d

DOI: 10.22034/ijche.2021.257620.1069

DOR: 20.1001.1.17355400.1400.20.116.3.8

Estimation of Pore Size and Permeability in Porous Media Using Image Processing

M. Kianinia¹, S. M. Abdoli^{2*}, S. Shafiei³

M. Sc. in Chemical Engineering, Sahand University of Technology
 Assistant Professor of Chemical Engineering, Sahand University of Technology
 Professor of Chemical Engineering, Sahand University of Technology
 Email: abdoli@sut.ac.ir

Abstract

In this study, the porous media's morphological information, such as pore and particle size distribution, number of particles, and porosity, was extracted using image processing by imaging the spherical particle bed. The findings revealed that the ratio between the average pore diameter and the mean particle diameter is logarithmically related to porosity. The pore network model was used to measure the permeability in porous media. To create a pore network, all of the information derived from the image was used. The pressure distribution, flow rate, and consequently, the permeability have been determined after applying the governing equations in the network. The simulation findings for validation were compared to the permeability calculated in the experiment and the Carmen-Kozeny and Rabbani et al. equations. It was observed that the experimental results are more consistent with the results of the pore network model due to considering the internal structure of the porous media in the form of pores and throats.

Received: 16 November 2020 Accepted: 17 January 2021 Page Number: 36-49

Keywords:

Image Processing, Pore Size Distribution, Pore Network Model, Permeability

Please Cite this Article Using:

Kianinia, M., Abdoli, S. M., Shafiei, S., "Estimation of Pore Size and Permeability in Porous Media Using Image Processing", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20, No. pp. 116, 36-49, In Persian, (2021).



doi

ন্ত

DOI: 10.22034/ijche.2021.257620.1069

DOR: 20.1001.1.17355400.1400.20.116.3.8

تخمین اندازهٔ حفرهها و نفوذ پذیری در محیط متخلخل با استفاده از پردازش تصویر مهسا کیانی نیا ^۱، سیدمجید عبدلی^{۲*}، سیروس شفیعی^۳ مهسا کیانی نیا ^۱، سیدمجید عبدلی ^{۲*}، سیروس شفیعی^۳ مهسا کیانی نیا ^۱، سیدمجید عبدلی ^{۲*}، سیروس شفیعی ۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند ۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند ییام نگار: abdoli@sut.ac.ir

چکیدہ

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۸/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۸ شماره صفحات: ۳۶ تا ۴۹

كليدواژەھا:

پردازش تصویر، توزیع اندازهٔ حفرهها، مدل شبکهٔ حفرهای، ضریب نفوذپذیری در این پژوهش با تصویربرداری از بستر ذرات کروی و استفاده از پردازش تصویر، اطلاعات ریخت شناختی محیط متخلخل نظیر توزیع اندازهٔ ذرات و حفرهها، تعداد ذرات و تخلخل استخراج شد. با بررسی دادههای به دست آمده، مشاهده شد که نسبت میانگین قطر حفرهها به میانگین قطر ذرات با تخلخل رابطهٔ لگاریتمی دارد. با توجه به اهمیت محاسبهٔ ضریب نفوذپذیری در محیطهای متخلخل، از مدل شبکهٔ حفرهای استفاده شد. برای ساخت شبکهٔ حفرهای کلیهٔ اطلاعات استخراج شده از تصویر به کار رفت. بعد از اعمال معادلات حاکم در شبکه، توزیع فشار، دبی جریان و درنتیجه ضریب نفوذپذیری در اعمال شد. نتایج حاصل از شبیه سازی برای اعتبار سنجی با ضریب نفوذپذیری اندازه گیری شده در آزمایش و معادلات تجربی کارمن-کوزنی و ربانی و همکاران مقایسه و مشاهده شد که متعلجل به صورت حفرهها و گلوییها مطابقت بیشتری دارد.

* تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

کیانینام،عبدلی،س.م، شفیعی، س.، "تخمین اندازهٔ حفرهها و نفوذپذیری در محیط متخلخل با استفاده از پردازش تصویر"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیستم، شماره ۱۱۶، صص. ۴۹–۳۶، (۱۴۰۰).

۱. مقدمه

امروزه بررسی جریان سیال و یدیدههای انتقال در محیطهای متخلخـل بـهدليـل اهميـت آن در كاربردهـای صـنعتی، مهندسـی، زیستشناختی و زیستمحیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هندسه، فضای حفرهها و توپولوژی از جمله شاخصههای کلیدی محيط متخلخل است؛ در صورتي كه اين مؤلف ها به طور صحيح حساب شوند، نقش مهمی در تعیین خصوصیات محیط متخلخل ایفا میکنند؛ اما پیچیدگی و مقیاس کوچک هندسهٔ حفرههای طبیعی باعث می شود تا اندازه گیری و شبیه سازی مقیاس حفرهای جریان و انتقال فرایندها چالش برانگیز باشد و همواره توزیع و حركت سيال را تحت تأثير قرار دهد[۱]. لذا طي چند دههٔ گذشته، با توجه به ساختار پیچیدهٔ حفرهها و تغییرات شرایط محیطی، رویکردهای آزمایشاگاهی و تجربی، نظری و روشهای عددی بسیار زیادی برای مطالعهٔ فرایندهای انتقال در محیط متخلخل ییشنهاد شده است[۲]. در منابع مختلف اساساً به طور گسترده از معادلهٔ کارمن- کوزنی برای جریان سیال در محیطهای مختلف استفاده مي شود [۴و۳]. اين معادله مشهور ترين رابطه بين نفوذيذيري و تخلخل است که نقطهٔ شروع برای دیگر مدلهای نفوذپذیری است[۶و۵]. خدور (و همکاران، مدلی برای تخمین نفوذپذیری از روی توزیع اندازهٔ حفرهها و خواص سیال به صورت تابعی از فشار متوسط سیال ارائه دادند؛ این مدل بر اساس یک مجموعهٔ تصادفی از دستهٔ لولههای مویین است که در آن اندازهٔ حفرهها از بزرگ به کوچک مرتب شده است. اندازهٔ فضای حفرهها با استفاده از روش آزمایشـگاهی تزریـق جیـوه تعیـین شـد. مشـاهده شـد کـه نتـایج بهدستآمده با دادههای آزمایشگاهی همخوانی دارد[۷]. اکای و همکاران، با استفاده از الگوریتم خدور و همکاران نفوذپذیری نسبی گاز و مایع را در محیط متخلخل به صورت تابعی از اشباعیت مایع به دست آوردند. نتایج نشان داد که مدل ارائهشده، مطابقت خوبی با دادههای آزمایشگاهی مختلف دارد[۸].

