

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی

# برآورد تجربی میزان نفوذپذیری محیط‌های متخلخل با استفاده از جبهه پیشرو

اساتید راهنما:

دکتر محمدرضا شاه‌نظری

دکتر مسعود ضیاء بشرحق

نگارش:

رضا میرزایی عربی

۸۷۰۲۸۴۴

شهریور ۹۰

رسالة محمد

## حق چاپ، نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و نشر این پایان نامه متعلق به نویسنده می باشد. هر گونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن، تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین، استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## تشکر و قدردانی

اعتراف می‌کنم که نه زبان شکر تو را دارم و نه توان تشکر از بندگان تو. آنچه در پیش رو دارید، حاصل تلاشی است که در حد توان خود و با راهنمایی‌های ارزنده اساتید زحمتکش و دوستان خوبم انجام گرفته است.

لذا در ابتدا بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات بی‌شائبه اساتید ارجمند، جناب آقای دکتر مسعود ضیاء بشرحق و جناب آقای دکتر محمدرضا شاه‌نظری که بی‌صبرانه بنده را در تهیه این پایان‌نامه یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را نمایم.

ممنون از دوستان خوبم، به خصوص جناب مهندس پویا شیشه‌گران، که با راهنمایی‌های خود باعث دلگرمی بنده می‌شدند و راه دشوار تحقیق و پژوهش را بر من هموار می‌ساختند. و در پایان از پدر و مادر مهربانم که بال‌های محبت خود را گسترانیدند و با تحمل دشواری‌ها، سبب شدند تا در کمال آسودگی خیال و فراغت بال، شوق آموختن در من زنده بماند نیز صمیمانه سپاسگزارم.

## چکیده

بررسی پدیده‌هایی نظیر انتقال جرم در محیط‌های متخلخل بر پایه دانشی است که بشر با مطالعه این پدیده‌ها به دست آورده است. استفاده از روش‌های تجربی در تعیین پارامترهایی که در این پدیده‌ها مؤثر می‌باشند از اهمیت بسزایی برخوردار است. آزمایشات هنری داری را می‌توان اساس تحقیقات مهندسی و دانشمندان روی ضریب نفوذپذیری محیط‌های متخلخل و بستر ذرات به حساب آورد. میزان اعتبار قانون داری با تحقیقات گسترده در این زمینه مورد توجه محققین قرار گرفت. فرچیمِر با در نظر گرفتن ترم درجه دوم سرعت، به عنوان اولین فردی بود که قانون داری را بسط داد و راه را برای سایر محققین فراهم کرد.

هدف از انجام این پژوهش و گردآوری این پایان‌نامه تعیین پارامتر نفوذپذیری محیط متخلخل به روش تجربی می‌باشد. لذا، پس از معرفی محیط متخلخل و مشخصات آن و مروری بر تحقیقات انجام شده در این زمینه، معادلات حاکم بر جریان سیال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در گام اول آزمایش‌های این پایان‌نامه، ضریب نفوذپذیری بستری متشکل از ذرات کروی با آرایش منظم و در گام دوم با افزایش سرعت سیال، اثرات اینرسی و میزان انحراف از قانون داری بررسی خواهد شد. در پایان، صحت نتایج به دست آمده از آزمایشات نیز با استفاده از روابط موجود و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه تأیید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل، ضریب نفوذپذیری، قانون داری، بستر ذرات با آرایش منظم و معادله فرچیمِر.

## فصل اول - مقدمه‌ای بر محیط متخلخل

.....	محیط متخلخل	۱-۱
.....	ضریب تخلخل	۲-۱
.....	ضریب نفوذپذیری	۳-۱
.....	مروری بر تحقیقات پیشین	۴-۱

## فصل دوم - مکانیک جریان سیال در محیط متخلخل

.....	قانون دارسی	۱-۲
.....	ضریب نفوذپذیری و خواص هندسی	۲-۲
.....	سرعت رسوخ و قانون بقای جرم	۳-۲
.....	شتاب و اثر ترم‌های گذرا	۴-۲
.....	معادله برینکمن	۵-۲
.....	پسای درجه دوم - معادله فُرجیمِر	۶-۲

