

# بررسی آزمایشگاهی جریان غیرخطی غیرماندگار در محیط متخلخل سنگریزه‌ای

جلال صادقیان<sup>۴</sup>

حبیب‌اله بیات<sup>۳</sup>

محمد رضا صبور<sup>۲</sup>

مرتضی شکری<sup>۱</sup>

(دریافت ۸۹/۷/۳۰ آخرین اصلاحات دریافتی ۹۰/۷/۲۰ پذیرش ۹۰/۷/۲۴)

## چکیده

در این تحقیق بررسی آزمایشگاهی جریان آب درون محیط متخلخل درشت دانه در یک کانال مرتفع سطح آزاد، به منظور درک بهتر مکانیسم افت انرژی در طول فلوم و تغییرات افت با سرعت جریان آب انجام شد. جریان درون محیط متخلخل درشت دانه در شرایط ماندگار و غیرماندگار در شرایط آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تنویر رفتار جریان‌های غیرخطی در سازه‌های سنگریزه‌ای در شرایط غیرماندگار، آزمایش‌هایی گسترده در یک فلوم روباز آزمایشگاهی انجام شد. مصالح سنگریزی شکسته با دانه‌بندی از پیش تعیین شده‌ای در فلوم مذکور با پهنای ۶۰ سانتی‌متر مترمترام شد و تغییرات سطح ایستابی در مصالح دانه‌ای، تحت تأثیر تغییرات تراز پایاب که معرف شرایط غیرماندگار بود، توسط پیژومترهای نصب شده در طول فلوم به روشهای نوری ثبت گردید. سپس مشاهدات آزمایشگاهی با نرم‌افزار SPSS تحلیل گردید و مشاهده شد که: الف) از معادله درجه دوم و دو جمله‌ای مشهور به فورشه‌ایمر با موفقیت می‌توان برای تحلیل هر دو نوع جریان‌های غیرخطی - ماندگار و غیرخطی - غیرماندگار در مصالح درشت دانه استفاده نمود، مشروط بر آنکه سطح ایستابی (جریان سطح آزاد) تشکیل گردد، ب) اگرچه می‌توان یک جمله سوم برای تبیین اثرات شرایط غیرماندگاری به معادله مذکور اضافه نمود، اما تأثیر آن به علت بسیار کوچک بودن ضریب جمله سوم کم اهمیت است، ج) با ترسیم منحنی تغییرات گرادیان هیدرولیکی (i) در مقابل عدد رینولدز برای کلیه مشاهدات آزمایشگاهی، وجود شرایط غیرخطی تأیید گردید، د) از مقایسه یافته‌ها با آنچه که توسط دیگر پژوهشگران گزارش شده است استنباط می‌شود که مجموعه آزمایشگاهی که به طور اختصاصی برای این پژوهش طراحی و ساخته شد، کاملاً شرایط حاکم بر پروتوتیپ را شبیه‌سازی می‌نماید.

**واژه‌های کلیدی:** مصالح درشت دانه، معادله فورشه‌ایمر، جریان غیرخطی، جریان غیردائمی، مصالح شکسته

## Experimental Investigation on Nonlinear Analysis of Unsteady Flow Through Coarse Porous Media

Morteza Shokri<sup>1</sup>

Mohammad Reza Saboor<sup>2</sup>

Habibolah Bayat<sup>3</sup>

Jalal Sadeghian<sup>4</sup>

(Received Oct. 22, 2010 Revised Oct. 12, 2011 Accepted Oct. 16, 2011)

### Abstract

An experimental investigation of water flowing through coarse porous media in an open channel with free surface was conducted to better understand the mechanism of energy loss and changes with flow velocity. In this research, experimentally, investigate water flowing through coarse porous media in nonlinear unsteady state. To cast light on the analytical characteristics of unsteady-turbulent flow within coastal rockfill structures, an extensive research program has been carried out using the open channel flow principles. Crushed coarse aggregates with pre-determined gradations were carefully packed in a 600 mm wide flume through which, variation of phreatic surface as a result of the tail-water variation – to resume unsteady flow conditions – were optically recorded by means of a set of piezometers installed along the flume's side-wall. Discharge rates were measured by a calibrated v-notch and the tail-water surface variations were precisely timed by means of delicate electrical equipments specially designed and manufactured for these experiments. Observations on the flow

1. Ph.D. Student of Civil Eng., Khajeh Nasireddin Toosi University of Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 811) 8278783  
mshokri@dena.kntu.ac.ir

2. Assist. Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Khajeh Nasireddin Toosi University of Tech., Tehran

3. Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Amir Kabir University of Tech., Tehran

4. Faculty Member of Civil Eng., Bu-Ali Sina University, Hamedan

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (نویسنده مسئول) ۸۲۷۸۷۸۳ (۰۸۱۱) mshokri@dena.kntu.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۴- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

media. b) Although a third term defining effects of unsteadiness may be included in the above mentioned equation, it is of little engineering importance. c) The nature of hydraulic gradient (i) variations versus Reynolds number (Re) – which were plotted for all sets of observations – confirms existence of turbulent conditions in all experiments. d) Our unique experimentation set-up adequately resembles the actual prototype conditions.

**Keywords:** Coarse Granular Porous Media, Forchheimer Equation, Nonlinear Flow, Unsteady Flow, Crushed Aggregates.

## ۱- مقدمه

این نکته بسیار کلیدی، زمینه را برای تدوین یک معادله دیفرانسیل جزئی که جایگزین معادله لاپلاس است، فراهم می‌آورد. در این راستا می‌توان از محققانی همچون دوژن<sup>۳</sup> در سال ۱۹۶۶، ویلکینز<sup>۴</sup> در سال ۱۹۵۵، پارکین<sup>۵</sup> در سال ۱۹۶۶، جانسون<sup>۶</sup> در سال ۱۹۷۱، لپس<sup>۷</sup> در سال ۱۹۷۲، سونی<sup>۸</sup> در سال ۱۹۷۸، ولکر<sup>۹</sup> در سال ۱۹۶۹، فورار و همکاران<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۰۴، کنستادینوس و همکاران<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۰۹ و چنگ و همکاران<sup>۱۲</sup> در سال ۲۰۰۸ نام برد که هر یک با برداشتی سلیقه‌ای، به ارائه مدلی برای تحلیلهای غیرخطی ولی ماندگار، در محیط‌های متخلخل دانه درشت پرداخته‌اند [۱۱-۱۵].

