

# جریان سیال در محیط‌های متخلخل

نویسنده:

زلتن ای. هینمن

مترجم:

مهندس محمد علی بابائی

مهندس سجاد آزادی خواه



[www.katibenovin.ir](http://www.katibenovin.ir)

|                     |                                                                                                   |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه             | : هاینه‌مان، زولتان ای. Heinemann, Zoltán E.                                                      |
| عنوان و نام پدیدآور | : جریان سیال در محیط‌های متخلخل / نویسنده زلتن ای. هینمن؛ مترجم محمد علی بابائی، سجاد آزادی‌خواه. |
| مشخصات نشر          | : شیراز: کتیبه نوین، ۱۳۹۹.                                                                        |
| مشخصات ظاهری        | : ۲۲۸ ص: جدول، نمودار.                                                                            |
| شابک                | : 978-622-6804-78-3 : ۴۰۰۰۰۰ ریال                                                                 |
| وضعیت فهرست نویسی   | : فیپا                                                                                            |
| یادداشت             | : عنوان اصلی: Fluid flow in Porous media, v1.                                                     |
| یادداشت             | : کتابنامه: ص ۲۱۷-۲۲۸.                                                                            |
| موضوع               | : مواد متخلخل--دینامیک سیالات                                                                     |
| موضوع               | : Porous materials--Fluid dynamics                                                                |
| موضوع               | : تخلخل                                                                                           |
| موضوع               | : Porosity                                                                                        |
| موضوع               | : تخلخل -- اندازه‌گیری                                                                            |
| موضوع               | : Porosity -- Measurement                                                                         |
| شناسه افزوده        | : سی بابائی، محمد، ۱۳۶۸، مترجم                                                                    |
| شناسه افزوده        | : آزاد خواه، سجاد، ۱۳۶۸، مترجم                                                                    |
| رده بندی کنگره      | : ۱۴۱۸۹                                                                                           |
| رده بندی دیویی      | : ۶۲۰/۱۱۶                                                                                         |
| شماره کتابشناسی ملی | : ۶۱۶۵۱۹۲                                                                                         |

|                         |                                              |
|-------------------------|----------------------------------------------|
| عنوان کتاب:             | جریان سیال در محیط‌های متخلخل                |
| نویسنده:                | زلتن ای. هینمن                               |
| مترجم:                  | مهندس محمد علی بابائی، مهندس سجاد آزادی‌خواه |
| ناشر:                   | کتیبه نوین                                   |
| نوبت چاپ:               | اول ۱۳۹۹                                     |
| شابک:                   | ۹۷۸-۶۲۲-۶۸۰۴-۷۸-۳                            |
| شمارگان:                | ۱۰۰۰ جلد                                     |
| سر ویراستار و صفحه آرا: | علی داودی                                    |
| چاپ و صحافی:            | مهر                                          |
| قیمت:                   | ۴۰۰۰ تومان                                   |

(کلیه حقوق برای انتشارات کتیبه نوین محفوظ است)

## پیشگفتار

توصیف جریان در محیط‌های متخلخل بسیار پیچیده‌تر از جریان در درون لوله و کانال است. اندازه‌گیری قطر لوله و محاسبه ظرفیت جریان آن بصورت تابعی از فشار نسبتاً آسان است اما در محیط متخلخل مسیر اصلی جریان مشخص و ابعاد آن قابل اندازه‌گیری نیست.

آنالیز جریان سیال طی سال‌ها، هم بصورت تحلیلی و هم بصورت تجربی، مطالعه شده است. فیزیکدانان، مهندسان، هیدرولوژیست‌ها و... رفتار جریان را در محیط متخلخل در بازه‌های مختلفی از راد، از بسته‌های شنی تا شیشه‌های پیرکس، در آزمایشگاه بررسی کرده‌اند و کوشیده‌اند نتایج را عموماً بنویسند تا بتوان رفتار سیستم‌های مشابه را تحلیل و پیش‌بینی کنند.

این کتاب می‌تواند به عنوان یکی از منابع کنکور کارشناسی ارشد و دکترای رشته مهندسی مخازن هیدروکربنی مدنظر قرار گیرد. همچنین این کتاب به عنوان یک درس سه واحدی در دوره کارشناسی ارشد تدریس می‌شود.

آنچه پیش روی شما است بازنویسی دقیق از کتاب (FLUID FLOW IN POROUS MEDIA) اثر Zoltán E. HEINEMANN به زبان فارسی است که شامل پنج فصل می‌باشد.

در این کتاب در فصل اول توضیحاتی در مورد خواص محیط متخلخل داده شده است و سپس بصورت تحلیلی و عددی به بررسی جریان سیال در محیط متخلخل پرداخته شده است. بطوری که در فصول ۲ تا ۴ به بررسی معادله فیلتراسیون و حل آن می‌پردازد و در فصل ۵ حرکت پیستون مانند سیال در محیط متخلخل را شرح می‌دهد.

