

# به نام خدا



عنوان: مطالعه تجربی نرخ انتقال جرم در فصل مشترک دو محیط متخلخل و غیر متخلخل

استاد پروژه: دکتر علی نوری

محمد امین قاسم زاده 93107246

سال تحصیلی 97-98 ترم دوم

دانشکده مکانیک

## فهرست

3	1 مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته
13	1.1 اهداف تحقیق
14	2 طراحی و ساخت
22	3 جمع آوری داده و خطای اندازه گیری
23	3.1 جدول داده های اندازه گیری
27	3.2 محاسبه خطای اندازه گیری و محاسبات
29	4 نتایج و بحث
36	5 نتیجه گیری
37	6 منابع

## 1. مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته

از دیدگاه کاربردی دستیابی به درکی صحیح از فیزیک جریان عبور کننده از محیط‌های متخلخل اهمیت ویژه ای دارد زیرا که این نوع جریان در صنایع مختلف از جمله انتقال نفت و گاز در سنگ‌های متخلخل، جریان در مخازن زیر زمینی و انتشار آلاینده‌های شیمیایی در اعماق زمین و نفوذ جوهر در کاغذ نقشی اساسی دارد. اغلب مثال‌های مذکور نه تنها به جریان‌های تک فاز بلکه به جریان‌های چندفازی مرتبط می‌شوند.

تحقیقات در زمینه ی جریان سیال و انتقال حرارت در محیط های متخلخل در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است و دلیل آن به کاربرد گسترده محیط های متخلخل در صنعت از جمله تولید نفت خام، عایق کاری بهینه ساختمان ها، خنک کاری فلاسک های سوخت هسته ای و مبدل های حرارتی بازیاب بر می‌گردد. در ادامه به پاره‌ای از کاربردهای مواد متخلخل در صنایع مختلف اشاره می‌گردد. مواد متخلخل در راکتورهای کاتالیستی فشرده، خشک‌کن ها، فرآیندهای فیلتراسیون، انتقال جرم درون غشاهای بسترهای کروماتوگرافی فشرده کاربرد دارند.

مواد متخلخل در مطالعات مربوط به جریان‌های آب زیر زمینی، حرکت آلودگی‌های زیر زمینی، مدیریت انرژی‌های زمین گرمایی، فرایند تمیزکاری خاک با تزریق بخار کاربرد دارند.

مواد متخلخل در سیستمهای خنک‌کاری جذبی تک فاز و دو فاز، لوله‌های گرمایی فتیله‌ای، عایقکاری ساختمان‌ها، جمع‌آوری انرژی‌های زیر زمینی، بهبود انتقال حرارت از طریق افزایش سطح تماس، خنک‌کاری راکتورهای هسته‌ای، فرآیندهای رطوبت‌زدایی کاربرد دارند.

مواد متخلخل در جریان نفت و گاز در مخازن، فرآیندهای تولید نفت، فرآیندهای تولید گاز طبیعی کاربرد دارند.

منظور از محیط متخلخل ماده‌ای است متشکل از یک شبکه جامد که توسط فضاها یا منفذهای خالی بین آنها به هم متصل شده‌اند. فضاهای خالی موجود بین شبکه جامد امکان جاری شدن سیال در این شبکه را فراهم می‌آورند. در یک محیط متخلخل طبیعی توزیع منفذها از نظر شکل و اندازه به صورت بی قاعده و نامنظم می‌باشند. شن ساحل، سنگ آهک و ریه انسان نمونه‌هایی از مواد متخلخل طبیعی می‌باشند. در مقیاسهای کوچک و قابل قیاس با اندازه منفذها کمیت های جریان مانند سرعت و فشار نیز کاملاً بی قاعده و نامنظم خواهند بود، اما مشاهدات تجربی نشان داده‌اند که در ناحیه‌هایی متشکل از تعداد زیادی منفذ متوسط کمیات جریان رفتارهایی با قاعده نسبت به زمان و مکان داشته و بنابراین می‌توان بحث‌های تئوریک برای آنها ابداع نمود. این که بتوان اجزاء سیال را به صورت ناحیه‌هایی متشکل از تعداد زیادی منفذ در نظر گرفت یا خیر به فاصله ی ناظر از محیط متخلخل بستگی دارد. در صورتی که فاصله ناظر کم باشد، ناظر تنها یک یا دو مجرا

را مشاهده خواهد کرد. در این صورت به شیوه‌های سنتی مکانیک سیالات می‌توان رفتار سیال را توصیف کرد، اما چنانچه فاصله ناظر از محیط زیاد باشد، تعداد زیادی مجرا و حفره در دید ناظر قرار خواهد گرفت. در این صورت روش‌های متوسط‌گیری حجمی برای توصیف رفتار سیال و ساده‌سازی مسئله بسیار مفیدتر و کارآمدتر خواهد بود.

روش معمول برای بدست آوردن معادلات حاکم بر مسئله این است که از معادلات سنتی حاکم بر مسئله شروع کرده و با متوسط‌گیری روی ناحیه‌هایی متشکل از تعداد زیادی منفذ، معادلات حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل بدست آورده می‌شوند. این روش به روش متوسط‌گیری حجمی محلی<sup>1</sup> مشهور می‌باشد. در این روش کمیت‌های ماکروسکوپی که به صورت یک مقدار متوسط مناسب بر روی یک حجم نمایند<sup>2</sup> تعریف می‌شوند. مقدار متوسط کمیت‌های جریان باید از اندازه حجم نماینده انتخابی مستقل باشند، همچنین ابعاد حجم نماینده باید بسیار بزرگتر از ابعاد منفذها و بسیار کوچکتر از ابعاد حوزه حل انتخاب گردد. در زیر یک حجم نماینده به صورت نمونه نمایش داده شده است.

تخلخل یک محیط متخلخل به صورت کسری از حجم کل محیط که توسط سیال اشغال می‌شود، تعریف شده و با نماد  $\varepsilon$  نمایش داده می‌شود. بنابراین  $\varepsilon = 1 - \varepsilon_s$  برابر با کسری از محیط خواهد بود که توسط ماده جامد اشغال شده است. مقدار تخلخل محیط برای محیط‌های متخلخل طبیعی رایج از مقدار  $0/6$  تجاوز نمی‌کند. برای بسترهای متخلخل متشکل از ذرات کروی جامد با قطر یکنواخت مقدار تخلخل از  $0/2595$  برای آرایش رومبوهدرال تا  $0/4764$  برای آرایش مکعبی ذرات تغییر می‌کند.

مقدار تخلخل برای مواد متخلخل متشکل از ذرات غیر یکنواخت کوچکتر از مواد تشکیل شده از ذرات یکنواخت خواهد بود، زیرا در این حالت ذرات کوچکتر می‌توانند فضاهای خالی ایجاد شده توسط ذرات بزرگتر را پر کنند. برای مواد متخلخل مصنوعی مانند فوم‌های فلزی مقدار تخلخل را می‌توان به اندازه دلخواه به یک نزدیک کرد.

کوزتسوف [1] "حل تحلیلی جریان سیالات در ناحیه سطح مشترک ماده متخلخل با جریان سیال در کانال‌هایی پوشیده شده بصورت جزئی با ماده متخلخل" بررسی نمود. خلاصه‌ی مقاله در زیر اشاره شده است:

"در این تحقیق حل تحلیلی برای جریان پایا، لمینار و توسعه یافته در کانال‌های مستطیلی و استوانه‌ای پوشیده شده با مقدار جزئی از ماده متخلخل مورد تحلیل قرار گرفته است. معادله برینکمن-داریسی مورد حل قرار گرفته است. همچنین حلی برای اثرات مرزها و شرایط پرش تنش مورد تحلیل قرار گرفته است. مستقل

---

<sup>1</sup> Local volume averaging technique

<sup>2</sup> Representative elementary volume

بودن سرعت در عدد دارسی و ضریب تعدیل پذیر شرایط پرش تنش مورد تحقیق قرار گرفته شده است. در نهایت معلوم شده است که پرش در تنش در نهایت بر پروفیل سرعت تاثیرگذار است."

در سال 2005 جمعی از افراد در دانشگاه وینسکانسین [2] از دپارتمان مکانیک بر روی مقاله ی "توسعه یافتن جریان سیال و انتقال گرما در کانالی پر شده به صورت جزئی با ماده متخلخل" کار کردند. خلاصه ای از مقاله در زیر آورده شده است:

"مدل سه بعدی عددی ای برای آنالیز جریان سیال در کانال با مواد متخلخل توسعه داده شده است. برای اینکه حل مسئله به خوبی فهمیده شود، معادله ی همرفتی نویر-استوکس و معادله ی حجم متوسط نویر-استوکس در مواد متخلخل در حل مسئله مورد استفاده قرار گرفته شده است. پایستگی جرم، مومنتوم و انرژی به صورتی عددی برای مسئله ی کوپل شده گاز و ماده متخلخل در طول یک کانال با روش گردابه-سرعت و شماتیک قانون توان حل شده است. در نهایت جزئیات سرعت محوری، جریان ثانویه و پروفیل دما در خروجی ارائه شده است. عامل اصطکاک و عدد ناسلت بعنوان تابعی از طول محوری ارائه شده اند و در نهایت تاثیر اندازه ی ماده متخلخل در کانال مورد آنالیز و تحلیل قرار گرفته شده است."

در سال 2006 کوپا [3] پایان نامه ی ارشد خود را با عنوان "جریان و انتقال گرما در کانال دو بعدی پر شده به صورت جزئی با ماده متخلخل" در دانشگاه تنسی مطرح کرد. خلاصه ای از پایان نامه ی وی در زیر آورده شده است:

"فوم گرافیت که در آزمایشگاه اوک ریدج توسعه یافته است خواص عالی ترمودینامیکی از نشان داده است که پتانسیل زیادی میتواند برای مولد های گرمای فشره داشته باشد. در این مقاله جریان و انتقال گرما در حالت دو بعدی در یک کانال که قسمتی از آن با فوم گرافیتی مورد نظر پوشیده شده است مورد مطالعه قرار گرفته شده است. جریان غیر قابل فشرده شدنی از آب در نرم افزار تجاری COMSOL Multiphysics مدل شده است. جریان ورودی بصورت یکنواخت و شار گرمایی ثابتی برای برای مرز های گرافیت در نظر گرفته شده است. ضریب گذر و طول بی بعد ماده متخلخل متغیر می باشند. شار گرمایی 100 و 300 کیلووات برای رینولدز های 1000 و 2000 در نظر گرفته شده اند. نتایج زیر حاصل شده است:

1. عامل اصطکاک با افزایش عدد رینولدز و ضریب گذر، کاهش می یابد. همچنین با افزایش ارتفاع ماده متخلخل نیز به صورت نمایی افزایش می یابد.

2. عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز، ارتفاع و ضریب گذر، افزایش می یابد.

3. بیشینه ی دما در سطح با افزایش عدد رینولدز، ارتفاع و ضریب گذر، کاهش می یابد.

4. پارامتر بی بعدی برای تاثیرگذاری تعریف شده است که به صورت خطی با شار گرمایی افزایش و به سرعت با افزایش عدد رینولدز کاهش می یابد. برای مثال وقتی عدد رینولدز 2 برابر شود، ضریب تاثیر گذاری به یک هشتم کاهش می یابد.

همانطور که قابل مشاهده است اکثریت مقالات و کار های انجام شده در این قسمت بر اساس حل تحلیلی، عددی و شبیه سازی هستند. مطالعات تجربی و آزمایش کم انجام شده است که می تواند زمینه مناسب کار ما در این پروژه باشد.