همان‌طور که بیان شد مکانیسم فیزیکی حاکم بر پدیده جریان ایستایی در گذشته مورد بررسی محققان مختلفی قرار گرفته است، اما مطالعات کمتری اثرات جریان شتاب‌دار را مورد آزمایش قرار داده‌اند. در این راستا اندک مطالعاتی نیز در رابطه با وجود عبارت سوم در معادله ساختاری فورشهیمیر (ناشی از شتابهای موضعی و یا اینرسی موضعی) در کارهای محققانی همچون پولوبارینو<sup>۱۳</sup> در سال ۱۹۵۲، تک<sup>۱۴</sup> در سال ۱۹۵۷، گرسما<sup>۱۵</sup> در سال ۱۹۴۷، هال و همکاران<sup>۱۶</sup> در ۱۹۹۴، برچات و همکاران<sup>۱۷</sup> در سال ۱۹۵۵ و حسینی‌زاده به چشم می‌خورد [۱۶-۱۸]. جریان غیر ایستا درون محیط متخلخل را به‌طور نمونه می‌توان در مسائلی همچون جریان امواج درون محیط سنگریزه‌ای، جریان در بستر رودخانه‌های کم عمق، جریان درون سازه‌های قله‌سنگی، جریان درون موج شکن‌ها و گابیون‌ها و غیره مشاهده نمود.

کاوشهای همه جانبه نویسندگان این تحقیق برای دسترسی به یافته‌های مشابهی برای جریان‌های غیرماندگار و غیرخطی که زمینه اصلی پژوهش حاضر بود، به گزارش کاری آزمایشگاهی هال و

فیزیک جریان در مصالح دانه‌ای، نقش مهمی را در ارزیابی اثرات مقیاس در مدل‌ها و فرمولاسیون مدل‌های عددی در اندرکنش سازه‌های موج شکن ایفا می‌کند [۱ و ۲]. از آنجا که جریان سیالات در محیط‌های متخلخل درشت دانه در کاربری‌های متداول به صورت غیر داریسی است، لذا برای تحلیلهای مهندسی نمی‌توان از روابط خطی مثلاً معادله لاپلاسی ( $\phi_{xx} + \phi_{yy} = 0$ )، استفاده نمود [۳-۶]. به عبارت دیگر در این مصالح بین سرعت جریان (V) و گرادیان هیدرولیکی (i)، ارتباط خطی برقرار نبوده و رابطه حاکم به صورت نمائی یا درجه دوم خواهد بود [۷]. از دیرباز پژوهشگران برای برآورد گرادیان هیدرولیکی (i) برحسب سرعت متوسط جریان (V) در مصالح درشت دانه، روابط گوناگونی را پیشنهاد کرده‌اند که تمامی روابط ارائه شده را می‌توان به دو صورت کلی زیر، طبقه‌بندی نمود [۷]

$$i = aV + b|V|V \quad (۱) \text{ رابطه دو جمله‌ای}$$

که به معادله فورشهیمیر<sup>۱</sup> معروف است و در آن a و b ضرایبی هستند که تابعی از ویژگی‌های جریان و محیط متخلخل هستند و معمولاً با روشهای آزمایشگاهی تعیین می‌شوند [۸].

$$i = mV^n \quad (۲) \text{ رابطه نمای}$$

که در این رابطه

m و n مقادیری وابسته به خصوصیات محیط متخلخل و سیال هستند [۹]. سهولت استفاده از رابطه ۲ موجب شده است تا این رابطه توسط پژوهشگران مختلف و به شکلهای گوناگونی مورد استفاده قرار گیرد [۹-۱۲]. لذا شایان ذکر است که هر یک از محققان مربوطه، تعیین ضرایب m و n را منوط به مجموعه‌ای از خصوصیات مصالح، سیال و سرعت ظاهری جریان (یا عدد رینولدز<sup>۲</sup>) دانسته‌اند و در نتیجه، سازگاری اندکی بین مقادیر ضرایب ارائه شده آنها برای یک مجموعه مفروض از داده‌های مهندسی وجود دارد. از طرفی دیگر علی‌رغم این اختلافات، پذیرشی فراگیر وجود دارد که فارغ از روش به‌کار گرفته شده در تعیین ضرایب برای یک مصالح مفروض و در محدوده نسبتاً مشخصی از اعداد رینولدز، می‌توان ضرایب m و n را با تقریب مناسبی، ثابت در نظر گرفت [۷].

<sup>1</sup> Forchheimer  
<sup>2</sup> Reynolds Number (Re)

<sup>3</sup> Dudgeon  
<sup>4</sup> Wilkins  
<sup>5</sup> Parkin  
<sup>6</sup> Johnson  
<sup>7</sup> Leps  
<sup>8</sup> Soni  
<sup>9</sup> Volker  
<sup>10</sup> Fourar et al.  
<sup>11</sup> Konstadinos et al.  
<sup>12</sup> Cheng et al.  
<sup>13</sup> Polubarinova  
<sup>14</sup> Tek  
<sup>15</sup> Geertsma  
<sup>16</sup> Hall et al.  
<sup>17</sup> Burcharth et al.

همکاران راه پیدا کرد که در ادامه آورده شده است [۱۹].

برای حالت ماندگار (as و bs) که از تحلیل همبستگی<sup>۴</sup> به دست آمده‌اند، در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- ضرایب a و b حاصل از آزمایش‌ها [۲۰]

پارامتر	سری آزمایش‌ها				
	S	C۴۲	R۴۲	CV۵	RV۵
قطر دانه D (میلی‌متر)	۱۰۰	۴۲	۴۲	۷۵	۷۵
تخلخل n (درصد)	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۲۶
$a_s$ (Sec/m)	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۴۳	۰/۱۶	۰/۴۱
$b_s$ (Sec/m) <sup>۲</sup>	۴/۹۴	۸/۷۷	۳۹/۶	۳/۴۳	۱۹/۲

$C_i$  کره‌هایی با قطر  $i$  میلی‌متر با دسته‌بندی مکعبی شکل،  $R_i$  کره‌هایی با قطر  $i$  میلی‌متر با دسته‌بندی لوزی شکل، S نمونه مصالح طبیعی

ایشان برای دستیابی به برازش‌های بهتر بین داده‌های مشاهداتی، با کمک روش آنالیز و تحلیل ابعادی بین گرادیان هیدرولیکی و دیگر ویژگی‌های جریان- محیط متخلخل مؤثر رابطه‌ای ارائه کرده‌اند که به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$a = \text{fun}(\rho, \mu, T, n, D, t) \quad (۳)$$

که در این رابطه

$\rho$  دانسیته سیال،  $\mu$  گرانشی سیال، A دامنه نوسانی ذره آب، T پرورد نوسانی ذره آب، D اندازه بارز مصالح، n تخلخل محیط، t زمان و a خاصیتی از سیستم است.

آنگاه نشان داده‌اند که برای هر مصالح مفروضی، تخلخل و طول موج گرادیان هیدرولیکی مستقل از عدد رینولدز است. همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که مقاومت ناشی از گرانشی (لزجت) در محدوده‌ای از سرعت‌های جریان، بدون تأثیر است.