## فصل سوم - شرح سیستم آزمایش

.....	شرح دستگاه	۱-۳
.....	هندسه بستر و ضریب تخلخل آن	۲-۳
.....	سیال و خواص آن	۳-۳
.....	نحوه انجام آزمایش	۴-۳

۵۸.....	۱-۴-۳) مرحله اول - رژیم دارسی
۶۳.....	۲-۴-۳) مرحله دوم - رژیم غیرداریسی

### فصل چهارم - بررسی نتایج و بحث پیرامون آن

۶۸.....	۱-۴) بررسی نتایج آزمایش
۶۸.....	۱-۱-۴) بررسی ضریب نفوذپذیری بستر
۷۶.....	۲-۱-۴) بررسی ترم فرچیمیر

### فصل پنجم - نتیجه گیری کلی و پیشنهادها

۸۴.....	۱-۵) نتیجه گیری کلی
۸۶.....	۲-۵) پیشنهادها

### منابع و مراجع

۸۸.....	منابع و مراجع
---------	---------------

### پیوستها

۹۲.....	پیوست الف) جداول مربوط به داده برداری مرحله اول آزمایش
۹۹.....	پیوست ب) جداول مربوط به داده برداری مرحله دوم آزمایش
۱۰۶.....	پیوست ج) معادلات آماری و متوسط گیری

جدول (۱-۱) خواص مواد متداول و پُر کاربرد.....	۷
جدول (۲-۱) مروری بر تحقیقات انجام شده پیرامون موضوع نفوذپذیری محیط متخلخل.....	۹
جدول (۳-۱) مروری بر تحقیقات انجام شده پیرامون موضوع انحراف از رابطه داریسی.....	۱۰
جدول (۱-۲) تصحیح رابطه کارمن- کازنی و نمایش ضرایب تصحیح بکار رفته در آن.....	۱۹
جدول (۱-۳) ضریب تخلخل بسترهای مورد استفاده در این آزمایش.....	۴۸
جدول (۲-۳) چگالی و ویسکوزیته آب، اتیلن گلیکول و گلیسرین.....	۵۰
جدول (۳-۳) چگالی ترکیب اتیلن گلیکول و آب.....	۵۰
جدول (۴-۳) چگالی ترکیب گلیسرین و آب.....	۵۲
جدول (۵-۳) چگالی سیال مورد استفاده در آزمایش.....	۵۴
جدول (۶-۳) ضریب نفوذپذیری متوسط برای هر قطر از ساچمه‌ها.....	۶۵
جدول (۱-۴) مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش مرحله اول.....	۶۹
جدول (۲-۴) محاسبه ضریب نفوذپذیری با استفاده از رابطه کارمن- کازنی.....	۷۰
جدول (۳-۴) تعیین ثابت کازنی برای هر یک از سه بستر.....	۷۱
جدول (۴-۴) ثابت فرچیمِر برای هر یک از بسترهای مورد آزمایش.....	۷۷
جدول (۵-۴) مقادیر متوسط سرعت و عدد رینولدز مرحله دوم آزمایش.....	۷۸
جدول (۶-۴) اولین ثابت ارگن برای بسترهای مورد استفاده در آزمایش.....	۸۰
جدول (۷-۴) دومین ثابت ارگن برای بسترهای مورد استفاده در آزمایش.....	۸۰
جدول (۸-۴) نتایج آزمایش‌ها بر اساس عدد رینولدز اصلاح شده.....	۸۱