اخیراً بهدلیل در دسترسبودن منابع قدرتمند رایانهای و توسعهٔ روشهای توصیفشده در مقیاس حفرهای، مدلسازی مقیاس حفرهای، یکی از ابزارهای مهم برای مطالعهٔ جریان و انتقال فرایندها و ارتباط آنها با پدیدههای ماکروسکوپی شده است که با سادهسازی

نمایش محیط متخلخل با بستههای کروی تصادفی یا منظم تکمیل می شود[۱۰و۹]. مطالعهٔ فرایندهای مقیاس حفرهای برای بررسی جریان و انتقال سیال در سطح ماکرو ضروری است و کارهای آزمایشگاهی در مقیاس حفرهای در اغلب موارد بهدلیل دشواریهای زیاد از جمله هزینهٔ بالا، دسترسی نداشتن به تمام تجهیزات و نمونههای لازم برای آزمایش، پیچیده و زمان بر بودن و در برخی مواقع خطرناک بودن آزمایش از لحاظ فنی، کاربرد چندانی ندارد. این امر باعث می شود که مدلسازی و روش های محاسباتی و رایانهای و تصویربرداری برای بررسی محیط متخلخل جایگزین خوبی برای کارهای آزمایشگاهی باشند[۱۱]. تاکنون مدلهای ریاضی متفاوتی به طور سنتی در مقیاس های ماکروسکوپی توسعه يافته است، ولى اين مدلسازىها، هندسة منافذ را بهطور واضحی در نظر نمی گیرند[۱]. شبیه سازی مقیاس حفرهای جریان، مدلسازی و پژوهشهای مقیاس آزمایشگاهی را بدون متوسط گیری از خواص محيط متخلخل ممكن مىسازد. مدلسازى مقياس حفرهای به دو دستهٔ عمده تقسیم بندی می شود؛ دستهٔ اول به عنوان شبیهسازی عددی مستقیم (DNS) معرفی میشود که این روش شامل روش دینامیک محاسباتی سیال (CFD^{*})، روش شبکهٔ بولتزمن (LBM^۵) و هیدرودینامیک ذرات صاف (SPH^۶) است. دستهٔ دوم از مدلسازی مقیاس حفرهای، مدلسازی شبکهٔ حفرهای (PNM^{*}) است که در این روش فضای حفرهای بهصورت شبکهای از حفرهها و گلوییهای بههم متصل شده، نمایش داده می شود. از این مدل بهعنوان ابزاری قدرتمند در زمینههای مختلف تحقیقاتی از جمله مهندسی شیمی، نفت، زیستفناوری، مواد و برای بررسی پدیدههای انتقال در محیط متخلخل و پیشبینی خواص مهم از جمله نفوذ پذیری مطلق و نسبی، ضرایب انتقال جرم و حرارت و جز اینها استفاده می شود [۱۵–۱۲]. مدل سازی شبکهٔ حفرهای یکی از روشهای اصلی برای شبیهسازی رفتار هیدرولیکی محیط متخلخل در مقیاس کوچک (میکرو) است. مدل های شبکهای که نمایان گر فضای خالی یک جامد متخلخل بهوسیلهٔ شبکهای از منافذ متصل به گلوییها هستند، می توانند نفوذپذیری نسبی را پس از مشخص شدن هندسهٔ منافذ و اشباعیت آن پیش بینی کنند [۱۶].

^{3.} Direct Numerical Simulation

^{4.} Computational Fluid Dynamic

^{5.} Lattice Boltzmann Method

^{6.} Smoothed Particle Hydrodynamics

^{7.} Pore Network Model

^{1.} Khaddour 2. Ecay

استخراج شبکهٔ حفرهای یک گام اساسی بـرای مـدلسـازی شـبکهٔ حفرهای است و با سه روش اصلی قابل اجراسـت: (۱) بیشـینه کـرهٔ محاطی و رویکرد فاصلهٔ حفرهها، (۲) اسکلت بنـدی، نـازکسـازی و

تجزیه و تحلیل محور میانی، و (۳) تقسیم بندی آبیخشان [۱۷]. برای تجزیه و تحلیل جریان و کارایی مواد متخلخل لازم است که اطلاعات مربوط به هندسه و توپولوژی فضای حفرهها مشخص شود. چندین روش برای توصیف ساختار فضای حفرهها وجود دارد. یکی از این روشها، تصویربرداری است. تولید عکسهای سهبعدی با تصویربرداری از ساختار داخلی واقعی نمونه های اصلی، ساختن عکسهای سهبعدی همنهشتشده از بخشهای نازک و دوبعدی با وضوح بالا و با استفاده از روش های آماری و یا شبیهسازی فرایندهای زمینشناسی نمونههایی از این روش هستند[۲]. بعد از تصویربرداری از محیط متخلخل، از جمله روشهای مورد استفاده برای بررسی محیط، یردازش تصویر است. یردازش تصویر عبارت است از فرایندی که به کمک آن می توان با کار کردن بر روی عناصر تصویر، اطلاعات مفیدی از آن استخراج کرد. وظایف اصلی یے دازش تصویر شامل کاهش نویز، تقویت تصویر (تغییر وضوح و روشنایی)، طبقهبندی پیکسلها، ترکیب و فشردهسازی تصویر، خوشهبندی، میانگین گیری و دیگر وظایف است[۱۸]. با تجزیه و تحلیل تصاویر فضاى محيط متخلخل، اندازة حفرهها، اندازة ذرات، سطح ويرث، تخلخل، عدد كئورديناسيون و خاصيت و سبك بافت مواد قابل دستيابي است. امروزه علم پردازش تصوير با توجه به کاربردهایی که در بسیاری از علوم و سنایع دارد، پیشرفت چشم گیری داشته است. از جمله این کاربردها می توان به علم پزشکی، زمین شناسی، علوم نظامی و امنیتی، صنعت و غیره اشاره كرد. چاي و همكاران [١٩]، تجزية الكتروليتي مايع يوني هیدروکسیل آمونیوم نیترات (HAN) در یک میکرو راکتور شفاف را بهصورت مؤلفهای با استفاده از روش پردازش تصویر بررسی کردن. در این پژوهش یک جفت الکترود به عنوان مؤلفهٔ مطلوب مشخص شد. به طورى كه اين مؤلفه قادر به تجزية الكتروليتي مايع يونى HAN به طور مداوم حتى در ولتاژهاى بالاست. يافته هاى حاصل از این تحقیق برای کنترل میزان واکنش کلی در مقیاس میکرو می تواند به کار رود. گروززیچ و سانکوفسکی^۳ جریان گرانشی فراینـد

