °C		T=29 °C			T=10 °C	
R^2	λ	R^2	λ	R^2	λ	R^2	λ	R^2	λ		R^2	λ
۰/۹۸	۱/۰۲	۰/۹۷	۱/۱۰	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۹	۱/۱۲	۰/۹۷	۰/۹۳	(Stephenson, 1979)
۰/۹۸	۰/۸۲	۰/۹۶	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۷۸	۰/۹۶	۰/۸۰	۰/۹۹	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۸۳	(Herrera & Felton, 1991)
۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۶	۱/۰۸	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۹	۱/۱۳	۰/۹۷	۰/۹۷	(Li et al., 1998)
۰/۹۸	۰/۶۹	۰/۹۶	۰/۷۷	۰/۹۴	۰/۷۰	۰/۹۴	۰/۷۴	۰/۹۸	۰/۸۲	۰/۹۰	۰/۷۹	(Ghazimoradi & Masumi, 1997)
۰/۹۷	۱/۰۳	۰/۹۲	۱/۲۱	۰/۸۷	۱/۳۱	۰/۸۴	۱/۴۷	۰/۹۲	۱/۵۹	۰/۷۵	۱/۷۲	(Jalal Aldin Korki, 1997)
۰/۹۶	۱/۳۳	۰/۸۷	۱/۶۵	۰/۷۷	۱/۹۷	۰/۷۱	۲/۳۲	۰/۸۳	۲/۴۱	۰/۵۸	۲/۸۳	(Jafari, 2001)
۰/۹۷	۰/۶۳	۰/۹۱	۰/۷۶	۰/۸۶	۰/۶۱	۰/۸۲	۰/۶۹	۰/۷۷	۲/۹۱	۰/۴۷	۴/۲۵	(Bazargan & Shoaiei, 2010)

بر این اساس، نتایج به دست آمده نشان دادند که پس از معادله لی و همکاران (Li et al., 1998) با NOF معادل ۰/۱۴۵ و سپس معادلات استفنسون (Stephenson,

با متوسط گیری از مقادیر NOF هر معادله در جدول ۳ و مرتب سازی از مقادیر کوچک به بزرگ، بهترین معادلات برای تخمین مقادیر افت اصطکاکی تعیین شدند.

می‌کنند و دو معادله لی و همکاران (Li *et al.*, 1998) و استفنسون (Stephenson, 1979) با مقدار λ نزدیک به ۱ بهترین برآورد را از نتایج دارند. معادلات هررا و فلتون (Herrera & Felton, 1991) و قاضی‌مرادی و معصومی (Ghazimoradi & Masumi, 1997) نیز مقادیر افت اصطکاکی را کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد می‌کند.