امید است که این کتاب سهمی هرچند کوچک در پیش برد دانش دانشجویان رشته مهندسی نفت را به خود اختصاص دهد. در پایان از تمامی کسانی که در مراحل مختلف تحصیلی ما را یاری کرده‌اند تشکر می‌نماییم و از خوانندگان خواهشمندیم که در صورت یافتن اشکال در این اثر بوسیله آدرس پستی زیر به ما اطلاع دهند.

محمدعلی بابایی و سجاد آزادی‌خواه

alibabaiem@yahoo.com

## فهرست مطالب

| عنوان                                                | صفحه |
|------------------------------------------------------|------|
| فصل اول: اصول خواص محیط متخلخل.....                  | ۱۵   |
| ۱-۱ تخلخل.....                                       | ۱۸   |
| ۱-۱-۱ جنبه‌های عمومی و تعریف.....                    | ۱۸   |
| ۱-۲ تعین تخلخل.....                                  | ۲۰   |
| ۱-۳ فشردگ.....                                       | ۲۲   |
| ۱-۴ قابلیت فشردگی محیط متخلخل.....                   | ۲۲   |
| ۱-۵ طبقه‌بندی حفرات.....                             | ۲۵   |
| ۲-۱ خواص مویینگی.....                                | ۲۶   |
| ۱-۲-۱ اشباع.....                                     | ۲۶   |
| ۲-۲-۱ قابلیت ترشوندگی.....                           | ۲۶   |
| ۱-۲-۲-۱ طبقه‌بندی سنگ‌های مخزن براساس ترشوندگی.....  | ۲۸   |
| ۲-۲-۲-۱ اندازه‌گیری ترشوندگی.....                    | ۳۰   |
| ۱-۲-۲-۲-۱ اندازه‌گیری زاویه تماس.....                | ۳۲   |
| ۲-۲-۲-۲-۱ روش آموت.....                              | ۳۲   |
| ۳-۲-۲-۲-۱ شاخص ترشوندگی USBM.....                    | ۳۴   |
| ۳-۲-۱ فشار مویینگی.....                              | ۳۸   |
| ۱-۳-۲-۱ تعریف.....                                   | ۳۸   |
| ۲-۳-۲-۱ اندازه‌گیری فشار مویینگی در محیط متخلخل..... | ۴۱   |
| ۱-۲-۳-۲-۱ روش سانتیفریوژ.....                        | ۴۳   |
| ۲-۲-۳-۲-۱ تزریق جیوه (روش پورسل).....                | ۴۸   |
| ۳-۳-۲-۱ تبدیل داده آزمایشگاهی.....                   | ۴۹   |
| ۴-۲-۱ تابع لورت.....                                 | ۵۰   |

|    |                                            |
|----|--------------------------------------------|
| ۵۱ | ۵-۲-۱ توزیع اندازه منافذ                   |
| ۵۳ | ۶-۲-۱ تعادل عمودی                          |
| ۵۶ | ۳-۱ تراوایی                                |
| ۵۶ | ۱-۳-۱ قانون دارسی                          |
| ۵۸ | ۲-۳-۱ تعریف و واحدهای نفوذپذیری            |
| ۶۰ | ۳-۳-۱ اندازه‌گیری تراوایی                  |
| ۶۴ | ۴-۳-۱ اثر کلینکنبرگ                        |
| ۶۴ | ۱-۳-۱ مقایسه بین قوانین دارسی، اهم و فوریه |
| ۶۶ | ۳-۳-۱ سرعت فیلتراسیون                      |
| ۶۷ | ۷-۳-۱ معادله درجه دوم فیلتراسیون           |
| ۶۸ | ۴-۱ تراوایی‌های نسبی                       |
| ۶۹ | ۱-۴-۱ تعریف نفوذپذیری نسبی                 |
| ۷۰ | ۲-۴-۱ تعاریف نقطه پایانی اشباع             |
| ۷۱ | ۳-۴-۱ اندازه‌گیری نفوذپذیری نسبی           |
| ۷۱ | ۱-۳-۴-۱ روش هاسلر                          |
| ۷۵ | ۲-۳-۴-۱ روش ایالت پن                       |
| ۷۶ | ۳-۳-۴-۱ روش ولج                            |
| ۷۶ | ۴-۴-۱ توزیع اشباع و تراوایی نسبی           |
| ۷۹ | ۵-۱ منابع                                  |
| ۸۱ | <b>فصل دوم: معادلات فیلتراسیون تک فاز</b>  |
| ۸۴ | ۱-۲ معادله اساسی فیلتراسیون                |
| ۸۴ | ۱-۱-۲ شکل دیفرانسیلی قانون دارسی           |
| ۸۸ | ۲-۱-۲ محیط متخلخل ناهمسان                  |
| ۹۰ | ۲-۲ معادله حالت                            |
| ۹۰ | ۱-۲-۲ سیالات غیر قابل تراکم                |