- شکل ۱-۱) جریان سیال از میان شبکه نفوذپذیر..... ۳
- شکل ۲-۱) اندازه حجم مشخصه بنیادی نسبت به اندازه حفره‌ها و دامنه جریان..... ۴
- شکل ۱-۲) شماتیکی از جریان سیال در محیط متخلخل..... ۲۰
- شکل ۲-۲) فصل مشترک سیال پاک و محیط متخلخل..... ۲۷
- شکل ۳-۲) انتقال جریان از رژیم داریسی به رژیم فرچیمیر..... ۳۳
- شکل ۱-۳) نمایی از دستگاه مورد استفاده در این آزمایش..... ۳۹
- شکل ۲-۳) نمایی از پمپ به همراه الکتروموتور آن..... ۴۰
- شکل ۳-۳) نمایی از روتامتر در دو حالت روشن و خاموش پمپ..... ۴۱
- شکل ۴-۳) نمایی از قالب مورد آزمایش پُر شده از ساچمه‌های فولادی (بسته)..... ۴۳
- شکل ۵-۳) نمایی از قالب مورد آزمایش پُر شده از ساچمه‌های فولادی (باز)..... ۴۳
- شکل ۶-۳) نمایی از چیدمان ساچمه‌ها در بستر..... ۴۵
- شکل ۷-۳) نمایی از چیدمان ساچمه‌ها در هر لایه..... ۴۵
- شکل ۸-۳) نمایی از بستر منظم و نامنظم ساچمه‌های فولادی..... ۴۶
- شکل ۹-۳) نمایی از ابعاد (طول و عرض) بستر مورد آزمایش..... ۴۷
- شکل ۱۰-۳) نمایی از نحوه قرار گرفتن دوربین روی دستگاه..... ۶۰
- شکل ۱۱-۳) نمایی از تقسیم‌بندی بستر به بازه‌های پنج سانتی‌متری..... ۶۱
- شکل ۱-۴) پراکندگی ثابت کازنی برای مقادیر به دست آمده از آزمایش..... ۷۲
- شکل ۲-۴) مقایسه نتایج این آزمایش با نتایج لارسُن و هیگدان..... ۷۳
- شکل ۳-۴) یک کره منفرد احاطه شده توسط محیط متخلخل یکنواخت..... ۷۴
- شکل ۴-۴) مقایسه نتایج این آزمایش با نتایج تحلیل‌ها و آزمایش‌های نیل و نادر..... ۷۴
- شکل ۵-۴) جریان خزشی سیال روی ذرات کروی بستر نفوذپذیر..... ۷۵
- شکل ۶-۴) مقایسه نتایج آزمایش مرحله دوم با نمودار فرچیمیر..... ۷۹
- شکل ۷-۴) مقایسه نتایج این آزمایش با تحقیقات مکدونالد و همکارانش..... ۸۲

### علائم لاتین

A	سطح مقطع عبور جریان
a	ثابت کارمن - کازنی
C	ضریب شکلی
$c_F$	ثابت بدون بُعد پسای شکلی (ثابت فرچیمیر)
$D_p$	قطر ذرات
$D_{p_2}$	قطر متوسط مؤثر ذرات
$d_h$	قطر هیدرولیک بستر (کانال)
$e_a$	تانسور ضرایب شتاب
$f_E$	ضریب اصطکاک معادله ارگن
$f_K$	ضریب اصطکاک
h	عمق بستر ذرات مورد آزمایش
i	اندیس شمارنده
$J_0$	تابع بسل نوع اول از مرتبه صفر
j	اندیس شمارنده
<b>K</b>	تانسور ضرایب نفوذپذیری
K	ضریب نفوذپذیری
$\bar{K}$	ضریب نفوذپذیری متوسط
k	ثابت کازنی
L	طول بستر (کانال)
m	نرخ جرمی جریان سیال
N	تعداد ذرات چیده شده در بستر
n	توان تجربی
P	فشار
R	شعاع کره
r	شعاع دسته لوله موازی

$Re_{D_p}$	عدد رینولدز بر اساس قطر ذرات
$Re_K$	عدد رینولدز بر اساس ضریب نفوذپذیری
$Re'_{D_p}$	عدد رینولدز اصلاح شده بر اساس قطر ذرات
S	سطح جانبی ویژه
s	مسیر جریان سیال
T	زمان مشخصه
t	زمان
$u_D$	سرعت داریسی
V	بردار سرعت متوسط حقیقی
v	بردار سرعت رسوخ سیال
$V_b$	حجم بستر ذرات
$V_f$	حجم سیال پُر کننده محیط متخلخل
$V_m$	حجم کل محیط متخلخل و سیال درون آن
$V_p$	حجم هر یک از ذرات پُر کننده بستر
$V_T$	حجم کل ذرات پُر کننده بستر
$V_0$	حجم حفره‌ها و منافذ
Var	واریانس
VBN	عدد ویسکوزیته ترکیب
w	عرض بستر (کانال)
x	مؤلفه افقی محور مختصات
y	مؤلفه عمودی محور مختصات

