



University Of Qom



Experimental and Numerical Investigation of Pizometric Head and Water Surface Profile of Steady Flow in Porous Media

Hassan Hajikazemian¹, Jalal Bazargan²

1. Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: H_hajkazemian@znu.ac.ir
2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: jbazargan@znu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 10 May 2023

Revised 21 Aug 2023

Accepted 28 Sep 2023

Keywords:

Drag Force,
Gradual Varied Flow,
Porous Media,
Water Surface Profile,
Pizometric Head,
Steady Flow.

ABSTRACT

In this article, pressure on the floor and water surface profile at steady flow in rockfill material (coarse grain aggregate) is survived experimentally and numerically. Porous media with small, medium and coarse grading was prepared in a 15 meter length, 1 meter wide and 0.8 meter height laboratory open channel. Pressure changes with pizometers which are installed on bed and water depth with reading from channel side are recorded. Steady flow is established with 3 flows and 12 tests are done totally. Based on experimental data coefficients of binominal relation are calculated with accuracy. Gradual varied flow relations have been used as governing equations. Based on recorded data, there is significant different between pizometric and water depth which amount of that is less in first of media and reach to maximum in end points. Frictional loose of drag force is reason of this deference. In the following, with solving of energy equation, pressure depth in all points is calculated with accuracy and then with applying of the mentioned energy loose, water depth and water surface profile are calculated. As a results, average error of pizometric head in whole tests is 3.3 percent and mean error of water profile calculation are 2.36 and 13.44 percent for with and without considering of drag force effect Respectively.

Cite this article: Hajikazeiman H, Bazarghan J. Experimental and Numerical Investigation of Pizometric Head and Water Surface Profile of Steady Flow in Porous Media. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 1-13. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9313.1473>



بررسی عددی و آزمایشگاهی بلندای پیزومتریک و نیمرخ سطح آب جریان ماندگار در محیط متخلخل سنگریزه‌ای

حسن حاجی کاظمیان^۱، جلال بازرگان^۲

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: H_hajkazemian@znu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: jbazargan@znu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، محیط متخلخل سنگریزه‌ای با سه دانه‌بندی مختلف در یک کانال آزمایشگاهی روباز با عمق ۰/۸ و پهنای ۱ و طول ۱۳ متر تهیه شده و در هر دانه‌بندی، جریان ماندگار با ۴ دبی مختلف برقرار شده است. سپس عمق آب و بلندای پیزومتریک در ۲۳ نقطه طول محیط ثبت گردیده است. براساس داده‌های ثبت شده بین مقادیر بلندای پیزومتریک و عمق آب، تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای وجود دارد که ناشی از افت انرژی ناشی از اثر نیروی درگ می‌باشد. در بخش دوم، معادله انرژی به عنوان معادله اصلی حاکم در نظر گرفته شد و با حل آن بلندای فشار پیزومتریک در تمام نقاط محاسبه شده است. در گام بعد با اعمال افت انرژی ناشی از اثر نیروی درگ نیمرخ سطح آب با دقت مناسبی محاسبه گردیده است. براساس نتایج به‌دست آمده، متوسط خطا بین هر سه نوع سنگریزه در محاسبه بلندای پیزومتریک ۳/۳ درصد می‌باشد. همچنین مقدار متوسط خطا در محاسبه نیمرخ سطح آب با در نظر گرفتن اثر نیروی درگ ۲/۳۶ درصد و بدون لحاظ کردن این اثر ۱۳/۴۴ درصد حاصل شده است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶

کلیدواژه‌ها:

نیروی درگ،
تئوری جریان متغیر تدریجی،
محیط متخلخل،
نیمرخ سطح آب،
بلندای پیزومتریک،
جریان ماندگار.

استناد: حاجی کاظمیان حسن، بازرگان جلال. بررسی عددی و آزمایشگاهی بلندای پیزومتریک و نیمرخ سطح آب جریان ماندگار در محیط متخلخل سنگریزه‌ای. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱): ۱-۱۳.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.9313.1473>

۱- مقدمه

ارائه شده در زمینه گرادیان هیدرولیکی جریان‌های غیرداریسی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت منفذی جریان رابطه‌ای غیرخطی برقرار می‌شود و رابطه‌ای تجربی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت منفذی ارائه دادند [۱۰]. حسینی، معادلات تجربی مورد استفاده برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی جریان غیرخطی از محیط‌های متخلخل درشت‌دانه را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند معادلاتی که در آنها اطلاعات مرتبط با زبری و شکل سنگدانه‌ها لحاظ شده‌اند به نتایج خوبی در تخمین پارامترهای جریان درون محیط متخلخل می‌انجامند. ایشان از روابط اصلاح شده سنت‌ونانت به منظور مدل‌سازی جریان غیرماندگار از میان محیط سنگریزه‌ای استفاده کردند [۱۱]. همچنین روابط مشابهی توسط پژوهشگران به عنوان روابط حاکم برای تحلیل جریان در محیط متخلخل ایجاد شده در یک کانال مستطیلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳]. باری و هانسن^۱، به مطالعه آزمایشگاهی جریان متغیر تدریجی درون مصالح سنگریزه‌ای پرداختند. ایشان دریافتند در شرایطی که گرادیان هیدرولیکی کوچک باشد تطابق بسیار خوبی بین نتایج جریان متغیر تدریجی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد [۶].

پترسون^۲ و همکاران، توسط آزمایش‌ها و روش‌های عددی ضریب درگ را برای مقادیر مختلف زاویه برخورد و سرعت در یک محیط متخلخل به‌دست آورده و مقایسه کردند. براساس آزمایش‌های صورت گرفته ضریب درگ در حالت ۹۰ درجه بیشترین مقدار حدود ۰/۲۵ و برای صفر درجه کمترین مقدار ۰/۰۲ به‌دست آمده است. همچنین استفاده از روش‌های عددی که توسط نرم‌افزار FLUENT انجام شده بیانگر دقت بسیار مناسب محاسبات با خطای ۶/۲ درصدی می‌باشد [۱۲].

بررسی و پیش‌بینی مشخصات جریان در محیط‌های سنگریزه‌ای به‌خصوص محیط درشت‌دانه در علوم مختلف دارای اهمیت زیادی می‌باشد. محیط‌های متخلخل درشت‌دانه با توجه به اندازه ذرات و منافذ، سبب بروز پیچیدگی‌هایی در رفتار جریان می‌گردند به‌طوری که جریان در آنها حالت لایه‌ای نداشته و رابطه داریسی اعتبار خود را از دست می‌دهد. در چنین وضعیتی رابطه سرعت-گرادیان هیدرولیکی به‌صورت غیرخطی می‌باشد. براساس پژوهش‌های بسیاری که در این زمینه انجام شده می‌توان رابطه دوجمله‌ای و رابطه نمایی را به عنوان دو دسته کلی روابط سرعت-گرادیان هیدرولیکی در محیط متخلخل معرفی نمود (روابط (۱) و (۲)):

$$i = aV + bV |V| \quad (1)$$

$$i = mV^n \quad (2)$$

که در این روابط، V سرعت جریان و i گرادیان هیدرولیکی می‌باشند. ضرایب روابط فوق، توسط محققین مختلفی بررسی شده و غالباً براساس مجموعه‌ای از خصوصیات مصالح، سیال و سرعت ظاهری (یا عدد رینولدز) محاسبه شده است [۱-۶]. صدقی اصل و انصاری، یک حل تحلیلی برای جریان‌های آزاد با فرضیات دوپویی-فورشه‌ایمر انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که حل تحلیلی انجام شده قابلیت محاسبه پروفیل جریان درون محیط‌های سنگدانه‌ای را دارد [۷]. عباس و همکاران، حل نیمه‌تحلیلی برای معادلات دیفرانسیلی جریان در محیط متخلخل کاملاً مستغرق ارائه نمودند [۸]. محققان به بررسی آزمایشگاهی جریان آشفته درون محیط سنگریزه‌ای درشت‌دانه پرداختند و با ارائه راه‌حل تحلیلی جدید پروفیل سطح آب در حالت ماندگار بر روی مصالح متخلخل مورد بررسی قرار دادند [۹]. صالحی و همکاران، با اجرای یک سری آزمایش در ستون‌های تحت فشار از محیط‌های سنگدانه‌ای به بررسی روابط مختلف

