

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی توزیع فشار در جریان ماندگار درون مصالح زهکشی

علیرضا محمدی<sup>۱</sup>، هادی نوروزی<sup>۲</sup>، جلال بازرگان<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۳

چکیده

توزیع فشار در هر دو تحلیل یک بعدی و دو بعدی جریان ماندگار در محیط متخلخل درشت‌دانه اهمیت فراوانی دارد. در پژوهش حاضر، توزیع فشار به صورت آزمایشگاهی در طول و ارتفاع محیط سنگریز برای سه دانه بندی ریز، متوسط و درشت در سه طول ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متری بررسی شده است. برای اندازه گیری فشار از پیژومتر در کف و دیواره های فلوم آزمایشگاهی استفاده شده است. داده های آزمایشگاهی نشان می دهد که: در بخش های اولیه محیط سنگریزه ای توزیع فشار واقعی (ثبت شده در آزمایشگاه) با فشار هیدرواستاتیک همخوانی نسبتاً مناسبی داشته و با نزدیک شدن به انتهای محیط سنگریزه ای و افزایش انحنای سطح آب، اختلاف فشارهای مذکور افزایش می یابد. متوسط میانگین خطای نسبی (MRE) بین فشار واقعی و فشار هیدرواستاتیک برای دو نقطه انتهایی محیط سنگریز برای سه دانه بندی مذکور در محیط ۰/۵ متری به ترتیب برابر با ۳۶/۳۴، ۳۲/۳۶ و ۳۳/۶۴ درصد، برای طول ۱ متری به ترتیب برابر با ۳۳/۶۳، ۲۸/۱۷ و ۲۹/۳۴ درصد و برای طول ۱/۵ متری نیز به ترتیب برابر با ۳۹/۴۶، ۲۵/۶۶ و ۲۷/۶۲ درصد به دست آمده است. به عبارت دیگر، برای بررسی جریان ماندگار در محیط متخلخل درشت‌دانه، استفاده از فشار واقعی باعث افزایش دقت در روند محاسبات خواهد شد.

واژه های کلیدی: توزیع فشار واقعی، توزیع فشار هیدرواستاتیک، جریان ماندگار، مصالح زهکشی

مقدمه

مصالح درشت‌دانه در رشته مهندسی عمران برای فیلتراسیون، ساخت گابیون، پوشش کانال‌ها، حوضچه‌های آرامش، آبگیرها و سدهای پاره‌سنگی و کنترل سیل کاربرد فراوانی دارد. محیط متخلخل به دو دسته ریزدانه و درشت‌دانه تقسیم می‌شوند. رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان در محیط ریزدانه خطی بوده و رابطه داری (رابطه ۱) کاربرد دارد (McWhorter et al., 1977). در محیط متخلخل درشت‌دانه به دلیل وجود منافذ، سرعت جریان بالا بوده و جریان تمایل به آشفستگی دارد (Hansen et al., 1995) و در این حالت رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان غیرخطی بوده و از قانون غیرداری به دو صورت رابطه توانی

(رابطه ۲) و رابطه دو جمله‌ای (رابطه ۳) تبعیت می‌کند (Forchheimer, 1901; Leps, 1973; Stephenson, 1979).

$$i = \left(\frac{1}{k}\right)V \quad (1)$$

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

$$i = aV + bV^2 \quad (3)$$

در روابط فوق،  $V$ : سرعت جریان (m/s)،  $k$ : قابلیت هدایت هیدرولیکی (s/m):  $i$ : گرادیان هیدرولیکی (-)،  $m$  و  $n$  مقادیری وابسته به خصوصیات محیط متخلخل، سیال و جریان بوده در حالیکه  $a$  و  $b$  ضرایبی هستند که تابعی از خصوصیات محیط متخلخل و سیال هستند. رابطه دو جمله‌ای در محیط متخلخل درشت‌دانه از آنجایی که با استفاده از آنالیز ابعادی (Ward, 1964) و معادلات ناویه استوکس (Ahmed and Sunada, 1969) قابل اثبات است، نسبت به رابطه توانی نمای دقت بالا و کارایی بهتری دارد (Stephenson, 1979; Leps 1973). روابط متعددی از جمله روابط ارائه شده توسط Stephenson, 1979; Kovacs, 1980; Sidiropoulou et al., (2007; Sedghi and Rahimi, 2011)، جهت محاسبه ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b) و در شرایط جریان ماندگار ارائه شده است. شریعتی

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
۲ دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
۳ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
(Email: jbazargan@znu.ac.ir) \*نویسنده مسئول

## مواد و روش‌ها

به‌طور کلی، پژوهش حاضر از مراحل زیر تشکیل شده است:

- (۱) آماده‌سازی محیط آزمایشگاهی برای برداشت داده در محیط سنگریز برای سه دانه‌بندی مختلف
- (۲) برداشت توزیع فشار در طول و ارتفاع محیط سنگریز برای دبی‌های مختلف
- (۳) مقایسه توزیع فشار واقعی در ارتفاع محیط سنگریز با فشار هیدرو- داده‌های آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در دانشکده عمران دانشگاه زنجان درون فلوم آزمایشگاهی شیب پذیر (شیب آزمایش‌ها برابر با ۰/۰۱۹ است) با مقطع مربعی به عرض و ارتفاع ۰/۳ متر و طول ۵ متر انجام شده است (شکل ۱). اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از سرریز مثلثی انجام می‌گیرد. دیواره‌ها از جنس پلکسی گلاس است که امکان مشاهده جریان و نصب پیزومتر در ارتفاع‌های مختلف را فراهم می‌کند. ۱/۵ متر از طول فلوم برای محیط سنگریزه‌ای در نظر گرفته شده و در طول و ارتفاع آن پیزومتر قرار داده شده است. نحوه قرارگیری پیزومترهای در کف و دیواره در شکل (۲) نشان داده شده است.

از سه نوع مصالح (ریز، متوسط و درشت) با دانه‌بندی ارائه شده در جدول (۱) و شکل (۳) برای ایجاد محیط سنگریز استفاده شده است. سه طول مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متری با ارتفاع و عرض ۰/۳ متری داخل فلوم آزمایشگاهی محیط سنگریز ایجاد شده (شکل ۴) و دبی‌های ماندگار مختلفی مطابق جدول (۲) از آنها عبور داده شده است.

و همکاران (۱۳۹۶) گذردهی جریان در آبگیرهای کفی با محیط متخلخل درشت‌دانه و تاثیر عواملی مانند جریان ورودی بالادست، اندازه ذرات، طول و ارتفاع محیط متخلخل بر روی آن را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. گودرزی و همکاران (۱۳۹۹) از آنجاییکه انحای جریان در انتهای محیط سنگریز زیاد است، اعمال هد نظیر درگ در روابط تئوری جریان‌های متغیر تدریجی، باعث افزایش دقت روش مذکور در محاسبه پروفیل سطح آب شده است. (Norouzi et al., 2021) از آنجاییکه، ضریب درگ ( $C_d$ ) و به تبع آن نیروی درگ ( $F_d$ ) تابعی از ضریب اصطکاک ( $f$ ) است. با استفاده از روابط داریسی و یسباخ، روابط دوجمله‌ای در حالت جریان ماندگار، روابط تحلیلی ارائه شده توسط احمد و سونادا برای محاسبه ضرایب  $a$  و  $b$  و رابطه بین ضریب اصطکاک ( $f$ ) و عدد رینولدز ( $Re$ ) در محیط متخلخل، رابطه-ای جهت محاسبه ضریب اصطکاک بر اساس عدد رینولدز ارائه کردند. (Norouzi et al., 2022) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در شرایط مختلف و آنالیز ابعادی، رابطه‌ای جهت محاسبه عمق جریان خروجی از محیط سنگریزه‌ای ارائه کردند.