از سوی دیگر جریان آب در خاک و مسائل وابسته، توسط دانشمندان علوم خاک، نفت، محیط زیست و هیدروژئولوژی از دیر باز تاکنون مورد توجه بوده است. در صورت دسترسی به سنگ مناسب در محیط، سدهای سنگریزه-ای ابزاری مقرون به صرفه و سریع برای جلوگیری از سیلاب و اهداف کنترلی هستند. اما طراحی مناسب و رضایت بخش سدهای سنگریزه‌ای تنها با آگاهی از هیدرولیک جریان این نوع سدها میسر خواهد بود. پروفیل خط نشت در سدهای سنگریزه‌ای به دو دلیل مورد توجه است، نخست آنکه برخلاف سدهای خاکی که هدف آن‌ها کم کردن نفوذ است، بعضاً نفوذ عمده و قابل توجه است البته در مورد سدهای خاکی توجه به سطح نشت خروجی مهم است زیرا که در یک دبی خاص پایین دست سازه‌های سنگریزه‌ای و زهکش‌های معادن مستغرق خواهد شد. علاوه بر آن سطح نشت مشاهده شده در پایین دست سازه‌های سنگریزه‌ای یکی از شرایط مرزی مسئله نشت برای مدل سازی فشار منفذی است. آگاهی از موقعیت سطح نشت در وجه پایین دست سدهای خاکی، محاسبات فشار منفذی را تسهیل می کند. آگاهی از توزیع فشار منفذی در بدنه سدهای سنگریزه‌ای در محاسبات مربوط به هدایت هیدرولیکی بسیار مهم است [4-6].

از این رو تحقیقات متعددی جهت بررسی پروفیل خط نشت در شرایط مختلف جریان در بالادست و پایین دست سازه‌های سنگریزه‌ای انجام شده است [6-8]. یکی از نخستین مطالعات انجام شده به روی مدل سازی پروفیل خط نشت به روش جریان متغیر تدریجی توسط ویلکینز انجام شده است [9]. در ادامه تحقیقات این حوزه، استفنسون [10] با استفاده از انتگرال گیری تحلیلی از معادله دیفرانسیل معمولی به مطالعه جریان متغیر تدریجی پرداخت. اما معادله تحلیلی استفنسون تنها قابل تعمیم به جریان آشفته کاملاً توسعه یافته می باشد.

مطالعه‌ی آزمایشگاهی جریان متغیر تدریجی درون مصالح سنگریزه‌ای بری و هانسن [11] نشان داد که در شرایط کوچک بودن گرادیان هیدرولیکی، تطابق بسیار خوبی بین نتایج جریان متغیر تدریجی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. آن‌ها اذعان نمودند که بسیاری از فرضیات مربوط به جریان‌های متغیر تدریجی برای جریان درون محیط‌های متخلخل قابل کاربرد است. اما یکی از فرضیات محدود کننده در این زمینه توزیع فشار هیدرو استاتیک در راستای قائم می باشد.

سامانی و همکاران [12] با ارائه یک تعریف جدید از مفاهیم شعاع و افت هیدرولیکی و تلفیق آن با رابطه پیوستگی به نتایج جدیدی دست یافتند. در تحقیقی دیگر از سامانی و همکاران [13] با استفاده از مفهوم

حجم کنترل و تلفیق آن با معادلات روندیابی مخزن، الگوریتم جدیدی برای روندیابی سیلاب درون سدهای سنگریزه‌های ارائه کردند.

آسیابان و همکارانش [14] روشی عددی را برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در سدهای سنگریزه‌های ناهمگون توسعه دادند. روش پیشنهاد شده توسط این محققان، شکل اصلاح شده معادله جریان متغیر را به روش گام مستقیم حل می‌نماید. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل ارائه شده و نتایج تجربی نشان دهنده‌ی توانایی مدل است.

مرادی و امیری [15] رابطه جدیدی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت در محیط متخلخل ارائه دادند. آن‌ها هدف تحقیق خود را ارائه‌ی روابط با بازهی کاربردی بیشتر معرفی کردند به‌گونه‌ای که در طیف گسترده‌تری از تخلخل و دانه‌بندی ذرات سازنده محیط متخلخل قابل کاربرد باشد. بدین منظور با استفاده از بخش عمده‌ی نتایج آزمایشگاهی موجود و تجزیه و تحلیل آن‌ها، رابطه جدیدی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت در محیط متخلخل ارائه کردند.

همان‌گونه که از بررسی ادبیات پژوهش مشخص است، محققان از روش‌های مختلفی برای مطالعات خود بهره گرفته‌اند. همچنین به علت دشواری تحلیل‌های تجربی، استفاده از شبیه‌سازی عددی به عنوان راهکاری مفید و مکمل متداول می‌باشد. اما شناسایی فیزیک جریان چندفازی در محیط متخلخل مستلزم بکارگیری ابزار عددی دقیق و قابل اعتمادی می‌باشد. جریان‌های چندفازی در محیط‌های متخلخل معمولاً با استفاده از شبیه‌سازی در مقیاس ماکرو مدل می‌شوند، که در آن معادله پیوستگی همراه با معادله حرکت، معادله تعادل گونه‌ها حل شده و معادلات ساختاری مانند قانون داریسی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مدل‌های توسعه یافته براساس اعتبار روابط ساختاری (به عنوان مثال گسترش چند فازی قانون داریسی)، نیاز به برخی ورودی‌ها برای پارامترهای نیمه‌تجربی دارند (به‌عنوان مثال نفوذپذیری نسبی). همچنین این مدل‌ها مشکلاتی برای محاسبه عدم تجانس و اتصال منافذ پیچیده و مورفولوژی دارند [16]. در نتیجه شبیه‌سازی‌های با دیدگاه ماکرو همیشه نمی‌توانند اثرات مرتبط با ساختار میکرو در جریان‌های چند فازی را محاسبه کنند.

در مقابل شبیه‌سازی در مقیاس میکرو قادر به محاسبه مواردی از قبیل عدم تجانس، اتصال و رفتار جریان غیریکنواخت است که در مقیاس ماکروسکوپی به خوبی حل نمی‌شود. علاوه بر این، شبیه‌سازی در مقیاس میکرو می‌تواند اطلاعات دقیق محلی برای توزیع سیال و سرعت آن را فراهم کند و به صورت امیدوار کننده‌ی اجازه می‌دهد که مدل‌ها و معادلات ساختاری جدید در مقیاس ماکروسکوپی ساخته و آزمایش شوند.

از طرف دیگر روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی معمول مانند روش کسر حجمی سیال و روش تنظیم سطح، جریان‌های چندفازی را با حل ماکروسکوپی معادلات ناویر استوکس همراه با یک روش مناسب برای رهگیری سطح بین دو فاز شبیه‌سازی می‌کنند. آنچه در استفاده از روش‌های کسر حجمی سیال و تنظیم سطح برای شبیه‌سازی در مقیاس میکرو در جریان‌های چندفازی در محیط متخلخل چالش برانگیز است،

مشکلات موجود در مدل‌سازی و ردیابی دینامیک بین فازهاست. از دیگر مشکلات به کارگیری روش‌های مذکور آن است که اثرات سطحی بین مایع و جامد (به عنوان مثال ترشوندگی سطح) در ساختار منافذ پیچیده، که ناشی از فعل و انفعالات بین مایع و جامد در اندازه میکرو هستند، لحاظ نمی‌شود.

برخلاف روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی که مبتنی بر حل‌های متغیرهای ماکروسکوپی مانند سرعت، فشار و چگالی هستند، روش شبکه بولتزمن یک روش شبه مولکولی است که با تابع توزیع ذرات مجموعه‌ای از مولکول‌ها کار می‌کند. در این روش که براساس مدل‌های میکروسکوپی و معادلات سنتیک مزوسکوپی [17] ساخته شده است، متغیرهای ماکروسکوپی از انتگرال لحظه‌ای تابع توزیع ذرات به دست می‌آید.

روش شبکه بولتزمن روشی مناسب برای حل جریان در هندسه‌های پیچیده می‌باشد. تحقیقات متعددی به موفقیت آمیز بودن این روش در مطالعه‌ی پدیده‌ی پخش و ترشوندگی [18-20]، ایجاد و برخورد حباب‌ها [21-23] و شبیه‌سازی جریان درون محیط‌های متخلخل اذعان نموده اند [24-26]. برخلاف روش‌های سنتی، در روش شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی جریان چندفازی، سطح مایع-مایع یک خط مادی نیست بلکه یک سطح پخش شده با عرض محدود است و شیب موثر خط تماس توسط دیفیوژن نسبی دو سیال در مجاورت خط تماس ایجاد می‌شود. از این‌رو نیازی به تکنیک‌های پیچیده ردیابی سطح تماس در روش‌های سطح تماس پخشی وجود ندارد و تغییر شکل و انتقال سطح تماس به عنوان یکی از نتایج شبیه‌سازی مشخص می‌شود [27]. لازم به ذکر است که برای تعیین ویژگی‌های جریان گذرکننده از منافذ، استفاده از میکرومدل‌های فیزیکی (که غالباً از شبکه‌های مویرگی شبه دوبعدی ساخته می‌شوند) توصیه می‌شود [28].

امروزه مواد متخلخل کاربردهای متعددی در زمینه‌های مختلف مهندسی پیدا کرده‌اند. منافذ داخل محیط متخلخل می‌تواند کاملاً رندم و تصادفی باشد. در کلی‌ترین حالت ممکن، حرکت سیال در منافذ موجود در مواد متخلخل، می‌تواند یک الگوی سه بعدی داشته باشد. البته در کاربردهای خاص‌تر که نیاز است تا ماده متخلخل به صورت مصنوعی ساخته شود، منافذ عبوردهنده سیال، می‌توانند دارای چیدمان‌های یک‌بعدی و یا دوبعدی نیز باشند. از جمله کاربردهای مهم این مواد استفاده در زمینه جداسازی ذرات محلول در سیالات مختلف، بهینه‌سازی عایق‌های حرارتی، افزایش انتقال حرارت به صورت موضعی، تصفیه مواد در صنایع بیولوژیک، ساخت کامپوزیت‌ها و صنایع الکترونیک می‌باشد. [29]

خواص متعددی در ارتباط با این مواد تعریف می‌شود که یکی از کاربردی‌ترین خواص، میزان نفوذپذیری محیط است که عموماً به صورت بی‌بعد گزارش می‌شود.

مطالعات اولیه در این زمینه به آزمایش‌های داری برمی‌گردد. داری از وجود یک رابطه خطی بین افت فشار ایجادشده در طول واحد و سرعت میانگین سطحی خبر داد. وی رابطه زیر را پیشنهاد کرده است:

$$-\nabla P = \frac{\mu U_d}{K}$$



در این معادله  $\mu$  گرانروی سیال،  $U$  میانگین سرعت سطحی،  $K$  نفوذپذیری محیط متخلخل و  $P$  افت فشار در طول واحد می‌باشد. [5]

این رابطه مکررا در مقالات مورد استناد واقع شده و مناسب جریان خزشی است. اغلب برای پیدا کردن افت فشار به‌ویژه در شرایطی که رژیم حاکم بر جریان از نوع خزشی است ( $Re < 1$ ) از معادله داریسی استفاده می‌شود. مدل برینکمن- فریچهمر در واقع گسترش یافته مدل داریسی است و از این معادله زمانی استفاده می‌شود که رژیم جریان خزشی نیست (اعداد رینولدز متوسط و بالا). در این حالت، اثرات اینرسی در محیط متخلخل می‌بایست در نظر گرفته شوند.