¹- Bari and Hansen

²- Peterson

که ϕ نسبت کرویت می‌باشد. در این پژوهش با توجه به قطر ذرات مورد بررسی و اعداد رینولدز مختلف ۱۵۰ حالت مورد بررسی قرار گرفت [۱۵].

در سال ۲۰۱۸، پژوهشگران به بررسی ضریب درگ دانه‌های کاملاً غیرمنظم پرداختند با توجه به شکل نامنظم دانه‌ها از تکنولوژی پردازش تصاویر به منظور ارزیابی ویژگی‌های هندسی ذرات بهره گرفته شده است. محققین با استفاده از روابط آماری و برازش منحنی‌ها رابطه‌نمایی برای محاسبه ضریب درگ یک ذره براساس پارامترهای عدد رینولدز و ضریب شکل استخراج شده است:

$$C_d = 0.945 \frac{C_{d_{sph}}}{Re^2 \phi^{exp}} Re^{0.01} \quad (5)$$

$$exp = mRe^a \quad (6)$$

که در آن $C_{d_{sph}}$ ضریب درگ ذرات کروی، ϕ نسبت کرویت ذرات و $m=0.641$ و $a=0.153$ می‌باشند [۱۶].

دانش‌فراز و همکاران، به بررسی افت انرژی جریان عبوری از یک محیط سنگریزه‌ای درشت‌دانه (سازه گابیونی) پرداختند. ایشان با کار آزمایشگاهی نشان دادند که سازه گابیونی می‌تواند تا ۷۶ درصد انرژی جریان را مستهلک نماید [۱۷].

گودرزی و همکاران، با استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی اثر نیروی درگ را در تحلیل نیمرخ طولی جریان در محیط متخلخل بررسی نمودند. محققین آزمایش‌های خود را روی محیط سنگریزه‌ای با ابعاد 30×30 سانتیمتر به طول $2/2$ متر در حالت ماندگار با دبی‌های 0.745 و $1/04$ لیتر بر ثانیه برای سنگدانه‌های شکسته و دبی‌های 0.649 و 0.971 لیتر بر ثانیه روی سنگریزه‌های گردگوشه انجام دادند. پژوهشگران رابطه (۷) را به منظور ضریب اصطکاک ناشی از نیروی درگ ارائه دادند:

$$C_d = \left(\frac{1}{Re} + 1 \right) \frac{y \cos \phi}{d} \quad (7)$$

شیخ و کیو^۳، میدان سرعت و اندرکنش آب و ذرات محیط را از یک ذره تا مجموعه‌ای از ذرات با چینش تصادفی با استفاده از مدل بولتزمن مورد بررسی قرار دادند. مدل فوق با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته توسط محققین توسعه پیدا کرده و اصلاح گردید. سپس مدل اصلاح شده به منظور محاسبه نیروی درگ به کار گرفته شد [۱۳].

ویتینگ^۴ و همکاران با به‌کارگیری روش مرزی غوطه‌وری، مشخصات جریان را بررسی نموده و با مشابه‌سازی ذرات محیط متخلخل با ذرات کروی و مکعبی، روابط جدیدی به دست آوردند. براساس این پژوهش، ضریب درگ برای مقادیر مختلف عدد رینولدز و تخلخل محاسبه شده و تأثیر این دو پارامتر بررسی شده است. بر این اساس برای ذرات کروی رابطه (۳) پیشنهاد گردید:

$$C_D = 0.686\varepsilon + \frac{51.3 - 18.4\varepsilon}{Re} + \frac{2.35}{\sqrt{Re}} \quad (3)$$

که در این رابطه، ε تخلخل و Re عدد رینولدز می‌باشند. براساس نتایج درصد خطای رابطه حاصل به‌طور متوسط ۲/۷ درصد می‌باشد [۱۴].

بیسترا^۵ و همکاران (۲۰۰۷) در مقاله خود یک رابطه به منظور محاسبه نیروی درگ برای جریان عبوری از دسته ذرات کروی به دو صورت متراکم و پراکنده ارائه کردند. محققین رابطه خود را بر اساس الگوی شبیه‌سازی بولتزمن- لاتیگ و بر پایه دو پارامتر عدد رینولدز و تخلخل ذرات بیان نمودند.

$$F = \frac{10\phi}{(1-\phi)^2} + (1-\phi)^2 (1+1.5\phi^2) + \frac{0.413Re}{24(1-\phi)^2} \left[\frac{(1-\phi)^{-1} + 3\phi(1-\phi) + 8.4Re^{-0.343}}{1+10^{3\phi} Re^{-(1+4\phi)/2}} \right] \quad (4)$$

³- Sheikh and Qiu

⁴- Witting

⁵- Bittstra

ابتدای محیط متخلخل و L کل طول محیط متخلخل می‌باشند [۲۰].

در این تحقیق تلاش شده است تا با پژوهشی آزمایشگاهی و عددی، سطوح پیژومتریکی (فشار وارد بر کف کانال) و نیمرخ سطح آب در طول یک جریان ماندگار در یک محیط سنگریزه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. به منظور محاسبه رقوم مذکور از رابطه انرژی و تئوری جریان‌های متغیر تدریجی استفاده شده است. برخلاف پژوهش‌های پیشین که تنها به بررسی نیمرخ سطح آب پرداخته‌اند، در این پژوهش، ابتدا فشار وارد بر کف کانال و سطح پیژومتریکی محاسبه شده و سپس با اعمال افت انرژی ناشی از اثر نیروی درگ نیمرخ سطح آب پیش‌بینی شده است. در گام نخست با برپایی یک مجموعه آزمایشگاهی و برقراری جریان‌های ماندگار مورد نظر داده‌های مشاهداتی مربوط به رقوم پیژومتریکی و سطح آب به دقت ثبت گردید و سپس با بررسی اختلاف مشاهده شده در دو تراز پیژومتریکی و سطح آب، رابطه (۱۰) در این شرایط مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت. سپس در گام بعدی با اعمال رابطه مذکور در رابطه انرژی و با حل آن رقوم پیژومتریکی و سطح آب محاسبه شد و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