در پژوهش حاضر، برای اولین بار با قرار دادن پیزومتر در کف و دیواره‌های فلوم آزمایشگاهی، علاوه بر توزیع فشار در طول محیط سنگریز، توزیع فشار در ارتفاع محیط سنگریز نیز برای سه دانه‌بندی مختلف اندازه‌گیری شده و مقادیر ثبت شده با فشار هیدرواستاتیک مقایسه شده است.



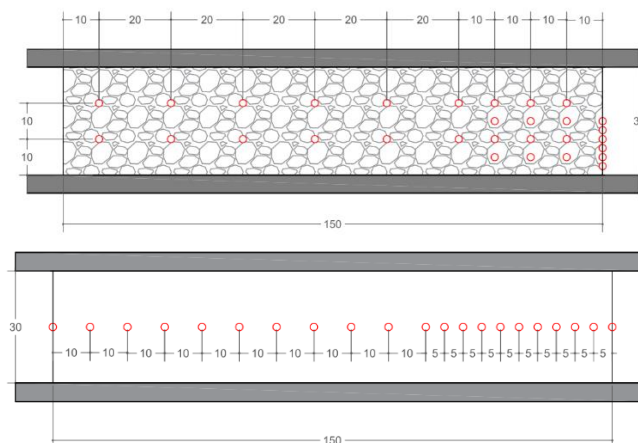
الف- نمای جانبی از فلوم آزمایشگاهی



ج- پیزومترهای دیواره کانال

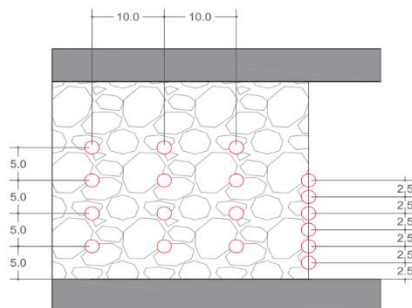
ب- پیزومترهای کف کانال

شکل ۱- نمای کلی دستگاه‌های آزمایشگاهی



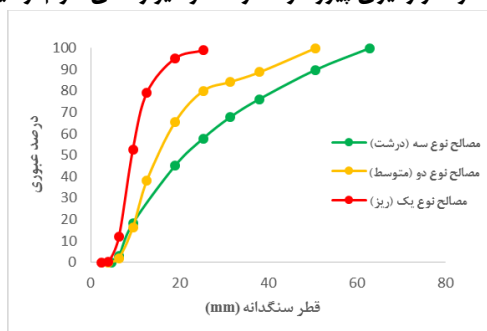
الف - کف فلوم

ب - دیواره‌های فلوم



ج - انتهای فلوم

شکل ۲- نحوه قرارگیری بیژومترها در کف و دیواره‌های فلوم آزمایشگاهی



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی برای مصالح با دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت (توزیع قطر ذرات تشکیل دهنده مصالح مورد استفاده)

جدول ۱- مشخصات مصالح آزمایشگاهی

Materials	$d_0$ (mm)	$d_{10}$ (mm)	$d_{30}$ (mm)	$d_{50}$ (mm)	$d_{60}$ (mm)	$d_{100}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	porosity
Small	۲/۳۶	۶/۰۶	۷/۷۷	۹/۲۶	۱۰/۱۹	۲۵/۴	۱/۶۸	-/۹۷	۰/۴۲
Medium	۴	۸/۴۳	۱۱/۴۴	۱۵/۲۳	۱۷/۴۶	۵۰/۸	۲/۰۷	-/۸۹	۰/۴۵۵
Large	۴/۷۵	۷/۶۶	۱۳/۵۱	۲۱/۴۸	۲۶/۸۸	۶۳	۳/۵۱	-/۸۸	۰/۴۸۵



الف- محیط سنگریز ۰/۵ متری



ب- محیط سنگریز ۱ متری



ج- محیط سنگریز ۱/۵ متری

شکل ۴- محیط سنگریز داخل فلوم آزمایشگاهی برای سه طول ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر

جدول ۲- مقادیر دبی جریان ماندگار در مصالح و طول‌های مختلف

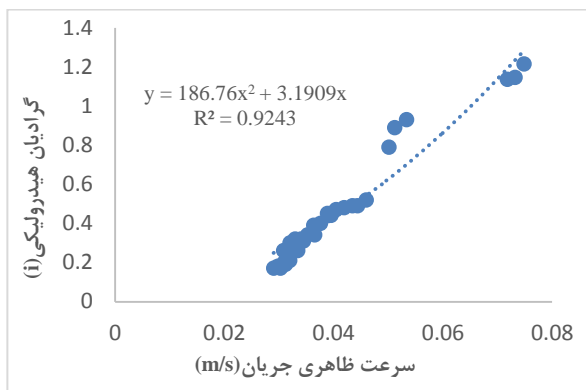
Length (m)	Discharge (L/s)		
	Small	Medium	Large
0.5	۲/۲۳	۲/۷۳	۳/۱۳
	۲/۴۵	۳/۰۴	۳/۶۱
	۲/۶۸	۳/۳۷	۴/۰۱
1	۱/۴۰	۱/۸۲	۲/۲۲
	۱/۵۷	۱/۹۸	۲/۴۹
	۱/۷۸	۲/۲۰	۲/۷۶
1.5	۱/۲۳	۱/۳۷	۱/۸۱
	۱/۳۸	۱/۵۳	۱/۹۸
	۱/۵۰	۱/۶۷	۲/۱۸

و b برازش شده برای رابطه دو جمله‌ای در شکل (۵) ارائه شده است. داده‌های فشار در تمام نقاط ارتفاعی بیان شده در فوق برداشت شده و توزیع فشار در ارتفاع محیط سنگریز برای چند نقطه مختلف در شکل (۶) آورده شده است.

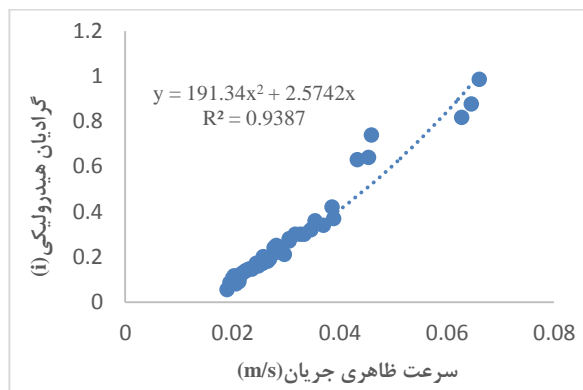
در جدول ۱، ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) برابر با  $\frac{D_{60}}{D_{10}}$  و ضریب

انحنای ( $C_c$ ) برابر با  $\frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$  است.