تخليهٔ سيلوها را با استفاده از يردازش تصوير بررسي كردند [۲۰]. شائو ً و همکاران[۲۱] یک روش پردازش تصویر بـرای انـدازهگیـری توزيع اندازهٔ حبابها ارائه کردند. این روش از پنج گام اصلی تقویت تصویر، بازسازی دیجیتال، تقسیم حباب کوچک، تقسیمبندی حباب بزرگ - خوشه و یس- یردازش^۵ تشکیل شده است. نتایج حاکی از آن بود که روش پیشنهادی برای توصیف حبابها با وضوح بالا در جریان چندفازی، یک روش ارزان قیمت نسبت به روش های دیگر است. توابع مختلفی برای پردازش تصویر استفاده می شوند؛ از جمله توابع مهم مي توان به الگوريتم آبيخشان ² و انواع توابع مسافت⁷ اشاره کرد. تابع مسافت از جمله ابزار کاربردی در پردازش تصویر است. این تابع حداقل فاصله بین هر کدام از پیکسل های فضای خالی (فضای حفرهای) و پیکسلهای اشغال شده به سیلهٔ ماتریس جامد (ذرات) را اندازه گیری می کند. به منظور استفاده از این تابع، تمام تصاویر بایستی به تصاویر دودویی تبدیل شوند. الگوریتم آبیخشان، ابزاری قدرتمند برای تقسیمبندی تصاویر دوبعدی و سهبعدی در ریختشناسی ریاضی است. در تجزیهٔ تصاویر محیط متخلخل از این الگوريتم براي تشخيص ذرات يا حفرهها و استخراج اندازهٔ ميانگين آنها استفاده میشود. این الگوریتم یک روش بسیار خوب و کاربردی در تقسیمبندی تصویر است و برای تشخیص مرز اشیا و توصيف ساختار سنگ در علم رايانه استفاده ميشود. بالدوين^ و همکاران، برای اولین بار برای تقسیمبندی تصاویر یک محیط متخلخل مصنوعي از الگوريتم آبپخشان استفاده كردند. آنها بستر استوانهای پر شده از ذرات کروی پخش شده به صورت تصادفی را بررسی کردند و مدلی برای توزیع عدد کئوردیناسیون شبکهٔ حفرهای ارائه دادند [۲۲]. شپارد و همکاران يک روش ترکيبي از الگوريتم آبپخشان و فاصلهٔ فعال برای تقسیم بندی فاصلهٔ مقیاس خاکستری نقشههای بهدست آمده از تبدیل تصاویر باینری استفاده کردند[۲۳]. از آنجایی که روش آبپخشان به نویزهای تصویر حساس است، یک فیلتر یخش ناهمسان گرد به کار بردند. در نهایت نویزها حذف و ویژگیهای عینی قابل توجه حفظ شدند. کتچام ^{۱۰} [۲۴] از الگوریتم آبیخشان برای جداکردن ذرات بههم چسبیده و استخراج توزیع

4. Shao

- 5. Post processing
 6. Watershed segmentation
- 7. Distance transform
- 8. Baldwin
- 9. Sheppard
- 10. Ketcham

- 1. Chai
- Hydroxyl ammonium nitrate
 Grudzień and Sankowski
- 3. Grudzien and Sankowski

اندازه از تصاویر پرتو ایکس با وضوح بالا استفاده کردند. ویلدنشیلد و شپارد^۱[۱۷] از روش آبپخشان برای تقسیمبندی فضای خالی شـن و ماسه استفاده کردند.

با توجه به پژوهشهای مختلف مشخص است که عملکرد تمام فرایندها و سازوکارهای اتفاق افتاده در محیط متخلخل بهطور مستقیم و یا غیر مستقیم بهسیلهٔ ساختار حفرهای کنترل می شود. همچنین برای بررسی و اهداف علمی و مهندسی صرفاً درک کیفی کافی نیست و باید بهصورت کمی سنجیده شود؛ لذا بهدست آوردن رابطهای برای اندازهٔ متوسط حفرهای میتواند نقش مؤثری در شناخت عملکرد محیط متخلخل داشته باشد. هدف از این مطالعه استفاده از تصویربرداری و پردازش تصویر برای استخراج اطلاعات ریختشناختی محیط متخلخل و ارائهٔ رابطهای برای تخمین متوسط اندازهٔ حفرهها است. سپس با استفاده از اطلاعات حاصل و مدل سازی شبکهٔ حفرهای، نفوذپذیری محیط حساب می شود.