سپس برای ارزیابی دقت یافته‌های پژوهشی، حداکثر گرادیان هیدرولیکی اندازه‌گیری شده و حداکثر گرادیان هیدرولیکی محاسباتی را رسم نموده و نتیجه‌گیری کرده‌اند که گرادیان هیدرولیکی به طول موج وابستگی معنی‌داری داشته است. نتیجه اینکه مؤلفه پایدار گرادیان هیدرولیکی ( $i_0$ )، تابعی از عدد رینولدز و تخلخل (n) و حرکت ذره آب به صورت بدون بعد ( $\frac{A}{D}$ ) و ترم بدون بعد اندازه ذره ( $D^*$ ) بوده و برای شرایط جریان غیرخطی،  $i_0$  مستقل از عدد رینولدز  $R_i$  است.

در این مقاله به منظور ارزیابی حدود اعتبار یافته‌های گزارش شده توسط دیگر محققان که در شرایط تحت فشار آزمایش شده است، برای کاربری‌های مهندسی در سازه‌های سنگریزی در قالب پروژه‌ای، پژوهش گسترده‌ی مشاهداتی بر روی محیط متخلخل درشت دانه غیر تحت فشار برنامه‌ریزی شد [۲۱].

در تحقیق مذکور تلاش شد تا نتایج حاصل از مشاهدات مقیاس‌دار به عمل آمده در یک فلوم تحت فشار نوسانی پر شده از سیال آب بر روی محیط‌های متخلخل ارائه شود که در واقع نوعی تلاش برای بازسازی جریان‌های غیرماندگار در موج شکن‌های سنگریزی دانه‌ای در سواحل دریاها بود. مقایسه نتایج آزمایش‌ها با معادله فورشه‌ایمر در شرایط مذکور نشان داد که در صورت افزودن جمله سوم به معادله فورشه‌ایمر به منظور نشان دادن تأثیر غیردائمی بودن جریان، میزان دقت معادله یاد شده را می‌توان در تحلیل‌های غیرخطی بالا برد. شایان ذکر است که یافته‌های گزارش شده محدود به نشان دادن چگونگی تأثیرگذاری پارامترهایی چون دامنه و پرورد نوسان‌های موج، اندازه دانه و تخلخل بر روی مقاومت محیط متخلخل در برابر جریان بوده است. اهمیت کار پژوهشی یاد شده ایجاب می‌کند که برخی فرازهای پر اهمیت‌تر از آن، در این مقاله به اختصار باز یافت گردد.

محیط دانه‌ای مورد استفاده در مشاهدات قبلی، متشکل از انواع مصالح طبیعی متراکم شده همچون سنگریز، شن و ماسه بوده که تفاوت بین آنها را با دانه‌بندی و ضریب یکنواختی مشخص کرده‌اند. چون مقاومت مصالح متخلخل یا نفوذپذیری آنها در مقابل جریان، وابسته به پارامترهایی چون شکل، جهت و موقعیت قرارگیری دانه‌ها، زبری سطحی، تخلخل و غیره است، لذا آزمایش‌هایی هم بر روی نوعی دانه‌های کروی یکنواخت (با قطر برابر) متراکم شده نیز انجام داده‌اند. در تمامی تیپ‌های مصالح به کار گرفته شده تأثیر تخلخل بر روی مقاومت در دو حالت پوک و حالت متراکم آزمایش شده است. همچنین به منظور تعیین تأثیر قطر سنگدانه‌های کروی، آنها را در دو اندازه مختلف و با دو حالت ترتیب قرارگیری برای هر یک، مورد آزمایش و بررسی قرار داده‌اند.

نکته‌ای بسیار با اهمیت در تجزیه و تحلیل مشاهدات این کار، فرض اعتبار داشتن ضرایب مربوط به جریان‌های ماندگار در ارزیابی و به دست آوردن اثرات اینرسی در جریان‌های غیرماندگار است. در این راستا از یافته‌های محققانی همچون مک کورکودال<sup>۱</sup> و هنورا<sup>۲</sup> استفاده کرده‌اند [۱۹]. به این منظور آزمایش‌ها در یک فلوم تحت فشار در آزمایشگاه مهندسی ساحلی دانشگاه کوئین<sup>۳</sup> صورت گرفته است.

این فلوم ابعادی برابر با یک متر ارتفاع در نیم‌متر پهنا داشت. اطلاعات مربوط به ویژگی‌های هر یک از مصالح دانه‌ای مورد استفاده شامل تخلخل (n)، قطر سنگدانه (D) و ضرایب فورشه‌ایمر

<sup>۱</sup> McCorquodale

<sup>۲</sup> Hannoura

<sup>۳</sup> Queen

<sup>۴</sup> Regression Analysis

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- مجموعه آزمایشگاهی<sup>۱</sup> مورد استفاده

اجزاء اصلی دستگاه مورد استفاده در این پژوهش که شماتیک آن در شکل ۱ نمایش داده شده عبارت بود از: آب انبار<sup>۲</sup> با طولی برابر ۱۳ متر، ارتفاع ۸۵ سانتی متر و عرض ۸۰ سانتی متر که گنجایشی حدود ۱۰ مترمکعب آب داشت. به منظور انجام آزمایش های مورد نظر، یک فلوم<sup>۳</sup> بتنی غیر شیب پذیر به طول ۱۵ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و پهنای ۰/۶ متر با دیواره های شفاف و مجهز به دو سرریز جانبی برای تنظیم دقیق سطح آب در بالا دست محیط متخلخل و یک دریچه انتهایی برای ایجاد نوسانات سیکلیک سطح آب در پایین دست محیط متخلخل و سیستم چرخش آب و ابزار دقیق در نظر گرفته شد. نمایشی از فلوم در شکل های ۲ تا ۵ آورده شده است.



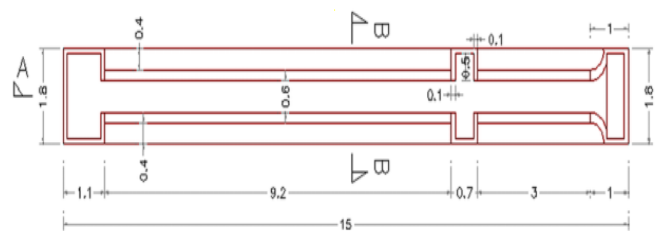
شکل ۲- نمایشی از جزئیات انتهایی فلوم مورد استفاده



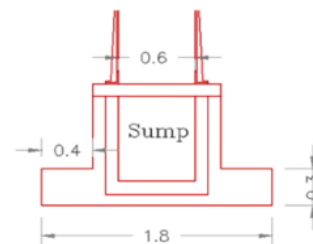
شکل ۳- نمایشی از فلوم و سرریزهای جانبی آن، نگاه به سمت راست



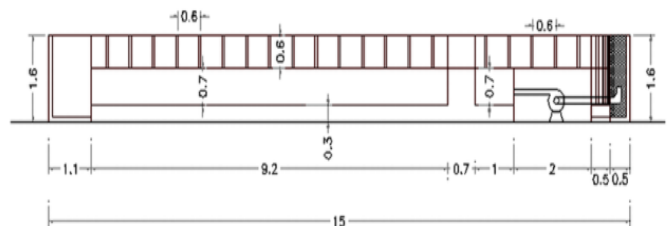
شکل ۴- نمایشی از فلوم در هنگام پرکردن محیط متخلخل نگاه به سمت بالادست