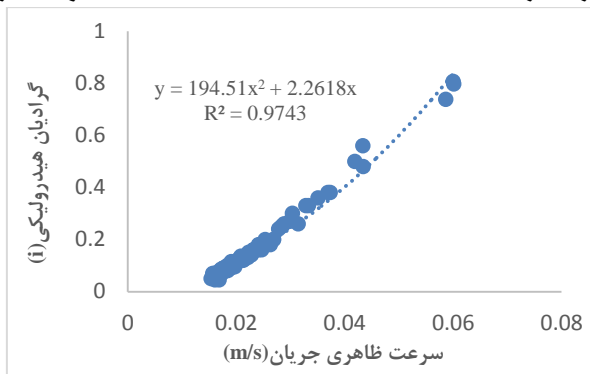
تغییرات گرادپان هیدرولیکی (i) براساس سرعت جریان (V) برا هر سه نوع مصالح در طول‌های مختلف و همچنین مقادیر ضرایب a



طول سنگریز ۰/۵ متر

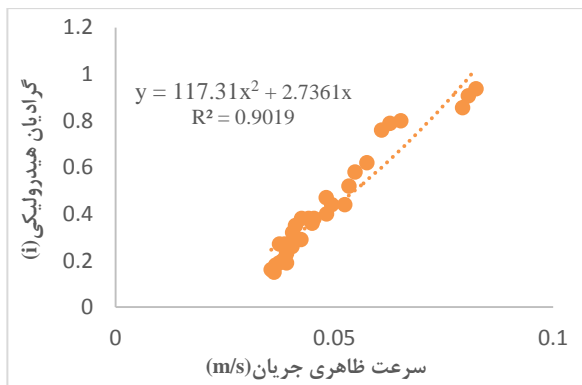


طول سنگریز ۱ متر

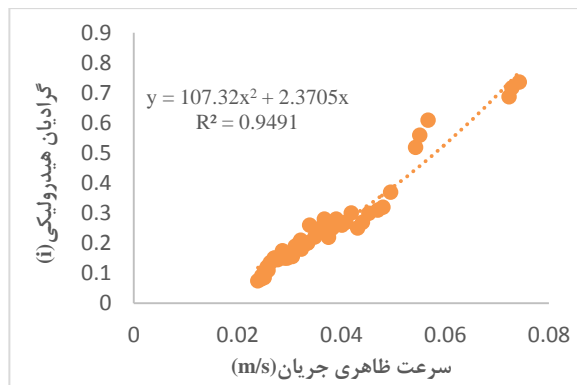


طول سنگریز ۱/۵ متر

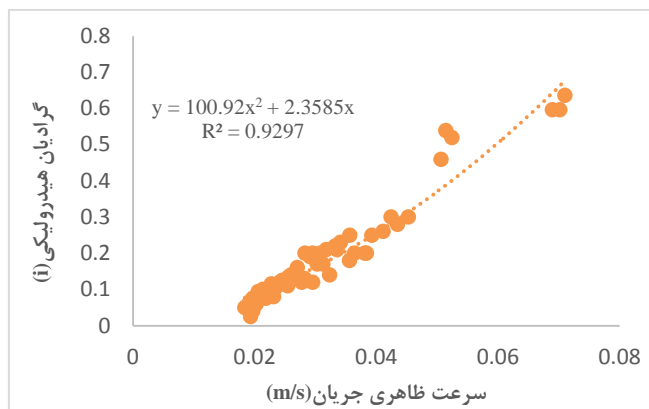
الف- ریزدانه



طول سنگریز ۰/۵ متر

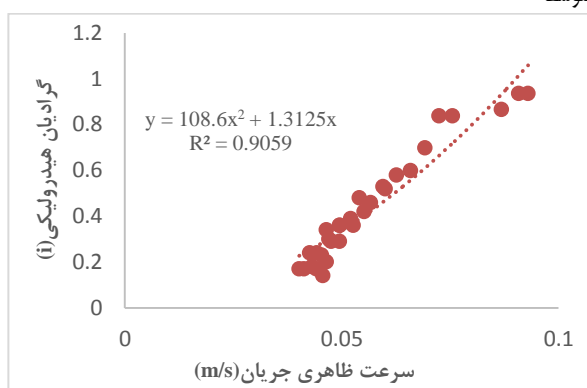


طول سنگریز ۱ متر

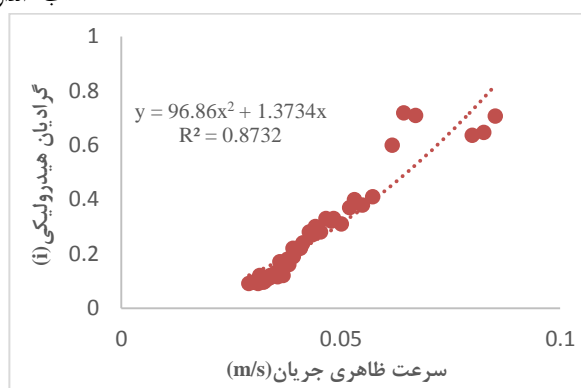


طول سنگریز ۱/۵ متر

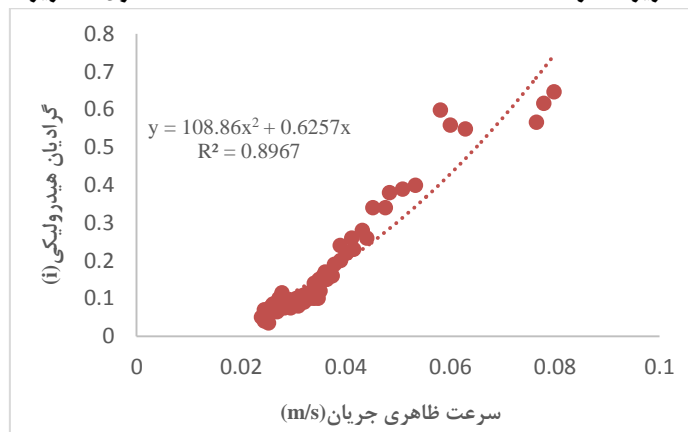
ب- اندازه متوسط



طول سنگریز ۰/۵ متر



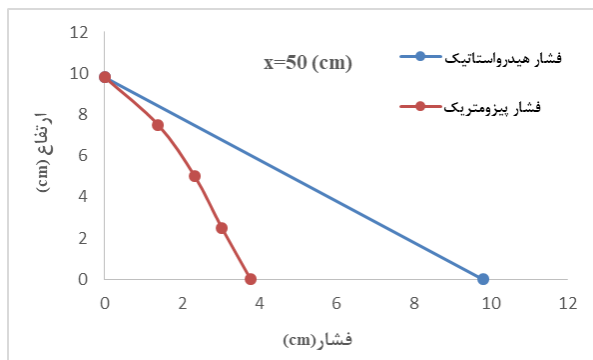
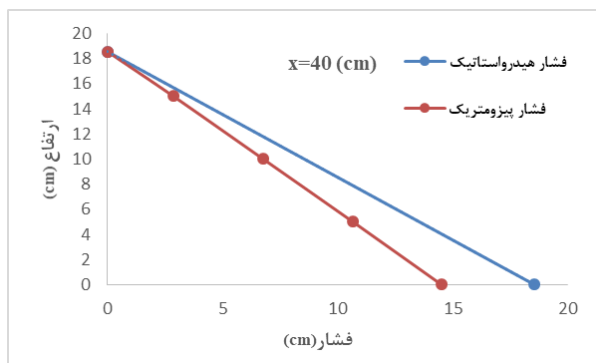
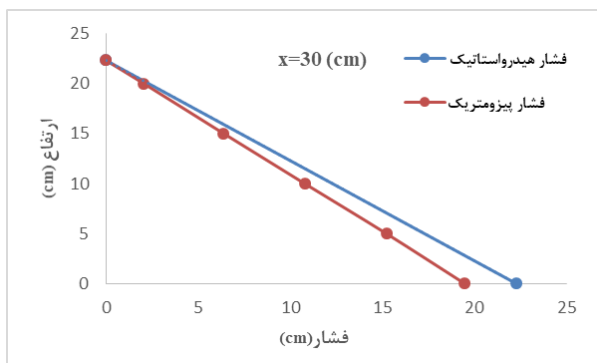
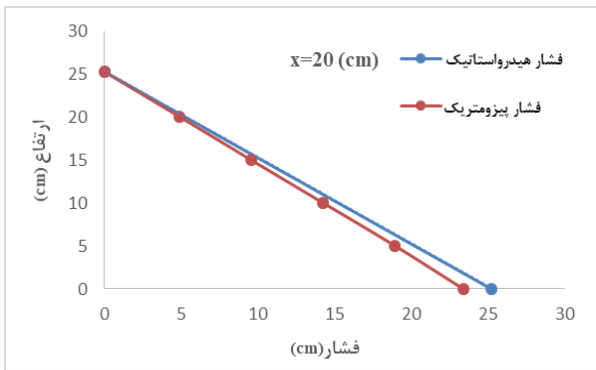
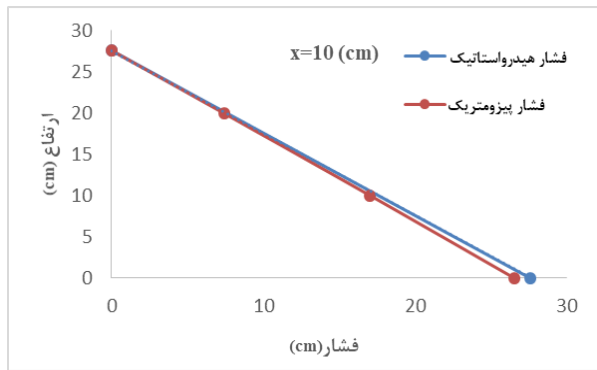
طول سنگریز ۱ متر