به اجزای سازنده ماتریس یک محیط متخلخل، میکروالیاف‌های ساختاری یا فیبرهای ساختاری گفته می‌شود. سطح این فیبرهای جامد، عموماً به صورت نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود و سیال عبوری از بین این ماتریس جامد، قابلیت نفوذ به داخل این فیبرها را نخواهد داشت. میزان نفوذپذیری یک محیط در حالت کلی تابعی از شکل فیبرها، نحوه قرارگیری آن‌ها نسبت به جریان و همچنین نحوه توزیع آن‌ها در راستاهای مختلف می‌باشد. تاکنون روش‌های عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی متفاوتی توسط پژوهشگران جهت پیش‌بینی خصوصیات جریان در مواد متخلخل به کار رفته است. حل‌های تحلیلی صورت گرفته اغلب محدود به جریان‌های خزشی و دارای یک یا چند فیبر استوانه‌ای اند.

با بررسی دقیق این مرجع، می‌توان گفت که مطالعات در این زمینه به آزمایش‌های کارمن [30] و سالیوان [31] در حدود سال‌های ۱۹۴۰ برمی‌گردد. چندین روش حل تحلیلی در دهه ۵۰ میلادی، توسط کاوابارا [32]، هاسیوتا [33]، هاپل [34]، اسپاراو و لوتفلر [35] و سپس در دهه ۷۰ میلادی توسط هاپل و برنر [36] پیشنهاد شد که در ادامه به بررسی دقیق‌تر هر یک از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

کاوابارا [32] در محل‌هایی که تنش برشی وجود نداشت از جریان‌های گردابه‌ای صرف‌نظر کرد. وی، با استفاده از شرایط مرزی محدودشده خود، توانست تابع جریان را برای محیط‌های متخلخل دارای آرایش‌های تصادفی حل کند و نفوذپذیری این محیط‌ها را در میزان تخلخل‌های بالا به دست آورد.

هاسیوتا [33] نفوذپذیری مواد متخلخل تحت جریانی عمود بر محور میکرو ساختارهای آن را تعیین کرد. میکروفیبرهای موجود در مدل وی [34]، دارای سطح مقطع دایروی بودند. وی از روش حل سری جهت تحلیل معادلات حاکم برای مدل خود استفاده کرد.

هاپل [34] و اسپاراو و روتفلر [35] در دهه ۵۰ میلادی تحقیقاتی را پیرامون نفوذپذیری در محیط دارای میکروفیبرهای موازی با جریان و با رویکرد کاربرد این هندسه در مبدل‌های حرارتی صورت دادند. هاپل با در نظر گرفتن سلول واحد دایره‌ای شکل که در مرکز آن یک میکروساختار استوانه‌ای قرار می‌گرفت، مدل خود را تعریف کرد. رویکرد وی در انتخاب شرایط مرزی (برای مدل تحلیلی خود)، به نوعی محدود شده بود

به طوری که میزان تنش برشی را در روی حجم کنترل سلول واحد مدل، صفر در نظر گرفت. به هر حال، پیش‌بینی روش وی برای میزان نفوذپذیری جریان‌های موازی، در مواردی که نسبت تخلخل محیط پایین بوده و میکروفیبرهای مجاور بر روی شرایط یکدیگر اثر گذارند، غیردقیق است.

در همان دهه، تحقیقاتی توسط اسپاراو ولوفلر بر روی مواد متخلخل با چیدمان‌های مربعی و شطرنجی صورت گرفت. آنان معادله پواسون را در دستگاه مختصات استوانه‌ای، برای مدل خود به کار بردند و بعد از به دست آوردن حل عمومی، با اعمال شرایط مرزی، ضرایب مربوط به حل سری را به صورت تابعی از نسبت تخلخل محاسبه کردند. در نهایت، آنان موفق به پیشنهاد رابطه‌ای شدند که تنها در میزان تخلخل‌های بالا دقت کافی داشت.

هاپل و برنر [36] معادله استوکس را برای جریان آزاد پیرامون یک استوانه و در وضعیت‌های عمودی و موازی با محور آن مورد بررسی قرار دادند. آنان از هرگونه تنش برشی در مدل خود صرف‌نظر کرده و همچنین توزیع سرعت را در ورودی به صورت کاملاً یکنواخت در نظر گرفتند. شرایط مرزی آنان با شرایط انتخابی توسط کاوابارا متفاوت است. طبق فرضیه آنان میزان مقاومت در برابر نفوذپذیری جریان، برای مواد متخلخل دارای ساختارهای سه بعدی، معادل با  $1/3$  همین مقاومت در حالت موازی به علاوه  $2/3$  آن در حالت عمودی جریان، در محیط‌های دارای ساختارهای یک‌بعدی است.

سانجی و آکریوس [37] نفوذپذیری لزج جریان، به‌ازای نسبت تخلخل‌های مختلف، برای محیط دارای استوانه‌هایی با چیدمان مربعی و متناوب را به دست آوردند. مدل ارائه‌شده توسط مولفان پیش‌بینی دقیقی در میزان تخلخل‌های مختلف دارد. سانجی و یو [38] در ادامه به گسترش مطالعات در زمینه آرایش‌های تصادفی پرداختند. آنان گزارش‌هایی را در زمینه روش‌های حل عددی برای جریان‌های عمود و موازی با محور فیبرهای ساختاری، برای محیط با آرایش یک‌بعدی تصادفی ارائه کردند. دراموند و تهیر [39] معادلات استوکس را برای جریان در حالت‌های متفاوت حل کرده و از روش توزیع تکین برای پیدا کردن میدان جریان در محیط‌های متخلخل با ساختارهای مربعی، مستطیلی، مثلثی و شش وجهی بهره‌بردند. در تحقیق این محققان، نتایج حالت عمودی (بر فیبر جامد) جریان با جواب‌های عددی به دست آمده توسط سانجی و آکریوس، و همچنین جواب برای حالت موازی جریان، با نتایج به دست آمده توسط هاپل و برنر مقایسه شده است. روش داراموند و تهیر در حالت عمودی انطباق بسیار مناسبی با مدل تحلیلی سانجی و آکریوس دارد، به‌همین علت در میزان تخلخل‌های بالا دارای دقت مضاعفی است.

صحرايي و کاویانی [40] با در نظر گرفتن اثرات اینرسی، به صورت عددی به بررسی جریان عمود بر فیبرهای استوانه‌ای پرداختند. رابطه پیشنهادی آنان تنها در بازه محدودی از نسبت تخلخل  $0.4 < \epsilon < 0.7$  دارای دقت مناسبی است.

در سال‌های اخیر، مطالعاتی در شاخه نفوذپذیری در محیط‌های متخلخل یک‌بعدی و دوبعدی توسط سوپرا و کلیچن [41] صورت پذیرفته است. مدل محاسباتی آن‌ها برگرفته از مدل ارائه‌شده توسط کلاچ و همکاران به همراه انجام اصلاحات مناسب در آن مدل می‌باشد. مقایسه نتایج آنان با حل‌های عددی صورت گرفته، گویای دقت بالای روش محاسباتی در نسبت تخلخل‌های بالاست. همچنین، مولفان نفوذپذیری محیط با چیدمان تصادفی فیبرها را به صورت تابعی از فاصله بین این میکروفیبرها و عدد بدون بعد توزیع تصادفی گزارش کردند. پژوهش‌های گسترده دیگری نیز در زمینه مواد متخلخل صورت گرفته است. مواد متخلخل واقعی دارای میکروفیبرهایی با چیدمان‌های تصادفی در راستاهای مختلف می‌باشند. محققان همواره به دنبال یافتن رابطه‌ای بودند که بتوان توسط آن نفوذپذیری چنین محیط‌هایی را در حالت کلی و با آرایش کاملاً تصادفی اش پیش‌بینی کرد. برای دستیابی به این مهم، از تحلیل جریان در وضعیت‌های یک‌بعدی و دوبعدی و بسط نتایج آن برای جریان‌های سه‌بعدی می‌توان استفاده کرد.

مدل پیشنهادشده توسط جکسون و جیمز [42] نیز بر همین اساس می‌باشد. پژوهش صورت گرفته توسط این محققان، بر روی مواد با جنس‌های مختلف از جمله مواد پلیمری با زنجیره‌های مختلف و پلاستیک‌های فایبرگلاس بود. همچنین مدل ارائه شده برای جریان با عدد رینولدز کم و نسبت تخلخل بالا برقرار می‌باشد. رابطه پیشنهادشده در این مرجع از طریق انجام آزمایش به دست آمده است. جکسون و جیمز در روش تئوری خود موفق به ارائه یک روش حل دقیق برای معادله ناویر-استوکس حاکم بر محیط متخلخل بی‌قاعده (دارای چیدمان تصادفی) شدند.

تاماداکیس و استریچس [43] نفوذپذیری یک ماده متخلخل غیرهمگن و دارای الیاف در بسترهای همپوشانی‌شده را در حالات مختلف یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند. گرچه نمونه‌های آن‌ها همه حالات توزیع تصادفی را شامل می‌شد، اما در اغلب موارد تفاوت‌های موجود بین پیش‌بینی روش آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی چشم‌گیر است.

آولاندا و ترکیوتو [44] با استفاده از ایجاد تشابه بین رسانایی الکتریکی و نفوذپذیری جریان، یک حد بیشینه‌ای برای نفوذپذیری در محیط‌های متخلخل پیشنهاد کردند. تاماداکیس و روبرتسون با بررسی نتایج آزمایشگاهی اظهار داشتند که به دست آوردن حد کمینه و بیشینه برای نفوذپذیری، مربوط به حالت‌های موازی و عمودی جریان در ساختارهای دارای میکروفیبرهای یک‌بعدی است.

پژوهش‌های آزمایشگاهی مختلفی نیز در زمینه بررسی نفوذپذیری محیط‌های متخلخل وجود دارد [45-51]. مروری از تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌شده به صورت خلاصه در جکسون و جیمز، استروم و همکاران [52] و تاماداکیس و روبرتسون آمده است. خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته در این پژوهش‌ها به صورت زیر است:

۱. در تحقیقات صورت گرفته توجه کمتری به میکروالیاف‌های با سطح مقطع غیردایره‌ای شده است.

۲. بیشتر حل‌های صورت‌گرفته به صورت برآزش یک منحنی بر داده‌های به‌دست آمده از روش‌های آزمایشگاهی یا عددی است و روش‌های تحلیلی کمتر مورد توجه بوده‌اند.

۳. مدل‌های تحلیلی موجود جامعیت کافی ندارند و همچنین در تمام نسبت تخلخل‌ها دارای دقت مطلوب نیستند.

۴. در بیشتر پژوهش‌های صورت‌گرفته نمایه سرعت در ابعاد سلول واحد به‌دست نیامده است.

۵. در پژوهش‌های صورت‌گرفته، کم‌تر از آنالیز مقیاسی برای تعیین میزان نفوذپذیری استفاده شده است.

اخیراً، تمایل و بهرامی [53] نفوذپذیری محیط‌های متخلخل با ساختارهای مختلف را در مقابل جریان‌های موازی و عمودی نسبت به محور میکروالیاف‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. آنان از مفهوم سلول واحد جهت مدل‌سازی و همچنین جهت تحلیل مدل خود از تکنیک انتگرالی استفاده کردند. آنان با فرض وجود یک توزیع سرعت سهموی برای نمایه سرعت در داخل سلول واحد و انتگرال‌گیری از معادلات بقای جرم و ممنتوم، روابط تحلیلی فشردگی را برای افت فشار و نفوذپذیری در یک سلول واحد از محیط متخلخل مورد نظر به‌دست آوردند. هندسه انتخابی، دارای سطح مقطع دایره‌ای بود. نتایج نهایی پژوهش آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده توسط ژانگ و دیگران تطابق بسیار خوبی در همه میزان تخلخل‌ها دارد.