در این مطالعه از کانال آزمایشگاهی شیب‌پذیر آزمایشگاه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه زنجان استفاده شده است. کانال مذکور به طول ۱۳ متر و به ابعاد یک متر عرض در ۰/۸ متر ارتفاع بوده و دیواره آن جهت بررسی جریان از شیشه ساخته شده است. به منظور ایجاد محیط متخلخل ۲/۱ متر از طول کانال انتخاب و توسط دو جداکننده توری جدا گردیده است. برای ثبت فشار وارد بر کف کانال تعداد ۲۳ پیژومتر در محدوده ایجاد شده نصب شده‌اند. فاصله پیژومترها به صورت ۶ پیژومتر به فاصله

که در این رابطه Re عدد رینولدز است که به همراه پارامتر طول d از روابط ارائه شده توسط احمد و سونادا استخراج می‌شوند. همچنین در این رابطه ϕ زاویه خطوط جریان با افق می‌باشد [۱۸]. نوروزی و همکاران، با استفاده از یک مطالعه آزمایشگاهی ضریب درگ را در محیط سنگریزه‌ای در جریان ماندگار و غیرماندگار مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها بر روی محیط سنگریزه‌ای تحت فشار که داخل یک استوانه فولادی به قطر ۱۶ و طول ۴۰ سانتیمتر ایجاد شده است. محققین نشان دادند که براساس رابطه دارسی- وایسباخ، رابطه دو جمله‌ای سرعت- گرادیان هیدرولیکی و ضرایب a و b محاسباتی توسط احمد و سونادا در دو حالت ماندگار و غیرماندگار ضریب اصطکاک را می‌توان به صورت روابط (۸) و (۹) محاسبه نمود:

$$f = \frac{2}{C} \left(\frac{1}{Re} + 1 \right) \quad (8)$$

$$f = \frac{2}{C} \left(\frac{1}{Re} + 1 \right) + 2 \frac{dg}{V^2} c \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

که در این روابط، C ضریب محاسباتی از روابط ارائه شده توسط احمد و سونادا، ضریب c ضریب جمله سوم در رابطه سرعت- گرادیان هیدرولیکی و d قطر ذرات می‌باشد [۱۹]. محمدی در تحقیقات خود در یک برنامه آزمایشگاهی که روی کانالی به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتیمتر به طول ۲ متر انجام داد. وی افت انرژی ناشی از نیروی درگ را به عنوان عامل ایجادکننده این اختلاف معرفی و رابطه (۱۰) را با استفاده از روابط ارائه شده توسط احمد و سونادا بدین منظور ارائه نمود:

$$H_{dr} = \left(\frac{2}{C} \right) \left(1 + \frac{1}{Re} \right) \left(\frac{y \cos \theta}{d} \right) \left(\frac{V \cos \phi^2}{2g} \right) \left(\frac{x}{L} \right) \quad (10)$$

که در این رابطه C ، Re و d مقادیر محاسبه شده از روابط پیشنهادی احمد و سونادا، θ زاویه کف کانال، ϕ متوسط زاویه خطوط جریان و افق، x فاصله نقطه مورد بررسی از

سنگدانه‌های دانه‌بندی شده توسط شرکت سه نوع دانه‌بندی تولید شد که نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

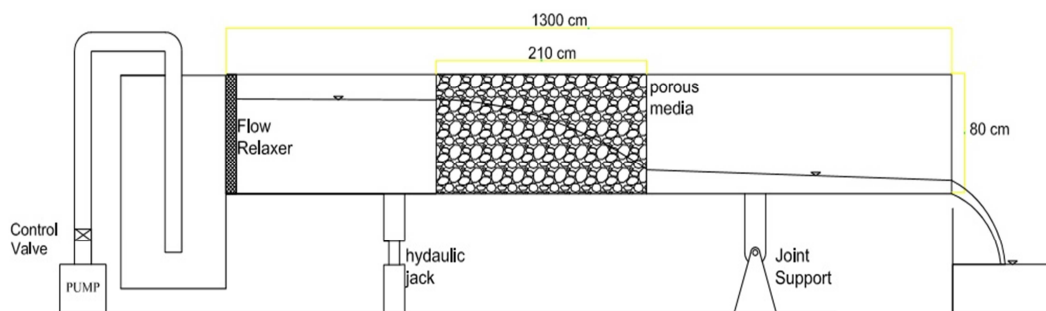
۲-۳- روش انجام آزمایش‌ها

به منظور ایجاد محیط متخلخل فضایی به ابعاد ۰/۸ به طول ۲/۱ متر توسط دو صفحه توری ایجاد شده و درون آن به صورت لایه لایه سنگریزه‌ها تخلیه و توزیع شده‌اند (شکل ۳). پس از ایجاد یک محیط سنگریزه‌ای یکنواخت، جریان با دبی‌های مختلف از محیط عبور داده شد. با هدف ماندگار شدن مؤلفه‌های جریان پمپ به مدت ۱۰ دقیقه با هر دبی ثابت کار کرده و سپس داده‌های مورد بررسی ثبت شدند.

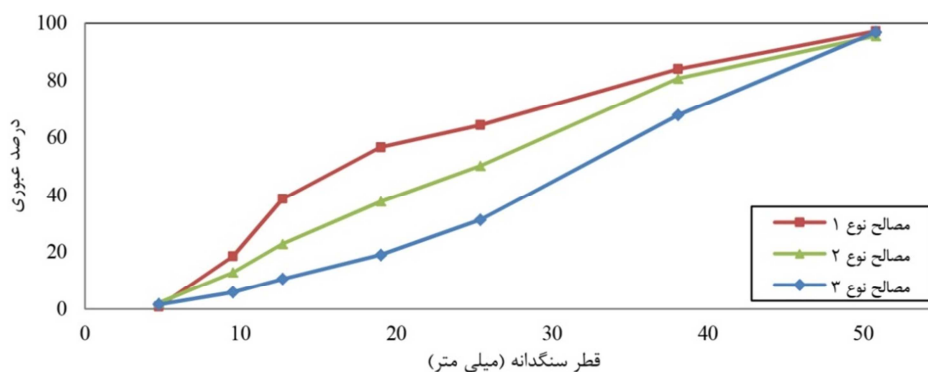
۱۵ سانتیمتر در ابتدا، ۶ پیژومتر به فاصله ۱۰ سانتیمتر در وسط و ۱۰ پیژومتر به فاصله ۵ سانتیمتر در انتهای کانال می‌باشد. شکل ۱، نمای شماتیک کانال را نشان می‌دهد. برای ایجاد شیب از دو جک هیدرولیک استفاده می‌شود که در این پژوهش شیب به صورت ثابت ۱/۷۳ درصد تنظیم شده است.