نتایج آنالیز آماری نشان می‌دهد که دامنه تغییرات پارامترهای ورودی آزمایش‌ها برای توسعه هر یک از معادلات تأثیر بسزایی دارد. از میان معادلات جدول ۱، شرایط آزمایشگاهی هررا و فلتون (Herrera & Felton, 1991) بیشترین انطباق را با شرایط آزمایشگاهی این تحقیق دارد. همچنین، شرایط آزمایشگاهی لی و همکاران (Li *et al.*, 1998) و استفنسون (Stephenson, 1979) بیشترین دامنه تغییرات را داراست و معادلات جعفری (Jafari, 2001) و جلال‌الدین کرکی (Jalal Aldin Korki, 1997) و قاضی‌مرادی و معصومی (Ghazimoradi & Masumi, 1997) برای ذرات سنگریزه بزرگ‌تر از ذرات این تحقیق توسعه یافته‌اند. ذرات سنگریزه در پژوهش بازرگان و شعاعی (Bazargan & Shoaiei, 2010) نیز کوچک‌تر از ذرات به‌کار رفته در این تحقیق هستند. بر این اساس مشاهده می‌شود که سه معادله لی و همکاران (Li *et al.*, 1998)، استفنسون (Stephenson, 1979) و هررا و فلتون (Herrera & Felton, 1991) بهترین نتایج را به‌دست داده‌اند و به‌طور کلی با افزایش قطر ذرات سنگریزه در آزمایش‌های این تحقیق، خطای برآورد دو معادله جلال‌الدین کرکی (Jalal Aldin Korki, 1997) و جعفری (Jafari, 2001) نیز کمتر می‌شود. معادله قاضی‌مرادی و معصومی (Ghazimoradi & Masumi, 1997) نیز به‌دلیل نبود پارامتر n تخلخل محیط سنگریزه‌ای در آن، در کل دامنه تغییرات اندازه سنگریزه آزمایش‌های این تحقیق خطای یکسانی داشته است. اما در معادله بازرگان و شعاعی (Bazargan & Shoaiei, 2010)، علاوه بر منطبق (Herrera & Felton, 1991)، هررا و فلتون (1991)، به ترتیب با مقادیر NOF معادل ۰/۱۵ و ۰/۲۳ بهترین انطباق را با داده‌های آزمایشگاهی دارند. بر اساس معیار NOF برآوردها زمانی قابل اطمینان هستند که مقدار این پارامتر کمتر از ۱ باشد. در جدول ۳ دیده می‌شود که معادله جعفری (Jafari, 2001) تقریباً همواره در محدوده آزمایش‌های این تحقیق دارای مقادیر NOF بیشتر از ۱ است و تنها در قطر D-4 شرایط مورد نظر برای آنها برقرار است. معادله جلال‌الدین کرکی (Jalal Aldin Korki, 1997) نیز تنها در قطر D-1 و دمای ۱۰ درجه مطابق با معیار NOF نیست و با افزایش قطر ذرات این شرایط برای معادله مذکور برقرار می‌شود. همچنین، به‌طوری‌که مشاهده می‌شود، معادله بازرگان و شعاعی (Bazargan & Shoaiei, 2010) نیز در آزمایش‌های مربوط به قطر D-1 شرط NOF کمتر از ۱ را ندارد و با افزایش قطر ذرات محیط متخلخل معیار فوق برای آن برقرار شده است. سایر معادلات در دامنه تغییرات اندازه ذرات آزمایش‌های این تحقیق نتایجی با خطای نسبتاً یکسان حاصل کرده‌اند. مقادیر R^2 در جدول ۴ برای سه معادله جلال‌الدین کرکی (Jalal Aldin Korki, 1997)، جعفری (Jafari, 2001) و بازرگان و شعاعی (Bazargan & Shoaiei, 2010) نشان می‌دهد که در ذرات سنگریزه کوچک پراکندگی نقاط محاسباتی در مقابل پراکندگی نقاط مشاهداتی زیاد است و این پراکندگی با افزایش قطر ذرات سنگریزه کاهش می‌یابد و مقادیر R^2 به ۱ نزدیک می‌شوند. در سایر معادلات میزان پراکندگی مقادیر محاسباتی در مقابل مقادیر مشاهداتی بسیار ناچیز است به‌طوری‌که مقدار R^2 از ۰/۹ تا ۰/۹۹ متغیر است. با متوسط‌گیری از مقادیر λ معادلات مختلف در جدول ۴ مشخص می‌شود که معادلات بازرگان و شعاعی (Bazargan & Shoaiei, 2010)، جعفری (Jafari, 2001) و جلال‌الدین کرکی (Jalal Aldin Korki, 1997) مقادیر افت اصطکاکی را بیشتر از واقعیت برآورد

گرفتن تطابق دامنه تغییرات پارامترهای ورودی معادلات مختلف جدول ۱، سه معادله لی و همکاران (Li *et al.*, 1998)، استفنسون (Stephenson, 1979) و هررا و فلتون (Herrera & Felton, 1991) به منظور تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی شامل لزوجت سینماتیک، تخلخل، قطر متوسط ذرات، انحراف استاندارد سنگریزه‌ها و سرعت ظاهری جریان، انتخاب شدند؛ این سه معادله به ترتیب بهترین نتایج را در برآورد مقدار افت اصطکاک به دست داده‌اند. نتایج استفاده از مقادیر مختلف پارامترهای ورودی جدول ۵، برای سه معادله افت اصطکاکی منتخب در جدول ۶ ارائه شده است.

