

کاربرد آنالیز دیجیتال مغزه برای پیش‌بینی تراوایی نسبی

مهناز حکمت‌زاده*، شهاب‌گرامی، پژوهشکده‌ی ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز

چکیده

هدف این مقاله توصیف فن‌آوری آنالیز دیجیتال مغزه به‌عنوان ابزاری مفید و عملی در صنعت نفت برای پیش‌بینی نفوذپذیری نسبی است. بنابراین مراحل اصلی این فن‌آوری شامل تصویربرداری از محیط متخلخل، آنالیز تصاویر دوبعدی و ساخت مدل محیط متخلخل سه‌بعدی، مدل‌سازی جریان سیال در مقیاس حفره با مدل‌سازی مستقیم یا مدل شبکه‌ی حفره و تفاوت آنها با یکدیگر، افزایش مقیاس خصوصیات جریان چندفازی حاصل از مدل‌سازی در مقیاس حفره به مقیاس‌های بزرگ‌تر و اعتبارسنجی و آزمایش قدرت پیش‌بینی حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه شرح داده خواهد شد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۱۲/۰۸

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۲/۳۰

واژگان کلیدی:

آنالیز دیجیتال مغزه، مدل‌سازی مستقیم، مدل شبکه‌ی حفره، نفوذپذیری نسبی

مقدمه

انواع جابجایی‌های متفاوت ازدیاد برداشت

در سال‌های اخیر نشان داده شده که ترکیب شبکه‌ی فضای خالی حاصل از محیط متخلخل واقعی سنگ همراه با توصیف منسجم نحوه‌ی توزیع سیالات و مکانیزم‌های جابجایی در مقیاس حفره، می‌تواند سبب تخمین پیش‌بینی‌های دقیق خواص جابجایی دو و سه‌فازی جریان شود [۱ و ۲]. بیشترین عدم قطعیت در این فن‌آوری مربوط به تعیین زاویه‌ی تماس در سیستم با ترشوندگی مخلوط و ساخت شبکه‌های قابل اعتماد از تصاویر سه‌بعدی محیط متخلخل به‌عنوان شبکه‌ی نماینده‌ی محیط متخلخل سنگ مخزن است.

در این تحقیق ابتدا مروری بر سابقه‌ی مطالعات فن‌آوری آنالیز دیجیتال مغزه شده است. سپس انواع روش‌های تصویربرداری از محیط متخلخل به‌همراه روش بازسازی ساختار فضاهای خالی شرح داده شده است. پس از آن روش‌های عددی محاسبه‌ی خواص جریان در جابجایی چندفازی در محیط متخلخل با ذکر مزایا و معایب هر یک توصیف شده است. در نهایت نحوه‌ی ارتقاء مقیاس و اعتبارسنجی با آزمایش‌های ویژه‌ی مغزه^۱ بیان شده است.

۱- بررسی سابقه‌ی مطالعات

در دهه‌ی گذشته مدل‌سازی در مقیاس حفره به‌سرعت رشد کرده و از روشی پایه‌ای برای فهم جریان‌های جابجایی سیالات بدون هیچ بهره‌برداری اقتصادی، به ابزاری پیش‌بینی‌کننده در صنعت نفت تبدیل شده که امروزه برخی شرکت‌ها مانند شرکت شلمبرژه و خدمات آنالیز دیجیتالی مغزه را به‌عنوان روشی تکمیلی بر آزمایش‌های ویژه‌ی مغزه ارائه می‌دهند. در جدول ۱- به اختصار مهم‌ترین مؤسسات تحقیقاتی که در این زمینه مطالعه می‌کنند و شرکت‌های ارائه‌دهنده‌ی خدمات آنالیز دیجیتال مغزه به‌همراه فعالیت‌های پژوهشی انجام شده توسط آنها لیست شده است.

یکی از ابهامات مهم در مشخصه‌سازی و شبیه‌سازی مخزن، تخصیص خواص جریان چندفازی است. نفوذپذیری‌های نسبی به‌صورت آزمایشگاهی و تنها برای چند نمونه و سناریوی محدود اندازه‌گیری می‌شوند. در حالی که در شبیه‌سازی مخزن به بلوک‌های ناهمگن بزرگ که ممکن است شامل انواع نمونه‌های سنگ باشد و مسیرهای متفاوت جابجایی سیالات اختصاص داده می‌شوند. در نتیجه نفوذپذیری‌های نسبی به‌ندرت قابل اعتماد هستند و اغلب با توجه فیزیکی کمی در طول تطبیق پیشینه در شبیه‌سازی اصلاح می‌شوند. حال آنکه تراوایی نسبی اختصاص داده شده در شبیه‌سازی در مقیاس میدان اثر بسیار زیادی بر پیش‌بینی میزان برداشت از مخزن دارد.

استفاده از روش‌های شبیه‌سازی دیجیتال مغزه (DCA) جایگزینی سریع برای روش‌های آزمایشگاهی است که می‌تواند زمان اندازه‌گیری خواص سنگ مخزن را در بستری مجازی، از هفته‌ها و ماه‌ها به چند روز کاهش دهد. از سوی دیگر از آنجا که آنالیز دیجیتال مغزه مبتنی بر مدل‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل (با مدل‌سازی مستقیم یا شبکه‌ی حفره) است سبب پیش‌بینی واقعی‌تر نسبت به روابط تجربی برای تخمین نفوذپذیری نسبی است [۱ و ۲]. مزایای استفاده از روش‌های DCA در محاسبه‌ی خصوصیات سنگ مخزن عبارت است از:

- کاهش هزینه‌های مربوط به اندازه‌گیری خصوصیات سنگ مخزن
- ایجاد شبکه‌ی سه‌بعدی سنگ مخزن با دقت زیاد و آشکارسازی ناهمگونی سنگ مخزن در مقیاس میکرو و نانو
- قابلیت اندازه‌گیری خصوصیات سنگ مخزن در شرایط عدم وجود مغزه و با استفاده از خرده‌های حفاری
- اندازه‌گیری سریع تراوایی سنگ مخزن در نمونه‌های بسیار کم‌تراوا
- قابلیت تکرار محاسبات روی مدل دیجیتالی ایجاد شده
- اندازه‌گیری ایمن تراوایی در دماهای زیاد
- امکان پیش‌بینی تراوایی نسبی برای سناریوهای متفاوت تزریق و برای