۲-۲- مصالح مورد استفاده

سنگدانه‌های مورد استفاده در این تحقیق از یک معدن سنگ کوهی واقع در روستای نیکویه در فاصله ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهر قزوین تأمین شده‌اند. سنگدانه‌ها از جنس آذرین بوده و با هدف استفاده در بالاست راه‌آهن تولید شده‌اند. بر این اساس، تمام سنگریزه‌های مورد استفاده تیزگوشه می‌باشند. با ترکیب



شکل ۱- شماتیک کلی کانال آزمایشگاهی



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده

d0 (mm)	d10 (mm)	d30 (mm)	d50 (mm)	d60 (mm)	d100 (mm)	Cu	Cc	تخلخل	
۳/۹۴	۶/۷۸	۹/۹۷	۱۳/۹۹	۱۷/۷۰	۵۴/۹۳	۲/۶۱	۰/۸۳	۰/۴۲۵	مصالح نوع ۱
۷/۴۷	۴/۲۱	۱۲/۱۰	۲۳/۸۹	۲۸/۵۶	۵۶/۹۷	۶/۷۹	۱/۲۲	۰/۳۹۴	مصالح نوع ۲
۳/۳۴	۱۱/۴۹	۲۳/۸۹	۳۱/۹۷	۳۵/۰۲	۵۰/۸۰	۳/۰۵	۱/۴۲	۰/۲۸۹	مصالح نوع ۳

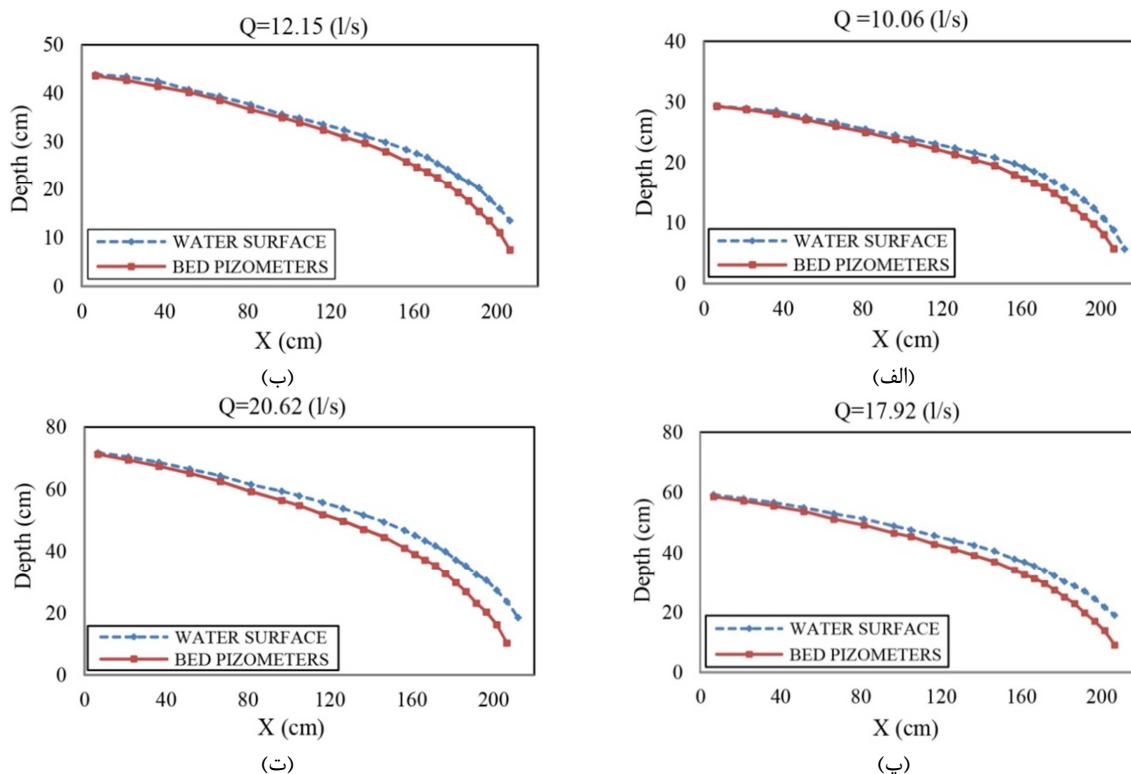
در این تحقیق، آزمایش‌ها بر روی سه نوع مصالح یاد شده و در هر مصالح با چهار دبی و در مجموع ۱۲ آزمایش صورت گرفته است. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نتایج آزمایشات را برای نیمرخ سطح آب و بلندای پیزومتریک در طول محیط روی مصالح نوع اول، دوم و سوم نشان می‌دهد. همانطور که در تصاویر شکل‌های ۴ تا ۶ مشاهده می‌گردد، برخلاف جریان در کانال‌های باز نیمرخ سطح آب و بلندای پیزومتریک در محیط متخلخل بر یکدیگر منطبق نمی‌باشند.

در جریان ثبت داده‌ها، بلندای پیزومتریک با قرائت مستقیم از تابلوی پیزومترها ثبت شد. به منظور برداشت نیمرخ سطح آب، عمق آب دقیقاً در نقاط نصب پیزومترها مشاهده و ثبت گردید. بر این اساس برای هر یک از مصالح، ۴ دبی عبور داده شده و در مجموع، ۱۲ آزمایش صورت گرفت.

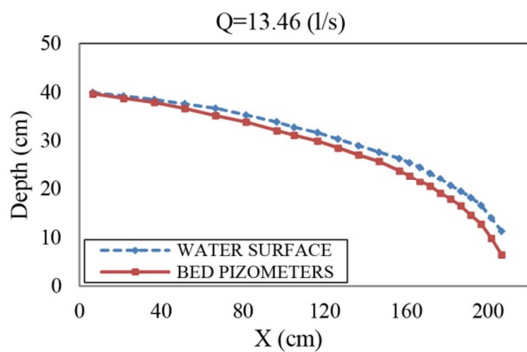
۳- نتایج آزمایشگاهی



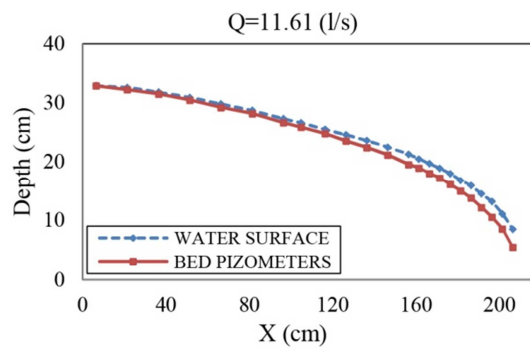
شکل ۳- محیط متخلخل ایجاد شده



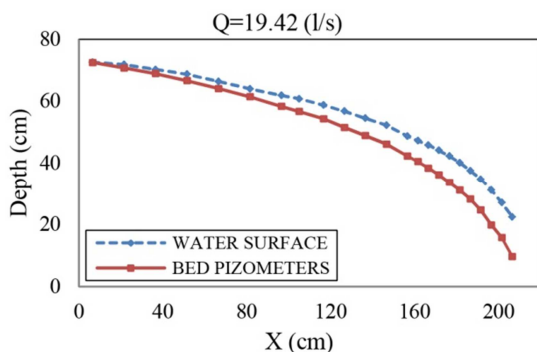
شکل ۴- بلندای پیزومتریک و عمق آب در طول محیط متخلخل برای مصالح نوع ۱ در دبی‌های مختلف



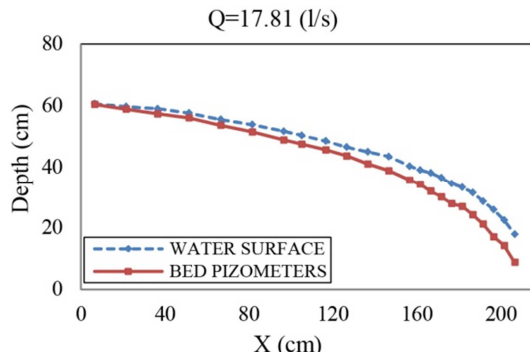
(ب)