### علائم یونانی

$\alpha$	دومین ثابت ارگن
$\beta$	اولین ثابت ارگن
$\Gamma$	پارامتر اتصال درون شبکه
$\gamma$	مقدار ثابت شتاب

$\delta$	طول مشخصه
$\varepsilon$	ضریب تخلخل
$\varepsilon_c$	ضریب تراوش
$\varepsilon_{\text{eff}}$	ضریب تخلخل مؤثر
$\eta$	فاصله بین ذرات مجاور بستر
$\theta$	کسر حجمی ترکیبات سیال
$\kappa$	ثابت نفوذپذیری
$\Lambda$	ضریب اثرات تلفات ویسکوزیته
$\lambda$	متغیر تابع بسل نوع اول
$\mu$	ضریب ویسکوزیته دینامیکی
$\tilde{\mu}$	ضریب ویسکوزیته مؤثر
$\nu$	ضریب ویسکوزیته سینماتیکی
$\rho$	چگالی
$\sigma$	انحراف معیار
$\phi$	کسر حجمی ترکیبات اتیلن گلیکول
$\varphi$	کسر حجمی ترکیبات گلیسرین
$\Phi_d$	ضریب تغییرات
$\chi$	عدم تقارن
$\Omega$	ضریب اثرات تلفات اینرسی
$\partial$	مشتق جزئی
$\bar{\nabla}$	عملگر نابلا
$\nabla^2$	عملگر لاپلاسین

## فصل اول

# مقدمه‌ای بر محیط متخلخل

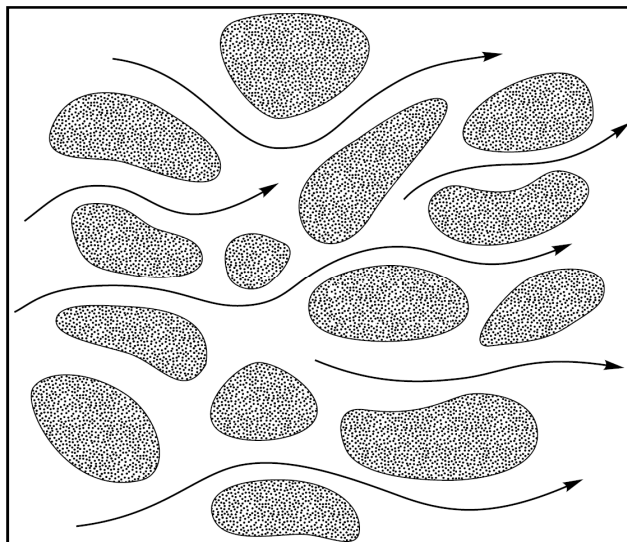
## ۱-۱) محیط متخلخل<sup>۱</sup>

کاربرد محیط متخلخل در زندگی روزانه، امری انکارناپذیر می‌باشد و مطالعه جریان سیال از میان محیط متخلخل، نقش مهمی در زمینه‌های علمی دارد. در نتیجه، تحقیقات تئوری و کاربردی در زمینه جریان سیال (سیالات)، انتقال حرارت و جرم در محیط متخلخل در طول سه دهه اخیر از توجه بیشتری برخوردار شده است. جریان سیال در محیط متخلخل کاربردهای وسیعی در مهندسی شیمی، مهندسی مکانیک، مهندسی تغذیه، صنایع پتروشیمی، فرآیندهای جداسازی، صنایع کاغذسازی و سایر فرآیندهای تکنولوژیکی دارد.