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (hekmatzadeh@nioc.ir)

زمانبر، بسیار سخت یا غیرممکن است. مثلاً اندازه گیری آزمایشگاهی نفوذپذیری نسبی برای یک آزمایش می تواند بیش از سه ماه به طول بیانجامد. حال اگر یک نفر بخواهد استراتژی های تولید چندگانه و سناریوهای بهبود برداشت را تخمین بزند با استفاده از روش های آزمایشگاهی متداول قریب به یک سال زمان نیاز دارد. از آنجا که

اساس این روش ساخت مدل هایی با افزایش توانایی پیش بینی تراوی سی و فشار موئینگی با استفاده از دینامیک جریان چندفازی و شکل هندسی محیط متخلخل سنگ حاصل از تصاویر سه بعدی حاصل از تصویربرداری از محیط متخلخل است. این امر سبب یافتن اطلاعاتی شد که با استفاده از روش های آزمایشگاهی متداول (SCAL/RCAL)

مؤسسات تحقیقاتی توسعه دهنده و شرکت های ارائه دهنده آنالیز دیجیتال مغزه



نام مؤسسه	رهبر تیم	اهم فعالیت های انجام شده
دانشگاه ملی استرالیا به همراه دانشگاه نیوساوت ولز (کنسر سیوم مغزه ی دیجیتال ^۲)	مارک ناکستند ^۳	تصویربرداری سه بعدی دینامیک از جریان سیال در محیط متخلخل و توسعه ی مدل سازی مستقیم برای پیش بینی نفوذپذیری نسبی
دانشگاه ایمپریال کالج (کنسر سیوم مدل سازی شبکه ی حفره ^۴)	پروفیسور بلانت	تشکیل کنسر سیوم مدل سازی شبکه ی حفره با حمایت مالی بی پی، شون، توتال، انی، پتروبارز و... برای مد سازی جریان های دو و سه فازی در مقیاس حفره و افزایش مقیاس نتایج مدل شبکه ی حفره به گریدهای شبیه سازها
تورندهیم نروژ (سنگ های عددی ^۵)	پل اریک اورن ^۶	مدل سازی شبکه ی بولترمن ^۷ به صورت مستقیم بر شبکه ی استخراج شده از محیط متخلخل
LSU (کنسر سیوم PoreSim)	پرفیسور کارستن ^۸ دکتر تامپسون ^۹	مدل سازی جریان چندفازی با مدل سازی مستقیم
دانشگاه وایومینگ	دکتر پیری	توسعه ی آزمایشگاه مجهزی برای آنالیز دیجیتال مغزه برای تهیه ی تصاویر سه بعدی از محیط متخلخل و توسعه ی مدل سازی شبکه ی حفره
هریوت وات	دکتر مکدوگال ^{۱۰}	توسعه ی مدل های شبکه ی حفره برای مدل سازی فرآیندهای ازدیاد برداشت شامل، تزریق آب با شوری کم، تزریق سورفکتانت و پلیمر
دانشگاه استونی بروک (3DMA-Rock)	دکتر لیندکویست ^{۱۱}	ساخت مدل سه بعدی شامل ساختار محیط متخلخل و سیالات
دانشگاه تگزاس	دکتر پرودانویک ^{۱۲} دکتر لندری ^{۱۳}	استفاده از تصاویر حاصل از میکرو سی تی و SEM برای ساخت مدل ساختار محیط متخلخل و توسعه ی مدل سازی روش تنظیم سطح ^{۱۴} و شبکه ی بولترمن برای مدل سازی جریان چندفازی در محیط متخلخل
دانشگاه واترلو	دکتر ایونیدیس ^{۱۵}	توسعه ی روش فیوژن آماری ^{۱۶} برای دستیابی به ناهمگنی و ساختار محیط متخلخل برای افزایش مقیاس
ETH	دکتر کارملیت ^{۱۷}	توسعه ی مدل های مدل سازی المان های مجزا ^{۱۸} و مدل سازی شبکه ی بولترمن
دانشگاه یوترخت	دکتر حسنی زاده دکتر رثوف	توسعه ی مدل سازی شبکه ی حفره برای مهاجرت سیال همراه با فرآیند جذب و واکنش شیمیایی
FEI (Lithicon)		در سال ۲۰۱۳ نرم افزار Lithicon با خرید و تجمیع Digitalcore دانشگاه ملی استرالیا و Numerical Rocks نروژ توسط شرکت FEI برای آنالیز دیجیتال مغزه ایجاد شد
شلمبرژه (آنالیز دیجیتال مغزه ی CoreFlow)		در دسامبر ۲۰۱۳ شلمبرژه سرویس آنالیز سنگ و سیال دیجیتال CoreFlow را با استفاده از شبیه سازی جریان چندفازی پیچیده در مقیاس حفره با نام شبیه سازی هیدرو دینامیک مستقیم ^{۱۹} معرفی کرد

۲- روش‌های تصویربرداری از محیط متخلخل

در حال حاضر مجموعه‌ای از روش‌های تصویربرداری از سنگ‌ها در مقیاس‌های مختلف از مقیاس مغزه‌ی کامل (برای تعیین ناهمگنی و ساختار در محدوده‌ی سانتی‌متر تا متر) و مقیاس میکرون (برای محیط‌های متخلخل با ساختار بزرگ) و زیر میکرون (برای نمونه‌های با محیط متخلخل سخت‌تر) وجود دارد. سه روش آزمایشگاهی برای تصویربرداری محیط متخلخل عبارتند از تصویربرداری با اشعه‌ی ایکس^{۲۲}، تصویربرداری با پرتو یونی متمرکز^{۲۳} و استفاده از میکروسکوپ نوری. قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر یک از این روش‌ها در ادامه توضیح داده شده است. چالش این قسمت، استفاده از اطلاعات موجود در تصاویر حاصل از هر فن‌آوری جهت پیش‌بینی دقیق و قابل اطمینان ساختار محیط متخلخل برای پیش‌بینی صحیح خواص جریان چندفازی است.