(الف)

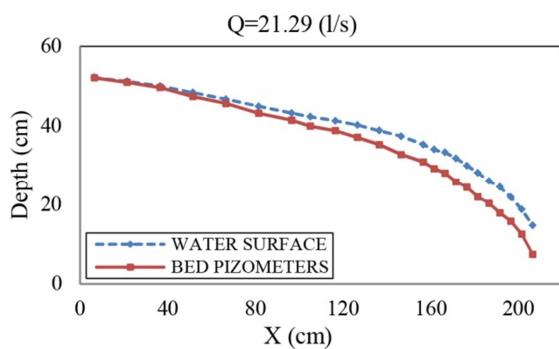


(ت)

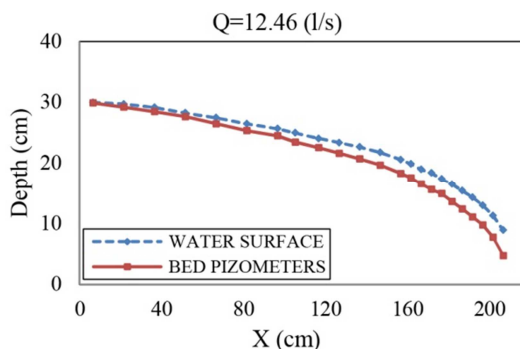


(پ)

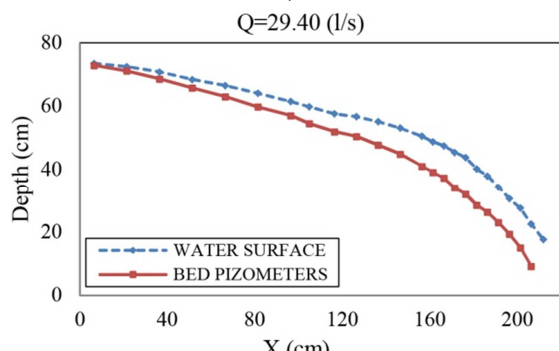
شکل ۵- بلندای پیزومتریک و عمق آب در طول محیط متخلخل برای مصالح نوع ۲ در دبی‌های مختلف



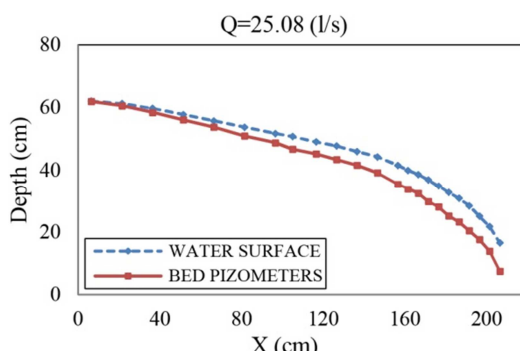
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۶- بلندای پیزومتریک و عمق آب در طول محیط متخلخل برای مصالح نوع ۳ در دبی‌های مختلف

عمق آب و ارتفاع پیزومتریک زیادتر است. براساس نتایج آزمایشگاهی ثبت شده نمودار سرعت متوسط در برابر گرادیان هیدرولیکی برای هریک از آزمایش‌ها رسم شده و

این اختلاف در نقاط انتهایی محیط که سرعت و همچنین زاویه جریان نسبت به کف کانال بیشتر شده است افزایش یافته است. همچنین در دبی‌های بالا اختلاف

با برازش دادن منحنی‌های با دقت مناسب، ضرایب روابط دوجمله‌ای و توانی با توجه به جدول ۲ استخراج شده‌اند.

جدول ۲- ضرایب رابطه دوجمله‌ای و نمائی

b	a	دبی (l/s)	
۳۳/۸۰۵	۱/۲۱۹	۱۰/۰۶	مصالح نوع ۱
۶۵/۲۴۴	۱/۱۷۳	۱۴/۱۵	
۹۵/۳۸۵	۱/۳۴۲	۱۷/۰۷	
۱۵۲/۰۸	۱/۵۲۵	۲۰/۶۲	
۵۱/۴۷۱	۰/۲۲۸	۱۱/۶۱	مصالح نوع ۲
۷۰/۰۷۶	۰/۲۹۸	۱۳/۴۶	
۱۵۶/۷۰	۰/۴۶۷	۱۷/۸۱	
۲۱۷/۲۳	۰/۸۷۳	۱۹/۴۲	
۳۴/۵۹۶	۰/۲۱۵	۱۲/۴۶	مصالح نوع ۳
۶۲/۵۷۹	۰/۶۲۱	۲۱/۲۹	
۷۲/۰۴۱	۰/۹۸۴	۲۵/۰۸	
۷۵/۹۲۵	۱/۳۳۸	۲۹/۴۰	

۴- روابط حاکم

جایگزین نمود. بر این اساس و با حل معادله انرژی مقدار

بلندای پیژومتریک در هر نقطه محاسبه می‌گردد:

$$\Delta h = S_f \cdot \Delta x = i \cdot \Delta x \quad (14)$$

$$\Delta x = \frac{\left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}\right)_1 - \left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}\right)_2}{S_0 - i} \quad (15)$$

که S_0 شیب کف کانال، \bar{i} میانگین گرادیان هیدرولیکی می‌باشند. همانطور که اشاره شد اختلاف بین بلندای پیژومتریک و عمق آب حاصل افت انرژی ناشی از اثر نیروی درگ می‌باشد. بر این اساس و با داشتن میزان این افت می‌توان عمق آب را محاسبه نمود:

$$y = \frac{P}{\gamma} + h_{f_{dr}} \quad (16)$$

افت انرژی ناشی از اثر نیروی درگ ($h_{f_{dr}}$) در این پژوهش با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد.

۵. نتایج و بحث

در این بخش نخست بلندای پیژومتریک در تمام نقاط با استفاده از رابطه انرژی محاسبه می‌گردد.

در این پژوهش از رابطه انرژی به منظور محاسبه بلندای پیژومتریک استفاده شده است (رابطه ۱۱). برای محاسبه عمق آب با اعمال افت انرژی ناشی از اثر نیروی درگ روابط زیر توسعه داده شده‌اند. بر این اساس در این بخش، ابتدا بلندای پیژومتریک و سپس عمق آب در هر نقطه در طول محیط متخلخل محاسبه شده است. رابطه انرژی در محیط سنگریزه‌ای را می‌توان به صورت رابطه (۱۳) ارایه نمود:

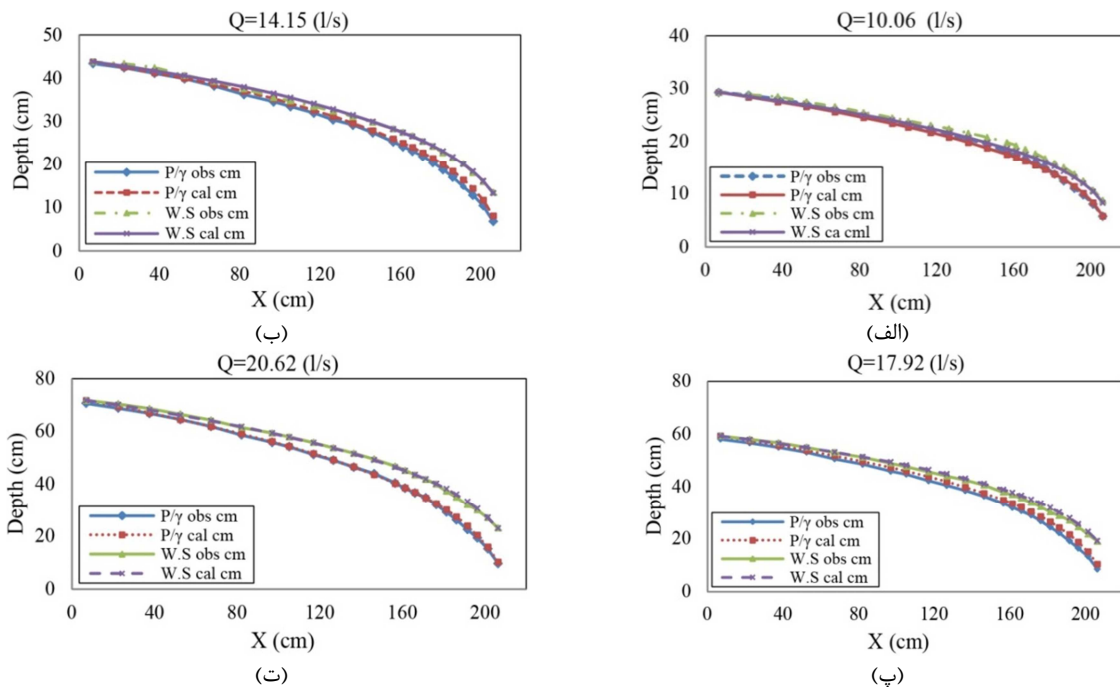
$$E = \frac{P}{\gamma} + Z + \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

$$E_1 = E_2 + \Delta E \quad (12)$$

$$\left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z\right)_1 = \left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z\right)_2 + \Delta H \quad (13)$$

که در آن E_1 و E_2 به ترتیب انرژی در مقطع ۱ و ۲، ΔE کل افت انرژی می‌باشند. در این روابط با جایگزین کردن گرادیان $S_f = i$ در معادله انرژی، کل افت انرژی به وجود آمده در طول جریان (Δx) را می‌توان با جمله $\Delta x \cdot i$

چنانچه مقدار محاسبه شده، اختلاف ناچیزی با عمق پیزومتریک در بخش نخست (معادله انرژی) داشته باشد، عمق در نظر گرفته شده ثبت شده و محاسبات برای نقطه بعدی انجام می‌پذیرد. در غیر اینصورت، با کم کردن مقداری جزئی از عمق در نظر گرفته شده محاسبات تا رسیدن به نتیجه مطلوب تکرار می‌گردد. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نتایج محاسبات و مقایسه آن با مشاهدات را نشان می‌دهد.



شکل ۷- عمق آب و بلندای پیزومتریک محاسباتی و مشاهداتی برای مصالح نوع ۱ در دبی‌های مختلف

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{O_i - C_i}{O_i} \right| \times 100 \quad (15)$$

که در آن O_i مقدار مشاهداتی، C_i مقدار محاسباتی و N تعداد داده‌ها می‌باشند.

مقادیر متوسط خطای نسبی و همچنین حداکثر خطای نسبی برای محاسبات بلندای پیزومتریک در جدول ۴ و برای عمق آب در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است مقادیر نشان داده شده در جدول ۴ متوسط خطا و همچنین حداکثر خطا برای تمام نقاط مورد بررسی در طول محیط متخلخل می‌باشد (۲۳ نقطه). براساس نتایج، مشاهده می‌شود محاسبه بلندای پیزومتریک با

محاسبات در بخش ماکرونویسی نرم‌افزار اکسل کدنویسی شده‌اند. سپس با داشتن بلندای پیزومتریک در هر نقطه، برای محاسبه عمق جریان محاسبات دوم انجام می‌شود. در این محاسبات، ابتدا مقدار مشخصی برای عمق در نقطه اول در نظر گرفته می‌شود. در گام بعدی، مقدار افت انرژی ناشی از اثر درگ با استفاده از رابطه (۱۰) براساس عمق در نظر گرفته شده محاسبه می‌گردد. در آخر، افت به‌دست آمده از عمق در نظر گرفته شده کسر شده و

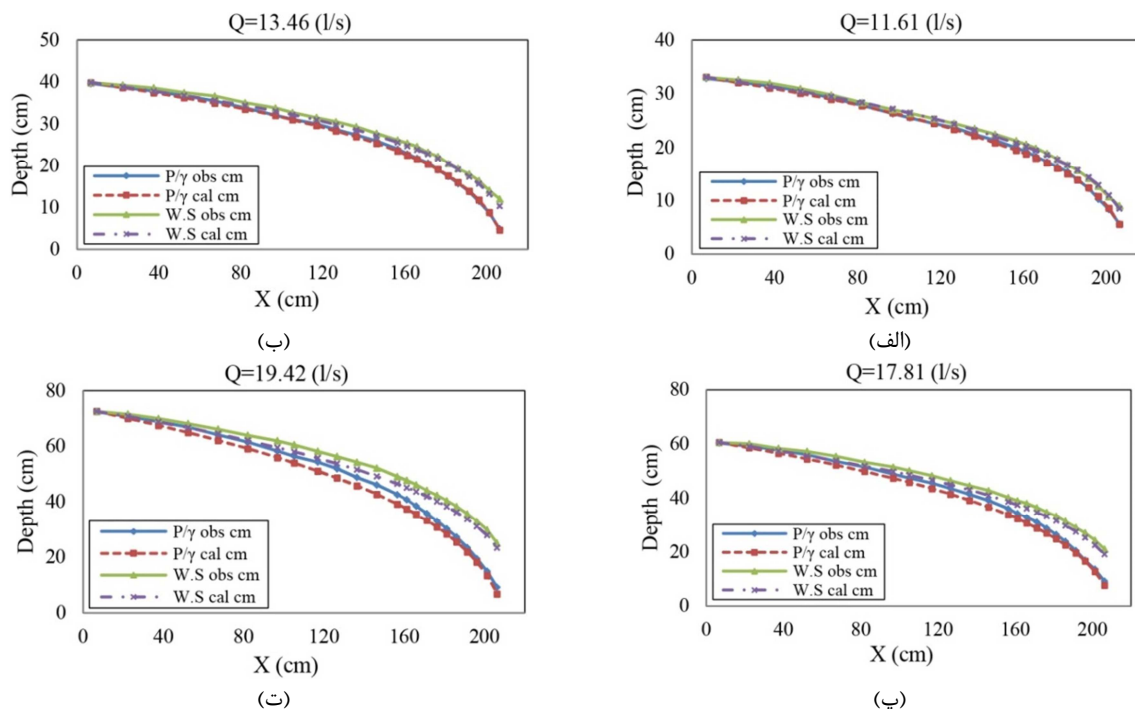
همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌گردد مقادیر محاسباتی با دقت مناسبی به‌دست آمده‌اند. لازم به ذکر است که چنانچه از افت ناشی از اثر نیروی درگ در محاسبات عمق صرف‌نظر گردد مقدار عمق محاسباتی به‌دست آمده دارای خطای زیادی خواهد بود.