منظور از محیط متخلخل، ماده‌ای است شامل یک شبکه<sup>۲</sup> جامد با منافذ<sup>۳</sup> متصل بهم؛ با این فرض که شبکه جامد کاملاً صلب است و یا اینکه بر اثر اعمال نیرو، تغییر شکل آن قابل صرف‌نظر کردن باشد. ارتباط داخلی منافذ و حفره‌ها، این امکان را ایجاد می‌کند که یک یا چند سیال بتوانند در محیط متخلخل جریان داشته باشند. در ساده‌ترین حالت، در جریان تک فاز، حفره‌ها توسط سیال کاملاً اشباع می‌شوند؛ در صورتی که برای جریان دو فاز، مایع و گاز به طور مشترک فضای حفره‌ها را پُر می‌کنند.

---

1) Porous Media  
2) Matrix  
3) Pore



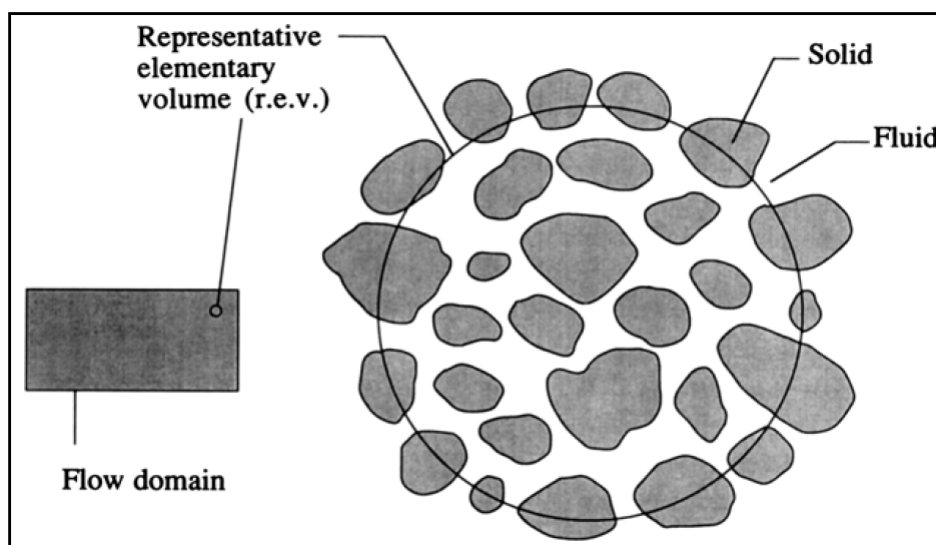
شکل ۱-۱) جریان سیال از میان شبکه نفوذپذیر [۱]

در ابعاد و اندازه‌های یک حفره (مقیاس میکروسکوپی<sup>۱</sup>)، کمیت‌های جریان نظیر سرعت، فشار و ...، به طور مشخص رفتاری نامنظم خواهند داشت. اما در آزمایش‌های متنوع، کمیت‌های مورد نظر در ناحیه‌ای از محیط متخلخل که در بر گیرنده تعداد زیادی حفره هستند، اندازه‌گیری می‌شوند. لذا این کمیت‌های متوسط فضایی (ماکروسکوپی<sup>۲</sup>)، به صورت منظم نسبت به مکان و زمان تغییر خواهند نمود. بنابراین، می‌توان برای رفتار آن‌ها توابع مشخصی را بیان کرد.

جریان سیال از میان حفره‌های محیط متخلخل را می‌توان به کمک جریان درون لوله‌های تو در تو شبیه‌سازی نمود. برای مسیرهای کوتاه جریان در محیط متخلخل، سیال از میان یک یا دو لوله عبور می‌کند. در این حالت معادلات متداول مکانیک سیالات و انتقال حرارت، برای بررسی آنچه در این محیط رخ می‌دهد، کافی است. اما اگر مسیر جریان زیاد باشد، در این صورت سیال از لوله‌ها و حفره‌های زیادی عبور خواهد کرد. برای چنین مسئله پیچیده‌ای، روش‌های متداول مکانیک سیالات و انتقال حرارت کاربردی نخواهند داشت. بنابراین، به منظور حل این مشکل متوسط‌گیری در یک حجم مشخص و اندازه‌گیری کلی برای کمیت‌هایی چون ضریب نفوذپذیری، بسیار مفید واقع می‌گردند و باعث ساده‌سازی توصیف جریان می‌شوند [۱].