نبودن دامنه تغییرات اندازه ذرات، وجود پارامترهای دیگر مبین مشخصات دانه بندی ذرات سنگریزه باعث خطای بسیار زیاد در برآورد نتایج شده است.

تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی معادلات

برای تحلیل حساسیت، باید مقادیر پایه پارامترها را مشخص کرد، پارامترها را در محدوده‌ای مشخص بزرگ و کوچک کرد و مقادیر افت اصطکاکی را بر اساس معادلات مختلف به دست آورد. مقادیر پایه پارامترهای ورودی مورد استفاده در این تحقیق به شرح جدول ۵ هستند و بر اساس دامنه تغییرات پارامترها در آزمایش‌ها تعیین شده‌اند. بر اساس معیار NOF در بخش قبل و همچنین در نظر

جدول ۵- مقادیر پارامترها برای تحلیل معادلات منتخب

پارامتر	لزوجت سینماتیکی (مترمربع بر ثانیه)	تخلخل	قطر متوسط ذرات (متر)	سرعت ظاهری (متر بر ثانیه)	انحراف استاندارد سنگریزه ها (متر)
حد پائینی	0.821×10^{-6}	۰/۳۹۱	۰/۰۱۶۸	۰/۰۱۴	۰/۰۰۳۷
مقدار متوسط	1.064×10^{-6}	۰/۴۰۴	۰/۰۳۲۶	۰/۰۶۳	۰/۰۰۶۸
حد بالایی	1.307×10^{-6}	۰/۴۱۷	۰/۰۴۸۴	۰/۱۱۲	۰/۰۱

جدول ۶- مقادیر افت اصطکاکی معادلات منتخب بر اساس مقادیر مختلف پارامترهای ورودی

پارامتر	مأخذ		
	Herrera & Felton, 1991	Stephenson, 1979	Li <i>et al.</i> , 1998
مقدار متوسط	۰/۲۵۲	۰/۳۱۹	۰/۳۱۵
v	۰/۲۴۵	۰/۳۱۶	۰/۳۱۰
	۰/۲۵۹	۰/۳۲۲	۰/۳۲۰
n	*--	۰/۳۴۰	۰/۳۳۶
	*--	۰/۳۰۰	۰/۲۹۶
D ₅₀	۰/۵۸۵	۰/۶۴۲	۰/۶۴۸
	۰/۱۶۲	۰/۲۱۲	۰/۲۰۸
V	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۲۰
	۰/۷۵۱	۰/۹۸۸	۰/۹۶۴
σ	۰/۲۴۹	*--	*--
	۰/۲۵۶	*--	*--

* نبود پارامتر در رابطه

پارامترهای ورودی مشابه هستند، پارامتر تخلخل محیط سنگریزه‌ای، بیشترین تأثیر را بر نتایج افت اصطکاکی دارد و پارامترهای سرعت ظاهری جریان، قطر متوسط ذرات و لزوجت سینماتیک آب به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. در معادله هررا و فلتون (Herrera & Felton, 1991)، پارامتر تخلخل وجود ندارد و به جای آن پارامتر انحراف استاندارد ذرات سنگریزه دیده می‌شود که در بین سایر پارامترها، کمترین تأثیر را بر مقادیر خروجی دارد.