## 1.1 اهداف تحقيق

هدف از انجام اين پروژه تعيين تجربى نرخ نفوذ يك سيال از يك محيط به محيط ديگر در فصل مشترك دو محيط در يك كانال نيمه متخلخل است. كانالى كه بخشى از طول آن توسط ماده متخلخل اشغال شده باشد. موقعيت قرار گيرى ماده متخلخل داخل كانال متغير و ميتواند بصورت يك لايه در اطراف سطح داخلى تمام و يا بخشى از آن را اشغال كرده باشد. از کاربردهاى كانال نيمه متخلخل ميتوان به پيل سوختى، انواع فيلتر هاى هوا و روغن اشاره نمود. بعلت افت فشار، انتظار ميرود كه سيال از محيط متخلخل بطرف بخش غير متخلخل نفوذ كند و مقدار آن در طول مسير تغيير نمايد. اين تغيير جرم به ابعاد كانال، ضخامت لايه متخلخل، فشار سيال ورودى، ويسكوزيته، درصد تخلخل و نفوذ پذيرى ماده متخلخل بستگى دارد.

اجراى كار ابتدا با مطالعات اوليه روى مبانى تئورى و تجربى كانال هاى نيمه متخلخل شروع شده و سپس با طراحى و ساخت دستگاه آزمايش ادامه مى يابد.

## 2. طراحی و ساخت

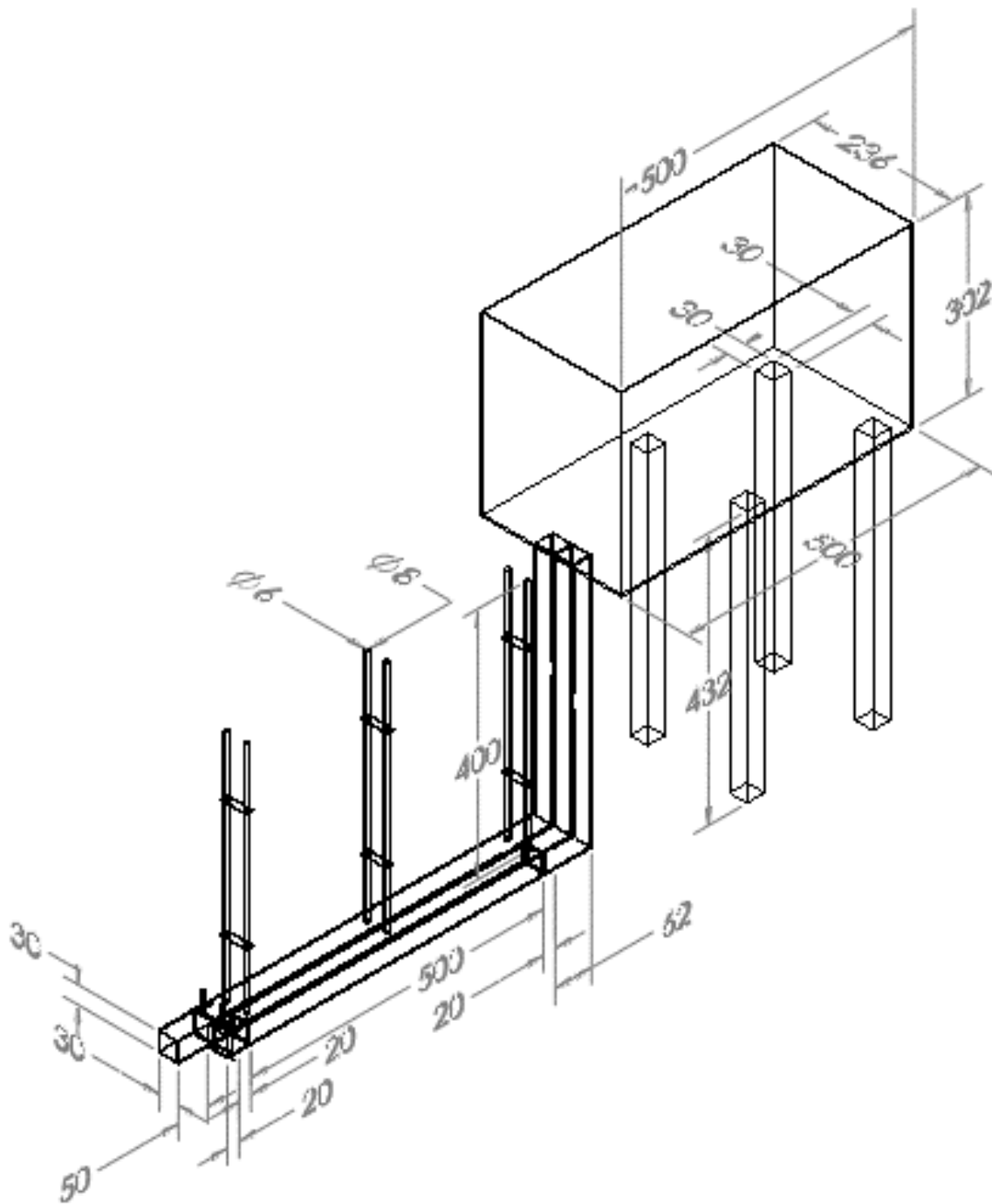
تعیین فشار در مقاطع مختلف

طول نفوذ آب از ماده متخلخل به کانال بدون ماده متخلخل

محاسبه دبی در خروجی

محاسبه دبی نفوذی از ماده متخلخل به محیط خارجی

محاسبه درصد تخلخل ماده متخلخل



شکل 2.1 نمای کلی دستگاه آزمایش

جنس بدنه از پلکسی گلس شفاف با ضخامت 2 میلی متر می باشد. پلکسی دارای استحکام مناسب می باشد. همچنین کار با آن راحت هست و امکان برش دقیق با لیزر را دارد. شفاف بودن آن باعث می شود که جریان آب در کانال ها دیده شود.

بدنه اصلی باید شامل دو کانال موازی باشد که در طول 50 سانتی متر با یکدیگر مرز نداشته باشند تا بتوان نفوذ آب از محیط متخلخل به غیر متخلخل را مشاهده نمود. بدنه اصلی از بالا به تانکر وصل شده است و در انتها برای خروج آب آزاد است. سطح مقطع کانال ها مربعی شکل با ابعاد 3cm انتخاب شده است.

سطح مقطع تانکر باید از سطح مقطع کانال ها بیشتر باشد تا تغییرات ارتفاع آب در آن بسیار ناچیز باشد و بتواند. فشار ثابت ایجاد کند.

برای کنترل دبی خروجی دریچه هایی ساخته شده است که امکان تغییر دبی را مهیا می سازد. برای تغییر دبی کافی است پین را در سوراخ مورد نظر وارد کرد تا سطح مقطع خروجی انتخاب شود. همچنین دریچه ها از پایین به سمت بالا حرکت می کنند که باعث می شود آب تا حد امکان در پشت آن به دام بیفتد و مانند سد از بالای آن حرکت کند. در این صورت تا حد امکان از هواگیری در خروجی جلوگیری به عمل می آید.

برای محاسبه فشار در ورودی، خروجی و وسط مرز دو محیط از لوله های پلکسی گلس با قطر داخلی 6 میلیمتر و قطر خارجی 8 میلی متر و طول 40 سانتی متر استفاده شده است. ارتفاع آب بالا آمده در لوله ها فشار کلی در آن مقطع را می گوید.

برای جدا کردن مرز دو محیط از توری استفاده شده است. به دلیل بلند بودن طول توری در مرز دو محیط امکان تاب برداشتن و کج شدن توری وجود دارد. لذا برای جلوگیری از این اتفاق، قاب هایی طراحی شده است که هم از تاب برداشتن توری جلوگیری کند و هم نصب توری در جای خود را راحت تر کند. همچنین در ابتدا و انتهای مرز نفوذ از دو طوری مربعی شکل با قاب استفاده شده است که از جابجایی ماده متخلخل در طول کانال جلوگیری کند.

برای تعیین فشار از لوله های عمود بر سطح در طول 1 و 25 و 49 سانتی متری ماده متخلخل استفاده شده است.

امکان ریختن جوهر در محیط متخلخل اینگونه فراهم شده است که از درون لوله های تعیین فشار، نی حاوی آب و جوهر را فرو برده و پس از رها سازی جوهر، جوهر به درون محیط متخلخل نشت می کند.

با استفاده از خط کش و قرار گیری آن در مرز دو ماده، می توان با فیلم برداری طول نفوذ از محیط متخلخل به غیر متخلخل را بدست آورد.

برای محاسبه ی دبی در خروجی، زمان طول کشیدن یک بشر با حجم 600 mL توسط آب هر کدام از کانال ها را اندازه گیری میکنیم.



گاهی به علت نشست زیاد در دریچه ها و سرعت خروجی زیاد، نیاز هست که از لوله های جمع کننده نشست و جریان خروجی استفاده کرد.

در آزمایش با ورودی دبی های برابر در دو کانال، می توان با کم کردن دبی های خروجی دو کانال از یک دیگر، میزان دبی نفوذی آب از محیط متخلخل به غیر متخلخل را محاسبه نمود.

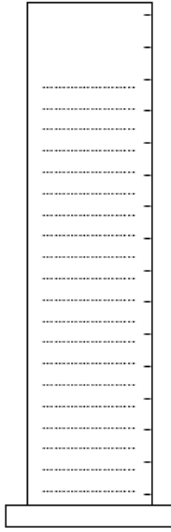
برای محاسبه ی درصد تخلخل، ابتدا یک استوانه مدرج را تا حجم 250 mL از ماده متخلخل پر کرده، سپس آنرا بر روی ترازو گذاشته و جرم را صفر میکنیم. حال شروع به آبریختن در آن میکنیم و اندکی صبر میکنیم تا آب به درون آن نفوذ کند. این کار را آنقدر ادامه می دهیم تا سطح آب کمی بالاتر از سطح ماده متخلخل قرار گیرد. چگالی آب 1 گرم بر میلی لیتر می باشد پس جرم بدست آمده حجم آب نیز می باشد. این حجم برابر حجم هوای خالی بین ذرات ماده متخلخل می باشد.

گاهی چگالی ماده متخلخل از چگالی آب کمتر بوده (مانند یونولیت) و باعث شده که ماده متخلخل بالای آب قرار گیرد. در این حالت از یک توری بر روی ماده متخلخل استفاده میکنیم تا از حرکت ماده متخلخل جلوگیری کند.