۲-۱- روش‌های تصویربرداری با اشعه‌ی ایکس

توسعه‌ی روش‌های تصویربرداری مدرن متکی بر استفاده از اشعه‌ی ایکس برای بازسازی سه‌بعدی محیط متخلخل با استفاده از مجموعه تصاویر دوبعدی گرفته شده در زوایای مختلف است. با چرخش نمونه، جذب اشعه‌ی ایکس در جهات مختلف سنگ ثبت می‌شود که برای تولید محیط متخلخل سه‌بعدی سنگ و اشباع سیالات استفاده می‌شود. در ۱۹۸۰ این روش برای اولین بار در سیستم‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری اشباع مایع دو و ازی برای برنامه‌های کاربردی علوم خاک با رزولوشن حدود ۳-۱ میلی‌متر استفاده شد. اولین تصاویر میکروسی‌تی^{۲۴} (میکرون یا مقیاس متخلخل) از سنگ‌ها توسط فلانتری و همکاران در مرکز تحقیقات اکسون (فلانتری و همکاران، ۱۹۸۷) با استفاده از منابع آزمایشگاهی و سینکروترون به‌دست آمد. دانشمور و همکاران (۱۹۹۱) این کار را برای توصیف توپولوژی فضای متخلخل و جابجایی در ماسه‌سنگ توسعه دادند. هازلت (۱۹۹۵) اولین کسی بود که از تصاویر اشعه‌ی ایکس برای محاسبه‌ی مستقیم جریان چندفازی، از جمله پیش‌بینی‌های نفوذپذیری نسبی با استفاده از روش شبکه‌ی بولتزمن (که در ادامه توصیف می‌شود) استفاده کرد. مروری بسیار عالی از این روش تصویربرداری در علوم زمین به کار برده شده و توسط کچام و کارلسون (۲۰۰۱) ارائه گردیده است [۴]. یکی از پیشگامان توسعه‌ی این فن‌آوری، تیمی در دانشگاه ملی استرالیا در همکاری با همکاران در دانشگاه نیوساوت ولز است. آنها برای تصویربرداری طیف گسترده‌ای از نمونه‌های سنگ و سپس پیش‌بینی خواص جریان، یک مرکز آزمایشگاهی قراردادی ساختند. تصویر پایه‌ی حاصل از این روش، نقشه‌ی سه‌بعدی از جذب اشعه‌ی ایکس است. این تصویر برای توصیف نوع کانی‌های سنگ، خاک رس و تشخیص دانه از فضای متخلخل استفاده می‌شود. این فن‌آوری به‌همراه مدل‌سازی‌های توسعه داده شده توسط دانشگاه تورندیهام نورث در سال ۲۰۱۳ توسط شرکت FEI خریداری شده و با نام نرم‌افزار Liticon برای ارائه‌ی خدمات آنالیز دیجیتال مغزه توسط این شرکت استفاده می‌شود. هم‌اکنون برای بازسازی محیط متخلخل با استفاده از اشعه‌ی ایکس به‌صورت تجاری سه ابزار آزمایشگاهی وجود دارد که هر یک با

شرکت‌های اندکی زمان یا بودجه‌ی لازم را دارند بسیاری فقط سناریوی پایه، بهترین سناریو بر مبنای ارزیابی‌های مهندسی را برای انجام کار آزمایشگاهی انتخاب می‌کنند. معمولاً این امر انتهای آنالیز مغزه است و در پایان آن باید بر اساس چندین آزمایش تصمیم‌گیری برای انجام آن سناریو یا تعلیق پروژه اتخاذ شود.

انجام شبیه‌سازی روش‌های ازدیاد برداشت بدون انجام آزمایش‌ها و با استفاده از نفوذپذیری‌های نسبی حاصل از روابط تجربی، خطای بسیاری دارد که می‌تواند اساس مطالعات ازدیاد برداشتی را زیر سؤال ببرد. به‌طور ایده‌آل شرکت‌های نفتی ترجیح می‌دهند سناریوهای تولید و ازدیاد برداشت بسیاری را در زمان کم و در آزمایشگاه آزمایش کنند. بنابراین برای دهه‌ها محققان راه‌هایی را جهت استفاده از تصاویر دیجیتالی نمونه‌های سنگ مخزن حاصل از خرده‌های حفاری برای استخراج اطلاعات سودمند جستجو می‌کردند. از دهه‌ی ۸۰ میلادی دانشگاه‌ها شروع به تصویربرداری کامپیوتری مقاطع نازک از مغزه‌ها و محاسبه‌ی فشار موئینگی و نفوذپذیری نسبی کردند.

اما تردیدها برای استفاده از آنالیز دیجیتالی مغزه به دو دلیل زیر برای مدت‌های طولانی ادامه یافت؛ اول اینکه توسعه‌دهنده‌ها در ابتدا راجع به توانایی‌های مدل‌سازی دیجیتالی مغزه اغراق نکردند. ادعاهایی انجام شد که آنالیز دیجیتالی مغزه می‌تواند جایگزین روش‌های آزمایشگاهی متداول مغزه گردد که تاکنون محقق نشده است. در حالی که آنالیز مغزه‌ی دیجیتالی در کنار آزمایش‌های مغزه برای کاهش هزینه‌ها و تعداد آزمایش‌ها کاربرد دارد. دوم آنکه مدل‌های دیجیتالی سنگ، با استفاده از اندازه‌گیری‌های فیزیکی اعتبار لازم را برای مقاعد کردن متخصصان نداشتند. برای اعتبار مدل دیجیتالی سنگ باید آنالیزهای مغزه‌ی دیجیتالی و فیزیکی را روی یک نمونه سنگ و با تجهیزات یکسان انجام داد. هم‌اکنون نیز اختلاف معمولاً چشمگیر بین اندازه‌گیری‌های فیزیکی و دیجیتالی به‌خصوص در مخازن ناهمگن اجتناب‌ناپذیر است. تحقیقات برای توسعه‌ی مدل‌سازی و تصویربرداری از مخازن سخت^{۲۰} در جریان است.

در ۲۰۱۳ بالأخره، فن‌آوری دیجیتالی سنگ به‌صورت موفقیت‌آمیز توسط مدل‌سازی مستقیم تجاری شد و هم‌اکنون این خدمات توسط شرکت شلمبرژه و FEI ارائه می‌گردند. لازم به‌ذکر است هر چند این روش با افزایش سرعت و دقت در آنالیز و مدل‌سازی سنگ مخزن، پتانسیل ایجاد تحول بزرگی را در صنعت نفت دارد اما هنوز برای ارائه‌ی پیش‌بینی‌های واقعی، نیاز به اعتبارسنجی و تأیید با روش‌های آزمایشگاهی متداول (SCAL/RCAL) وجود دارد. همچنین مدل‌سازی با شبکه‌ی حفره که برای محیط متخلخل ناهمگن و ترشوندگی مخلوط مناسب است هنوز وارد فاز تجاری نشده و تحقیقات در این زمینه ادامه دارد.