جدول ۷ مقادیر نمایه حساسیت افت اصطکاکی حاصل از معادلات منتخب را بر اساس تغییر یکی از پارامترهای ورودی و ارزیابی اثر آن بر نتیجه، نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر نمایه حساسیت به دست آمده، پارامترهای ورودی هر یک از معادلات منتخب بر حسب اهمیت رتبه‌بندی و در جدول ۸ ارائه شده‌اند. در جدول ۸ مشاهده می‌شود که در دو روش لی و همکاران (Li et al., 1998) و استفنسون (Stephenson, 1979) که دارای

جدول ۷- مقادیر نمایه حساسیت (درصد)

پارامتر ورودی	مأخذ	Li et al., 1998	Stephenson, 1979	Herrera & Felton, 1991
v		۶/۶	۴/۰	۶/۳
n		-۱۹۳/۲	-۱۹۵/۸	*--
D ₅₀		-۱۰۶/۳	-۱۰۳/۹	-۱۱۷/۰
V		۱۲۳/۹	۱۲۴/۳	۱۲۲/۹
σ		*--	*--	۳/۴

* نبود پارامتر در رابطه

جدول ۸- رتبه‌بندی اهمیت پارامترهای ورودی معادلات منتخب

رتبه اهمیت	مأخذ	Li et al., 1998	Stephenson, 1979	Herrera & Felton, 1991
۱		n	n	V
۲		V	V	D ₅₀
۳		D ₅₀	D ₅₀	v
۴		v	v	σ

ورودی بر اساس متوسط قدر مطلق مقادیر نمایه حساسیت پارامترهای مختلف ورودی به این صورت است: هررا و فلتون (Herrera & Felton, 1991) با نمایه حساسیت ۶۲/۴ درصد کمترین حساسیت و بعد از آن استفنسون (Stephenson, 1979) و لی و همکاران (Li et al., 1998) به ترتیب با نمایه حساسیت ۱۰۷/۵ و ۱۰۷ درصد قرار دارند. علت کم بودن مقدار نمایه حساسیت در معادله هررا و فلتون (Herrera & Felton, 1991) حضور نداشتن پارامتر تخلخل است که در تمامی معادلات دیگر بیشترین

متوسط‌گیری مقادیر نمایه حساسیت هر پارامتر در معادلات مختلف نشان می‌دهد که در مجموع تخلخل با نمایه حساسیت ۱۹۴/۵- درصد بیشترین تأثیر را بر مقادیر خروجی دارد و پس از آن سرعت، قطر متوسط ذرات، لزوجت سینماتیک و انحراف استاندارد ذرات به ترتیب با نمایه حساسیت ۱۲۳/۷، ۱۰۹/۱- و ۵/۶ و ۳/۴ درصد، پارامترهای مؤثرتر به شمار می‌آیند. در هر معادله، چنانچه تمامی پارامترها به طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند، رتبه‌بندی میزان حساسیت هر معادله به پارامترهای

آب به سمت پایین دست این اختلاف افزایش می یابد. همانند جریان یکنواخت در مجاری روباز شیب دار با تجاوز مقدار زاویه شیب سطح آب از ۶ درجه، اختلاف بین عمق آب و فشار پیزومتری بیشتر از ۱ درصد خواهد بود و با توجه به ناچیز بودن سرعت ظاهری جریان در محیط های متخلخل و در نتیجه قابل چشم پوشی بودن نیروی گریز از مرکز ناشی از انحنای خطوط جریان، نسبت عمق آب به فشار پیزومتری تقریباً معادل $\cos^2\theta$ خواهد بود.

- بر اساس معیار NOF در دامنه تغییرات متغیرهای تحقیق حاضر، معادله لی و همکاران (Li et al., 1998) بهترین تخمین را از مقدار افت انرژی در جریان غیر داری از درون محیط متخلخل درشت دانه به دست می دهد و پس از آن به ترتیب معادلات استفنسون (Stephenson, 1979) و هررا و فلتون (Herrera & Felton, 1991) بهترین انطباق را با داده های آزمایشگاهی دارند.