- ۲-۲-۲ سیال کمی تراکم پذیر ..... ۹۰
- ۳-۲-۲ ضریب جمی سازند ..... ۹۱
- ۴-۲-۲ گازهای ایده‌آل و حقیقی ..... ۹۲
- ۵-۲-۲ معادله پیوستگی ..... ۹۴
- ۳-۲ اشکال خاص معادله فیلتراسیون ..... ۹۶
- ۱-۳-۲ سیال تراکم پذیر ..... ۹۶
- ۲-۳-۲ سیالات کم تراکم پذیر ..... ۹۷
- ۱-۲-۲ محیط‌های متخلخل کُشسان ..... ۹۸
- ۴-۲ گازهای ایده‌آل و حقیقی ..... ۱۰۰
- ۵-۲ شرایط اولیه و مرز ..... ۱۰۲
- ۱-۵-۲ شرایط مرز ..... ۱۰۲
- ۲-۵-۲ شرایط اولیه ..... ۱۰۳
- ۳-۵-۲ ناپیوستگی در محیط متخلخل ..... ۱۰۴
- ۶-۲ شمایی از معادلات فیلتراسیون ..... ۱۰۵
- فصل سوم: حل معادله فیلتراسیون تک فاز ..... ۱۰۹**
- ۱-۳ حالت پایدار فیلتراسیون ..... ۱۱۲
- ۱-۱-۳ حالت پایای فیلتراسیون سیال کم تراکم پذیر ..... ۱۱۲
- ۲-۱-۳ فیلتراسیون حالت پایا در سیستم شعاعی ..... ۱۱۴
- ۳-۱-۳ فیلتراسیون گاز در حالت پایا ..... ۱۱۶
- ۲-۳ فیلتراسیون ناپایا در سیستم نامتناهی ..... ۱۱۹
- ۱-۲-۳ سیستم شعاعی با دبی تولید ثابت ..... ۱۱۹
- ۲-۲-۳ خواص تابع  $E_i$  ..... ۱۲۳
- ۳-۲-۳ افت فشار در مکان و زمان ..... ۱۲۴
- ۴-۲-۳ تزریق فشاری جریان ..... ۱۲۷
- ۳-۳ متغیرهای بدون بعد ..... ۱۲۸

|                                     |                                                  |     |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------|-----|
| ۳-۴                                 | سیستم‌های شعاع بی‌نهایت با فشار ثابت در درون مرز | ۱۳۳ |
| ۳-۵                                 | فیلتراسیون حالت ناپایدار در سیستم محدود          | ۱۳۸ |
| ۳-۵-۱                               | دبی تولید ثابت                                   | ۱۳۸ |
| ۳-۵-۱-۱                             | مرزهای بیرونی بسته شده                           | ۱۳۸ |
| ۳-۵-۱-۲                             | مرز با فشار ثابت                                 | ۱۴۰ |
| ۳-۵-۲                               | فشار ثابت در مرز داخلی و مرز خارجی بسته          | ۱۴۱ |
| ۳-۶                                 | حالت ناپایای فیلتراسیون در سیستم خطی             | ۱۴۲ |
| ۳-۶-۱                               | جریان خطی با دبی ثابت تولید                      | ۱۴۲ |
| ۳-۷                                 | اصل انطباق                                       | ۱۴۸ |
| ۳-۷-۱                               | قانون اول انبساط                                 | ۱۴۸ |
| ۳-۷-۲                               | قانون دوم انبساط                                 | ۱۵۱ |
| ۳-۷-۳                               | محاسبه مساحت مورد نیاز                           | ۱۵۳ |
| ۳-۷-۴                               | یک چاه با دبی‌های تولید متفاوت                   | ۱۵۳ |
| ۳-۷-۵                               | ساخت فشار چاه بسته                               | ۱۵۵ |
| ۳-۷-۶                               | روش تصویری                                       | ۱۵۶ |
| ۳-۷-۶-۱                             | آزمایش ساخت فشار در نزدیکی مرز بارر جریان        | ۱۵۸ |
| ۳-۷-۶-۲                             | مرز با فشار ثابت                                 | ۱۶۰ |
| ۳-۸                                 | منابع                                            | ۱۶۲ |
| <b>فصل چهارم: فیلتراسیون دو فاز</b> |                                                  |     |
| ۴-۱                                 | معادله فیلتراسیون دو فاز                         | ۱۷۳ |
| ۴-۲                                 | فیلتراسیون عمودی سیالات تراکم‌ناپذیر             | ۱۷۴ |
| ۴-۳                                 | روش حل باکلی-لورت                                | ۱۷۷ |
| ۴-۳-۱                               | روش ولج                                          | ۱۸۱ |
| ۴-۴                                 | تأثیر جاذبه و نیروی موینگی                       | ۱۸۶ |
| ۴-۴-۱                               | تأثیر جاذبه                                      | ۱۸۶ |