در این قسمت در ابتدا به اختصار روش‌های تصویربرداری که در آنها برای تهیه‌ی محیط متخلخل سه‌بعدی از فضای حفرات نمونه‌ی سنگ استفاده می‌شود اشاره خواهد شد. برای بررسی دقیق‌تر در این زمینه می‌توان به مطالعه ویلندسنچاید^{۱۱} [۳] رجوع کرد. سپس در خصوص روش‌های عددی مختلف مورد استفاده که برای محاسبه‌ی خواص مقیاس حفره بحث خواهد شد.

تصویر، پردازش هیستوگرام، افزایش کنتراست، اصلاح گاما و ...، استفاده از عملگر کانولوشن (فیلترهای بلاگذر و پایین گذر)، اعمال فرآیندهای ریاضی نظیر ترکیب یا تفریق تصاویر، عملگر لگاریتمی یا توانی، اتساع یا سایش)، استفاده از فیلترهای کاهش دهنده نویز (نظیر فیلتر هموارساز انطباقی، فیلتر میانگین، فیلتر سیگما)، عملگر حذف روند، عملگر تشخیص لبه و روش‌های آنالیز تصویر استفاده شود [۵]. در نهایت باید تقسیم‌بندی به دانه‌های سنگ و فازهای سیالات مختلف بر اساس الگوریتم اوتسو چندآستانه‌ای^{۲۷} انجام شود [۶ و ۷].

۲-۲- روش‌های تصویربرداری با پرتو یونی متمرکز

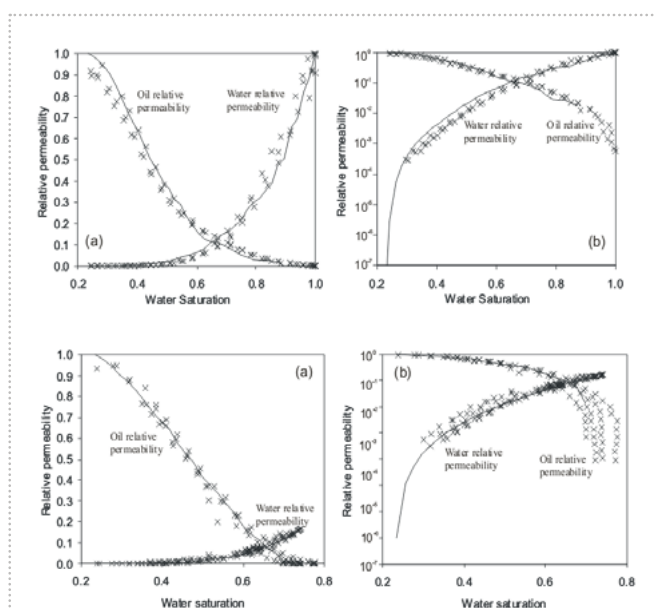
از این روش برای گرفتن تصاویر دوبعدی با مقیاس ریز از نمونه‌های سنگ استفاده می‌شود. اسکن میکروسکوپ الکترونی^{۲۸} که به طور معمول تصاویری با رزولوشن کمتر از ۱۰ نانومتر تولید می‌کند یکی از ابزارهای پرکاربرد این گروه است. این وسیله جهت تصویربرداری فضای متخلخل در ماسه‌سنگ‌ها و کربنات‌های با نفوذپذیری کم و نیز مطالعه‌ی حفرات در مقیاس نانومتر در مخازن غیرمتعارف شیل نفت و گاز استفاده می‌شود. محدودیت این روش، دوبعدی بودن تصاویر حاصله است. از این رو اتصال سه‌بعدی فضاهای متخلخل ناشناخته است. بنابراین جهت بازسازی محیط متخلخل سه‌بعدی باید از روش‌های آماری با استفاده از تجزیه و تحلیل تصویر دوبعدی با وضوح زیاد استفاده کرد. روش‌های آماری شامل روش‌های بر مبنای استخراج الگوهای نمونه (مثل آمار چندنقطه‌ای^{۲۹} (استربل (۲۰۰۲) برای حفظ اتصال محیط متخلخل (اکابه و بلانت (۲۰۰۴)، جیانگ و همکاران (۲۰۰۷)، وو و وان (۲۰۰۶)) و روش‌های مبتنی بر هدف (اورن و بکی (۲۰۰۲)) که بسته‌بندی دانه‌های نامنظم و دیاژن را شبیه‌سازی می‌کند

توجه به انرژی اشعه‌ی ایکس، دستیابی به اندازه و رزولوشن تصویر مشخصی را فراهم می‌آورند؛ سینکروترون^{۳۰}، میکروسی تی و نانوسی تی. رزولوشن حاصل از این روش‌ها توسط اندازه‌ی نمونه، کیفیت پرتو و مشخصات آشکارساز تعیین می‌شود. در ابزارهای آزمایشگاهی که پرتو مخروطی دارند، رزولوشن توسط فاصله‌ی نمونه تا پرتو کنترل می‌شود. در این روش‌ها، برای تولید تصویر نماینده از محیط متخلخل، اندازه‌ی مغزه‌ها به طور معمول چند میلی‌متر است و رزولوشن حاصل محدود به چند میکرون می‌باشد. رزولوشن زیر میکرون با استفاده از ابزار خاص و نمونه‌ی کوچکتر امکان‌پذیر است. به طور کلی، رزولوشن چند میکرون برای توصیف فضای متخلخل برای ماسه‌سنگ‌ها و برخی سنگ‌های کربناته‌ی نفوذپذیر مناسب است، در حالی که بسیاری از سنگ‌های کربناته‌ی و منابع غیرمتعارف مانند شیل‌ها حفره‌هایی با اندازه‌ی بسیار کمتر از یک میکرون دارند. اگر این کسر از فضای متخلخل به علت رزولوشن کم تصاویر نادیده گرفته شود ممکن است پیش‌بینی جایجایی حاصل خطای قابل توجهی داشته باشد. ممکن است تحولات در تصویربرداری با اشعه‌ی ایکس اجازه دهد تصاویر بسیار بزرگ‌تر حاصل شود اما بسیاری از تصاویر کنونی طیف حدود ۱۰۰۰ برابر رزولوشن نسبت به اندازه‌ی نمونه دارند.