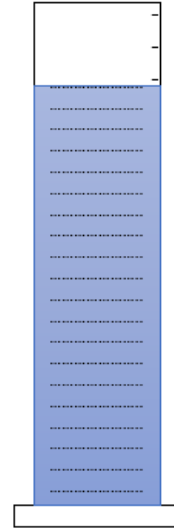
گاهی اعداد گزارش شده در مخرج کسر از 250 mL کمتر بوده، این به این علت است که پس از ریختن آب به درون استوانه مدرج، ذرات ماده متخلخل به یکدیگر چسبیده یا آرایش دیگری به خود میگیرند.

$$\varepsilon = \frac{V_{air}}{V_{total}} = \frac{m_{water}}{m_{total}}$$

ضریب تخلخل :



استوانه مدرج با ماده متخلخل بدون آب



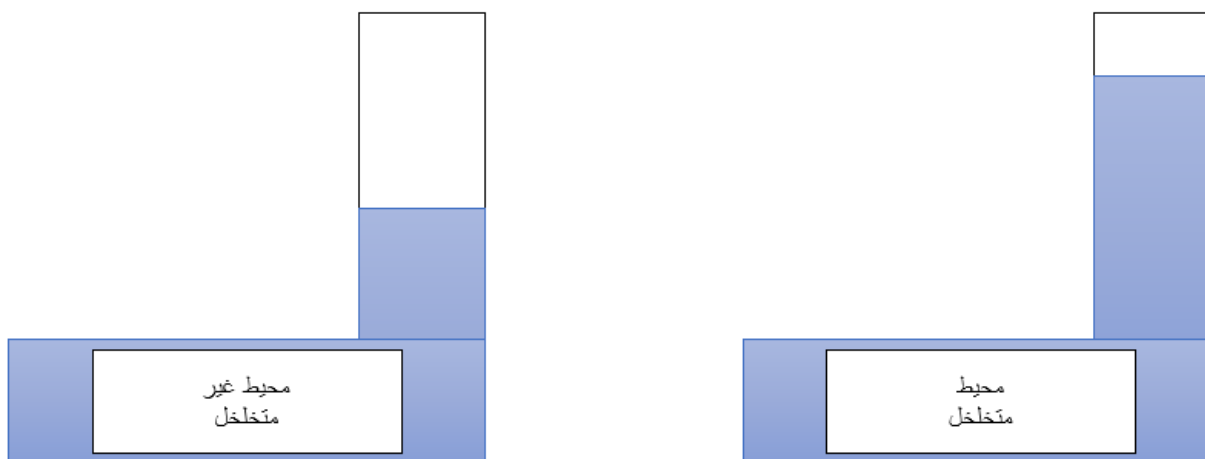
استوانه مدرج با ماده متخلخل با آب  
در حالت کامل امتیاع شده

## شکل 2.2 نحوه اندازه گیری درصد تخلخل

برای تغییر دبی ورودی از یک دریچه با آجر (برای جلوگیری از تکان خوردن) در تانکر استفاده میکنیم. باید حواسمان باشد که سطح مقطع ورودی هر دو کانال باید برابر باشند. همچنین می توان آب ورودی به تانک توسط پمپ را نیز کم و زیاد کرد.

برای تغییر دبی خروجی دریچه را در اندازه مورد نیاز باز کرده و پین را به داخل سوراخ های دریچه قرار می دهیم تا سطح مقطع خروجی تغییر نکند.

برای ایجاد جریان با دبی ها برابر در دو کانال فقط کافی است سطح مقطع ورودی دو کانال در تانکر با هم برابر باشد. در این حالت فشار در ابتدای دو محیط با هم برابر نمی شود و فشار در ماده متخلخل همیشه بیشتر است.



شکل 2.3 اختلاف فشار در کانال ورودی دو محیط

برای ایجاد جریان با فشار های برابر در دو کانال باید آب در کانال های عمودی ورودی به صورت کامل پر شود. این شرایط آزمایش چندین مشکل دارد.

1. فشار در ورودی هر دو محیط برابر است و اختلاف فشاری وجود ندارد. حال هر چقدر آب در مرز دو محیط جلوتر رود به علت افت فشار زیاد در ماده متخلخل، فشار ماده متخلخل در هر مقطع از فشار غیر متخلخل کمتر است. نفوذ به علت اختلاف فشار رخ می دهد. پس از محیط متخلخل به محیط غیر متخلخل نفوذ رخ نمی دهد.

2. به علت بالا بودن فشار در ورودی ها (حداقل  $40 \text{ cm H}_2\text{O}$ ) سرعت آب در خروجی ها بسیار زیاد می باشد که باعث می شود، آب به سرعت تخلیه شود و تانکر عملکرد خود را از دست بدهد. همچنین امکان اندازه گیری و آزمایش نمی باشد زیرا شرایط ثابت نمانده و کل زمان انجام آزمایش به چند ثانیه می رسد.

برای جدایش در مرز دو محیط از توری استفاده شده است.

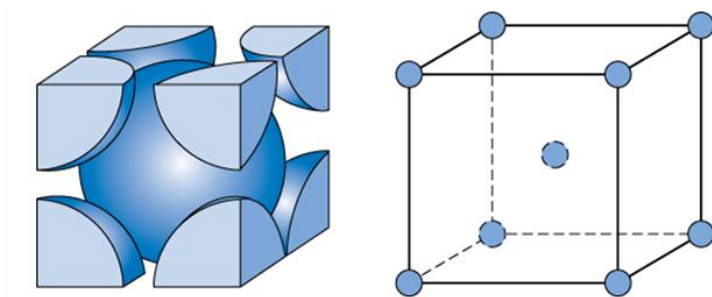
با کم و زیاد کردن دبی های ورودی و خروجی حالت پایا ای برای آزمایش بوجود می آوریم که پرامتر ها تغییر نکنند. پس از پایا شدن به آزمایش می پردازیم.

برای آب بندی کانال های جریان از کلروفوم که ماده حلال پلکسی گلس می باشد استفاده شده است. کلروفوم پس از حل کردن قسمتی از دو محل برخورد، هر دو قسمت را به هم می چسباند. سوراخ های جزئی را با چسب دوجزئی آب بندی میکنیم. در محل قرار گیری دريچه نشتی جزئی وجود دارد که به علت قرار گیری دريچه در زیر می باشد. نشتی های این قسمت را تا حد امکان با گذاشتن لاستیک آب بندی کرده ایم اما باز

هم نشستی جزئی ای وجود دارد که با هدایت کردن نشستی ها به لوله های جهت دهنده ی خروجی جریان، مقدار آنرا به حداقل رسانده ایم. همچنین در بعضی موارد از خمیر بازی نیز برای جلوگیری از نشستی استفاده شده است.

برای تهیه ماده متخلخل سه نوع دانه های یونولیت و پوشال و کاموا نیاز به تلاش زیادی نداشتند. البته پوشال و تار های کاموا تا حدودی کوتاه شدند تا از خطای آزمایش کم کنند. برای بدست آوردن ماسه با سایز مناسب، خاک و ماسه را بین دو الک با سایز های مختلف فیلتر کردیم. (الک بالایی با سوراخ های بزرگتر و الک پایینی با سوراخ های ریزتر) ذرات باقی مانده در الک دوم از الک اول کوچکتر و از الک دوم بزرگتر بودند، یعنی سایز ذرات بین مقادیر خاصی قرار داشت.

ضرایب تخلخل در یونولیت ، خاک و مواد متخلخل کروی را می توان با توجه به هندسه مسئله نیز بدست آورد.



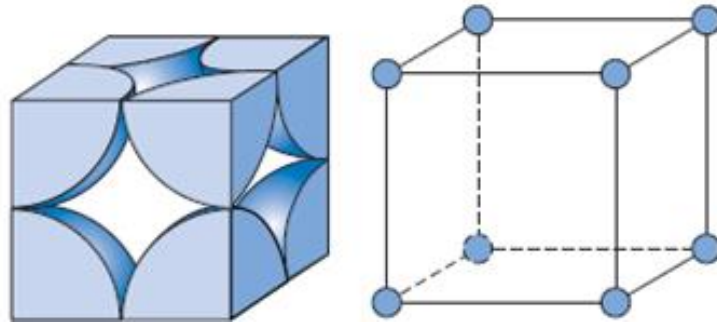
شکل 2.4 پیکربندی BCC

در این حالت ابتدا حجم احاطه شده در مکعب را حساب میکنیم.

$$\sqrt{3}a = 4r \rightarrow r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$$

$$\frac{V_{\text{پر}}}{V_{\text{کل}}} = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = 0.68$$

$$\varepsilon = 1 - 0.68 = 0.32$$



شکل 2.5 پیکربندی SC

$$a = 2r \rightarrow r = \frac{1}{2}a$$

$$\frac{V_{\text{ذرات}}}{V_{\text{کوب}}}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = 0.52$$

$$\varepsilon = 1 - 0.52 = 0.48$$

### 3. جمع آوری داده و خطای اندازه گیری

آزمایش در حالت دبی ورودی برابر انجام شده است. ابتدا ماده متخلخل را درون دستگاه قرار داده و قاب خروجی را می گذاریم تا تکان نخورد. هنگام قرار دادن ماده متخلخل باید حواسمان باشد که با وزن خود درون دستگاه قرار گیرند و ما فشرده نکنیم. سپس دریچه های خروجی را در اندازه دلخواه قرار می دهیم. (مناسب ترین مقدار سوراخ سوم می باشد). مقطع دبی ورودی را نیز کنترل میکنیم. سپس جریان آب را توسط پمپ به راه می اندازیم و صبر میکنیم تا دستگاه در حالت پایا قرار گیرد. سپس به داده برداریم می پردازیم.

داده ها و نحوه محاسبه خطای هر کدام:

برای محاسبه ی فشار طول آب بالا آمده در هر لوله فشار را میخوانیم. لوله ها توسط خط کش مدرج شده و خطای آن ها نیم سانتی متر می باشد.

سپس جوهر را در هر سه لوله فشار ماده متخلخل قرار می دهیم و با فیلم برداری و خط کش طول نفوذ را حساب میکنیم. طول نفوذ طولی است که جوهر از بخش متخلخل به غیر متخلخل نفوذ میکند. داده های این بخش قابل استناد نبوده و خطای بسیاری دارد، اما به صورت کیفی نفوذ را نشان می دهند.

حال دبی را با استفاده از زمان سنج و پر شدن بشر 600 mL محاسبه میکنیم. این قسمت را 3 بار تکرار میکنیم تا خطا بدست بیاید. خطا ماکسیمم تفریق میانگین داده ها با داده ها می باشد.

خطای دبی از فرمول زیر محاسبه می شود.

$$\Delta \dot{V} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{t}\right)^2 + \left(\frac{V}{t^2} \Delta t\right)^2}$$

در انتها با استفاده از ترازو و روش گفته شده در قسمت های قبلی ضریب تخلخل را محاسبه میکنیم.

### 3.1 جدول داده های اندازه گیری

جدول 3.1 توزیع فشار در محیط یونولیت و محیط غیر متخلخل

	X <sub>1</sub> (1 cm)	X <sub>2</sub> (25 cm)	X <sub>3</sub> (49 cm)
P <sub>1</sub> متخلخل (cm H <sub>2</sub> O) ±0.5cm	13	7	4
P <sub>2</sub> غیر متخلخل (cm H <sub>2</sub> O) ±0.5cm	8	7	6.5
طول ورود (cm)	0.8	0	N/A

جدول 3.2 دبی خروجی از محیط متخلخل یونولیت

600 mL	t <sub>1</sub> (s)	t <sub>2</sub> (s)
	15.03	6.09
	15.05	5.89
	14.66	5.97
$\bar{t}$ (s)	14.91	5.98
$\Delta t$ (s)	0.25	0.11

$$\text{ضریب تخلخل یونولیت} : \varepsilon = \frac{V_{air}}{V_{total}} = \frac{m_{water}}{m_{total}} = \frac{92}{230} \approx 0.4$$

جدول 3.3 توزیع فشار در محیط پوشال و محیط غیر متخلخل

	X <sub>1</sub> (1 cm)	X <sub>2</sub> (25 cm)	X <sub>3</sub> (49 cm)
P <sub>1</sub> متخلخل (cm H <sub>2</sub> O) ±0.5cm	5.5	4.5	3.5
P <sub>2</sub> غیر متخلخل (cm H <sub>2</sub> O) ±0.5cm	5	4.5	4
طول ورود (cm)	1	0	N/A