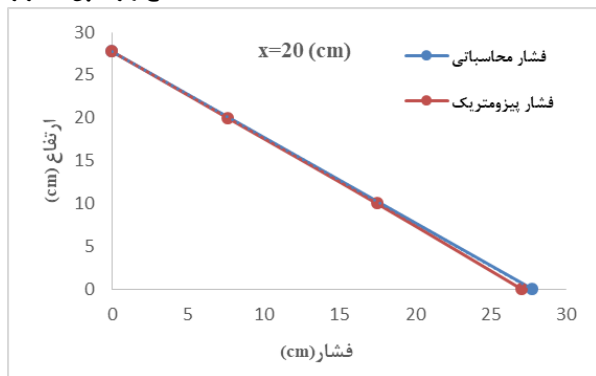
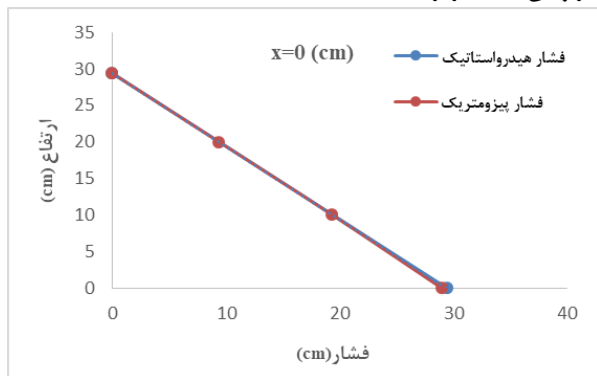
طول سنگریز ۱/۵ متر

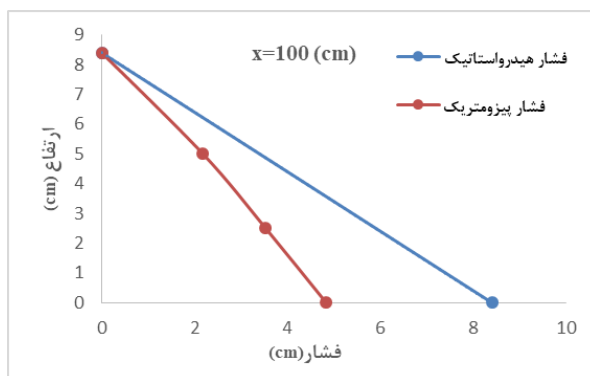
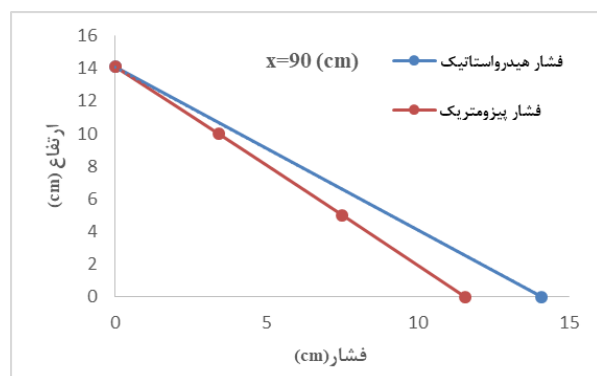
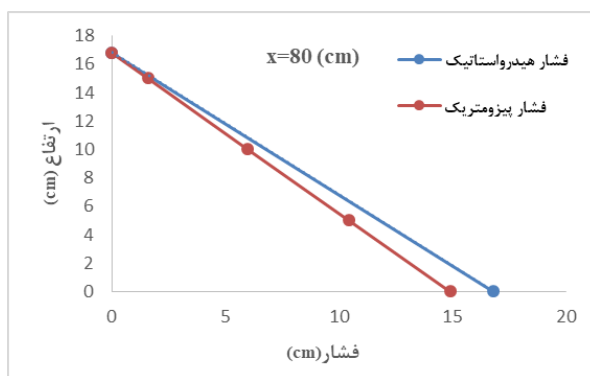
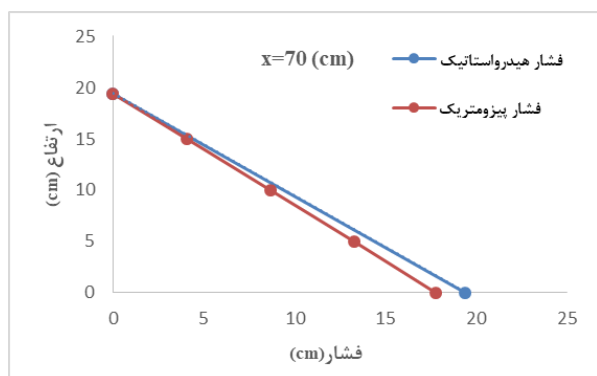
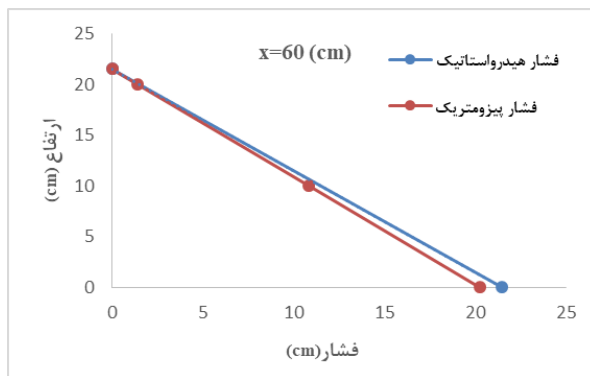
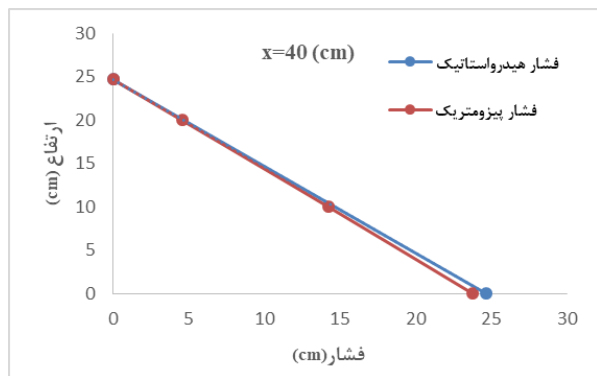
ج- درشت‌دانه