در سینکروترون یک پرتو تک‌رنگ روشن از اشعه‌ی ایکس به نمونه‌ی سنگ کوچک تابانده می‌شود. سینکروترون‌ها پرتوهایی با انرژی‌های مختلف دارند که پرتوهای با انرژی کمتر از حدود ۳۰ هزار الکترون ولت برای تصویربرداری نمونه‌ی سنگ ایده‌آل هستند. رزولوشن‌های سینکروترون کم (حدود ۳ میکرومتر) است.

میکروسیتی اشعه‌ی ایکس چند رنگ دارد که پرتوهای آن موازی نیستند (وضوح تصویر در درجه‌ی اول توسط مجاورت نمونه‌ی سنگ به منبع تعیین می‌شود). میکروسی تی دارای انرژی‌های معمولی اشعه‌ی ایکس در محدوده‌ی ۳۰-۱۶۰ هزار الکترون ولت دارد (با طول موج متناظر ۰/۰۴-۰/۱۱ نانومتر) و تصاویر با رزولوشن حدود ۱۰۰۰۳ تا ۲۰۰۰۳ و کسل تولید می‌کنند. ابزارهای مذکور این مزیت را دارند که نیازمند دسترسی به امکانات سینکروترون مرکزی یا آزمایشگاه سفارشی هستند. همچنین در زمان گرفتن تصویر هیچ محدودیتی وجود ندارد. محدودیت این روش ضعیف بودن شدت اشعه‌ی ایکس در مقایسه با سینکروترون است و گسترش پرتو و طیف وسیع طول موج‌ها سبب ایجاد تصاویر غیرواقعی می‌شود.

تصاویر را باید پس از اخذ، پردازش کرده و سپس تقسیم‌بندی به دانه‌های سنگ و فازهای سیالات انجام می‌شود. پردازش تصاویر شامل دو مرحله‌ی اصلی است: از بین بردن نویزها و تصاویر غیرواقعی (باریکه‌های نور) که ممکن است در طول برداشت تصاویر با اشعه‌ی ایکس به وجود آمده باشند. نویزها با استفاده از فیلتر انتشار ناهمسان گرد دوبعدی یا در حالت ایده‌آل سه‌بعدی با یک محدودکننده‌ی انتشار زیاد در تغییرات حداکثری برای حفظ لبه‌های تصاویر حذف می‌شوند. تصاویر غیرواقعی (باریکه‌های نور عمودی) نیز به بهترین شکل با استفاده از فیلتر فوریر-یولت^{۳۱} از تصاویر اصلی حذف می‌گردند. همچنین در این مرحله با توجه به کیفیت تصاویر ورودی و نوع مسأله‌ی مورد مطالعه، باید از روش‌های مختلف پردازش تصویر (نظیر بهبود کیفیت



۱ | نفوذپذیری‌های نسبی پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه‌ی حفره و اندازه‌گیری شده‌ی آزمایشگاهی توسط اوک (۱۹۹۰) با محور خطی (سمت چپ) و لگاریتمی (سمت راست). ردیف بالا فرآیند تخلیه‌ی اولیه و ردیف پایین سیلاب‌زنی با آب را نشان می‌دهد



از جریان و انتقال مستقیماً برای محیط متخلخل سه‌بعدی حاصل از آنالیز تصاویر نوشته می‌شوند. در این روش شکل هندسی صحیح حفرات با موفقیت حفظ می‌شود؛ در حالی که دینامیک حرکت سیالات نیز ساده‌سازی می‌گردد. این روش به علت حجم محاسبات زیاد برای جریان چندفازی در سیستم نفت بسیار زمان‌بر است. بنابراین استفاده از این روش جهت جابجایی‌های تحت کنترل نیروی موئینگی^{۳۳} برای تصاویر محیط متخلخل بزرگ به علت کاهش نرخ جریان و افزایش زمان محاسبات بسیار مشکل است.

در مدل‌سازی شبکه‌ای PNM در ابتدا شبکه‌ی فضای خالی نماینده‌ی محیط متخلخل سنگ حاصل از آنالیز تصاویر، استخراج شده و سپس معادلات جابجایی و انتقال برای این شبکه نماینده‌ی محیط متخلخل نوشته می‌شود. در این روش، پیچیدگی کلی محیط متخلخل سنگ حفظ شده؛ در حالی که شکل هندسی واقعی حفره‌ها به صورت شبکه‌ای از لوله‌ها و کره‌های مصنوعی ساده می‌گردد. این روش اساساً برای مطالعه‌ی جریان‌های تحت کنترل نیروی موئینگی بسیار مناسب است. بنابراین مدل‌سازی دیجیتالی به علت ساده کردن زیاد هندسه‌ی فضای خالی در مدل‌سازی PNM یا ساده کردن زیاد خصوصیات سیال در مدل‌سازی DM یا هر دو عامل از واقعیت جریان سیال در محیط متخلخل فاصله دارد. اما در مقایسه بین دو روش اشاره شده و با بررسی مطالعات صورت گرفته تا کنون، پیش‌بینی‌های موفق و مقرون به صرفه‌ی جریان چندفازی با استفاده از شبکه‌ی حفره برای تعیین ضریب نفوذ و نفوذپذیری نسبی انجام شده است. همچنین باید به محدودیت‌ها و چالش‌های این دو روش شامل یافتن نمونه‌ی سنگ و شبکه‌ی محیط متخلخل نماینده، تصویربرداری و شبیه‌سازی جریان و انتقال سیالات در محیط متخلخل در مقیاس‌های مختلف جهت افزایش مقیاس خصوصیات به میدان و تعیین ترشوندگی اشاره کرد. هر دوی این روش‌ها در ادامه توضیح داده شده‌اند.