جدول 3.4 دبی خروجی از محیط متخلخل پوشال

600 mL	t <sub>1</sub> (s)	t <sub>2</sub> (s)
	9.77	7.97
	9.53	7.86
	9.55	7.91
$\bar{t}$ (s)	9.62	7.91
$\Delta t$ (s)	0.15	0.06

$$\text{ضریب تخلخل پوشال} : \varepsilon = \frac{V_{air}}{V_{total}} = \frac{m_{water}}{m_{total}} = \frac{190}{240} \approx 0.8$$



جدول 3.5 توزیع فشار در محیط خاک و محیط غیر متخلخل

	X <sub>1</sub> (1 cm)	X <sub>2</sub> (25 cm)	X <sub>3</sub> (49 cm)
P <sub>1</sub> متخلخل (cm H <sub>2</sub> O) ±0.5cm	20	8	7
P <sub>2</sub> غیر متخلخل (cm H <sub>2</sub> O) ±0.5cm	8.5	8	7.5
طول ورود (cm)	0.5	0	N/A

جدول 3.6 دبی خروجی از محیط متخلخل خاک

600 mL	t <sub>1</sub> (s)	t <sub>2</sub> (s)
	18.03	6.10
	17.89	5.83
	17.56	5.82
$\bar{t}$ (s)	17.83	5.92
$\Delta t$ (s)	0.27	0.18

$$\varepsilon = \frac{V_{air}}{V_{total}} = \frac{m_{water}}{m_{total}} = \frac{115}{230} \approx 0.5$$

ضریب تخلخل خاک :

جدول 3.7 توزیع فشار در محیط کاموا و محیط غیر متخلخل

	X <sub>1</sub> (1 cm)	X <sub>2</sub> (25 cm)	X <sub>3</sub> (49 cm)
P <sub>1</sub> متخلخل (cm H <sub>2</sub> O) ±0.5cm	36.5	15.5	12
P <sub>2</sub> غیر متخلخل (cm H <sub>2</sub> O) ±0.5cm	16.5	15.5	15
طول ورود (cm)	0.5	0	N/A

جدول 3.8 دبی خروجی از محیط متخلخل کاموا

600 mL	t <sub>1</sub> (s)	t <sub>2</sub> (s)
	65.07	4.51
	63.92	4.64
	62.34	4.73
$\bar{t}$ (s)	63.78	4.63
$\Delta t$ (s)	1.44	0.12

$$\text{ضریب تخلخل کاموا} : \varepsilon = \frac{V_{air}}{V_{total}} = \frac{m_{water}}{m_{total}} = \frac{169}{250} \approx 0.67$$

### 3.2 محاسبه خطای اندازه گیری و محاسبات

ابتدا دبی و خطای دبی را در هر مورد حساب میکنیم.

$$\dot{V} = \frac{V}{\bar{t}}$$

$$\Delta \dot{V} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{t}\right)^2 + \left(\frac{V}{t^2} \Delta t\right)^2}$$

جدول 3.9 دبی کانال ها و خطا

	دبی متخلخل $\left(\frac{mL}{s}\right)$	خطا $\left(\frac{mL}{s}\right)$	دبی غیرمتخلخل $\left(\frac{mL}{s}\right)$	خطا $\left(\frac{mL}{s}\right)$
یونولیت	40.24	1.81	100.33	4.57
پوشال	62.37	2.77	75.85	3.21
خاک (ماسه)	33.65	1.49	101.35	5.23
کاموا	9.41	0.44	129.59	6.36

حال اختلاف دبی (دبی نفوذی) و دبی ورودی به کانال ها را محاسبه میکنیم.

$$\dot{V}_{\text{نفوذ}} = \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_1}{2}$$

$$\dot{V}_{in} = \frac{\dot{V}_1 + \dot{V}_2}{2}$$

$$\Delta \dot{V} = \Delta \dot{V}_1 + \Delta \dot{V}_2$$

جدول 3.10 دبی ورودی و نفوذی و خطا

	دبی نفوذی $\left(\frac{mL}{s}\right)$	خطا $\left(\frac{mL}{s}\right)$	دبی ورودی $\left(\frac{mL}{s}\right)$	خطا $\left(\frac{mL}{s}\right)$
یونولیت	30.04	6.38	70.28	6.38
پوشال	6.74	5.98	69.11	5.98
خاک (ماسه)	33.85	6.72	67.50	6.72
کاموا	60.09	6.80	69.50	6.80

\*اعداد بدست آمده برای طول نفوذ غیر قابل استناد می باشند و بصورت کیفی ارزش دارند. (به علت خطای بسیار زیاد)

\*دبی ورودی با تقریب خیلی خوبی در تمامی موارد برابر است که نشان از صحت آزمایش می باشد.

#### 4. نتایج و بحث

##### +معادله دارسی و عدد رینولدز

معادله ی دارسی برای اعداد رینولدز کوچکتر از یک شکل زیر را دارد.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{Q\mu}{\varepsilon A}$$

که  $Q$  دبی بر حسب حجم بر زمان می باشد.

حال اگر عدد رینولدز بین 1 تا 10 باشد، معادله به معادله ی درجه دو دارسی-فورشهائمر اصلاح می شود.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\mu}{\varepsilon A} Q - \frac{\rho}{K_1 A^2} Q^2$$

که در آن  $K_1$  بعنوان ضریب ترشوندگی لختی شناخته می شود.

حال عدد رینولدز مسئله را محاسبه می کنیم.

$$Re = \frac{VL}{\mu}$$

$$V = \frac{\text{دبی ورودی}}{\text{سطح مقطع}} = \frac{Q}{A} = \frac{70}{9} \approx 7.7 \text{ cm/s}$$

$$\mu_{\text{water @20}^\circ\text{C}} \approx 10^{-3} \text{ Pa.s}, L \approx 10 \text{ cm}$$

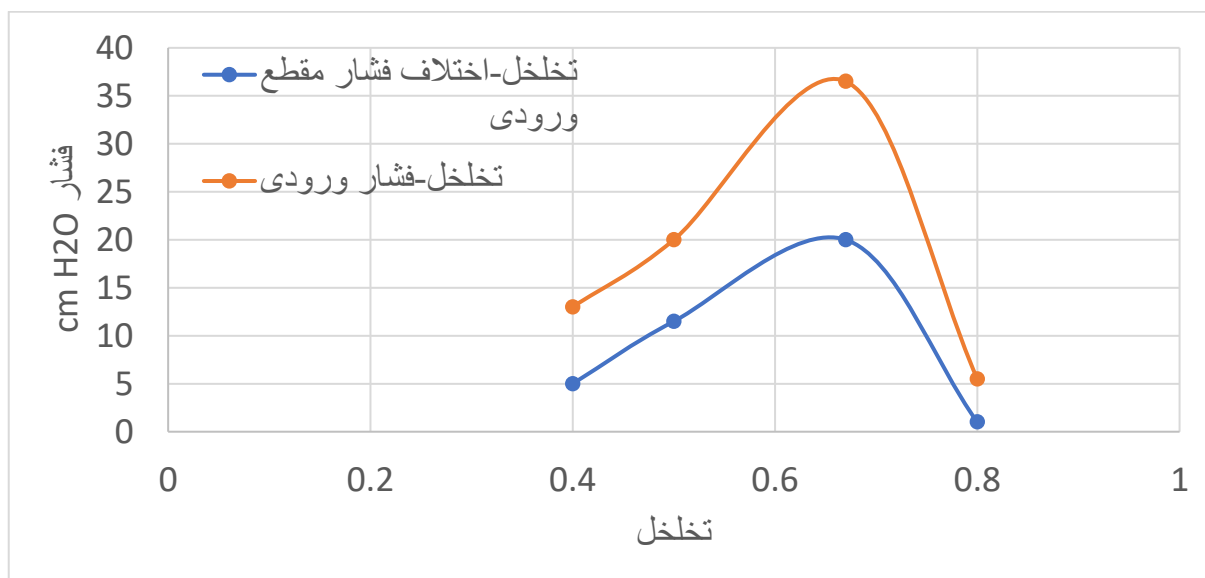
$$Re = \frac{7.7 \times 10 \times 10^{-4}}{10^{-3}} = 7.7$$

مشاهده میکنیم که عدد رینولدز به دست آمده در حدود یک تا ده می باشد. پس با معادله ی دارسی-فورشهائمر سر و کار داریم و باید انتظار نمودارهای درجه 2 را داشته باشیم.

## +دبی ورودی-اختلاف فشار در مقطع ورودی و فشار ورودی-تخلخل

جدول 4.1 دبی ورودی، اختلاف فشار در مقطع ورودی، فشار ورودی و تخلخل

فشار ورودی	اختلاف فشار مقطع ورودی	دبی ورودی	تخلخل	ماده
13	5	70.28	0.4	یونولیت
20	11.5	67.5	0.5	خاک
36.5	20	69.5	0.67	کاموا
5.5	1	69.11	0.8	پوشال



شکل 4.1 اختلاف فشار در مقطع ورودی، فشار ورودی و تخلخل

مقدار دبی ورودی در هر 4 حالت با تقریب خوبی ثابت بوده. پس باید به روابط بین تخلخل و فشار دقت کنیم. همانطور که انتظار می رود نمودارها به شکل توابع درجه 2 می باشد.

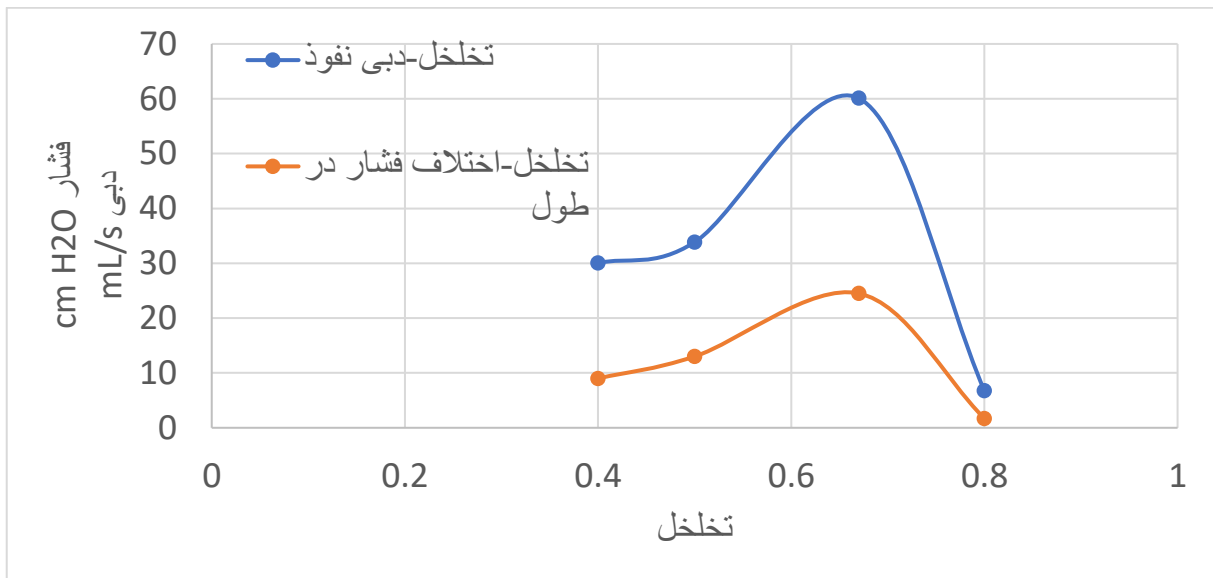
$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\mu}{\varepsilon A} Q - \frac{\rho}{K_1 A^2} Q^2$$

البته به دلیل تفاوت در ضرایب  $\varepsilon$ ,  $K_1$  نباید انتظار نمودارهایی با اشکال مرتبط را داشته باشیم. پس در مورد این قسمت به نتایج مربوطه برخورد نمیکنیم.