۲. روش مدلسازی و آزمایش

برای داشتن محیط متخلخل دوبعدی، ساخت بسترهای پر شده از ذرات کروی در نظر گرفته شده است. بنا بر ایـن ابتـدا جعبـههـای

مكعب مستطيلي در سه اندازهٔ متفاوت، از جنس يلكسي گلاس شفاف ساخته شد، سیس تعدادی ساچمهٔ فلزی کروی بهعنوان ذرات جامد محیط متخلخل در چهار اندازهٔ ۶، ۷، ۸ و ۱۰ میلی متر، در هر کدام از جعبهها، ریخته شد. با در نظر گرفتن مقدار تخلخل و با تغییردادن تعداد و اندازهٔ ذرات در هـ کـدام از بسترها، تصویرهای متفاوتی گرفته شد. تصاویر بهدستآمده، در انواع حالتهای مختلف بهعنوان ورودی، به نرمافزار متلب^۲ وارد شدند. برای پردازش تصاویر، از جعبهابزار پردازش تصویر آدر متلب استفاده شد. بهعنوان اولین مرحلهٔ پردازش تصویر و بهمنظور سادهسازی تجزیه و تحلیل، تصاویر ورودی با کمک آرایههای دو بعدی به تصاویر باینری[†] (دودویی) به رنگ سیاه و سفید که بهترتیب معرف فضای حفرهای و جامد هستند، تبدیل شدند. مراحل بعدی پردازش تصویر که شامل کاهش و حـذف نـویز و اشـیای کوچـک از تصـویر، عملیات و تبدیلات ريخت شناختي، استفاده از تابع تبديل مسافت سيتي بلاك و تقسیم بندی آبیخشان است، به تر تیب انجام شد. شکل (۱) مراحل گفتهشده را نشان میدهد. این عملیات باعث میشود که نواحی خالی تصویر که بهعنوان فضای حفرهای در نظر گرفته شده است، به چندین قسمت جداگانه بهوسیلهٔ خطوط مرزی تقسیم شوند.



در پژوهش حاضر، از ترکیب دو الگوریتم آبپخشان و سیتی بلاک، برای شناسایی ساختار دقیق حفرهها و تقسیمبندی آنها استفاده می شود. برای تشخیص و ثبت تک تک فضاهای جدا شده، از دستور برچسب زدن ٔ استفاده شد. بعد از برچسب گذاری اشیای مـرتبط در تصویر، اطلاعات مهم موجود در آنها، جهت دستهبندی، دانستن تعداد اشیا، مقایسه، خوشهبندی یا بازشناسی اشیای مرتبط، به صورت ماتریس استخراج می شود. با بررسے پیکسل به پیکسل تصویر، سطح فضای حفرهای بهعبارتی سطح قسمت سیاه موجود در هر یک از بخشها، همان طور که در شکل (۲) به وسیلهٔ دایرهای محصور نشان داده شده، اندازه گیری شد. در نهایت با استفاده از نتایج حاصل و با فرض دایرهای شکل بودن سطح مقطع هر کدام از حفرهها، شعاع حفرهها بهصورت تقريبي بهدست آمد. با استفاده از این روش، مساحت تمام فضاهای خالی موجود در تصویر، حساب شد و می توان یک توزیع برای اندازهٔ حفرهها به دست آورد. با توجه به اطلاعات حاصل، رابطه ای بر اساس تخلخل و میانگین اندازهٔ ذرات برای تخمین میانگین اندازهٔ حفرهها ارائه می شود، تا بتوان بدون دسترسی به امکانات آزمایشگاهی و تصویربرداری با استفاده از رابطهٔ ارائه داده شده میانگین اندازهٔ حفرهها بسترهای پرشده از ذرات

کروی را تخمین زد. در این حالت اطلاعات شبکه با مادهٔ متخلخل واقعی بیشتر مطابقت دارد و ارزش و اعتبار مدل و شبیهسازی افزایش مییابد.

در بخش دوم مطالعهٔ حاضر از مدل شبکهٔ حفرهای برای تخمین نفوذپذیری با استفاده از اطلاعات حاصل از قسمت پردازش تصویر استفاده میشود. مدل شبکهای که در این تحقیق به کار رفته است، مدلی دوبعدی از حفرههای بههم پیوسته بهوسیلهٔ مجراهاست. در شبکهٔ دوبعدی عدد کثوردیناسیون برابر چهار است؛ یعنی هر حفرهٔ داخلی شبکه به چهار حفرهٔ مجاور خود متصل است. اطلاعات مورد نیاز برای ساخت شبکهٔ حفرهای عبارت است از طول شبکهٔ حفرهای، تعداد کل حفرهها و مجراها، محل قرارگیری حفرهها، توزیع سایز حفرهها و مجراها، شکل هندسی حفرهها و مجراها و عدد کئوردیناسیون هر حفره. در شبکهٔ مورد بحث تمامی مؤلفههای مطرح شده، از تصویربرداری و پردازش تصویر حاصل میشوند. پس از مشخص شدن شعاع حفرهها، شعاع گلوییها طبق رابطهٔ (۱)

$$R_{ij} = \alpha \times \min[R_{pi}, R_{pj}]$$



Figure 2. Extraction and calculation of pore radius with watershed segmentation and cityblock algorithm.

1. Labeling

٤١

در این رابطه R_{pi} و R_{pi} بهترتیب برابر شعاع حفره i و j هستند و α مؤلفهٔ عددی است. با توجه به این که تخلخل استخراجشده از تصویر بیان گر تخلخل واقعی محیط متخلخل است، در نتیجه تخلخل شبکه نیز باید با آن برابر باشد. به این منظور در صورتی که طول شبکه ثابت فرض شود، با استفاده از ضریب α مقدار تخلخل تنظیم میشود. فاصلهٔ مرکز تا مرکز حفرهها با استفاده از رابطهٔ (۲) حساب میشود. که در آن (x_i,y_i) و (x_j,y) بهترتیب مختصات حفره i و j هستند. هر گلویی دو حفره را بههم متصل می کند. فاصلهٔ بین دو حفرهٔ مجاور هم بهعنوان طول مجرا شناخته می شود که طبق رابطهٔ (۳) تعیین می شود.