الف- پلان (ابعاد به متر)



ب- برش A-A (ابعاد به متر)



ج- برش B-B (ابعاد به متر)

شکل ۱- فلوم مورد استفاده در پژوهش حاضر (مقادیر به متر)

- 1 Experimental Setup
- 2 Sump
- 3 Flume

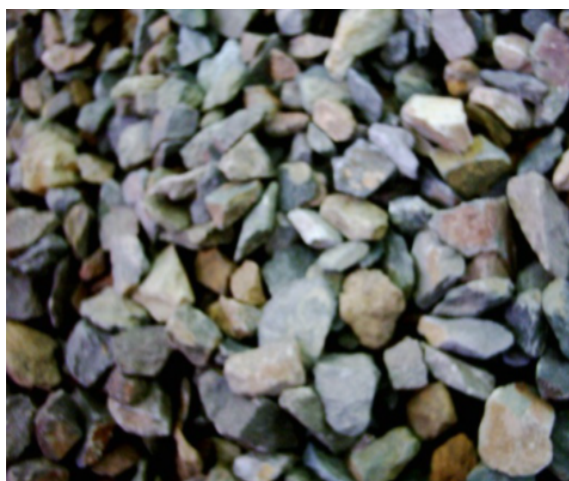
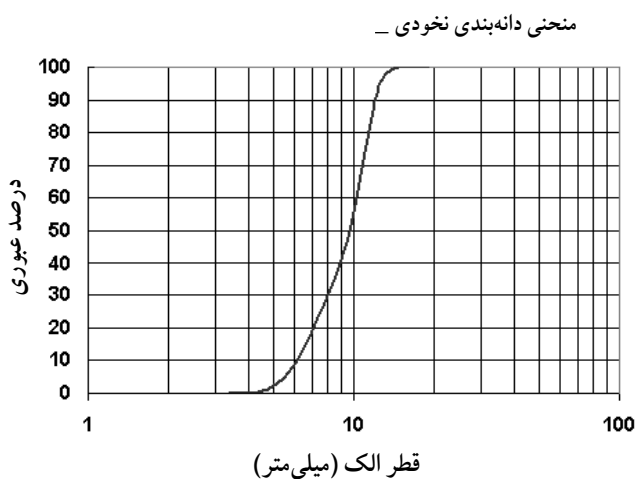
$$a = 4/313 \text{ (S/m)} \quad (4)$$

$$b = 224/61 \text{ (S/m)}^2 \quad (5)$$

جایگذاری مقادیر  $a$  و  $b$  در معادله فورشایمر، رابطه زیر را نتیجه می‌دهد

$$i = 4/3 + 224/6 V^2 \quad (6)$$

سپس آزمایش‌ها در شرایط غیرماندگار با گامهای زمانی مختلف (۵ دقیقه‌ای و ۲ دقیقه‌ای) در حالتی که دریچه با سرعتی برابر به سمت بالا و سپس به سمت پایین حرکت می‌کرد، پیش برده شد. مقادیر و پارامترهای مورد نیاز در حالتی که دریچه به سمت بالا حرکت می‌کند در جدولهای ۳ و ۴ و در حالتی که دریچه به سمت پایین حرکت می‌کند در جدولهای ۵ و ۶ آورده شده است.



شکل ۶- خم دانه‌بندی و مصالح نخودی مورد استفاده در پژوهش حاضر ( $C_u$  برابر ۱/۶۲ و  $C_c$  برابر ۱/۰۲)



شکل ۵- نمایشی از فلوم و پیزومترها در حین آزمایش

## ۲-۲- آماده‌سازی‌ها و مشاهدات

سنگدانه‌ها از معدنی در فاصله ۵۰ کیلومتری همدان و از نوع شکسته از قله‌های کوهی تهیه شد که پس از دانه‌بندی با توزیع از قبل تعیین شده، کاملاً شسته شد تا از ریزدانه‌ها و غبار و خاک عاری شود. اندازه بیشینه سنگدانه‌ها در این دانه‌بندی ۱۲/۷ میلی‌متر (عبوری از الک ۰/۵ اینچ) و اندازه کمینه سنگدانه‌ها ۴/۷۵ میلی‌متر (عبوری از الک نمره ۴) بود.

پس از دانه‌بندی مصالح برحسب برنامه آزمایشی، برخی مشخصات فیزیکی آنها از قبیل وزن مخصوص اشباع با سطح خشک سنگدانه‌ها و تخلخل ( $n$ ) نمونه‌ها نیز در آزمایشگاه خاک دانشگاه بوعلی سینا در همدان تعیین شدند. آنگاه مصالح دانه‌ای در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری در داخل فلوم ریخته شد و توسط تخماق در شرایط اشباع، متراکم گشت. خم دانه‌بندی مصالح نخودی مورد استفاده در شکل ۶ نشان داده شده است.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- مشاهدات و تجزیه و تحلیل‌های آماری

برای تعیین تغییرات گرادیان هیدرولیکی در طول محیط متخلخل مدل شده و در شرایط ماندگار و غیرماندگار، ارتفاع‌های پیزومتریک در زمان‌ها و مکان‌های از پیش تعیین شده با روش فیلم‌برداری قرائت شد که خلاصه‌ای از آن در جدولهای ۲ تا ۴ آورده شده است. در ابتدا، آزمایش‌ها در حالت ماندگار درون محیط سنگریزه‌ای انجام گرفت که با برآزش منحنی بین داده‌های آزمایشگاهی، در شرایط مذکور رابطه‌ای بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان پیدا شد (رابطه ۶). با کمک نرم‌افزار SPSS، مقادیر  $a$  و  $b$  برای داده‌های جدول ۲ به دست آمد

جدول ۲- تعیین تغییرات گرادیان هیدرولیکی در شرایط ماندگار (m/m)

موقعیت	H(i)	V(i)	$\Delta H$ (سانتی متر)	$\bar{V}$ (سانتی متر بر ثانیه)	L (سانتی متر)	(i مشاهداتی)
سراب	۵۰/۲۵	۱/۱۳	---	---	---	---
۱Piz	۵۰/۲۵	۱/۱۳	۰/۰۰	۱/۳۳	۵	۰/۰۰۰
۲Piz	۴۸/۶۰	۱/۱۷	۱/۶۵	۱/۱۵	۲۰	۰/۰۸۲
۳Piz	۴۶/۸۵	۱/۲۲	۱/۷۵	۱/۱۹	۲۰	۰/۰۸۸
۴Piz	۴۵/۰۵	۱/۲۷	۱/۸۰	۱/۲۴	۲۰	۰/۰۹۰
۵Piz	۴۳/۲۵	۱/۳۲	۱/۸۰	۱/۲۹	۲۰	۰/۰۹۰
۶Piz	۴۱/۲۰	۱/۳۸	۲/۰۵	۱/۳۵	۲۰	۰/۱۰۳
۷Piz	۳۹/۱۵	۱/۴۶	۲/۰۵	۱/۴۲	۲۰	۰/۱۰۳
۸Piz	۳۶/۹۰	۱/۵۴	۲/۲۵	۱/۵۰	۲۰	۰/۱۱۳
۹Piz	۳۴/۳۰	۱/۶۶	۲/۶۰	۱/۶۰	۲۰	۰/۱۳۰
۱۰Piz	۳۱/۶۰	۱/۸۰	۲/۷۰	۱/۷۳	۲۰	۰/۱۳۵
۱۱Piz	۲۸/۳۰	۲/۰۱	۳/۳۰	۱/۹۱	۲۰	۰/۱۶۵
۱۲Piz	۲۴/۲۰	۲/۳۶	۴/۱۰	۲/۱۸	۲۰	۰/۲۰۵
۱۳Piz	۱۸/۵۵	۳/۰۷	۵/۶۵	۲/۷۱	۲۰	۰/۲۸۳
پایاب	۱۸/۵۵	۳/۰۷	۰/۰۰	۳/۰۷	۵	۰/۰۰۰