1) Microscopic  
2) Macroscopic

روش متداول برای استخراج معادلات حاکم بر متغیرهای ماکروسکوپی در محیط متخلخل از معادلات استاندارد شروع می‌شود که سیال از آن‌ها تبعیت می‌کند و با متوسط‌گیری در یک حجم یا یک سطحی که در بر گیرنده تعداد معینی حفره باشد، قوانین حاکم به دست خواهند آمد. متوسط‌گیری با استفاده از دو روش امکان‌پذیر می‌باشد: روش فضایی<sup>۱</sup> و روش آماری<sup>۲</sup>. در روش متوسط‌گیری فضایی، میانگین متغیر ماکروسکوپی در یک حجم مشخصه بنیادی<sup>۳</sup>، که به اندازه کافی بزرگ است، تعریف می‌شود. به کمک این روش مقدار متغیر مورد نظر در مرکز حجم مشخصه بنیادی به دست خواهد آمد. فرض می‌شود نتایج به دست آمده، مستقل از ابعاد و اندازه حجم مذکور بوده و طول مقیاس<sup>۴</sup> این حجم از طول مقیاس حفره‌ها بسیار بزرگتر باشد؛ اما از طول مقیاس دامنه جریان ماکروسکوپی کوچکتر در نظر گرفته می‌شود [۱].



شکل (۲-۱) اندازه حجم مشخصه بنیادی نسبت به اندازه حفره‌ها و دامنه جریان [۱]

در روش آماری، متوسط‌گیری متغیرهای ماکروسکوپی بر روی مجموعه‌ای از حفره‌ها که از نظر ماکروسکوپی معادل می‌باشند، امکان‌پذیر است. به دلیل اینکه اطلاعات آماری مجموعه‌ای از

- 
- 1) Spatial Method
  - 2) Statistical Method
  - 3) Representative Elementary Volume (r.e.v.)
  - 4) Length Scale



حفره‌ها باید بر مبنای نمونه‌های ساده به دست آید و این فقط وقتی امکان‌پذیر است که مجموعه آماری همگن وجود داشته باشد، این روش یک روش سخت و پیچیده محسوب می‌شود. با صرف نظر از اثر نوسانات جریان، روابط استخراج شده بین کمیت‌های متوسط فضایی به کمک هر دو روش مذکور یکسان خواهند بود. بنابراین، روش اول که بر مبنای حجم مشخصه بنیادی است، به عنوان روش ساده‌تر، از اولیت بیشتری نسبت به روش آماری برخوردار می‌باشد. همچنین در سال‌های اخیر تعداد مقالات تحقیقاتی در این زمینه با روش آماری نیز افزایش یافته است [۱].

## ۱-۲) ضریب تخلخل<sup>۱</sup> ( $\varepsilon$ )

ضریب تخلخل یک محیط متخلخل کسری از حجم کل محیط است که توسط حفره‌ها اشغال می‌شود و به عنوان یکی از مشخصه‌های محیط متخلخل مطرح می‌باشد. در این تعریف از ضریب تخلخل، فرض می‌شود که تمام حفره‌ها به یکدیگر متصل هستند. اگر برخی از حفره‌ها هیچ گونه ارتباطی با سایر حفره‌ها نداشته باشند، در این صورت از عبارت ضریب تخلخل مؤثر<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. بنابراین، ضریب تخلخل مؤثر برابر با نسبت حجم حفره‌های متصل بهم به حجم کل محیط متخلخل می‌باشد.