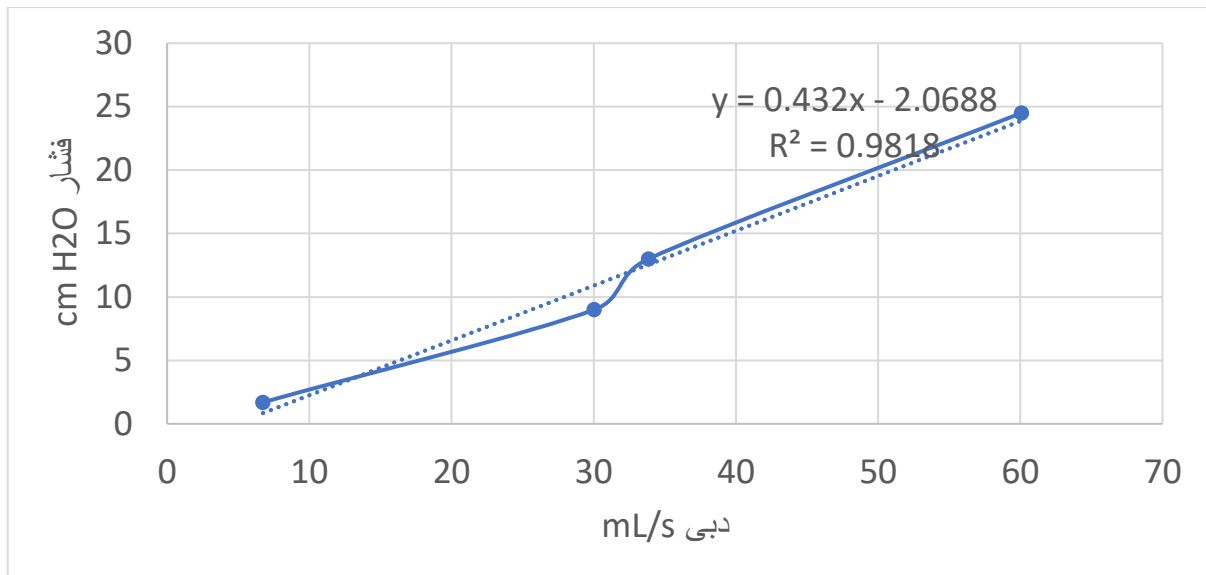
## +دبی نفوذ-اختلاف فشار در طول-تخلخل

جدول 4.2 دبی نفوذ-اختلاف فشار در طول-تخلخل

ماده	تخلخل	دبی نفوذ	اختلاف فشار در طول
یونولیت	0.4	30.04	9
خاک	0.5	33.85	13
کاموا	0.67	60.09	24.5
پوشال	0.8	6.74	1.7



شکل 4.2 دبی نفوذ-اختلاف فشار در طول-تخلخل



شکل 4.3 دبی نفوذ-اختلاف فشار در طول

همانطور که انتظار می رود نمودار ها دبی و فشار با تخیل به شکل توابع درجه 2 می باشد.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\mu}{\varepsilon A} Q - \frac{\rho}{K_1 A^2} Q^2$$

البته به دلیل تفاوت در ضرایب  $\varepsilon$ ,  $K_1$  نباید انتظار نمودار هایی با اشکال مرتبط را داشته باشیم. پس در مورد این قسمت به نتایج مربوطه برخورد نمیکنیم. اما نمودار دبی نفوذی با اختلاف فشار در طول رابطه مستقیمی دارد که نمایانگر رابطه خطی دبی نفوذی با اختلاف فشار در راستای طولی است.

اختلاف فشار در طول را می توان حاصل تفریق اختلاف فشار در دو مقطع ورودی و خروجی نیز دانست زیرا نفوذ بر اثر اختلاف فشار در مقطع رخ می دهد.

$$P_2 @x_1 \approx P_2 @x_3$$

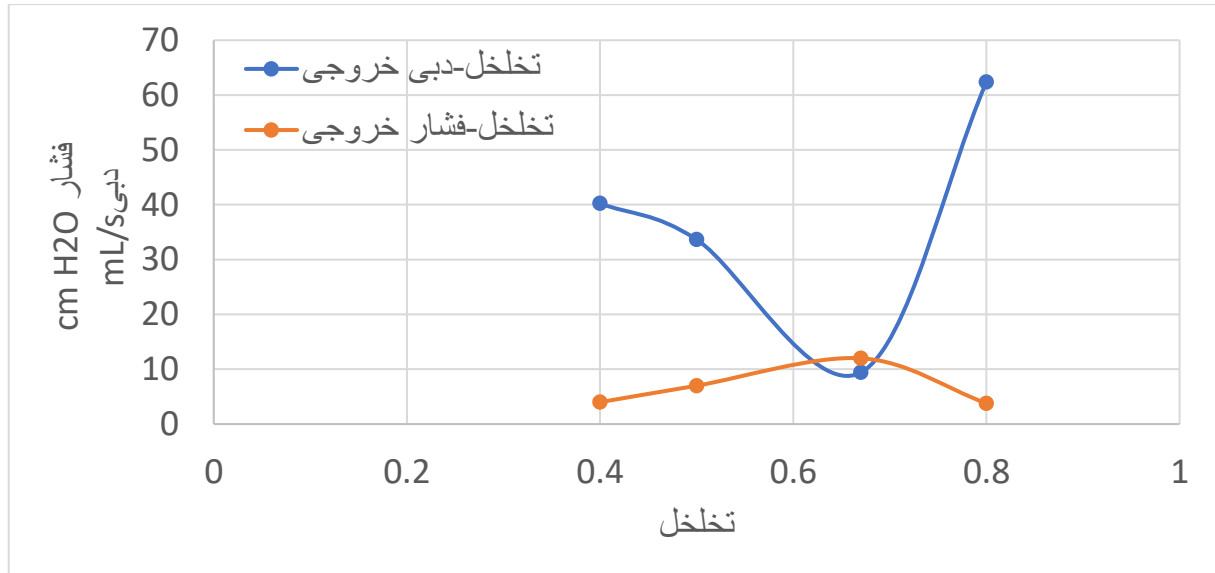
$$(P_1 @x_1 - P_2 @x_1) - (P_2 @x_3 - P_1 @x_3) \approx P_1 @x_1 - P_1 @x_3$$



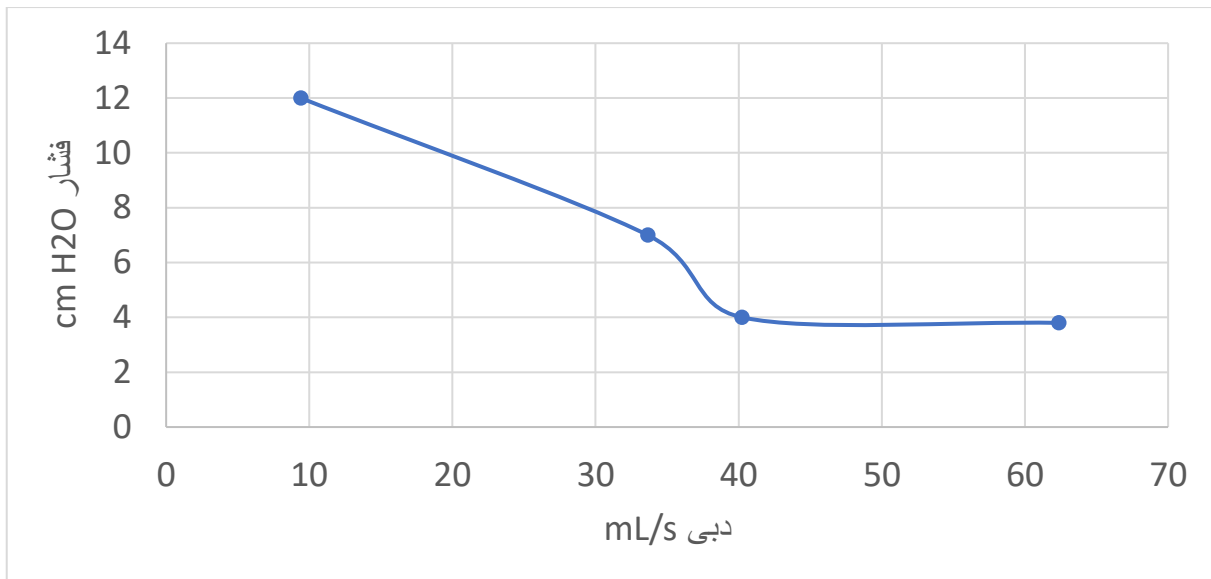
## +دبی خروجی-فشار خروجی-تخلخل

جدول 4.3 دبی خروجی-فشار خروجی-تخلخل

فشار خروجی	دبی خروجی	تخلخل	ماده
4	40.24	0.4	یونولیت
7	33.65	0.5	خاک
12	9.41	0.67	کاموا
3.8	62.37	0.8	پوشال



شکل 4.4 دبی خروجی-فشار خروجی-تخلخل



شکل 4.5 دبی خروجی-فشار خروجی

همانطور که انتظار می رود نمودار ها دبی و فشار با تخلخل به شکل توابع درجه 2 می باشد.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\mu}{\varepsilon A} Q - \frac{\rho}{K_1 A^2} Q^2$$

البته به دلیل تفاوت در ضرایب  $\varepsilon$ ,  $K_1$  نباید انتظار نمودار هایی با اشکال مرتبط را داشته باشیم. پس در مورد این قسمت به نتایج مربوطه برخورد نمیکنیم. اما نمودار دبی خروجی با فشار خروجی رابطه عکس دارد اما رابطه بصورت خطی نمی باشد، به صورت کیفی می توان گفت با کاهش فشار خروجی افزایش پیدا میکند. علت در این می تواند باشد که در ناحیه خروجی از محیط غیر متخلخل به محیط متخلخل نفوذ داریم (به دلیل اختلاف فشار) حال هر چه فشار خروجی بیشتر افت کند دبی خروجی نیز بیشتر خواهد شد.

### +اختلاف فشار در مقاطع مختلف-طول نفوذ

علت نفوذ سیال از محیط متخلخل به غیر متخلخل اختلاف فشار بین دو محیط و مقاومت ماده متخلخل در برابر جریان می باشد. با توجه به طول ورود در مقطع  $X_1$  در جداول 3.1، 3.3، 3.5 و 3.7 هنگامی که فشار ماده متخلخل بیشتر باشد طول نفوذ عددی بزرگتر از صفر است. با توجه به طول ورود در مقطع  $X_2$  هنگامی که اختلاف فشار صفر باشد طول نفوذ نیز صفر است. با توجه به طول ورود در مقطع  $X_3$  هنگامی که اختلاف فشار صفر باشد نفوذ نداریم.

### +ضرایب تخلخل و هندسه

با توجه به فصل دوم رابطه ی بین ضریب تخلخل و هندسه مشاهده میکنیم که ساختار ذرات خاک به حالت شکل 2.5 نزدیک تر می باشند.

همچنین ساختار ذرات یونولیت بینابین شکل 2.4 و 2.5 می باشد.

### +علت بالاتر بودن فشار ورودی ماده متخلخل

آب در کانال عمودی ورودی جریان ماده متخلخل ارتفاع بیشتری نسبت به ورودی غیر متخلخل دارد. علت این می باشد که دبی هر دو کانال برابر است، برای اینکه این مقدار برابر دبی در هر دو کانال بتواند نفوذ کند نیاز به فشار دارد. حال چون در مقابل یک کانال ماده متخلخل قرار دارد، نیاز به فشار بیشتری دارد تا بتواند این مقدار برابر دبی را از خود عبور دهد.