شکل ۵- تغییرات گرادیان هیدرولیکی بر حسب سرعت جریان ماندگار ثبت شده در آزمایشگاه

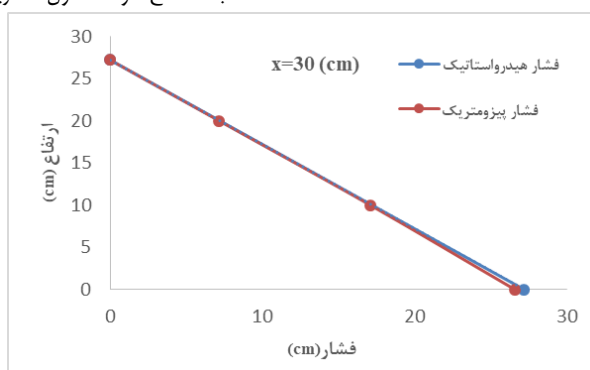
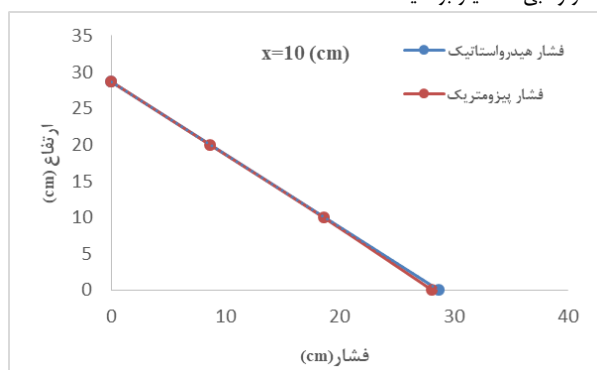


الف- مصالح ریز، طول سنگریز ۰/۵ متر و دبی ۲/۶۸ لیتر بر ثانیه

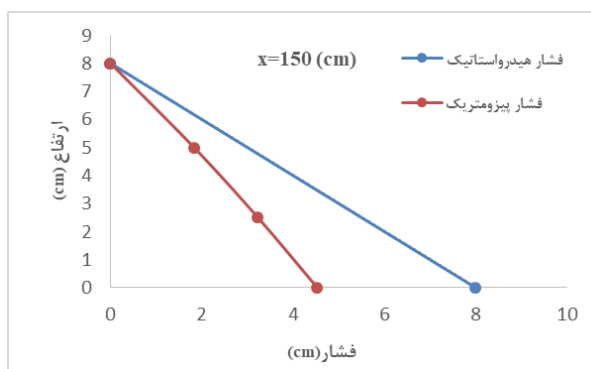
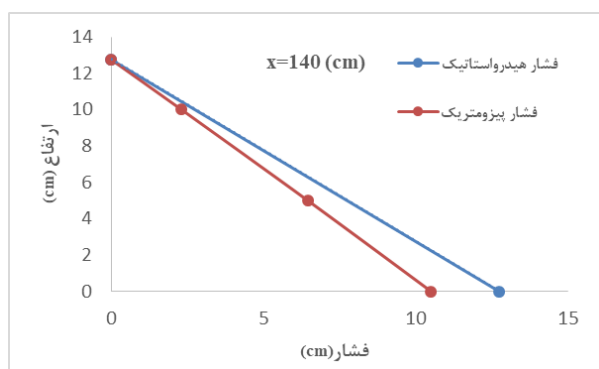
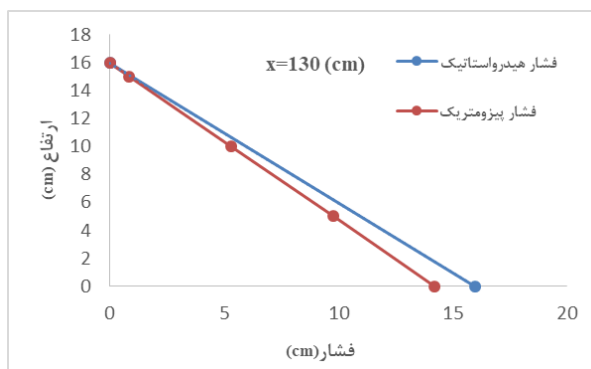
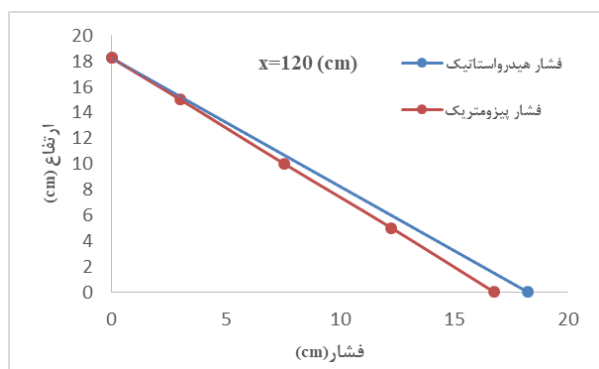
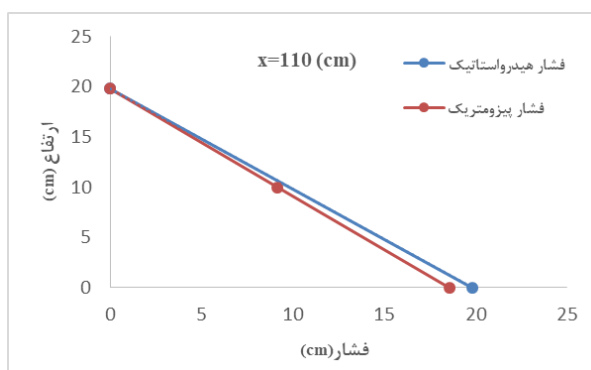
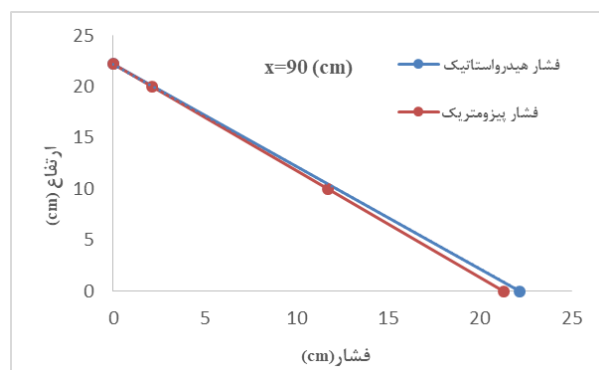
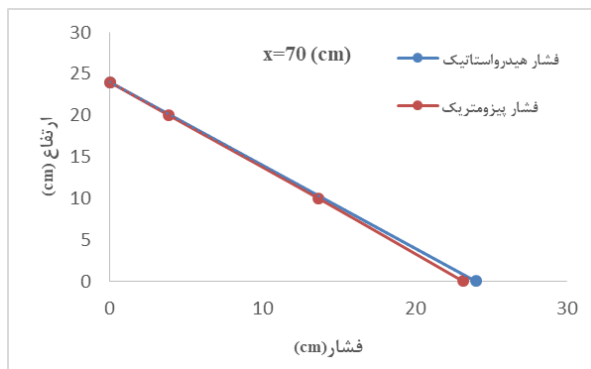
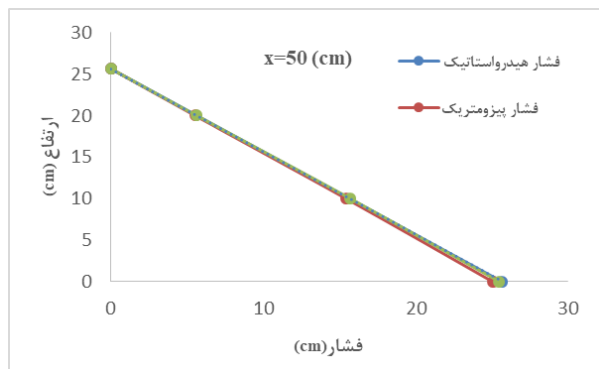




ب- مصالح متوسط، طول سنگریز ۱ متر و دبی ۲/۲ لیتر بر ثانیه







ج- مصالح درشت، طول سنگریز ۱/۵ متر و دبی ۲/۱۸ لیتر بر ثانیه  
 شکل ۶- توزیع فشار در ارتفاع سنگریز در نقاط طولی مختلف

است.