برای محیط‌های متخلخل طبیعی، ضریب تخلخل معمولاً از مقدار ۰/۶ بیشتر نخواهد شد. برای بسترهایی<sup>۳</sup> با ذرات کروی<sup>۴</sup> و قطر یکنواخت این ضریب در محدوده ۰/۲۵۹۵ (برای بسترهایی با آرایش شش وجهی) و ۰/۴۷۶۴ (برای بسترهایی با آرایش مکعبی) خواهد بود. غیریکنواختی در اندازه ذرات باعث می‌شود تا ضریب تخلخل محیط کاهش یابد؛ زیرا ذرات با ابعاد کوچکتر نسبت به ذرات بزرگتر، حجم بیشتری از حفره‌ها را اشغال می‌کنند. ضریب تخلخل مواد ساخته شده توسط بشر حتی

- 
- 1) Porosity
  - 2) Effective Porosity
  - 3) Packed Beds
  - 4) Spherical Particles

می‌تواند تا مقدار یک نیز میل کند. در جدول ۱-۱ ضریب تخلخل برخی از مواد متداول آورده شده است [۱].

### ۱-۳) ضریب نفوذپذیری<sup>۱</sup>

ضریب نفوذپذیری یک محیط متخلخل، توانایی انتقال یا هدایت سیال از آن محیط تعریف می‌شود و واحد آن برابر با واحد طول به توان دو ( $m^2$ ) می‌باشد. همچنین این ضریب به عنوان بخشی از ثابت تناسب در قانون دارسی<sup>۲</sup> برای ارتباط بین خواص سیال، سرعت جریان سیال و گرادیان فشار آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. محققانی که در زمینه ژئوفیزیک کار می‌کنند، اغلب از یک واحد مشترک برای ضریب نفوذپذیری به نام *د/رسی* استفاده می‌کنند، که برابر با  $10^{-12} \times 987 \times 0$  متر مربع می‌باشد.

نفوذپذیری مواد متخلخل موجود در طبیعت دارای مقادیر بسیار متنوعی است. به عنوان مثال، ضریب نفوذپذیری ماسه تمیز<sup>۳</sup> در محدوده  $10^{-7}$  و  $10^{-9}$ ، شن تمیز<sup>۴</sup> در محدوده  $10^{-9}$  و  $10^{-12}$ ، ذغال سنگ<sup>۵</sup> در محدوده  $10^{-11}$  و  $10^{-13}$  و خاک رس<sup>۶</sup> در محدوده  $10^{-13}$  و  $10^{-16}$  می‌باشد. در جدول ۱-۱ ضریب نفوذپذیری مواد متخلخل پُرکاربرد آورده شده است [۱].

پیش‌بینی ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل یکی از مسائلی است که دانشمندان و محققان زیادی با آن سر و کار داشتند و دارند. این تحقیقات، به خصوص برای مواد متخلخل طبیعی که ساختار داخلی منافذ آن‌ها غیرقابل مشاهده است، از پیچیدگی خاصی برخوردار می‌باشد. بسیاری از مطالعات تئوری و تحقیقات تجربی روی بستری از ذرات کروی و یا الیافی از مواد مختلف به منظور

- 
- 1) Permeability
  - 2) Darcy's Law
  - 3) Clean Gravel
  - 4) Clean Sand
  - 5) Peat
  - 6) Clay

مدل‌سازی محیط متخلخل مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این گونه محیط‌های متخلخل مصنوعی، به دلیل ساختار شبکه‌ای، بستری همگن ایجاد می‌کنند؛ به طوری که بررسی محیط متخلخل را آسان‌تر و قوانین کلی را ساده‌تر می‌سازند. محققان به این نتیجه رسیدند که ضریب نفوذپذیری متأثر از پارامترهایی چون سطح و ساختار بستر محیط متخلخل، همگنی یا عدم همگنی آن، ضریب تخلخل و هندسه ذرات پُر کننده بستر می‌باشد.