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 - (y_i - y_j)^2}$$
(7)

$$L_{throat} = L_{ij} - (R_{pi} + R_{pj})$$
(°)

برای محاسبهٔ حجم و سطح حفرهها و مجراها باید شکل هندسی آنها مشخص شود که در مطالعهٔ حاضر به ترتیب کروی و استوانهای شکل فرض شده است. همچنین هر دو دسته حفرهها و مجراها دارای حجم فیزیکی هستند. تخلخل شبکهٔ حفرهای طبق رابطهٔ (۴) حساب می شود.

$$\emptyset = \frac{\sum \mathbf{v}_{\text{pore}} + \sum \mathbf{v}_{\text{throat}}}{A \times (2 \times R_{\text{max}})}$$
(°)

طبق این رابطه vpore کم مجموع حجم حفرهها و vthroat و بعدی حجم گلوییها هستند. با توجه به این که شبکهٔ مد نظر دو بعدی است، ضخامت شبکه برابر قطر بزرگترین شعاع حفرهها در نظر گرفته شده و A سطح مقطع شبکه برای عبور جریان است. بعد از مشخص شدن طول گلویی، حجم گلویی و حفرهها، مشخص و تخلخل شبکه حساب می شود. همان طور که پیش تر گفته شد، نمونهٔ اصلی برابر شود. در شکل (۳)، طرحوارهای از چهار حفره نمونهٔ اصلی برابر شود. در شکل (۳)، طرحوارهای از چهار حفره برای تعیین ضریب نفوذپذیری به روش شبکهٔ حفرهای لازم است که توزیع فشار و دبی جریان برای تمام حفرهها تعیین شود. با توجه به قانون بقای جرم در حالت پایا، مجموع جریانهای ورودی به هر حفره برابر با مجموع جریانهای خروجی از آن حفره هستند. با نوشتن موازنهٔ جرم برای هرکدام از حفرهها راطهٔ (۵) بهدست می]ید.

$$\sum_{i=1}^{n} Q_{i} = Q_{1} + Q_{2} + Q_{3} + \dots = 0$$

(۵)



٤٢

اندازه گیری اختلاف فشار ایجاد شده از روش مانومتری استفاده شده است؛ لـذا از قسمت وجـه ياييني جعبـه، لولـهاي نـازك بـه قطـر ۵ میلیمتر بهصورت U شکل نصب شده و سیال مورد استفاده در داخل لولهٔ آب است که برای رؤیت بهتر اختلاف ارتفاع، کمی مایع ردیاب به آب اضافه شده است. جریان سیال عبوری از محیط متخلخل در آزمایش، هوا در نظر گرفته شده است. برای اندازه گیری سرعت جریان هوای خارجشده از کمپرسور ابتدا از یک سرعتسنج دیجیتالی استفاده شده است. طرحوارهٔ دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در شکل (۵) آورده شده است.

۳. نتايج و بحث

از بستر ذرات کروی ساخته شده، در بیش از ۱۰۰ حالت مختلف تصویربرداری شد که در تمام این حالات، تعداد و اندازهٔ ذرات و ابعاد بستر با یکدیگر متفاوت بودند. برای هـر کـدام از تصـاویر، بـا اعمـال دستورات مطرحشده در جعبهابزار پردازش تصویر متلب، توزیع اندازهٔ ذرات، توزيع اندازهٔ حفرهها و مقدار تخلخل حساب شد. برای بررسی نتایج حاصل در این قسمت، از بین تصاویر گرفته شده، تصویر بستری با ابعاد (۲۰۰×۲۰۰×۲۰۰)، حاوی ۴۶۰ عدد ذرهٔ کروی در سه اندازهٔ متفاوت ۶، ۸ و ۱۰ میلیمتر، با تخلخل ۱۰/۶۷۱، بهعنوان نمونه در نظر گرفته شد. در شکل (۶) نمودارهای توزیع اندازهٔ ذرات و حفرهها، استخراج شده از تصویر نمونه، نمایش داده شده است. همان طور که از شکل (۶) - a مشخص است، تعداد و اندازهٔ ذرات حاصل از پردازش تصویر با تعداد و اندازهٔ ذرات موجود در بستر مطابقت دارد. همچنین برای صحتسنجی فرایند پردازش تصویر، مقدار تخلخل حاصل از پردازش تصویر نیز حساب شد که مقدار آن ۰/۶۶۲ است. با توجه به نتایج، مشاهده میشود که روش پردازش تصویر به کار گرفته شده از دقت مناسبی برخوردار بوده، به طوری که مقدار خطای محاسبهٔ تخلخل از مقدار اندازه گیری شده کمتر از ۲ درصد است. این خطا ممکن است ناشی از کیفیت و وضوح تصویر گرفته شده از بستر باشد؛ لذا میتوان به این نتیجه رسید که شناسایی ذرات و محاسبهٔ اندازه قطر و تخلخل آن ها با نرمافزار پردازش تصویر تقریباً بهدرستی انجام شده است. با استناد بر صحت این دو مؤلفه می توان ادعا کرد که توزیع اندازهٔ حفرهها نیز بهطور صحیح اندازه گیری شده است.

لازم بهذكر است كه Q با توجه به جهت جريان مي تواند مثبت يا منفى باشد. با استفاده از معادلهٔ هاگن- يوآزى أمى توان دبى جريان گلوییها را با اختلاف فشار بین دو حفرهٔ متصل طبق رابطهٔ (۶) بیان کرد. در این رابطه، _{گلوی} R و _{گلوی} L بهترتیب شعاع و طول گلویی jj و μ گرانروی سیال عبوری است.

$$Q_{i} = \frac{\Delta P_{ij} \times \pi R_{ij}}{8\mu L_{ij}}^{4}$$
(%)

فشار در حفرهها مجهول است. با نوشتن رابطهٔ (۶) و (۵) برای هریک از حفرهها دستگاه معادلات خطی طبق رابطهٔ (۷) حاصل می شود.

در این رابطه G یک ماتریس اسپارس شامل مقاومت جریان در گلویی، P بردار فشارهای مجهول و C بردار ثوابت و معلومات هستند. فشار ورودی و خروجی شبکه مشخص است، درنتیجه تعداد معلومات و مجهولات برابر است. با حل دستگاه معادلات جبری، توزیع فشار برای هـر یـک از حفـرههـا حسـاب مـیشـود. پـس از مشخص شدن فشار، با استفاده از معادلهٔ (۶)، دبی جریان گلوییها مشخص می شود. در صورتی که دبی ورودی و خروجی حفرها یا به عبارتی دبی عبوری از مرز گلوییها جمع زده شود، دبی جریان کل شبکهٔ حفرهای حساب می شود. ضریب نفوذ پذیری برای شبکهٔ حفرهای با استفاده از قانون دارسی طبق رابطهٔ ۸ بهدست بهطور خلاصه نشان میدهد.

$$\mathbf{K} = -\frac{Q.L.\mu}{\Delta P.A} \tag{(A)}$$

برای اندازه گیری ضریب نفوذپذیری از راه آزمایش، از یک جعبهٔ شفاف به ابعاد ۱۰×۸×۷ میلیمتر مکعب استفاده شده است. این جعبه از ساچمههای فلزی سفید رنگ و هم اندازه با قطر تقریبی ۷ میلیمتر بهعنوان محیط متخلخل پر می شود. در قسـمت ابتـدا و انتهای جعبه برای جریان سیال، لولههایی نصب شده و برای پخش یکنواخت سیال دو عدد پخشکن دندانه دار تعبیه شده است. برای

كياني نيا

همكاران – صص

^{1.} Hagen-Poiseuille



شکل ۴. نمودار جریان الگوریتم محاسبهٔ ضریب نفوذپذیری مورد استفاده در این مطالعه. Figure 4. Flowchart of permeability coefficient calculation algorithm used in this study.