H(i) ارتفاع پیزومتریک در پیزومتر i ام (برحسب سانتی متر)، V(i) سرعت جریان در مقطع i ام (برحسب سانتی متر بر ثانیه)،  $\Delta H$  اختلاف پیزومتریک بین دو پیزومتر متوالی (برحسب سانتی متر)، L طول افقی بین دو پیزومتر متوالی (برحسب سانتی متر)،  $\bar{V}$  سرعت متوسط بین دو پیزومتر متوالی (برحسب سانتی متر بر ثانیه) و همچنین تراز سطح دریچه برابر ۱۰ سانتی متر است

جدول ۳- تراز سطح آب پیزومترها، سراب و پایاب در فواصل زمانی ۵ دقیقه در لحظات بالارفتن دریچه (برحسب سانتی متر)

لحظه شروع	در دقیقه ۵	در دقیقه ۱۰	در دقیقه ۱۵	
۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	تراز سراب
۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	پیزومتر شماره ۱
۴۸/۸۰	۴۸/۸۰	۴۸/۸۰	۴۸/۸۰	پیزومتر شماره ۲
۴۷/۰۰	۴۷/۱۵	۴۷/۰۰	۴۷/۰۰	پیزومتر شماره ۳
۴۵/۲۰	۴۵/۳۵	۴۵/۲۰	۴۵/۲۰	پیزومتر شماره ۴
۴۳/۲۵	۴۳/۵۰	۴۳/۳۰	۴۳/۸۰	پیزومتر شماره ۵
۴۱/۲۵	۴۱/۵۰	۴۱/۳۵	۴۱/۹۰	پیزومتر شماره ۶
۳۹/۲۵	۳۹/۴۰	۳۹/۵۰	۳۹/۹۵	پیزومتر شماره ۷
۳۷/۱۰	۳۷/۲۰	۳۷/۵۰	۳۸/۰۰	پیزومتر شماره ۸
۳۴/۵۰	۳۴/۶۰	۳۵/۱۵	۳۵/۷۰	پیزومتر شماره ۹
۳۱/۸۰	۳۲/۰۰	۳۲/۷۰	۳۳/۴۰	پیزومتر شماره ۱۰
۲۸/۵۰	۲۹/۰۰	۲۹/۸۵	۳۰/۸۵	پیزومتر شماره ۱۱
۲۴/۶۰	۲۵/۱۵	۲۶/۳۰	۲۷/۷۰	پیزومتر شماره ۱۲
۱۹/۰۰	۲۰/۱۰	۲۲/۱۰	۲۳/۸۵	پیزومتر شماره ۱۳
۱۹/۰۰	۲۰/۱۰	۲۲/۱۰	۲۳/۸۵	تراز پایاب
۱۲/۴۷	۱۴/۸۵	۱۶/۹۵	۱۹/۳۵	تراز سطح دریچه (سانتی متر)
۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	ارتفاع H (سانتی متر)

جدول ۴- تغییرات گرادیان هیدرولیکی (m/m) و تعیین a, b و c در شرایط غیرماندگار با گامهای زمانی ۵ دقیقه ای (دریچه رو به بالا)

تغییرات تراز دریچه به سمت پایین (لحظه شروع)													
۰/۰۲۶۷	۰/۰۲۱۷	۰/۰۱۹۰	۰/۰۱۷۳	۰/۰۱۶۰	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۳۶	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۱۴	$\bar{V}$ (متر بر ثانیه)
۰/۰۲۸۰	۰/۰۱۹۵	۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۰۰	۰/۰۱۰۰	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۰۰	i (مشاهداتی)
۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	$\bar{V}$ (a)
۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	a از نرم افزار SPSS
۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	b از نرم افزار SPSS
-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	-۶/۲۲	c از نرم افزار SPSS
E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	E-۰۰۴	i (محاسباتی)
۰/۰۲۶۹	۰/۰۱۹۶	۰/۰۱۶۲	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۲۶	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۰۷	۰/۰۱۰۰	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۸۱	
تغییرات تراز دریچه به سمت پایین پس از گذشت (t برابر ۵ دقیقه)													
۰/۰۲۵۶	۰/۰۲۱۳	۰/۰۱۸۸	۰/۰۱۷۲	۰/۰۱۶۰	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۱۴	$\bar{V}$ (متر بر ثانیه)
۰/۰۲۵۳	۰/۰۱۹۳	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۱۰	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۰۰	i (مشاهداتی)
۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	$\bar{V}$ (a)
۰/۰۲۴۹	۰/۰۱۸۷	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۱۲	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۷۸	i (محاسباتی)
تغییرات تراز دریچه به سمت پایین پس از گذشت (t برابر ۱۰ دقیقه)													
۰/۰۲۳۸	۰/۰۲۰۵	۰/۰۱۸۳	۰/۰۱۶۹	۰/۰۱۵۸	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۱۴	$\bar{V}$ (متر بر ثانیه)
۰/۰۲۱۰	۰/۰۱۷۸	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۱۸	۰/۰۱۰۰	۰/۰۱۰۰	۰/۰۱۰۰	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۰۰	i (مشاهداتی)
۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	$\bar{V}$ (a)
۰/۰۲۲۰	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۴۷	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۱۷	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۰۰	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۷۴	i (محاسباتی)
تغییرات تراز دریچه به سمت پایین پس از گذشت (t برابر ۱۵ دقیقه)													
۰/۰۲۲۳	۰/۰۱۹۶	۰/۰۱۷۸	۰/۰۱۶۶	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۴۷	۰/۰۱۴۰	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۱۴	$\bar{V}$ (متر بر ثانیه)
۰/۰۱۹۳	۰/۰۱۵۸	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۰۰	i (مشاهداتی)
۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	$\bar{V}$ (a)
۰/۰۱۹۶	۰/۰۱۶۰	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۱۲	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۷۱	i (محاسباتی)