## 5. نتیجه گیری

- دبی نفوذی با اختلاف فشار در طول کانال رابطه مستقیم دارد.  $P = 0.432Q - 2.0688$  که در آن  $P$  اختلاف فشار بر حسب سانتی متر آب و  $Q$  دبی نفوذی بر حسب میلی لیتر بر ثانیه است.
- دبی خروجی با فشار خروجی به صورت کیفی رابطه عکس دارد.
- در معادله داری-فورشه‌ایمر دو ضریب  $K_1$ ,  $\varepsilon$  موجود می باشند. پس نمی توان از نمودار های تخلخل-دبی و تخلخل-فشار استفاده کرد. اما به صورت نسبی شکل درجه 2 معادلات دیده می شود.
- از روی ضرایب تخلخل می توان هندسه قرار گیری ماده متخلخل کروی شکل را بدست آورد.
- نفوذ به دلیل اختلاف فشار در هر مقطع رخ می دهد و طول نفوذ تابعی از اختلاف فشار، ضرایب ماده متخلخل و هندسه مسئله می باشد. اگر اختلاف فشار در مقطع مثبت باشد طول نفوذ نیز مثبت است و اگر صفر باشد طول نفوذ نیز صفر است و اگر منفی باشد، نفوذ نداریم.
- در آزمایش دبی برابر، فشار ورودی محیط متخلخل همواره از فشار ورودی محیط غیر متخلخل بیشتر است زیرا برای جریان دادن دبی های برابر از هر محیط، ماده متخلخل به دلیل مقاومت فشار بیشتری نیاز دارد.

1. A. V. Kuznetsov, Analytical investigation of the fluid flow in the interface region between a porous medium and a clear fluid in channels partially filled with a porous medium, 1996.
2. Tien-Chien Jen, T.Z. Yan, developing fluid flow and heat transfer in a channel partially filled with porous medium, 2005.
3. S. Kuppa, Flow and heat transfer in a 2-D channel partially filled with porous medium, 2006.
4. شبیه‌سازی عددی نفوذ جریان مایع در یک محیط متخلخل به روش شبکه بولتزمن, ظفر نمازیان, جعفر نمازیان
5. [https://en.wikipedia.org/wiki/Darcy%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Darcy%27s_law)
6. D. Hansen, The Behavior of Flow through Rockfill Dams, Ph.D. Thesis, University of Ottawa (Canada), 1992.
7. R. D. Townsend, V. K. Garga, D. Hansen, Finite difference modelling of the variation in piezometric head within a rockfill embankment, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 254-263, 1991.
8. D. Hansen, R. Bari, Uncertainty in water surface profile of buried stream flowing under coarse material, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 8, pp. 761-773, 2002.
9. J. Wilkins, Flow of water through rock fill and its application to the design of dams, New Zealand Engineering, Vol. 10, No. 11, pp. 382, 1955.
10. D. Stephenson, Rockfill in Hydraulic Engineering, eBook ISBN:9780444600837, Elsevier, pp. 32-33, 1979.
11. R. Bari, D. Hansen, Application of gradually -varied flow algorithms to simulate buried streams, Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, No. 6, pp. 673-683, 2002.
12. J. Samani, H. Samani, M. Shaiannejad, Reservoir routing with outflow through rockfill dams, Journal of Hydraulic Research, Vol. 42, No. 4, pp. 435-439, 2004.
13. H. M. Samani, J. M. Samani, M. Shaiannejad, Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 129, No. 6, pp. 448-454, 2003.
14. P. Asiaban, E. Amiri Tokaldany, M. Tahmasebi Nasab, Simulation of water surface profile in vertically stratified rockfill dams, International Journal of Environmental Research, Vol. 9, No. 4, pp. 1193-1200, 2015.

- 15.M. Moradi Tayyebi, E. Amiri Tokaldany, introducing a relationship to estimate hydraulic gradient in non-darcy turbulent flow in porous media, *Journal of Water and Soil*, Vol. 29, No. 4, (فارسی)pp. 908 -918, 2015.
- 16.M. T. Balhoff, S. G. Thomas, M. F. Wheeler, Mortar coupling and upscaling of pore-scale models, *Computational Geosciences*, Vol. 12, No. 1, pp. 15 -27, 2008.
- 17.S. Succi, *The Lattice Boltzmann Equation: For Fluid Dynamics and Beyond*, New York, Oxford university press, 2001.
- 18.P. Raiskinmäki, A. Koponen, J. Merikoski, J. Timonen, Spreading dynamics of three-dimensional droplets by the lattice-Boltzmann method, *Computational Materials Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 7-12, 2000.
- 19.M. Latva-Kokko, D. H. Rothman, Static contact angle in lattice Boltzmann models of immiscible fluids, *Physical Review E*, Vol. 72, No. 4, pp. 046701, 2005.
- 20.S. Fallah Kharmiani, M. Passandideh Fard, H. Niazmand, Modeling of simultaneous impact of two parallel drops on a thin liquid film using Lattice Boltzmann Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 373-384, 2016.
- 21.T. Inamuro, T. Ogata, S. Tajima, N. Konishi, A lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences, *Journal of Computational Physics*, Vol. 198, No. 2, pp. 628-644, 2004.
- 22.K. Sankaranarayanan, X. Shan, I. Kevrekidis, S. Sundaresan, Analysis of drag and virtual mass forces in bubbly suspensions using an implicit formulation of the lattice Boltzmann method, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 452, No. 3, pp. 61-96, 2002.
- 23.E. Sattari, M. Aghajani Delavar, E. Fattahi, K. Sedighi, Investigation of two bubble coalescence with large density differences with Lattice Boltzmann Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 93-100, 2014.
- 24.K. Langaas, P. Papatzacos, Numerical investigations of the steady state relative permeability of a simplified porous medium, *Transport in Porous Media*, Vol. 45, No. 2, pp. 241-266, 2001.
- 25.M. C. Sukop, H. Huang, C. L. Lin, M. D. Deo, K. Oh, J. D. Miller, Distribution of multiphase fluids in porous media: Comparison between lattice Boltzmann modeling and micro-x-ray tomography, *Physical Review E*, Vol. 77, No. 2, pp. 026710, 2008.
- 26.M. Taghilou, M. H. Rahimian, Simulation of 2D droplet penetration in porous media using Lattice Boltzmann Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 13, pp. 43-56, 2013.

- 27.S. Chen, G. D. Doolen, Lattice Boltzmann method for fluid flows, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 30, No. 1, pp. 329-364, 1998.
- 28.E. S. Boek, M. Venturoli, Lattice-Boltzmann studies of fluid flow in porous media with realistic rock geometries, Computers & Mathematics with Applications, Vol. 59, No. 7, pp. 2305-2314, 2010.
29. محاسبه تحلیلی و عددی نفوذپذیری جریان در محیط متخلخل با هندسه مربعی، علیرضا صالحی، مجتبی خاکسار
- 30.Carman P. C., “The Determination of Specific Surface of Powders”, Journal of the Society of Chemical Industry, Vol. 57, 1938, pp. 225-234.
- 31.Sullivan R. R., “Specific Surface Measurements on Compact Bundles of Parallel Fibers”, Journal of Applied Physics, Vol. 13, 1942, pp. 725-730.
- 32.Kuwabara S., “The Forces Experienced by Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders or Spheres in a Viscous Flow at Small Reynolds Numbers”, Journal of Physical Society of Japan, Vol. 14, 1959, pp. 527-532.
- 33.Hasimoto H., “On the Periodic Fundamental Solutions of the Stokes Equations and Their Application to Viscous Flow Past a Cubic Array of Spheres”, Journal of Fluid Mech., Vol. 5, 1959, pp. 317-328.
- 34.Happel J., “Viscous Flow Relative to Arrays of Cylinders,” American Institute of Chemical Engineers Journal, Vol. 5, 1959, pp. 174-177
- 35.Sparrow E. M., Loeffler A. L., “Longitudinal Laminar Flow Between Cylinders Arranged in Regular Array”, AIChE Journal, Vol. 5, 1959, pp. 325-330.
- 36.Happel J., Brenner H., Low Reynolds Number Hydrodynamics, Noordhoff International Publishing, Leyden, Netherlands, 1973, p. 533.
- 37.Sangani A. S., Acrivos A., “Slow Flow Past Periodic Arrays of Cylinders with Application to Heat Transfer”, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 8, 1982, pp. 193-206.
- 38.Sangani A. S., Yao C., “Transport Processes in Random Arrays of Cylinders:II-Viscous Flow”, Physics of Fluids, Vol. 31, No. 9, 1988, pp. 2435-2444.
- 39.Drummond J. E., Tahir M. I., “Laminar Viscous Flow through Regular Arrays of Parallel Solid Cylinders”, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 10, 1984, pp. 515-540.
- 40.Sahraoui M., Kaviani M., “Slip and No-Slip Boundary Condition at Interface of Porous, Plain Media”, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 37, 1994, pp. 1029-1044.

41. Sobera M. P., Kleijn C. R., "Hydraulic Permeability of Ordered and Disordered Single Layer Arrays of Cylinders", *Physical Review*, Vol. 74, 2006, 036302-1-10.
42. Jackson G. W., James D. F., "The Permeability of Fibrous Porous Media", *Canadian Journal of Chemical Eng.*, Vol. 64, 1986, pp. 364-374.
43. Tomadakis M. M., Sotirchos S. V., "Transport Properties of Random Arrays of Freely Overlapping Cylinders with Various Orientation Distributions", *Journal of Chemical Physics*, Vol. 98, 1993, pp. 616-626.
44. Avellaneda M., Torquato S., "Rigorous Link between Fluid Permeability, Electrical Conductivity, and Relaxation Times for Transport in Porous Media", *Physics of Fluids*, Vol. 11, 1991, pp. 2529-2540.
45. Kyan C. P., Wasan D. T., Kinter R. C., "Flow of Single-Phase Fluids through Fibrous Beds", *Industrial Engineering and Chemical Fundamentals*, Vol. 9, 1970, pp. 596-603.
46. Bergelin O. P., Brown G. A., Hull H. L., Sullivan W., "Heat Transfer and Fluid Friction during Viscous Flow across Banks of Tubes: III - A Study of Tube Spacing and Tube Size", *ASME Transactions*, Vol. 72, 1950, pp. 881-888.
47. Kirsch A. A., Fuchs N. A., "Studies on Fibrous Aerosol Filters-II Pressure Drops in Systems of Parallel Cylinders", *Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 10, 1967, pp. 23-30.
48. Sadiq T. A. K., Advani S. G., Parnas R. S., "Experimental Investigation of Transverse Flow through Aligned Cylinders", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 21, No. 5, 1995, pp. 755-774.
49. Khomami B., Moreno L. D., "Stability of Viscoelastic Flow around Periodic Arrays of Cylinders", *Rheologica. Acta.*, Vol. 36, No. 4, 1997, pp. 367-383.
50. Zhong W. H., Currie I. G., James D. F., "Creeping Flow through a Model Fibrous Porous Medium", *Experiments in Fluids*, Vol. 40, 2006, pp. 119-126.
51. Skartsis L., Kardos J. L., "The Newtonian Permeability and Consolidation of Oriented Carbon Fiber Beds", *Proceedings of American Society of Composites Technical Conference*, Vol. 5, 1995, pp. 548-556.
52. Astrom B. T., Pipes R. B., Advani S. G., "On Flow through Aligned Fiber Beds and Its Application to Composite Processing", *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 9, 1992, pp. 1351-1373.
53. Tamayol, Bahrami, "Analytical Determination of Viscous Permeability", *ASME FED2008*, Jacksonville, 2008.