شایان ذکر است، در پژوهش‌های قبلی صرفاً با قرار دادن پیزومتر در کف کانال، توزیع فشار در طول محیط سنگریز اندازه‌گیری شده است. در حالیکه در پژوهش حاضر علاوه بر توزیع فشار در طول محیط سنگریز، با قرار دادن پیزومتر در ارتفاع‌های مختلف دیواره فلوم آزمایشگاهی، توزیع فشار در ارتفاع محیط سنگریزه‌ای نیز اندازه‌گیری شده است. مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) بین فشار واقعی (ثبت شده در آزمایشگاه به وسیله پیزومترهای قرار داده شده در ارتفاع محیط سنگریز) و فشار هیدرواستاتیک برای سه دانه‌بندی مذکور و برای طول‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متری به‌ترتیب در جداول (۳) الی (۵) آورده شده است. در جدول (۳)، x بیانگر فاصله نقطه مورد نظر از ابتدای محیط سنگریز و l کل طول محیط سنگریز (سه طول ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متری بررسی شده است) است.

مطابق شکل (۵)، رابطه دو جمله‌ای (رابطه ۲) بین تغییرات گرادیان هیدرولیکی براساس سرعت جریان برقرار بوده و بیانگر آنست که جریان ایجاد شده در آزمایشگاه از نوع غیرداری است. همچنین مطابق شکل (۶) فشار واقعی همواره کوچکتر از فشار هیدرواستاتیک است.

## نتایج و بحث

توزیع فشار در تحلیل یک بعدی (تئوری جریان‌های متغیر تدریجی) و دو بعدی (حل معادلات پارکین) جریان ماندگار عبوری از محیط سنگریز اهمیت فراوانی دارد. در پژوهش‌های قبلی، توزیع فشار در ارتفاع محیط سنگریز به‌صورت هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر برای اولین بار علاوه بر تغییرات فشار در طول محیط سنگریز، تغییرات فشار در ارتفاع سنگریز نیز با قرار دادن پیزومترهایی در کف و دیواره‌های فلوم آزمایشگاهی بررسی شده

جدول ۳- مقایسه فشار هیدرواستاتیک و فشار واقعی برای ذرات ریز، متوسط و درشت و طول ۰/۵ متر

Materials	Q (L/s)	x/l	MRE %	Materials	Q (L/s)	x/l	MRE %
S	۲/۲۳	۰/۲	۲/۷۷	S	۲/۴۵	۰/۲	۳/۰۲
		۰/۴	۵/۷۴			۰/۴	۶/۱۰
		۰/۶	۱۰/۲۸			۰/۶	۱۱/۱۳
		۰/۸	۱۹/۴۰			۰/۸	۲۰/۲۱
		۱	۵۵/۰۸			۱	۴۹/۷۰
S	۲/۶۸	۰/۲	۳/۱۷	M	۲/۷۳	۰/۲	۲/۹۲
		۰/۴	۶/۵۷			۰/۴	۵/۹۶
		۰/۶	۱۲/۱۰			۰/۶	۱۰/۱۹
		۰/۸	۲۰/۸۶			۰/۸	۱۹/۲۴
		۱	۵۲/۸۴			۱	۴۴/۵۵
M	۳/۰۴	۰/۲	۳/۴۲	M	۳/۳۷	۰/۲	۳/۴۶
		۰/۴	۶/۱۴			۰/۴	۶/۵۳
		۰/۶	۱۱/۰۲			۰/۶	۱۱/۳۷
		۰/۸	۱۹/۴۸			۰/۸	۲۱/۲۰
		۱	۴۵/۳۴			۱	۴۴/۳۷
L	۳/۱۳	۰/۲	۲/۶۹	L	۳/۶۳	۰/۲	۳/۲۲
		۰/۴	۵/۶۲			۰/۴	۶/۰۵
		۰/۶	۱۰/۱۳			۰/۶	۱۰/۶۹
		۰/۸	۱۸/۳۱			۰/۸	۱۹/۶۱
		۱	۴۶/۱۲			۱	۴۷/۰۸
L	۴/۰۱	۰/۲	۳/۲۱	L	۴/۰۱	۰/۲	۳/۲۱
		۰/۴	۶/۷۱			۰/۴	۶/۷۱
		۰/۶	۱۲/۱۴			۰/۶	۱۲/۱۴
		۰/۸	۲۱/۶۴			۰/۸	۲۱/۶۴
		۱	۴۹/۱۱			۱	۴۹/۱۱

جدول ۴- مقایسه فشار هیدرواستاتیک و فشار واقعی برای ذرات ریز، متوسط و درشت و طول ۱ متر

Materials	Q (L/s)	x/l	MRE %	Materials	Q (L/s)	x/l	MRE %
S	۱/۴۰	۰/۰۱	۰/۹۴	S	۱/۵۷	۰/۰۱	۰/۷۴
		۰/۲	۱/۹۵			۰/۲	۱/۷۸
		۰/۴	۲/۸۷			۰/۴	۳/۱۲
		۰/۶	۵/۰۴			۰/۶	۵/۲۷
		۰/۷	۷/۲۷			۰/۷	۷/۶۵
		۰/۸	۱۰/۵۰			۰/۸	۱۱/۰۰
		۰/۹	۱۶/۸۵			۰/۹	۱۷/۷۳
		۱	۴۸/۷۵			۱	۴۹/۷۳
S	۱/۷۸	۰/۰۱	۰/۶۷	M	۱/۸۲	۰/۰۱	۰/۸۳
		۰/۲	۱/۷۴			۰/۲	۱/۶۰
		۰/۴	۳/۱۳			۰/۴	۲/۷۸
		۰/۶	۵/۵۵			۰/۶	۵/۳۱
		۰/۷	۸/۰۷			۰/۷	۷/۷۸
		۰/۸	۱۱/۱۶			۰/۸	۱۰/۸۶
		۰/۹	۱۷/۸۴			۰/۹	۱۶/۷۴
		۱	۵۰/۸۷			۱	۳۹/۴۸
M	۱/۹۸	۰/۰۱	۰/۷۶	M	۲/۲۰	۰/۰۱	۰/۶۹
		۰/۲	۱/۵۹			۰/۲	۱/۹۳
		۰/۴	۳/۰۰			۰/۴	۳/۱۶
		۰/۶	۵/۴۶			۰/۶	۵/۹۹
		۰/۷	۷/۹۱			۰/۷	۷/۸۶
		۰/۸	۱۱/۰۳			۰/۸	۱۱/۶۰
		۰/۹	۱۶/۸۶			۰/۹	۱۷/۴۳
		۱	۳۸/۹۷			۱	۳۹/۵۲
L	۲/۲۲	۰/۰۱	۰/۸۳	L	۲/۴۹	۰/۰۱	۰/۷۵
		۰/۲	۲/۰۸			۰/۲	۱/۸۸
		۰/۴	۳/۲۰			۰/۴	۳/۳۳
		۰/۶	۵/۳۰			۰/۶	۵/۹۰
		۰/۷	۷/۰۹			۰/۷	۷/۹۲
		۰/۸	۱۰/۱۲			۰/۸	۱۱/۳۸
		۰/۹	۱۶/۴۰			۰/۹	۱۶/۸۵
		۱	۳۹/۲۸			۱	۴۱/۲۳
L	۲/۷۶	۰/۰۱	۰/۶۸	L	۲/۷۶	۰/۰۱	۰/۶۸
		۰/۲	۱/۹۵			۰/۲	۱/۹۵
		۰/۴	۳/۵۵			۰/۴	۳/۵۵
		۰/۶	۶/۲۲			۰/۶	۶/۲۲
		۰/۷	۸/۴۱			۰/۷	۸/۴۱
		۰/۸	۱۲/۰۸			۰/۸	۱۲/۰۸
		۰/۹	۱۸/۶۴			۰/۹	۱۸/۶۴
		۱	۴۳/۶۳			۱	۴۳/۶۳