جدول (۱-۱) خواص مواد متداول و پُر کاربرد [۲ و ۳]

مواد متداول و پُر کاربرد	ضریب تخلخل ( $\epsilon$ )	ضریب نفوذپذیری ( $K$ )
پودر سنگ سیاه	۰/۵۷ - ۰/۶۶	$۴/۹ \times 10^{-10} - ۱/۲ \times 10^{-9}$
آجر	۰/۱۲ - ۰/۳۴	$۴/۸ \times 10^{-11} - ۲/۲ \times 10^{-9}$
کاتالیزر	۰/۴۵	.....
سیگار	.....	$۱/۱ \times 10^{-5}$
فیلتر سیگار	۰/۱۷ - ۰/۴۹	.....
زغال سنگ	۰/۰۲ - ۰/۱۲	.....
سیمان	۰/۱۰	$۱ \times 10^{-9} - ۲/۳ \times 10^{-7}$
پودر مس	۰/۰۹ - ۰/۳۴	$۳/۳ \times 10^{-6} - ۱/۵ \times 10^{-5}$
چوب پنبه	.....	$۲/۴ \times 10^{-7} - ۵/۱ \times 10^{-7}$
الیاف شیشه	۰/۸۸ - ۰/۹۳	.....
سنگ خرد شده	۰/۴۵	.....
موی سر	۰/۹۵ - ۰/۹۹	$۸/۳ \times 10^{-6} - ۱/۲ \times 10^{-5}$
چرم	۰/۵۶ - ۰/۵۹	$۹/۵ \times 10^{-10} - ۱/۲ \times 10^{-9}$
سنگ آهک	۰/۰۴ - ۰/۱۰	$۲/۰ \times 10^{-11} - ۴/۵ \times 10^{-10}$
ماسه	۰/۳۷ - ۰/۵۰	$۲/۰ \times 10^{-7} - ۱/۸ \times 10^{-6}$
ماسه سنگ	۰/۰۸ - ۰/۳۸	$۵/۰ \times 10^{-12} - ۳/۰ \times 10^{-8}$
پودر سیلیس	۰/۳۷ - ۰/۴۹	$۱/۳ \times 10^{-10} - ۵/۱ \times 10^{-10}$
خاک	۰/۴۳ - ۰/۵۴	$۲/۹ \times 10^{-9} - ۱/۴ \times 10^{-7}$

## ۴-۱) مروری بر تحقیقات پیشین<sup>۱</sup>

کاربردهای وسیع محیط‌های متخلخل و بستر ذرات، موجب انجام تحقیقات زیادی در این حوزه در سال‌های اخیر شده است. مسیر تکاملی بررسی‌های انجام شده روی پدیده‌های انتقال در محیط متخلخل در چند قرن اخیر کاملاً مشهود است. با بررسی‌های اولیه هنری داری<sup>۲</sup> روی رفتار ماکروسکوپی جریان سیال در ستونی از ماسه ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل مطرح شد. در قرن نوزدهم کارمن و کازنی<sup>۳</sup> با بررسی بستر متشکل از ذرات مختلف، رابطه نیمه تجربی برای تعیین ضریب نفوذپذیری بر اساس مشخصه‌های هندسی را مطرح کردند. رابطه کارمن-کازنی توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفت. حل تحلیلی جریان استوکس از میان بستری از ذرات با اشکال هندسی متنوع نیز موضوعی است که در کارهای محققانی از جمله شاه‌نظری و همکارانش<sup>۴</sup> به آن پرداختند. خلاصه تحقیقات انجام شده در این زمینه در جدول ۱-۲ آورده شده است.

با افزایش سرعت، انحراف از قانون داری از اهمیت برخوردار می‌شود؛ برای اولین بار فُرچیمیر<sup>۵</sup> با افزودن ترم غیرخطی به رابطه داری به این موضوع پرداخت. برینکمن<sup>۶</sup> نیز با افزودن ترم ترم لاپلاسیین اثر ویسکوزیته مؤثر را بررسی نمود. در این راستا، وفایی و تین<sup>۷</sup> شکل کلی معادله اندازه حرکت به همراه ترم‌های فُرچیمیر و برینکمن را ارائه دادند. به این ترتیب، خلاصه تحقیقات انجام شده در این زمینه نیز در جدول ۱-۳ آورده شده است.

- 
- 1) Literature Review
  - 2) Henry Darcy
  - 3) Carman & Kozeny
  - 4) Shahnazari et al.
  - 5) Forchheimer
  - 6) Brinkman
  - 7) Vafai & Tien