- تحلیل حساسیت روی پارامترهای ورودی معادلات مختلف نشان می دهد که دو معادله لی و همکاران (Li et al., 1998) و استفنسون (Stephenson, 1979) دارای کمترین نمایه حساسیت اند و پارامترهای تخلخل، سرعت ظاهری جریان، قطر متوسط ذرات و لزوجت سینماتیک آب به ترتیب بیشترین تأثیر را بر مقادیر افت اصطکاکی جریان غیر داری در محیط های متخلخل سنگریزه ای دارند.

مقدار نمایه حساسیت را داشته است. تخلخل یکی از پارامترهای اصلی معرف خلل و فرج محیط سنگریزه ای است و وجود آن در معادله درجه دوم جریان غیر داری طبق ساده سازی های معادله ناویه استوکس محرز گردیده است، دو معادله استفنسون (Stephenson, 1979) و لی و همکاران (Li et al., 1998) ضمن دارا بودن بهترین صحت در برآورد مقدار افت اصطکاکی، کمترین میزان حساسیت و عدم قطعیت را به پارامترهای ورودی دارند.

نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور ارزیابی معادلات مختلف افت اصطکاکی جریان آزاد درون محیط های متخلخل سنگریزه ای، آزمایش هایی روی سه نمونه سنگریزه رودخانه ای با قطرهای متوسط ۱/۶۸، ۲/۲۷ و ۴/۸۴ سانتی متر اجرا و در حین آزمایش ها به طور همزمان ارتفاع پیزومتری و عمق آب در محیط متخلخل ثبت شد.

پس از تجزیه و تحلیل داده ها برای دماهای مختلف و مقایسه آماری نتایج آزمایشگاهی با معادلات مختلف ارائه شده برای جریان غیر داری و همچنین تحلیل حساسیت روی پارامترهای ورودی معادلات منتخب، نتایج زیر حاصل شد:

- با توجه به شیب زیاد جریان و همچنین انحنای خطوط در محیط متخلخل، توزیع فشار از نوع غیر هیدرواستاتیک است و بین نیمرخ طولی سطح آب و فشار پیزومتری وارد بر کف اختلاف وجود دارد و با افزایش دبی و شیب سطح

مراجع

- Abt, S. R., Ruff, J. F. and Wittler, R. J. 1991. Estimating flow through riprap. J. Hydraul. Eng. ASCE 117(5): 670-675.
- Ahmed, N. and Sunada, D. K. 1969. Nonlinear flow in porous media. J. Hydraul. Diy. ASCE. 95(6): 1847-1857.
- Akbari, G. and Barati, R. 2012. Comprehensive analysis of flooding in unmanaged catchments. Water Manage. 165(WM4): 229-238.