جدول ۵- تراز سطح آب پیژومترها، سراب و پایاب در فواصل زمانی ۵ دقیقه در لحظات پایین آمدن دریچه (برحسب سانتی متر)

لحظه شروع	در دقیقه ۵	در دقیقه ۱۰	در دقیقه ۱۵	
۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	تراز سراب
۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	۵۰/۲۵	پیژومتر شماره ۱
۴۸/۷۰	۴۸/۷۰	۴۸/۷۰	۴۸/۷۰	پیژومتر شماره ۲
۴۷/۱۰	۴۷/۱۰	۴۷/۱۰	۴۷/۱۰	پیژومتر شماره ۳
۴۵/۲۰	۴۵/۳۰	۴۵/۵۰	۴۵/۵۰	پیژومتر شماره ۴
۴۳/۳۰	۴۳/۴۵	۴۳/۷۰	۴۳/۹۰	پیژومتر شماره ۵
۴۱/۴۰	۴۱/۶۰	۴۱/۹۰	۴۲/۱۰	پیژومتر شماره ۶
۳۹/۲۵	۳۹/۷۰	۴۰/۱۰	۴۰/۲۵	پیژومتر شماره ۷
۳۷/۱۰	۳۷/۵۰	۳۸/۰۰	۳۸/۲۵	پیژومتر شماره ۸
۳۴/۵۰	۳۵/۰۰	۳۵/۷۰	۳۶/۰۵	پیژومتر شماره ۹
۳۱/۸۰	۳۲/۳۵	۳۳/۱۵	۳۳/۸۰	پیژومتر شماره ۱۰
۲۸/۵۰	۲۹/۳۰	۳۰/۳۰	۳۱/۱۵	پیژومتر شماره ۱۱
۲۴/۶۵	۲۵/۸۰	۲۷/۰۵	۲۸/۱۰	پیژومتر شماره ۱۲
۱۹/۲۰	۲۱/۰۰	۲۲/۹۵	۲۴/۳۰	پیژومتر شماره ۱۳
۱۹/۲۰	۲۱/۰۰	۲۲/۹۵	۲۴/۳۰	تراز پایاب
۱۲/۴۷	۱۵/۱۳	۱۷/۶۰	۲۰/۰۰	تراز سطح دریچه (سانتی متر)
۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	ارتفاع H (سانتی متر)

جدول ۶- تغییرات گرادیان هیدرولیکی (m/m) و تعیین ضرایب در شرایط غیرماندگار درگامهای زمانی ۵ دقیقه‌ای (دریچه روبه پایین)

تغییرات تراز دریچه به سمت پایین (لحظه شروع)														
-----	۰/۰۲۲	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۶	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱	$\bar{V}$ (متر بر ثانیه)
۰/۰۰۰	۰/۱۹۰	۰/۱۵۳	۰/۱۳۳	۰/۱۱۳	۰/۱۱۰	۰/۱۰۰	۰/۰۹۳	۰/۰۹۰	۰/۰۸۰	۰/۰۸۰	۰/۰۸۰	۰/۰۷۷	۰/۰۰۰	i (مشاهداتی)
	۰/۰۳۹	۰/۰۳۴	۰/۰۳۱	۰/۰۲۹	۰/۰۲۷	۰/۰۲۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲۲	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	$\bar{V}$ (a)
	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	۱/۸۸۷	a از نرم افزار SPSS
	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	۷۵/۷۳۴	b از نرم افزار SPSS
	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	۶/۵۵	c از نرم افزار SPSS
	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	E-۰۴	i (محاسباتی)
	۰/۱۹۰	۰/۱۵۵	۰/۱۳۴	۰/۱۲۰	۰/۱۰۹	۰/۱۰۰	۰/۰۹۳	۰/۰۸۷	۰/۰۸۲	۰/۰۷۸	۰/۰۷۴	۰/۰۷۱		
تغییرات تراز دریچه به سمت پایین پس از گذشت (t برابر ۵ دقیقه)														
---	۰/۰۲۳۱	۰/۰۲۰۰	۰/۰۱۸۱	۰/۰۱۶۷	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۴۷	۰/۰۱۴۰	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۱۴	$\bar{V}$ (متر بر ثانیه)
۰/۰۰۰	۰/۲۰۵۰	۰/۱۶۲۵	۰/۱۴۲۵	۰/۱۲۷۵	۰/۱۱۵۰	۰/۱۰۵۰	۰/۰۹۰۰	۰/۰۹۰۰	۰/۰۹۰۰	۰/۰۸۰۰	۰/۰۸۰۰	۰/۰۷۷۵	۰/۰۰۰۰	i (مشاهداتی)
	۰/۰۴۱	۰/۰۳۶	۰/۰۳۲	۰/۰۳۰	۰/۰۲۸	۰/۰۲۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲۲	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	$\bar{V}$ (a)
	۰/۲۰۸	۰/۱۶۷	۰/۱۴۲	۰/۱۲۶	۰/۱۱۴	۰/۱۰۴	۰/۰۹۷	۰/۰۹۱	۰/۰۸۶	۰/۰۸۲	۰/۰۷۸	۰/۰۷۴	۰/۰۷۰	i (محاسباتی)
تغییرات تراز دریچه به سمت پایین پس از گذشت (t برابر ۱۰ دقیقه)														
---	۰/۰۲۴۷	۰/۰۲۰۹	۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۷۰	۰/۰۱۵۸	۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۱۴	$\bar{V}$ (متر بر ثانیه)
۰/۰۰۰	۰/۲۴۰۰	۰/۱۷۵۰	۰/۱۵۲۵	۰/۱۳۲۵	۰/۱۲۵۰	۰/۱۱۰۰	۰/۰۹۵۰	۰/۰۹۲۵	۰/۰۹۲۵	۰/۰۹۰۰	۰/۰۸۰۰	۰/۰۷۷۵	۰/۰۰۰۰	i (مشاهداتی)
	۰/۰۴۴	۰/۰۳۷	۰/۰۳۳	۰/۰۳۰	۰/۰۲۸	۰/۰۲۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲۲	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	$\bar{V}$ (a)
	۰/۲۳۶	۰/۱۸۱	۰/۱۵۲	۰/۱۳۳	۰/۱۲۰	۰/۱۰۹	۰/۱۰۲	۰/۰۹۵	۰/۰۹۰	۰/۰۸۵	۰/۰۸۱	۰/۰۷۸	۰/۰۷۰	i (محاسباتی)
تغییرات تراز دریچه به سمت پایین پس از گذشت (t برابر ۱۵ دقیقه)														
---	۰/۰۲۶۵	۰/۰۲۱۷	۰/۰۱۹۰	۰/۰۱۷۳	۰/۰۱۶۰	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۱۴	$\bar{V}$ (متر بر ثانیه)
۰/۰۰۰	۰/۲۷۲۵	۰/۱۹۲۵	۰/۱۶۵۰	۰/۱۳۵۰	۰/۱۳۰۰	۰/۱۱۰۰	۰/۱۰۷۵	۰/۰۹۵۰	۰/۰۹۵۰	۰/۰۹۵۰	۰/۰۸۰۰	۰/۰۷۷۵	۰/۰۰۰۰	i (مشاهداتی)
	۰/۰۴۷	۰/۰۳۹	۰/۰۳۴	۰/۰۳۱	۰/۰۲۹	۰/۰۲۷	۰/۰۲۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲۲	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	$\bar{V}$ (a)
	۰/۲۶۸	۰/۱۹۵	۰/۱۶۱	۰/۱۴۰	۰/۱۲۵	۰/۱۱۴	۰/۱۰۶	۰/۰۹۹	۰/۰۹۴	۰/۰۸۸	۰/۰۸۴	۰/۰۸۱	۰/۰۷۰	i (محاسباتی)