شکل ۶. اطلاعات استخراج شده از تصویر بستر با ابعاد (۲۰۰×۲۰۰×۲۰۰) و با اندازهٔ ذرات متفاوت، (a) توزیع اندازهٔ حفرهها.

Figure 6. Extracted data from the image of packed bed with dimensions (220×200×10 mm3) and with different particle sizes, a) particle size distribution, b) pore size distribution.

این نسبت مطابق شکل (۷) رسم شد. با برازش انواع روابط مختلف ریاضی و بررسی نتایج حاصل مشخص شد که رابطهٔ لگاریتمی بهتر از روابط دیگر، دادههای جمعآوری شده را برازش میکند. رابطهٔ (۹) بیان گر رابطهٔ استخراج شده است. با استفاده از این رابطه میتوان با در دست داشتن مقدار تخلخل و میانگین اندازهٔ ذرات برای یک بستر پر شده از ذرات کروی نظیر کاتالیستها و جاذبها، میانگین اندازهٔ حفرهها را حساب کرد. بعد از اعتبارسنجی اطلاعات هندسی حاصل از پردازش تصویر، تمام دادههای استخراجشده از تصاویر گرفته شده در حالتهای مختلف اعم از اندازه و تعداد ذرات، اندازه و تعداد حفرهها و تخلخل گردآوری شدند. سعی بر این است که بتوان رابطهای کلی برای تخمین میانگین اندازهٔ حفرهها، با استفاده از سایر مؤلفهها ارائه داد. با الهام گرفتن از رابطهٔ تخلخل، نسبت میانگین قطر حفرهها به میانگین قطر ذرات حساب و نمودار مقدار تخلخل برحسب

Iranian Chemical Engineering Journal - Vol. 20 - No. 116 (2021)

تخمين انداز هٔ حفر هها و نفوذ پذيري در محيط متخلخل با استفاده از..

کیانی نیا و همکاران – صص. ۶۹–۶۹

(٩)





$$d_{pore} = d_{particle} * \exp(\frac{\phi - 0.7122}{0.207})$$

برای اندازه گیری ضریب نفوذپذیری، بعد از تصویربرداری، پردازش تصویر انجام و دادههای ماکروسکوپی استخراج شد. در جدول (۱) به چند نمونه از دادههای ماکروسکوپی حاصل از تصاویر اشاره شده، که از همین دادهها برای شبیهسازی شبکهٔ حفرهای استفاده شده است. با توجه به دو بعدی بودن شبکه، تعداد حفرهها باید در هر دو بعد شبکه در نظر گرفته شود. همان طور که قبلاً اشاره شده عدد کئوردیناسیون برای تمام شبکهها برابر چهار در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه برای صحتسنجی نتایج مدلسازی شبکهٔ حفرهای، دو رابطهٔ تجربی کارمن-کوزنی و ربانی و همکاران به کار برده شده است. رابطهٔ کارمن-کوزنی به کمک رابطهٔ (۱۰) بیان شده است. رابطهٔ ربانی و همکاران[۲۵]، تصحیح رابطهٔ کارمن-کوزنی از راه محاسبهٔ سطح ویژه از پردازش تصویر است و فقط ضریب آن از ۱۸۰ به ۱۷/۸۷ تغییر داده شده است که طبق رابطهٔ ۱۱ ارائه شده است. در این روابط _p بیانگر میانگین قطر ذرات و ϕ تخلخل بستر است. نتایج حاصل از محاسبهٔ ضریب نفوذ پذیری مطابق جدول (۲) است. با توجه به این جدول مشاهده می شود که نتایج نفوذپذیری شبکهٔ

جدول ۱. اطلاعات هندسی به کار برده شده در شبیهسازی. Table 1. Geometric information used in the simulation.

Image NO.	Porosity	Average particle diameter (m)	Average pore diameter (m)
1	0.4956	0.006	0.00209
2	0.541	0.008	0.003471
3	0.665	0.008	0.00635
4	0.789	0.01	0.014545
5	0.799	0.01	0.015272
6	0.8103	0.006	0.009682

حفرهای بهدلیل در نظر گرفتن ساختار داخلی محیط متخلخل بهصورت حفرهها و گلوییها به نتایج رابطهٔ ربانی و همکاران نزدیکتر است.

$$k = \frac{D_p^2}{180} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}$$
 (1.)

$$k = \frac{D_p^2}{17.87} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}$$
(11)

نشریه مهندسی شیمی ایران ـ سال بیستم ـ شماره صد و شانزده (۱٤۰۰)

Image NO.	Porosity	Permeability (m ²)			
		Pore Network (current study)	Rabbani et. al.	Carman-Kozeny	
1	0.4956	8.694×10 ⁻⁸	9.5692×10 ⁻⁸	9.6388×10 ⁻⁷	
2	0.541	2.4949×10 ⁻⁶	2.6917×10 ⁻⁶	2.6722×10 ⁻⁷	
3	0.665	8.67×10 ⁻⁶	9.3849×10 ⁻⁶	9.3171×10 ⁻⁷	
4	0.789	6.3×10 ⁻⁵	6.0123×10 ⁻⁵	5.9689×10 ⁻⁶	
5	0.799	6.4395×10 ⁻⁵	7.0652×10 ⁻⁵	7.0142×10 ⁻⁶	
6	0.8103	3.0101×10 ⁻⁵	2.9784×10 ⁻⁵	2.9569×10 ⁻⁶	

جدول ۲. نتایج نفوذپذیری شبیهسازی شبکهٔ حفرهای و معادلات تجربی.
Table 2. The permeability results from pore network simulations and empirical equations.