۳-۱-۱ مدل‌سازی مستقیم

روش معمول برای محاسبه‌ی جریان تک‌فازی و چندفازی به طور مستقیم روی تصاویر فضای متخلخل، روش شبکه‌ی بولتزن است. این روش که مبتنی بر ذرات است، حرکت و برخورد ذرات را روی یک شبکه شبیه‌سازی می‌کند. در این روش حل معادله‌ی بولتزن گسسته شده روی ذرات، جایگزین حل معادلات ناویر استوکس می‌شود. در روش مذکور امکان دادن خواص میانه (مانند فشار و چگالی) به ذرات وجود دارد. این ذرات مؤثر می‌توانند فازهای مختلف را نشان دهند و توسط کشش بین سطحی معادل با یکدیگر تعامل داشته باشند. توسعه‌ی روش بولتزن نسبتاً آسان بوده و برای پلتفرم‌های محاسبات موازی مناسب و ایده‌آل است. این روش با اجازه دادن به ردیابی ذراتی که نماینده عناصر مایع دو فازی (یا بیشتر) هستند به آسانی به جریان چندفازی تعمیم داده می‌شود اما نقطه ضعف اصلی آن (حتی با اجرای موازی)، بازده محاسباتی است. زمان اجرای محاسبات تقریباً با معکوس سرعت جریان واقعی رابطه دارد. بنابراین رسیدن به جابجایی با کنترل موئینگی برای نمونه به اندازه‌ی کافی بزرگ (اندازه‌ی REV) را برای پیش‌بینی قابل اطمینان نفوذپذیری نسبی مشکل می‌کند. با این حال تحقیقات

هستند. این روش‌ها برای نمایش ساختار محیط متخلخل در مقیاس‌های مختلف، ترکیب اطلاعات حاصل از تصاویر با رزولوشن‌های مختلف و ارائه‌ی طیف فضایی بزرگ‌تر از محیط متخلخل نسبت به فن‌آوری‌های تصویربرداری مستقیم گسترش یافته‌اند.

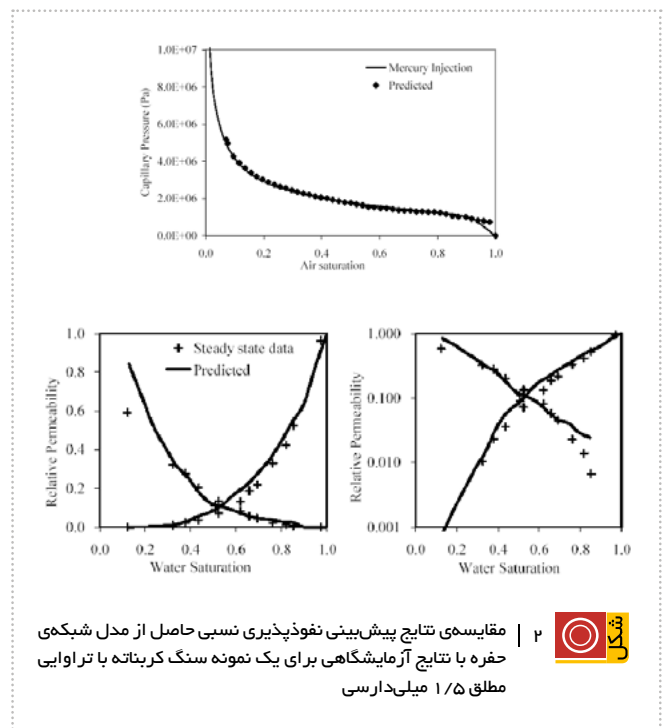
FIB/SEM (که FIB مخفف پرتوهای یون متمرکز است) نیز فن‌آوری جدیدی است که برای گرفتن تصاویر سه‌بعدی با وضوح بسیار زیاد از نمونه‌های کوچک سنگ (معمولاً فقط چند میکرون) استفاده می‌شود (لمنز و همکاران (۲۰۱۰)، توموتسا و سیلین (۲۰۰۷)) و پرتو یونی برش‌های بسیار ریزی در طول نمونه ایجاد کرده و باعث می‌شود تصاویر SEM پی‌درپی به دست آید. این روش با تخریب محیط متخلخل سنگ همراه است اما جزئیات بی‌نظیری از فضای خالی بسیار کوچک محیط متخلخل را نشان می‌دهد.

۳-۲- میکروسکوپ نوری

علاوه بر SEM و اشعه‌ی ایکس، میکروسکوپ نوری را نیز می‌توان برای تولید تصاویر از فضای متخلخل سه‌بعدی استفاده کرد. در این روش میکروسکوپ کانفوکال در یک سری صفحات در طول نمونه تمرکز می‌کند. سپس با استفاده از این تصاویر دوبعدی حاصل از میکروسکوپ، تصویر سه‌بعدی محیط متخلخل بازسازی می‌شود. در این روش رزولوشن عمودی می‌تواند بسیار عالی باشد اما تنها نمونه‌های نسبتاً نازک را می‌توان مطالعه کرد.

۳-۳ روش‌های عددی

روش‌های عددی مورد استفاده برای محاسبه‌ی خصوصیات محیط متخلخل به دو گروه تقسیم می‌شوند: شبیه‌سازی مستقیم^{۳۴} (DM) و مدل‌سازی شبکه‌ای^{۳۵} (PNM). در شبیه‌سازی مستقیم، معادلات حاصل



استفاده شد. از آن پس مدل سازی شبکه‌ی حفره به شدت توسعه یافته است. به نحوی که هم اکنون مدل سازی شبکه‌ی حفره‌ای برای محاسبات محیط‌های متخلخل نامنظم و ناهمگن، جریان لایه‌ی فیلمی تر، ترشوندگی دلخواه، جابجایی سیالات در جریان دوفازی و سه فازی و همچنین فرآیندهای مختلف فیزیکی (شامل انواع روش‌های ازدیاد برداشت) از جمله تبادل فاز، جابجایی غیرنیوتنی، جریان غیرداریسی، انتقال دما، تبادل یونی، جابجایی راکتیو و ... استفاده شود. بسیاری از مکانیسم‌های زیربنایی جریان سیال در محیط متخلخل، هم از لحاظ نظری و هم از طریق انجام آزمایش‌های میکرومدل دوبعدی بررسی شده‌اند. تحولات عمده در طول ده سال گذشته بر افزایش واقع‌گرایی ساختار شبکه‌ی نماینده‌ی محیط متخلخل و توسعه‌ی روش شبکه‌ی حفره جهت پیش‌بینی جریان چندفازی و خواص جابجایی بر اساس تصاویر فضای متخلخل متمرکز شده است. پیش‌بینی نفوذپذیری نسبی برای ماسه‌سنگ ساده، برپا نشان‌دهنده‌ی تطابق نتایج مدل شبکه‌ی حفره با نتایج آزمایش مغزه بود. با ظهور منابع محاسباتی قدرتمندتر، علاوه بر مدل‌های شبکه‌ی حفره‌ی شبه‌استاتیک مدل‌های شبکه‌ی حفره‌ی دینامیک نیز توسعه داده شده‌اند که علاوه بر نیروهای موئینگی، اثرات سرعت جریان (نیروهای ویسکوز) را نیز لحاظ می‌کنند که سبب وسعت طیف مکانیزم‌های جابجایی به دقت شبیه‌سازی می‌شود.