برای بررسی دقت محاسبات مقدار درصد خطای نسبی (RE) و متوسط خطای نسبی (MRE) براساس روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شوند:

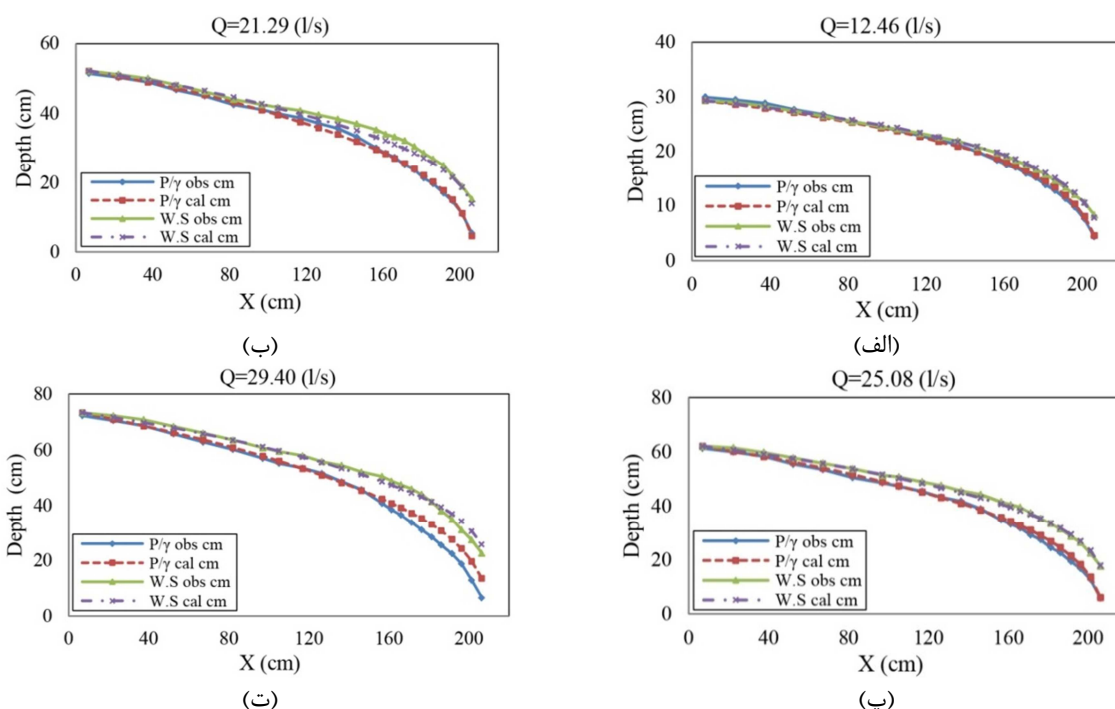
$$RE = \left| \frac{O_i - C_i}{O_i} \right| \times 100 \quad (14)$$

بیشترین مقدار متوسط خطا در پیش‌بینی بلندای پیزومتریک ۶/۳۵ درصد می‌باشد.

استفاده از تئوری جریان متغیر تدریجی با در نظر گرفتن $S_f=i$ از دقت مناسبی برخوردار است به طوری که



شکل ۸- عمق آب و بلندای پیزومتریک محاسباتی و مشاهداتی برای مصالح نوع ۲ در دبی‌های مختلف



شکل ۹- عمق آب و بلندای پیزومتریک محاسباتی و مشاهداتی برای مصالح نوع ۳ در دبی‌های مختلف

خطای متوسط ۴/۲۸ درصد در مصالح نوع ۲ در دبی ۱۹/۴۲ رخ داده است. حداکثر متوسط خطای به وجود آمده نیز در مصالح نوع دوم و دبی ۱۳/۴۶ دیده می‌شود.

همچنین نتایج ارائه شده در جدول ۵، بیانگر صحت و دقت رابطه ارائه شده برای افت ناشی از اثر نیروی درگ می‌باشد. براساس این نتایج، کمترین دقت محاسبات با

همچنین براساس نتایج نشان داده شده در جدول ۵، مقادیر خطای عمق آب محاسباتی با صرف نظر از افت انرژی ناشی از اثر نیروی درگ نسبت به حالت با در نظر گرفتن آن بسیار متفاوت است. خطای متوسط حدود ۸ برابر شده است و به عنوان مثال، برای مصالح نوع دوم با دبی ۱۹/۴۲ به ۲۱/۵۳ درصد رسیده است.

جدول ۴- مقادیر خطای بلندای پیزومتریک محاسباتی

RE max	MRE	دبی (l/s)	
۴/۰۹	۲/۱۸	۱۰/۰۶	مصالح نوع ۱
۱۹/۱۲	۴/۶۲	۱۴/۱۵	
۲۲/۳۵	۵/۸۹	۱۷/۹۲	
۵/۱۹	۱/۶۶	۲۰/۶۲	
۵/۱۱	۱/۴۶	۱۱/۶۱	مصالح نوع ۲
۵/۱۵	۱/۴۲	۱۳/۴۶	
۱۵/۸۵	۴/۸۰	۱۷/۸۱	
۲۵/۶۸	۶/۳۵	۱۹/۴۲	
۷/۰۹	۲/۷۶	۱۲/۴۶	مصالح نوع ۳
۱۵/۷۴	۲/۶۸	۲۱/۲۹	
۱۰/۵۷	۳/۵۷	۲۵/۰۸	
۲۳/۶۲	۳/۷۶	۲۹/۴۰	

جدول ۵- مقادیر خطای عمق آب محاسباتی

میانگین خطای نسبی (درصد)		حداکثر خطای نسبی (درصد)		دبی (l/s)	
بدون درگ	با درگ	بدون درگ	با درگ		
۱۰/۳۰	۳/۵۲	۳۳/۸۶	۵/۸۶	۱۰/۰۶	مصالح نوع ۱
۹/۱۹	۱/۰۰	۴۰/۰۰	۲/۵۰	۱۴/۱۵	
۱۰/۲۵	۲/۱۷	۴۵/۲۶	۵/۷۰	۱۷/۰۷	
۱۴/۷۵	-۰/۸۲	۵۵/۸۴	۴/۰۳	۲۰/۶۲	
۸/۳۲	۱/۳۵	۳۷/۷۸	۵/۶۷	۱۱/۶۱	مصالح نوع ۲
۱۳/۰۲	۲/۷۰	۶۱/۶۷	۱۴/۰۸	۱۳/۴۶	
۱۸/۱۷	۴/۰۳	۶۳/۳۳	۹/۱۹	۱۷/۸۱	
۲۱/۵۳	۴/۲۸	۷۱/۸۰	۶/۴۴	۱۹/۴۲	
۷/۰۳	۱/۲۸	۴۴/۵۸	۵/۶۶	۱۲/۴۶	مصالح نوع ۳
۱۶/۱۹	۳/۴۰	۷۰/۰۷	۸/۶۸	۲۱/۲۹	
۱۵/۲۰	۱/۳۹	۶۵/۵۴	۴/۴۰	۲۵/۰۸	
۱۷/۳۰	۲/۳۲	۶۹/۰۷	۴/۸۸	۲۹/۴۰	

۶- نتیجه گیری

می‌باشد. این پدیده سبب می‌گردد سطح پیزومتریک همواره کمتر از سطح آب باشد. اختلاف سطح آب و بلندای پیزومتریک ناشی از اثر نیروی درگ می‌باشد که سبب افت انرژی در راستای جریان می‌شود. به منظور محاسبه فشار وارد بر کف و مقایسه آن با مقادیر

همانطور که در نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق مشاهده می‌گردد، توزیع فشار در عمق جریان در محیط سنگریزه‌ای به صورت غیرهیدرواستاتیک بوده و غالباً فشار وارد بر کف کانال، کمتر از فشار هیدرواستاتیک

دقت مناسب دارند و حداکثر متوسط درصد خطا برای مصالح نوع یک، دو و سه با ترتیب برابر با ۵/۸۹، ۶/۳۵ و ۳/۵۷ می‌باشند.