با مربع شعاع میانگین حفرهها متناسب است و رابطهای تقریباً خطی دارد؛ از این رو نفوذپندیری یک مؤلف م شدیداً وابسته به شعاع حفرههاست. در مطالعات دیگر نیز این نتیجه مشاهده شده است[۲۷و۲۶]. برای بررسی تأثیر اندازهٔ میانگین حفرهها بر روی ضریب نفوذپذیری، نمودار مربع شعاع میانگین حفره ها بر حسب نفوذپذیری مطابق شکل (۸) رسم شد. همان طور که از این شکل مشخص است، با افزایش شعاع حفره ها نفوذپذیری بیشتر شده به طوری که نفوذپذیری



شکل ۸ نمودار بررسی رابطهٔ بین نفوذپذیری و مربع شعاع میانگین حفرهها.

Figure 8. Relation between permeability and square of the average radius of the pore.

مشاهده شد که روش پردازش تصویر به کار گرفته شده از دقت مناسبی برخوردار بوده، به طوری که مقدار خطای محاسبهٔ تخلخل از مقدار اندازه گیری شده کم تر از ۲ درصد است. از این رو با استفاده از این رابطه می توان با محاسبهٔ اندازهٔ میانگین حفرهها، بدون نیاز به تصویر برداری و پردازش تصویر با استفاده از انواع توابع توزیع، توزیع اندازهٔ حفره ها را حساب کرد تا بتوان خواص قابل اندازه گیری محیط متخلخل نظیر نفوذ پذیری را پیش بینی کرد. در نهایت به کمک تمام داده های هندسی استخراج شده، شبکهٔ حفره ای دوبعدی معادل محیط متخلخل واقعی ساخته شد. با اعمال و معادلات حاکم بر شبکه، و شبیه سازی جریان، ضریب نفوذ پذیری معادلات حاکم بر شبکه، و شبیه سازی جریان، ضریب نفوذ پذیری کرمن-کوزنی، ربانی و همکاران و روش آزمایشگاهی استفاده شد. به دلیل در نظر گرفتن ساختار داخلی محیط متخلخل به صورت مدای هر مشاهده شد که نتایج آزمایشگاهی استفاده شد.

مراجع

- Bear, J., Cheng, A. H. -D. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Springer Netherlands, Dordrecht, 1st ed., XXI, p. 834, (2010).
- [2] Xiong, Q., Baychev, T. G., Jivkov, A. P., "Review of Pore Network Modelling of Porous Media: Experimental Characterisations, Network Constructions and Applications to Reactive Transport", Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 192, pp. 101–117, (2016).
- [3] Rahrah, M., Lopez-Peña, L. A., Vermolen, F., Meulenbroek, B., "Network-Inspired versus Kozeny– Carman Based Permeability-Porosity Relations Applied to Biot's Poroelasticity Model", Journal of Mathematics in Industry, Vol. 10, No. 1, p. 19, (2020).
- [4] Guo, Z., Ren, X., Nong, M., "A Novel Kozeny-Carman-Based Permeability Model for Hydrate-Bearing Sediments", Earth and Space Science Open Archive, (2020).
- [5] Singh, H., Myshakin, E. M., Seol, Y., "A Novel Relative Permeability Model for Gas and Water Flow in Hydrate-Bearing Sediments With Laboratory and Field-Scale Application", Scientific Reports, Vol. 10, No. 1, p. 5697, (2020).
- [6] Henderson, N., Brêttas, J. C., Sacco, W. F., "A Three-Parameter Kozeny-Carman Generalized Equation for Fractal Porous Media", Chemical Engineering Science, Vol. 65, No. 15, pp. 4432–4442, (2010).

برای اعتبار سنجی نتایج مدل شبکهٔ حفرهای علاوه بر روابط تجربی، از نتایج آزمایشگاهی نیز استفاده شده است؛ لذا ابتدا از بستر آزمایشگاهی مورد نظر، تصویربرداری و سپس با استفاده از پردازش تصویر، دادههای ماکروسکویی استخراج شدهاند. در نهایت بهوسیلهٔ اطلاعات بەدستآمدە، ضریب نفوذیذیری برای بستر آزمایشگاهی به روش های مدل شبکهٔ حفرهای، آزمایشگاهی و با استفاده از روابط تجربی حساب شد. تخلخل بستر برابر ۱/۵۷۲۳ است. با استفاده از معادلهٔ دارسی، میانگین ضریب نفوذیدیری برای بستر مورد آزمایش حساب شد. نتایج محاسبهٔ این ضریب با استفاده از تمام روشها برای بستر مورد آزمایش در جـدول (۳) ارائـه شـد. بـا توجه به جدول مشاهده می شود که ضریب نفوذپذیری حساب شده از روش مدلسازی شبکهٔ حفرهای، به نتیجهٔ حاصل از روش آزمایشگاهی نزدیکتر از سایر روشهاست و دورترین جواب، نتیجهٔ روش كارمن-كوزنى است. دليل اختلاف زياد نتيجة كارمن-كوزني را می توان به لحاظ نکردن ساختار داخلی مادهٔ متخلخال در این رابطه ربط داد.

جدول ٣. نتايج محاسبهٔ نفوذ پذيري.

Table 3. Results of permeability calculation.