و از آنجا

$$i = 1/887 + 75/734 V^2 + 6/55 \times 10^{-4} t \quad (A)$$

از طرفی چون مشاهدات به تفکیک تغییرات گرادیان هیدرولیکی در دو حالت نیم سینوسی متناظر با بالا بردن و یا پایین بردن دریچه صورت گرفت، لذا لازم بود که در یک چرخه کامل تمام سینوسی نیز تحلیل رگرسیونی داده‌ها انجام شود. مقادیر a، b و c حاصل از نرم افزار SPSS به ترتیب برابراند با

$$a = 2/19 \text{ (Sec/m)}$$

$$b = 71/457 \text{ (Sec/m)}^2$$

$$c = 3/12e - 5 \text{ (1/Sec)}$$

مشاهده می‌شود که ضریب ترم سوم مربوط به زمان t (مقدار ضریب) در حالت سینوسی نیز عدد بسیار کوچکی به دست آمده است. به هر حال مجدداً می‌توان معادله فورشایمر را به صورت زیر بازنویسی کرد

با استفاده از مشاهدات شرایط غیرماندگار به کمک نرم افزار، با برقراری روابط بین گرادیان‌ها و سرعتها و زمان‌ها، مقادیر a، b و c محاسبه شدند. در حالت بالارفتن دریچه، این ضرایب به صورت زیر به دست آمد

$$a = 2/6 \text{ (Sec/m)}$$

$$b = 64/17 \text{ (Sec/m)}^2$$

$$c = -6/22e - 4 \text{ (1/Sec)}$$

در نتیجه

$$i = 2/6V + 64/17 V^2 - 6/22 \times 10^{-4} t \quad (Y)$$

و برای برگشت (پایین آمدن) دریچه، ضرایب بالا عبارت‌اند از

$$a = 1/887 \text{ (Sec/m)}$$

$$b = 75/734 \text{ (Sec/m)}^2$$

$$c = 6/55e - 4 \text{ (1/Sec)}$$



جدول ۷- تراز سطح آب پیزومترها، سراب و پایاب در فواصل زمانی ۲ دقیقه در لحظات پایین آمدن دریاچه (برحسب سانتی متر)

لحظه شروع	در دقیقه ۲	در دقیقه ۴	در دقیقه ۶	در دقیقه ۸	در دقیقه ۱۰	در دقیقه ۱۲	در دقیقه ۱۴	در دقیقه ۱۶	در دقیقه ۱۸	
۵۰/۲۰	۵۰/۲۰	۵۰/۲۰	۵۰/۲۰	۵۰/۲۰	۵۰/۲۰	۵۰/۲۰	۵۰/۲۰	۵۰/۲۰	۵۰/۲۰	تراز سراب
۴۸/۶۵	۴۸/۶۵	۴۸/۶۵	۴۸/۶۵	۴۸/۶۵	۴۸/۶۵	۴۸/۶۵	۴۸/۶۵	۴۸/۶۵	۴۸/۶۵	پیزومتر شماره ۱
۴۶/۹۰	۴۶/۹۰	۴۶/۹۰	۴۶/۹۰	۴۶/۹۰	۴۶/۹۰	۴۶/۹۰	۴۶/۹۰	۴۶/۹۰	۴۶/۹۰	پیزومتر شماره ۲
۴۵/۱۰	۴۵/۱۰	۴۵/۱۰	۴۵/۱۰	۴۵/۱۰	۴۵/۱۰	۴۵/۱۰	۴۵/۱۰	۴۵/۱۰	۴۵/۱۰	پیزومتر شماره ۳
۴۳/۲۵	۴۳/۲۵	۴۳/۲۵	۴۳/۲۵	۴۳/۲۵	۴۳/۲۵	۴۳/۲۵	۴۳/۲۵	۴۳/۲۵	۴۳/۲۵	پیزومتر شماره ۴
۴۱/۳۰	۴۱/۳۰	۴۱/۳۰	۴۱/۳۰	۴۱/۳۰	۴۱/۳۰	۴۱/۳۰	۴۱/۳۰	۴۱/۳۰	۴۱/۳۰	پیزومتر شماره ۵
۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	پیزومتر شماره ۶
۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	پیزومتر شماره ۷
۳۴/۴۰	۳۴/۴۰	۳۴/۴۰	۳۴/۴۰	۳۴/۴۰	۳۴/۴۰	۳۴/۴۰	۳۴/۴۰	۳۴/۴۰	۳۴/۴۰	پیزومتر شماره ۸
۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	پیزومتر شماره ۹
۲۸/۲۰	۲۸/۲۰	۲۸/۲۰	۲۸/۲۰	۲۸/۲۰	۲۸/۲۰	۲۸/۲۰	۲۸/۲۰	۲۸/۲۰	۲۸/۲۰	پیزومتر شماره ۱۰
۲۴/۲۰	۲۴/۲۰	۲۴/۲۰	۲۴/۲۰	۲۴/۲۰	۲۴/۲۰	۲۴/۲۰	۲۴/۲۰	۲۴/۲۰	۲۴/۲۰	پیزومتر شماره ۱۱
۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	پیزومتر شماره ۱۲
۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	پیزومتر شماره ۱۳
۱۸/۳۵	۱۸/۳۵	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	۱۸/۴۰	تراز پایاب
										دمای آزمایش
										تراز سطح
۱۰/۰۰	۱۱/۱۰	۱۱/۹۸	۱۳/۱۰	۱۴/۱۰	۱۵/۱۰	۱۶/۰۸	۱۷/۱۰	۱۸/۰۸	۱۹/۰۵	دریاچه (سانتی متر)
۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	۹/۳۹	ارتفاع H (سانتی متر)

در جداول بالا:  $\bar{V}$  سرعت متوسط بین دو پیزومتر متوالی (متر بر ثانیه) و  $V(a)$  سرعت واقعی در محیط متخلخل (متر بر ثانیه)