از مزایای استفاده از روش مدل‌سازی شبکه‌ی حفره، قابلیت پیش‌بینی سریع‌تر خواص جریان نسبت به اندازه‌گیری آزمایشگاهی است که به‌طور معمول نیازمند چند ماه زمان است. این روش همچنین برای نمونه‌های کوچک (مانند خرده‌های حفاری و قطعات بسیار کوچک مغزه برای دستگاه سیلاب‌زنی مغزه‌ی استاندارد) نیز به کار می‌رود. با روش مذکور می‌توان نفوذپذیری‌های نسبی را برای ترشوندگی‌های مختلف یا اشباع‌های اولیه‌ی متفاوت و تحت سناریوهای برداشت مختلف شامل سیلاب‌زنی آب یا تزریق گاز نیز ارزیابی کرد.

در طول نه سال گذشته کنسرسیوم امپریال کالج برای مدل‌سازی جریان سیال در مقیاس حفره، موفق به توسعه‌ی مجموعه‌ای از نرم‌افزارها جهت پیش‌بینی خواص جریان دوفازی و سه فازی در شبکه‌های واقع‌بینانه‌ی نماینده‌ی محیط متخلخل سنگ مخزن شده است. بر اساس این پژوهش‌ها مدل شبکه‌ی حفره، پتانسیل تکمیل قابل توجه نتایج آنالیز ویژه‌ی سنگ با استفاده از اندازه‌گیری‌های ساده (مانند فشار موئینگی تزریق جیوه، آنالیز مقاطع نازک و تعیین شاخص ترشوندگی) جهت پیش‌بینی نفوذپذیری نسبی برای سناریوهای متفاوت جابجایی را دارد. علاوه بر این مدل‌سازی در مقیاس حفره اجازه می‌دهد روند تغییرات نفوذپذیری نسبی با تخلخل، نفوذپذیری یا نوع سنگ با تغییر ترشوندگی مخزن و طی جریان سه‌فازی پیش‌بینی شود. مثلاً در شکل ۱- نتایج مدل‌سازی شبکه‌ی حفره برای نمونه‌ی سنگ برا که توسط استات‌اویل ارائه شده، با نتایج آزمایشگاهی اوک مقایسه شده‌اند. در این مدل‌سازی مدل شبکه‌ی حفره توسط میکروسی‌تی اسکن و از طریق بازسازی آماری سه‌بعدی تهیه شده است.

اخیر نشان می‌دهد که با استفاده از بهترین منابع کامپیوتر، محاسبه‌ی نفوذپذیری نسبی بر اساس تصاویر فضای متخلخل در برخی موارد امکان‌پذیر است. این روش برای محاسبه‌ی خواص و جابجایی جریان تک‌فازی، مانند نفوذپذیری، ضریب پراکندگی و سرعت واکنش مناسب است. همچنین با موفقیت برای ارائه‌ی تجزیه و تحلیلی دقیق از دینامیک منافذ، برای محاسبه‌ی مساحت سطحی و برای کمک به توسعه‌ی نظریه‌های جریان متخلخل استفاده شده است.

هیدرودینامیک ذرات صاف^{۳۳} و انواع آن روش دیگری از مدل‌سازی مستقیم است که در مطالعه‌ی پراکندگی و جریان‌های چندفازی با موفقیت استفاده شده است (تارتاوسکی و همکاران (۲۰۰۹) و اویسی و پیری (۲۰۱۰)). علاوه بر این، روش‌های دیگری نیز وجود دارد که به‌طور خاص برای مطالعه‌ی جابه‌جایی با کنترل موئینگی طراحی شده است. روش تنظیم، سطح یک مرز را بین مایعات تعریف کرده و حرکت آنرا در یک جابجایی شبه‌استاتیک ردیابی می‌کند. این روش برای مسائل بزرگ (بر اساس تصاویر سه‌بعدی از فضای متخلخل) نیز از نظر محاسباتی بسیار سنگین است اما جهت بررسی فرآیندهای آشام و جریان بین شکاف/ماتریس استفاده شده است.

مدل‌سازی تراکم کاربردی^{۳۴} نیز جهت توسعه‌ی فرمولی کلی برای جریان سیال شامل ترکیب پدیده‌های مختلف فیزیکی، از جمله جریان چندفازی، رئولوژی غیرنیوتنی و اثرات حرارتی استفاده شده است. این روش برای محاسبه‌ی توزیع مایع در شکل‌های هندسی ساده مثل یک لوله‌ی موئین نیز با موفقیت استفاده شده است. اما شبیه‌سازی از روش‌ها نیازمند توسعه‌ی بیشتر جهت پیش‌بینی خواص جریان چندفازی در مقیاس مغزه و بر اساس تصاویر واقع‌گرایانه‌ی فضای متخلخل است. برای مطالعه‌ی سایر مدل‌های توسعه‌یافته در مدل‌سازی مستقیم به مطالعه‌ی میاکین^{۳۵} و تارتاوسکی (۲۰۰۹) رجوع شود.