Method	Expe rime ntal	Pore Netwo rk	Rabbani et al.	Carman -Kozeny
Permeability coefficient (m ²)	2.28×10 ⁻⁶	2.4364×10 ⁻⁶	2.712×10 ⁻⁶	2.7922×10 ⁻⁷

۴. نتیجهگیری کلی

در این مطالعه، اطلاعات ماکروسکوپی محیط متخلخل اعم از توزیع اندازهٔ ذرات و حفرهها، تعداد ذرات و تخلخل با استفاده از پردازش تصویر در نرمافزار متلب، استخراج شد. با توجه به نتایج، مشاهده شد که نسبت قطر میانگین حفرهها به میانگین قطر ذرات با تخلخل رابطهٔ لگاریتمی دارد. به این منظور با برازش منحنی لگاریتمی، رابطهای جدید برای محاسبهٔ اندازهٔ میانگین حفرهها براساس اندازهٔ میانگین ذرات و تخلخل برای بسترهای پرشدهٔ ذرات کروی ارائه شد. برای صحتسنجی فرایند پردازش تصویر، تخلخل، تعداد و اندازهٔ ذرات حاصل از پردازش تصویر با تخلخل، تعداد و اندازهٔ ذرات موجود در بستر آزمایشی مقایسه و با توجه به نتایج،

- [7] Khaddour, F., Grégoire, D., Pijaudier-Cabot, G., "A Hierarchical Model for the Computation of Permeation Properties of Porous Materials and Their Enhancement Due to Microcracks", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 144, No. 2, p. 04017160, (2018).
- [8] Ecay, L., Grégoire, D., Pijaudier-Cabot, G., "On the Prediction of Permeability and Relative Permeability from Pore Size Distributions", Cement and Concrete Research, Vol. 133, p. 106074, (2020).
- [9] Gunjal, P. R., Ranade, V. V, Chaudhari, R. V., "Computational Study of a Single-Phase Flow in Packed Beds of Spheres", AIChE Journal, Vol. 51, No. 2, pp. 365–378, (2005).
- [10] Yang, X., Mehmani, Y., Perkins, W. A., Pasquali, A., Schönherr, M., Kim, K., Perego, M., Parks, M. L., Trask, N., Balhoff, M. T., Richmond, M. C., Geier, M., Krafczyk, M., Luo, L.-S., Tartakovsky, A. M., Scheibe, T. D., "Intercomparison of 3D Pore-Scale Flow and Solute Transport Simulation Methods", Advances in Water Resources, Vol. 95, pp. 176–189, (2016).
- [11] Raoof, A., Nick, H. M., Hassanizadeh, S. M., Spiers, C. J., "PoreFlow: A Complex Pore-Network Model for Simulation of Reactive Transport in Variably Saturated Porous Media", Computers & Geosciences, Vol. 61, pp. 160–174, (2013).
- [12] Nukunya, T., Devinny, J. S., Tsotsis, T. T., "Application of a Pore Network Model to a Biofilter Treating Ethanol Vapor", Chemical Engineering Science, Vol. 60, No. 3, pp. 665–675, (2005).
- [13] Dullien, F. A. L. Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure. Elsevier, California, 2nd ed., p. 574, (1992).
- [14] Rajabbeigi, N., Elyassi, B., Tsotsis, T. T., Sahimi, M., "Molecular Pore-Network Model for Nanoporous Materials. I: Application to Adsorption in Silicon-Carbide Membranes", Journal of Membrane Science, Vol. 335, Nos. 1–2, pp. 5–12, (2009).
- [15] Sok, R. M., Knackstedt, M. A., Sheppard, A. P., Pinczewski, W. V., Lindquist, W. B., Venkatarangan, A., Paterson, L., "Direct and Stochastic Generation of Network Models from Tomographic Images; Effect of Topology on Residual Saturations", Transport in Porous Media, Vol. 46, No. 2/3, pp. 345–371, (2002).
- [16] Dong, H., Blunt, M. J., "Pore-Network Extraction from Micro-Computerized-Tomography Images", Physical Review E, Vol. 80, No. 3, p. 036307, (2009).
- [17] Wildenschild, D., Sheppard, A. P., "X-Ray Imaging and Analysis Techniques for Quantifying Pore-Scale Structure and Processes in Subsurface Porous Medium Systems", Advances in Water Resources, Vol. 51, pp. 217–246, (2013).

- [18] Kaestner, A., Lehmann, E., Stampanoni, M., "Imaging and Image Processing in Porous Media Research", Advances in Water Resources, Vol. 31, No. 9, pp. 1174–1187, (2008).
- [19] Chai, W. S., Cheah, K. H., Koh, K. S., Chin, J., Chik, T. F. W. K., "Parametric Studies of Electrolytic Decomposition of Hydroxylammonium Nitrate (HAN) Energetic Ionic Liquid in Microreactor Using Image Processing Technique", Chemical Engineering Journal, Vol. 296, pp. 19–27, (2016).
- [20] Grudzień, K., Sankowski, D., "Methods for Monitoring Gravitational Flow in Silos Using Tomography Image Processing", Informatics Control Measurement in Economy and Environment Protection, Vol. 7, No. 1, pp. 24–29, (2017).
- [21] Shao, S., Li, C., Hong, J., "A Hybrid Image Processing Method for Measuring 3D Bubble Distribution Using Digital Inline Holography", Chemical Engineering Science, Vol. 207, pp. 929–941, (2019).
- [22] Baldwin, C. A., Sederman, A. J., Mantle, M. D., Alexander, P., Gladden, L. F., "Determination and Characterization of the Structure of a Pore Space from 3D Volume Images", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 181, No. 1, pp. 79–92, (1996).
- [23] Sheppard, A. P., Sok, R. M., Averdunk, H., "Techniques for Image Enhancement and Segmentation of Tomographic Images of Porous Materials", Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 339, Nos. 1–2, pp. 145–151, (2004).
- [24] Ketcham, R. A., "Three-Dimensional Grain Fabric Measurements Using High-Resolution X-Ray Computed Tomography", Journal of Structural Geology, Vol. 27, No. 7, pp. 1217–1228, (2005).
- [25] Rabbani, A., Jamshidi, S., "Specific Surface and Porosity Relationship for Sandstones for Prediction of Permeability:, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 71, pp. 25–32, (2014).
- [26] Nishiyama, N., Yokoyama, T., "Permeability of Porous Media: Role of the Critical Pore Size", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 122, No. 9, pp. 6955–6971, (2017).
- [27] Sarout, J., "Impact of Pore Space Topology on Permeability, Cut-off Frequencies and Validity of Wave Propagation Theories", Geophysical Journal International, Vol. 189, No. 1, pp. 481–492, (2012).

تخمین انداز هٔ حفر هها و نفوذپذیری در محیط متخلخل با استفاده از... کیانینیا و همکاران – صص ۴۶–۴۶

Iranian Chemical Engineering Journal - Vol. 20 - No. 116 (2021)

٤٩