۳- در بررسی مقادیر محاسباتی عمق آب بدون در نظر گرفتن اثر افت انرژی ناشی از نیروی درگ ملاحظه می‌شود خطای زیادی وارد محاسبات شده و مقادیر حداکثر متوسط خطا به ترتیب ۱۴/۷۵، ۲۱/۵۳ و ۱۷/۳ درصد برای مصالح نوع یک، دو و سه می‌باشند. این در حالی است که با در نظر گرفتن اثر مذکور، مقادیر خطای یاد شده به ۳/۵۲، ۴/۲۸ و ۳/۴ کاهش می‌یابند.

مشاهداتی از رابطه انرژی بهره گرفته شده است. در این ارتباط، کل افت انرژی در واحد طول برابر با گرادیان هیدرولیکی در نظر گرفته شده و برای محاسبه گرادیان هیدرولیکی از رابطه دوجمله‌ای استفاده شده است. براساس بررسی‌های صورت گرفته نتایج زیر حاصل شدند:

۱- نتایج داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند اختلاف بلندای پیژومتريک و عمق آب با افزایش سرعت جریان و زاویه خطوط جریان افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین اختلاف مربوط به بیشترین دبی و در انتهای محیط متخلخل رخ داده است.

۲- محاسبات صورت گرفته بر پایه رابطه انرژی نشان می‌دهد مقادیر محاسباتی بلندای پیژومتريک

References

- [1] Ergun S. Fluid flow through packed columns. Chemical engineering progress. 1952; 48(2): 89-94.
- [2] Ward JC. Turbulent flow in porous media. Journal of the hydraulics division. 1964 Sep; 90(5): 1-12. **doi: 10.1061/JYCEAJ.0001096.**
- [3] Stephenson DJ. Rockfill in hydraulic engineering. Elsevier; 1979.
- [4] Sidiropoulou MG, Moutsopoulos KN, Tsihrintzis VA. Determination of Forchheimer equation coefficients a and b. Hydrological Processes: An International Journal. 2007 Feb 15; 21(4): 534-54. **doi: 10.1002/hyp.6264**
- [5] Ahmed N, Sunada DK. Nonlinear flow in porous media. Journal of the Hydraulics Division. 1969 Nov; 95(6): 1847-58. **doi: 10.1061/JYCEAJ.0002193**
- [6] Bari R, Hansen D. Application of gradually-varied flow algorithms to simulate buried streams. Journal of Hydraulic Research. 2002 Nov 1; 40(6): 673-83. **doi: 10.1080/00221680209499914**
- [7] Sedghi-Asl M, Ansari I. Adoption of extended Dupuit-Forchheimer assumptions to non-Darcy flow problems. Transport in Porous Media. 2016 Jul; 113: 457-69. **doi: 10.1007/s11242-016-0703-1**
- [8] Abbas W, Awadalla R, Bicher S, Abdeen MA, El Shinnawy ES. Semi-analytical solution of nonlinear dynamic behaviour for fully saturated porous media. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2021 Jan 28; 25(2): 264-80. **doi: 10.1080/19648189.2018.1527728**
- [9] Sedghi-Asl M, Rahimi H, Farhoudi J, Hoorfar A, Hartmann S. One-dimensional fully developed turbulent flow through coarse porous medium. Journal of Hydrologic Engineering. 2014 Jul 1; 19(7): 1491-6. **doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.000093**
- [10] Salahi MB, Sedghi-Asl M, Parvizi M. Nonlinear flow through a packed-column experiment. Journal of Hydrologic Engineering. 2015 Sep 1; 20(9): 04015003. **doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.00011**
- [11] Hosseini SM, Joy DM. Development of an unsteady model for flow through coarse heterogeneous porous media applicable to valley fills. International Journal of River Basin Management. 2007 Dec 1; 5(4): 253-65. **doi: 10.1080/15715124.2007.9635325**
- [12] Patursson Ø, Swift MR, Tsukrov I, Simonsen K, Baldwin K, Fredriksson DW, Celikkol B. Development of a porous media model with application to flow through and around a net panel. Ocean Engineering. 2010 Feb; 37(2-3): 314-24. **doi: 10.1016/j.oceaneng.2009.10.001**
- [13] Sheikh B, Qiu T. Pore-scale simulation and statistical investigation of velocity and drag force distribution of flow through randomly-packed porous media under low and intermediate Reynolds numbers. Computers & Fluids. 2018 Jul 30; 171: 15-28. **doi: 10.1016/j.compfluid.2018.05.029**
- [14] Wittig K, Nikrityuk P, Richter A. Drag coefficient and Nusselt number for porous particles under laminar flow conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017 Sep; 112: 1005-16. **doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.035**

- [15] Beetstra R, van der Hoef MA, Kuipers JA. Drag force of intermediate Reynolds number flow past mono-and bidisperse arrays of spheres. *AIChE journal*. 2007 Feb; 53(2): 489-501. **doi: 10.1002/aic.11065**
- [16] Wang Y, Zhou L, Wu Y, Yang Q. New simple correlation formula for the drag coefficient of calcareous sand particles of highly irregular shape. *Powder Technology*. 2018 Feb 15; 326: 379-92. **doi: 10.1016/j.powtec.2017.12.004**
- [17] Daneshfaraz R, Majedi-Asl M, Mortazavi S, Bagherzadeh M. Laboratory Evaluation of Energy Dissipation in the Combined Structure of the Vertical Drop with Gabion. *Civil Infrastructure Researches*, 2022; 8(1): 145-157. **doi: 10.22091/cer.2022.7720.1344** [In Persian]
- [18] Gudarzi M, Bazargan J, Shoaee M. Longitude Profile Analysis of Water Table in Rockfill Materials Using Gradually Varied Flow Theory with Consideration of Drag Force. *Iran Soil and Water Research*. 2020; 51: 404-415 [In Persian]
- [19] Norouzi H, Bazargan J, Azhang F, Nasiri R. Experimental study of drag coefficient in non-darcy steady and unsteady flow conditions in rockfill. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2021: 203-219. **doi: 10.1007/s00477-021-02047-4**
- [20] Mohammadi A. Investigation the Factors Affecting on the Distribution of Real Pressure in non Darcy-Steady Flow within Rockfill Materials. MSc Thesis, Faculty of Engineering, University of Zanjan. 2022. [In Persian]