این احتمال وجود دارد که با پیشرفت روش‌های عددی و قدرت کامپیوتر و پلتفرم‌های محاسباتی جدید، (مانند پردازنده‌های موازی یا GPU) بسیاری از محاسبات خواص جریان تک‌فازی و چندفازی با استفاده از یک یا چند روش بالا انجام شود. اما اکنون و در حالی که این روش‌ها برای جریان تک‌فاز به‌خوبی کار می‌کند برای جریان چندفازی حجم محاسبات افزایش می‌یابد. بنابراین در روش مدل‌سازی مستقیم باید در یک هندسه‌ی پیچیده با زاویه‌ی تماسی که حفره به حفره متفاوت است، مرز بین فازها پیگیری شده و موقعیت جدید مرزها تعیین گردد. بنابراین در این روش ردیابی لایه‌های فاز ترکننده و نازک که بسیاری از فرآیندها را در جریان دوفازی و سه‌فازی در محیط متخلخل کنترل می‌کند دشوار خواهد بود. به‌هرحال روش‌های تجاری‌سازی شده‌ی آنالیز دیجیتال مغزه مبتنی بر یکی از روش‌های مدل‌سازی مستقیم هستند. اما بر اساس تحقیقات انجام شده، کارآمدترین و موفق‌ترین پیش‌بینی محاسباتی جریان چندفازی از مدل‌سازی شبکه‌ی حفره به شرح زیر نشأت گرفته که هنوز تجاری نشده است.

۳-۲- مدل‌سازی شبکه‌ی حفره

اولین مدل شبکه‌ی حفره توسط فت^{۳۶} (۱۹۵۶) و برای مقایسه‌ی جریان در محیط متخلخل و یک شبکه‌ی مقاومت تصادفی

نتیجه گیری

اعتقاد بر اینست که منشاء و اساس خواص اندازه گیری شده در مقیاس ماکروسکوپی، وقوع پدیده های در مقیاس حفرات است. بنابراین با شناخت محیط متخلخل و مکانیزم های حاکم بر آن در مقیاس های کوچک می توان به درک بهتری از رفتار کمیت های ماکروسکوپی رسید. با مدل سازی جریان در مقیاس حفره از طریق مدل سازی مستقیم یا مدل سازی شبکه ای حفره برای چندین ساختار محیط متخلخل مربوط به یک نمونه سنگ و با متوسط گیری برای حجم نماینده ای پایه (REV) می توان با استفاده از روش افزایش مقیاس چندگریدی^{۳۷} خصوصیات جریان چندفازی حاصل از مقیاس حفره را به طور مستقیم به مقیاس شبیه سازی میدان ارتقاء مقیاس داد. آنالیز دیجیتال مغزه با استفاده از تصویربرداری مستقیم از محیط متخلخل و مدل سازی مستقیم تجاری سازی شده است. اما بر اساس تحقیقات انجام شده تا به امروز، مدل سازی شبکه ای حفره، در پیش بینی محاسباتی جریان چندفازی و روش های ازدیاد برداشت کارآمدتر و موفق تر عمل کرده که این روش هنوز تجاری سازی نشده است.

نتایج بسیار امیدوار کننده هستند، اما باید دقت داشت که برای تعمیم آنها به هر نوع سنگ مخزنی باید خصوصیات کامل ساختار محیط متخلخل نماینده ای سنگ مخزن شناسایی گردد. بنابراین باید دقت شود که برای مقایسه ای نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی شبکه ای حفره، باید یک نوع سنگ مخزن و با یک تجهیزات آزمایشگاهی بررسی انجام شود. شکل ۲- نتایج پیش بینی نفوذپذیری نسبی برای یک نمونه سنگ کربناته با تراوایی مطلق ۱/۵ میلی داری را نشان می دهد. جهت اطمینان از صحت ساختار محیط متخلخل استفاده شده، ابتدا شکل و توزیع اندازه ای حفرات برای مطابقت با فشار موئینگی منحنی تزریق جیوه تنظیم شده، سپس منحنی های تراوایی نسبی حاصل تخلیه ای اولیه، پیش بینی و با نتایج آزمایشگاهی آنالیز ویژه مغزه مقایسه گردیده اند.

مشکل دوم در مدل سازی شبکه ای حفره، تخصیص زاویه ای تماس در شبکه جهت پیش بینی داده ای سیلاب برای نمونه ای با ترشوندگی مخلوط است که تحقیقات در این زمینه کماکان ادامه دارد.

پانویس ها

- | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1. SCAL | 14. level set | 27. Multi-thresholding Otsu's algorithm |
| 2. Digital Core Consortium | 15. Ioannidis | 28. Scanning Electron Microscopy (SEM) |
| 3. Mark Knackstedt | 16. statistical fusion | 29. Multiple point statics |
| 4. Pore Scale Modeling | 17. Carmeliet | 30. Direct Modeling |
| 5. Numerical Rocks | 18. Discrete element modeling (DEM) | 31. Pore Network Modeling |
| 6. Pål-Eric Øren | 19. Direct HydroDynamic (DHD) | 32. Pc Dominant |
| 7. Lattice Boltzmann modeling (LBM) | 20. Tight Reservoirs | 33. Smooth particle Hydrodynamic |
| 8. Karsten | 21. Wildenschild | 34. Density Functional Modeling |
| 9. Thompson | 22. X Rays | 35. Meakin |
| 10. McDougall | 23. Focused Ion Beams | 36. Fatt |
| 11. Lindquist | 24. Micro CT | 37. multiple-grid based upscaling |
| 12. Prodanović | 25. Synchrotron | |
| 13. Landry | 26. Fourier-Wavelet | |

منابع

- [1] Blunt MJ, Jackson MD, Piri M, Valvatne PH. Detailed physics, predictive capabilities and macroscopic consequences for pore-network models of multiphase flow. *Adv Water Resour* 2002;25:1069–89.
- [2] Øren P-E, Bakke S. Reconstruction of Berea sandstone and pore-scale modelling of wettability effects. *J Petrol Sci Eng* 2003;39:177–99.
- [3] Wildenschild D. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems. *Adv Water Resour* 2013;51:217–46.
- [4] Ketcham RA, Carlson WD. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Comput Geosci* 2001;27:381–400.
- [5] Hossain Z, Moller T. Edge aware anisotropic diffusion for 3D scalar data. *IEEE Trans Vis Comput Graph* 2010;16(6):1376–85.
- [6] Otsu N. *IEEE Trans Syst Man Cybernet* 1979;9:62–6.
- [7] Iglauer S, Paluszny A, Pentland CH, Blunt MJ. Residual CO₂ imaged with X-ray micro-tomography. *Geophys Res Lett* 2001;38:L21403.