- Bazargan, J. and Shoaiei, S. M. 2010. Analysis of non-Darcy flow in rock fill materials using gradually varied flow method. *J. Civil Surv. Eng.* 44(2): 131-139. (in Persian)
- Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Pub.
- Engelund, F. 1953. On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand. Akademiet for de tekniske videnskaber, Copenhagen.
- Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.* 48, 89-94.
- Ghazimoradi, A. and Masumi, A. 1997. Investigation of water flow through rockfill media. Proceedings of the 1st Iranian Hydraulic Conference. Sep. 2-4, Tehran, Iran. (in Persian)
- Gent, M. R. A. 1995. Porous flow through rubble-mound material. *J. Waterw. Port. Coast. Ocean Eng.* 121(3): 176-181.
- Hannoura, A. A. and Barends, F. B. J. 1981. Non-Darcy flow; a state of the art. In: In: Veruijt, A. and Banrends, F. B. J. (Eds). *Flow and Transport in Porous Media*. Balkema, Ratterdam.
- Hansen, D. 1992. The behaviour of flow through rockfill dams. Ph. D. Thesis. Department of Civil Engineering. University of Ottawa, Canada.
- Hansen, D., Garga, V. K. and Townsend, D. R. 1995. Selection and application of a one-dimensional non-Darcy flow equation for two-dimensional flow through rockfill embankments. *Can. Geotech. J.* 32(2): 223-232.
- Herrera, N. M. and Felton, G. K. 1991. Hydraulics of flow through a rockfill dam using sediment-free water. *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 34(3): 871-875.
- Hill, R. J. and Koch, D. L. 2002. The transition from steady to weakly turbulent flow in a close-packed ordered array of spheres. *J. Fluid Mech.* 465, 59-97.
- Jafari, H. 2001. Investigation the flow hydraulics in porous media made of round-edge rockfill river material with the diameter of 10 to 20 cm. M. Sc. Thesis in Water Structures. University of Tarbiat Modarres, Tehran, Iran. (in Persian)
- Jalal Aldin Korke, M. S. 1997. Hydraulic investigation of flow in rockfill porous media. M.Sc. Thesis in Water Structures. Azad Islamic University of South Tehran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. 1996. *Treatment Wetlands*. New York.
- Kovacs, G. 1981. *Developments in Water Science-Seepage Hydraulics*. Elsevier.
- Leps, T. M. 1970. Review of shearing strength of rockfill. *J. Soil Mech. Found. Div.* 96(SM4): 1159-1170.
- Li, B. 1995. Flowthrough and overtopped rockfill dams. Ph. D. Thesis. Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Canada.
- Li, B., Garga, V. K. and Davies, M. H. 1998. Relationships for non-Darcy flow in rockfill. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 124(2): 206-212.
- McCorquodale, J. A., Hannoura, A. A. A. and Nasser, M. S. 1978. Hydraulic conductivity of rockfill. *J. Hydraul. Res.* 16(2): 123-137.

- Moradi-Tayyebi, M., Amiri-Tokaldany, E. 2015. Introducing a relationship to estimate hydraulic gradient in non-Darcy turbulent flow in porous media. *J. Water Soil.* 29(4): 908-918. (in Persian)
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H. and Salehi, R. 2014. Non-Darcy Flow of Water through a Packed Column Test. *Transport Porous Med.* 101(2): 215-227.
- Sidiropoulou, M. G., Moutsopoulos, K. N. and Tsihrintzis, V. A. 2007. Determination of Forchheimer equation coefficients a and b . *Hydrol. Process.* 21, 534-554.
- Stephenson, D. 1979. *Rockfill in Hydraulic Engineering.* Elsevier Science Pub. New York.
- Ward, J. C. 1964. Turbulent flow in porous media. *J. Hydraul. Div. ASCE.* 90(5): 1-12.



Evaluation and Sensitivity Analysis of Head-Loss Equations of Free Surface Flow through Rockfill Porous Media

A. Gord-Noshahri, E. Amiri-Tokaldany* and M. Sedghi-Asl

*Corresponding Author: Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
Email: amiri@ut.ac.ir

Received: 13 October 2017; Accepted: 21 February 2018

Abstract

This research was aimed to evaluate the available equations provided for non-Darcy flow in rockfill porous media, when there is a free surface flow, and when vertical pressure distribution is non-hydrostatic. Most of previous investigation about non-Darcy flow performed in permeameter that simulate one dimensional flow in porous media. Because of severe energy loss and considerable difference between upstream and downstream water surface elevations in rockfill porous media, a non-hydrostatic pressure distribution was expected. To carry out the research, a series of laboratory experiments have been conducted on rockfill materials with three different diameters (1.68, 2.27 and 4.84 cm) and in a medium of 100cm in length, where water temperature varied between 10 and 29 °C. Results indicated that difference between water depth and piezometric pressure increased as water surface and water discharge increased. Based on statistical analysis of existing experimental data, the most suitable model for energy loss in free surface flow in rockfill materials was introduced. Moreover, it was found that the introduced model had the lowest sensitivity to the variation of the input parameters, and the porosity, apparent velocity, median rockfill diameter and kinematic viscosity, respectively, had highest influence on head-loss results.

Keywords: Energy Loss, Non-Darcy Flow, Non-Hydrostatic Pressure Distribution