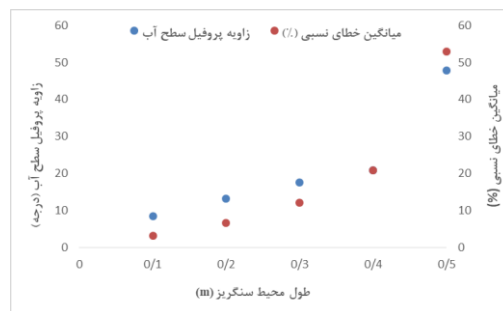
جدول ۵- مقایسه فشار هیدرواستاتیک و فشار واقعی برای ذرات ریز، متوسط و درشت و طول ۱/۵ متر

Materials	Q (L/s)	x/l	MRE %	Materials	Q (L/s)	x/l	MRE %
S	۱/۲۳	۰/۰۶۷	۱/۱۶	S	۱/۳۸	۰/۰۶۷	۰/۷۴
		۰/۲	۱/۷۲			۰/۲	۱/۲۷
		۰/۳۳۳	۲/۱۰			۰/۳۳۳	۲/۳۴
		۰/۴۶۷	۳/۰۹			۰/۴۶۷	۲/۷۲
		۰/۶	۳/۶۹			۰/۶	۳/۶۳
		۰/۷۳۳	۵/۷۰			۰/۷۳۳	۵/۹۸
		۰/۸	۷/۶۱			۰/۸	۸/۰۰
		۰/۸۶۷	۱۰/۱۴			۰/۸۶۷	۱۰/۶۱
		۰/۹۳۳	۱۵/۲۹			۰/۹۳۳	۱۶/۳۸
۱	۴۶/۹۱	۱	۴۵/۱۰				
S	۱/۵۰	۰/۰۶۷	۱/۳۰	M	۱/۳۷	۰/۰۶۷	۰/۸۷
		۰/۲	۱/۸۲			۰/۲	۱/۷۴
		۰/۳۳۳	۲/۴۲			۰/۳۳۳	۱/۷۲
		۰/۴۶۷	۳/۱۱			۰/۴۶۷	۲/۷۰
		۰/۶	۴/۱۰			۰/۶	۳/۶۸
		۰/۷۳۳	۶/۲۰			۰/۷۳۳	۵/۳۵
		۰/۸	۷/۷۲			۰/۸	۶/۹۷
		۰/۸۶۷	۱۱/۱۵			۰/۸۶۷	۹/۱۲
		۰/۹۳۳	۱۷/۰۹			۰/۹۳۳	۱۳/۷۸
۱	۴۳/۹۸	۱	۳۸/۲۴				
M	۱/۵۳	۰/۰۶۷	۱/۱۷	M	۱/۶۷	۰/۰۶۷	۱/۰۵
		۰/۲	۱/۴۹			۰/۲	۱/۲۴
		۰/۳۳۳	۲/۰۶			۰/۳۳۳	۱/۸۲
		۰/۴۶۷	۲/۵۰			۰/۴۶۷	۲/۶۶
		۰/۶	۳/۸۰			۰/۶	۴/۰۷
		۰/۷۳۳	۵/۹۸			۰/۷۳۳	۶/۱۶
		۰/۸	۷/۴۲			۰/۸	۷/۹۶
		۰/۸۶۷	۹/۸۴			۰/۸۶۷	۱۰/۴۰
		۰/۹۳۳	۱۳/۹۹			۰/۹۳۳	۱۵/۰۶
۱	۳۶/۳۸	۱	۳۶/۵۲				
L	۱/۸۱	۰/۰۶۷	۱/۲۸	L	۱/۹۸	۰/۰۶۷	۱/۲۳
		۰/۲	۱/۶۷			۰/۲	۱/۵۴
		۰/۳۳۳	۱/۵۴			۰/۳۳۳	۲/۱۱
		۰/۴۶۷	۲/۶۵			۰/۴۶۷	۲/۹۰
		۰/۶	۳/۸۵			۰/۶	۳/۹۸
		۰/۷۳۳	۵/۶۴			۰/۷۳۳	۵/۳۸
		۰/۸	۶/۶۳			۰/۸	۷/۴۲
		۰/۸۶۷	۹/۲۸			۰/۸۶۷	۹/۸۶
		۰/۹۳۳	۱۵/۱۳			۰/۹۳۳	۱۵/۱۹
۱	۳۸/۲۵	۱	۳۹/۲۳				
		۰/۰۶۷	۱/۰۲				
		۰/۲	۱/۱۹				

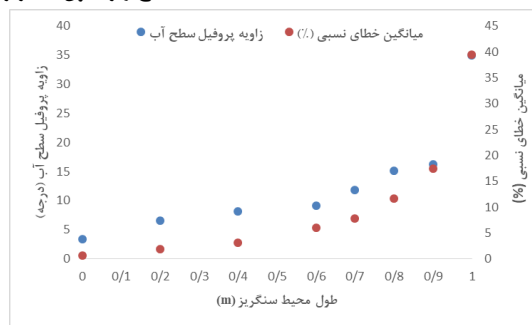
		۰/۳۳۳	۱/۹۳
		۰/۴۶۷	۲/۹۷
L	۲/۱۸	۰/۶	۳/۹۸
		۰/۷۳۳	۶/۴۶
		۰/۸	۷/۶۸
		۰/۸۶۷	۱۰/۸۹
		۰/۹۳۳	۱۶/۷۲
		۱	۴۱/۲۱

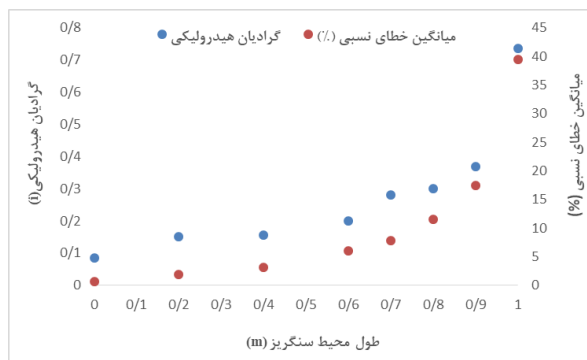
با توجه به شکل (۷)، با نزدیک شدن به انتهای محیط سنگریزه-ای، شیب پروفیل سطح آب، گرادیان هیدرولیکی (i) و عدد رینولدز (Re) افزایش یافته و به تبع آن اختلاف بین فشار واقعی و فشار هیدرواستاتیک نیز افزایش یافته است. به عبارت دیگر، فشار درون محیط سنگریزه‌ای تابعی از پارامترهای مذکور می‌باشد.

مطابق جداول فوق، اختلاف بین فشار واقعی و فشار هیدرواستاتیک در ابتدای محیط سنگریز ناچیز بوده و با نزدیک شدن به انتهای آن، افزایش چشم‌گیری با یکدیگر دارند. به عبارت دیگر، انحای جریان در انتهای محیط سنگریز افزایش یافته و به تبع آن اختلاف بین فشار واقعی و فشار هیدرواستاتیک نیز افزایش یافته است.