#### ۴- نتیجه گیری

همان گونه که در ابتدا بیان شد و داده های آزمایشگاهی و نمودارهای مربوطه نیز گواه بر آن است، جریان درون محیط متخلخل درشت دانه مورد آزمایش، جریانی غیر خطی - سهمی شکل بود که رابطه ارائه شده، با برازش داده های آزمایشگاهی و با ضریب رگرسیون بسیار بالایی به دست آمد. یافته های پژوهش حاضر حاکی از آن است که: الف) برای جریان های سطح آزاد آشفته و غیرماندگار در محیط های متخلخل درشت دانه مشابه، اضافه کردن ترم سوم به معادله فورشهایمر دقت محاسبات را به طور محسوسی افزایش نخواهد داد. یافته های مشاهداتی نیز نشان می دهند که در حد دقتهای قابل دستیابی در این آزمایش ها ضریب جمله سوم در معادله فورشهایمر، بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن است. در آزمایش مدل های بزرگ مقیاس و تحت فشار، این ضریب قابل توجه بوده و برای برازش منحنی های پوش، ترم سوم ناگزیر باید دخالت داده شود. ب) در صورت اندازه گیری همزمان سرعت جریان در بالادست و پایین دست محیط متخلخل در شرایط ذکر شده، دستیابی به پروفیل های دقیق تری از گرادیان های هیدرولیکی غیرماندگار، امکان پذیر خواهد بود. ج) ویژگی های فیزیکی محیط متخلخل تأثیر قابل اندازه گیری بر ضریب ترم سوم معادله

$$i = 2/197 + 71/457 V^2 + 3/12 \times 10^{-5} t \quad (9)$$

در صورتی که همین آزمایش ها برای حالت ۲ دقیقه ای انجام گردد، مشاهده می شود که مقادیر  $a$  و  $b$  و  $c$  حاصل از نرم افزار SPSS به ترتیب برابراند با (جدول ۷)

$$a = 2/62 \text{ (Sec/m)}$$

$$b = 65/12 \text{ (Sec/m)}^2$$

$$c = -5/77e - 4 \text{ (1/Sec)}$$

و از آنجا معادله فورشهایمر تعمیم یافته به صورت ذیل ارائه می گردد

$$i = 2/627 + 65/12 V^2 - 5/77 \times 10^{-4} t \quad (10)$$

همان طور که در بالا ذکر شد روابط بالا به منظور خم دانه بندی مورد آزمایش به دست آمد.

از آنجا که شرایط هیدرولیکی جریان، جزر و مدی (غیر ماندگار) بوده و محیط متخلخل در برابر عبور جریان از درون آن از خود مقاومت نشان می دهد (مفهوم گرادیان فشار)، لذا سرعت جریان، تابعی از زمان است. زیرا تراز سطح آب در دو سوی محیط متخلخل (بالا دست و پایین دست) ثابت نبوده و با تغییر زمان، تغییر می نماید. به این ترتیب رابطه های ارائه شده برای گرادیان هیدرولیکی نیز وابسته به زمان هستند.

فورشهایمیر ندارند. اما این نکته حداقل برای شرایط جریان غیرماندگار تحت فشار صادق نیست.

## ۵- قدردانی

نویسندگان این تحقیق از آقایان دکتر ملکی رئیس وقت دانشکده

عمران و آقای مهندس طهماسبی مدیر وقت دفتر فنی دانشگاه و مهندس افکار نیز به خاطر مساعدت بی دریغ ایشان در ساخت دستگاه و پیشنهاداتی در جهت پیشرفت پروژه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## ۶- مراجع

- 1- Burcharth, H.F., and Andersen, O.H. (1995). "On the one-dimensional steady and unsteady porous media flow equation." *J. of Coastal Engineering*, 24, 233-257.
- 2- Sheidegger, A.E. (1974). *Physics of flow through porous media*, University of Toronto Press, Toronto.
- 3- Venkataraman, P., and Rao, P.R.M. (1998). "Darcian, transitional and turbulent flow through porous media." *J. of Hydra. Eng.*, 124(8), 840-846.
- 4- Ahmed, N., and Sunada, D.K. (1969). "Nonlinear flow in porous media." *J. of Hydra. Divi.*, 95(6), 1847-1857.
- 5- Ahmed, N., and Sunada, D.K. (1971). "Closure on nonlinear flow in porous media." *J. of Hydra. Divi.*, 8, 1233-1234.
- 6- Curtic, R.P., and Lawson, J.D. (1967). "Flow over and through rockfill banks." *J. of Hydra. Divi.*, 5, 1-21.
- 7- George, G.H., and Hansen, D. (1992). "Conversion between quadratic and power law for non- Darcy flow." *J. of Hydra. Engineering*, 118(5), 792-797.
- 8- Bazargan, J. (2002), "Design and analysis of rockfill intakes." Ph.D. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Amir kabir University, Tehran, Iran. (In Persian)
- 9- Straughan, B. (2010), "Structure of the dependence of Darcy and Forchheimer coefficients on porosity." *International J. of Engineering Science*, 48(11), 1610-1621.
- 10- Li, B., Garga, V., and Davies, M. (1998), "Relationships for Non-Darcy flow in rockfill." *J. of Hydraulic Engineering*, 124(2), 206-212.
- 11- Afzali, S.H., Abedini, J.M., and Monajemi, P. (2009). "Identification of network physical properties in simulation of flow through porous media using network model." *J. of Water and Wastewater*, 68, 48-56. (In Persian)
- 12- Moutsopoulos, K.N., and Tsihrintzis, V.A. (2005). "Approximate analytical solutions of the Forchheimer equation." *J. of Hydrology*, 309, 93-103.
- 13- Moutsopoulos, K.N., Pappaspyros, I.N.E., and Tsihrintzis, V.A. (2009). "Experimental investigation of inertial flow processes in porous media." *J. of Hydrology*, 374, 242-254.
- 14- Fourar, M., Radilla, G., Lenormand, R., and Moyne, Ch. (2004). "On the non-linear behavior of a laminar single-phase flow through two and three-dimensional porous media." *J. of Advances in Water Resources*, 27, 669-677.
- 15- Cheng, N.Sh., Hao, Zh., and Tan, S.K. (2008). "Comparison of quadratic and power law for nonlinear flow through porous media." *J. of Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1538-1547.
- 16- Poluobarinova-Kochina, Y.P. (1952). *Theory of groundwater movement*, English Tranlation by DeWiest, R.M.J. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- 17- Hall, K.R., Smith, G.M., and Turcket, D.J. (1994). "Development of a non-linear porous media flow relationship for oscillatory unsteady flow." *J. of Coastal Research*, 10(1), 158-169.
- 18- Majid Hassanizadeh, S. (1978). "High velocity flow in porous media." *J. of Transport in Porous Media*, 2, 521-537.
- 19- Hall, k., Smith, G.M., and Turcke, D.J. (1994). "Development of a non-linear porous media flow relationship for oscillatory unsteady flow." *J. of Coastal Research*, 10(1) 158-169.
- 20- Wang, X.A., and Liu, Zh.F. (2004). "The Forchheimer equation in two-dimensional percolation porous media." *J. of Physica*, 337, 384-388.
- 21- Shokri, M. (2004), "Investigating parameters affecting nonlinear unsteady flow in porous media." M.Sc. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)