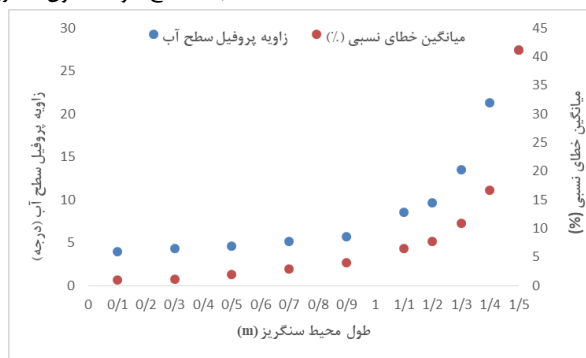


الف- مصالح ریز، طول سنگریز ۰/۵ متر و دبی ۲/۶۸ لیتر بر ثانیه





ب- مصالح متوسط، طول سنگریز ۱ متر و دبی ۲/۲ لیتر بر ثانیه



ج- مصالح درشت، طول سنگریز ۱/۵ متر و دبی ۲/۱۸ لیتر بر ثانیه

شکل ۷- تغییرات زاویه پروفیل سطح آب، گرادیان هیدرولیکی، عدد رینولدز و خطا در طول محیط سنگریزه‌ای

## نتیجه گیری

اندازه‌گیری شده است. با توجه به انحنای جریان، فشار واقعی و فشار هیدرواستاتیک در انتهای محیط سنگریز اختلاف معناداری با یکدیگر دارد. به عبارتی، فشار درون محیط سنگریزه‌ای تابعی از شیب پروفیل سطح آب، گرادیان هیدرولیکی (i) و عدد رینولدز (Re) است. نتایج پژوهش حاضر بیانگر آنست که؛ متوسط میانگین خطای نسبی (MRE) بین فشار واقعی و فشار هیدرواستاتیک دو نقطه انتهایی برای دانه‌بندی ریز، متوسط و بزرگ برای طول ۰/۵ متری به- ترتیب برابر با ۳۶/۳۴، ۳۲/۳۶ و ۳۳/۶۴ درصد، برای طول ۱ متری به- ترتیب برابر با ۳۳/۶۳، ۲۸/۱۷ و ۲۹/۳۴ درصد و برای طول ۱/۵ متری به- ترتیب برابر با ۳۹/۴۶، ۲۵/۶۶ و ۲۷/۶۲ درصد می‌باشد. به- عبارت دیگر، استفاده از توزیع فشار واقعی در تحلیل جریان ماندگار در

توزیع فشار واقعی در محیط متخلخل درشت‌دانه در تحلیل یک بعدی جریان ماندگار (تئوری جریان‌های متغیر تدریجی) جهت محاسبه انرژی واقعی جریان و در تحلیل دو بعدی جریان ماندگار (حل معادله پارکین) جهت برآورد دقیق شرایط مرزی بالادست و پایین- دست اهمیت فراوانی دارد. در پژوهش‌های قبلی، توزیع فشار در محیط متخلخل درشت‌دانه به صورت هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده است. در حالیکه در پژوهش حاضر با استفاده از پیژومترهای قرار داده شده در دیواره فلوم آزمایشگاهی، توزیع فشار واقعی در ارتفاع محیط سنگریز برای سه دانه‌بندی مختلف در حالت جریان ماندگار

- Leps, T. M. 1973. Flow through rockfill, Embankment-dam engineering casagrande volume edited by Hirschfeld, RC and Poulos, SJ.
- McWhorter, D. B. Sunada, D. K. and Sunada, D. K. 1977. Ground-water hydrology and hydraulics. Water Resources Publication. LLC. U.S.Library.
- Norouzi, H., Bazargan, J., Azhang, F. and Nasiri, R. 2021. Experimental study of drag coefficient in non-darcy steady and unsteady flow conditions in rockfill. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 1-20.
- Norouzi, H., Hasani, M. H., Bazargan, J., & Shoaee, S. M. 2022. Estimating output flow depth from Rockfill Porous media. Water Supply. 22(2): 1796-1809.
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H. 2011. Adoption of Manning's equation to 1D non-Darcy flow problems. Journal of Hydraulic Research. 49(6): 814-817.
- Sidiropoulou, M. G. Moutsopoulos, K. N. Tsihrintzis, V. A. 2007. Determination of Forchheimer equation coefficients and b. Hydrological Processes: An International Journal. 21(4): 534-554.
- Stephenson, D. J. 1979. Rockfill in hydraulic engineering. Elsevier scientific publishing company. Distributors for the United States and Canada.
- Ward, J. C. 1964. Turbulent flow in porous media. Journal of the hydraulics division. 90(5): 1-12.
- محیط سنگریزه‌ای نسبت به توزیع فشار هیدرواستاتیک کارایی بهتری خواهد داشت.
- ### منابع
- شریعتی، ح.، خدشناس، س.، اسماعیلی، ک.، ۱۳۹۶. بررسی عوامل موثر بر آبگذری جریان از آبگیر کفی با محیط متخلخل در شرایط آب زلال. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۶۹ (۱۸): ۱۷-۳۰.
- گودرزی، م.، بازرگان، ج.، شعاعی، م.، ۱۳۹۹. تحلیل نیمرخ طولی سطح آب درون مصالح سنگریزه‌ای با استفاده از تئوری جریان متغیر تدریجی با در نظر گرفتن نیروی درگ. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۲): ۴۰۳-۴۱۵.
- Ahmed, N. and Sunada, D. K. 1969. Nonlinear flow in porous media. Journal of the Hydraulics Division. 95(6): 1847-1858.
- Forchheimer, P. 1901. Wasserbewegung Durch Boden, Z.Ver, Deutsh. Ing. 45: 1782-1788.
- 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. Canadian Geotechnical Journal. 32(2): 223-232.
- Kovács, G., 1980. Developments in water science: seepage hydraulics. Elsevier Scientific Publishing Company.

## Experimental Study of Pressure Distribution in Steady Flow inside Drainage Materials

A.R. Mohamadi<sup>1</sup>, H. Norouzi<sup>2</sup>, J. Bazargan<sup>3\*</sup>  
Received: Jan.31, 2023 Accepted: Apr.23, 2023

### Abstract

Pressure distribution is of utmost importance in both 1D and 2D analysis of steady flow in coarse-grained porous media. In the present study, the pressure distribution in length and height of the gravel media has been investigated in a experimental for three gradations of small, medium, and large in three lengths of 0.5, 1, and 1.5 meters. A piezometer is used to measure the pressure on the floor and walls of the laboratory flume. Experimental data show that; in the initial parts of the gravel media, the real pressure distribution (recorded in the laboratory) has relatively a good agreement with the hydrostatic pressure, and as the end of the gravel media is approached and the increase of water level curve, the pressure difference increases. The average Mean Relative Error (MRE) between the real pressure and the hydrostatic pressure for the two endpoints of the gravel media for the three gradations mentioned in the 0.5 meter media are respectively equal to 36.34%, 32.36%, and 33.64%, for 1 meter length is equal to 33.63%, 28.17%, and 29.34% respectively and for 1.5 meter length, it is equal to 39.46%, 25.66%, and 27.62% respectively. In other words, to check the steady flow in the coarse-grained porous media, the use of real pressure will increase the accuracy of the calculation process.

**Keywords:** Drainage Materials, Hydrostatic Pressure Distribution, Real Pressure Distribution, Steady Flow

---

1- Post Graduate Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran  
2- PhD Candidate of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran  
3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran  
(\*-Corresponding author Email: jbazargan@znu.ac.ir)