

# مروری بر رویکردهای افزایش مقیاس تحلیلی فرآیند آشام خودبه‌خودی ناهمسو در مخازن شکاف‌دار نفتی

ابوذر میرزائی‌پیمان<sup>۱،۲،۳</sup>، محسن مسیحی<sup>۱\*</sup> و رامین روغنیان<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- مدیریت فنی، اداره مهندسی نفت، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، اهواز، ایران

۳- دانشگاه ایالتی کمپیناس، برزیل

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵

## چکیده

آشام خودبه‌خودی یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های تولید نفت از مخازن شکاف‌دار در نواحی است که بلوک‌های سنگی در تماس با آب تزریقی یا آبران است. در این فرآیند، آب در اثر نیروهای مؤین مثبت وارد بلوک‌های سنگ شده و نفت را به شکاف‌های پیرامون بلوک می‌راند. جهت ارزیابی اثربخشی این مکانیزم، معمولاً از آزمایش‌هایی در مقیاس مغزه استفاده می‌شود. با این حال، جابه‌جایی نفت و آب در این آزمایش‌ها معمولاً از لحاظ هندسه جریان، ویژگی‌های سیالات، فشار، دما و اندازه نمونه‌ها با آنچه درون مخزن رخ می‌دهد متفاوت است. بنابراین، به‌کارگیری نتایج آزمایش‌گاهی در مقیاس مخزنی نیازمند بهره‌گیری از رویکردهای مناسبی برای تعمیم نتایج مربوطه است. یکی از روش‌های کاربردی در این زمینه، استفاده از روابط افزایش مقیاس است. در این مقاله، به مرور و بررسی مبانی روابط افزایش مقیاس تحلیلی برای پدیده آشام خودبه‌خودی پرداخته می‌شود. افزون بر این، ضمن اشاره به عوامل تأثیرگذار بر کارایی این روابط، جامعیت آن‌ها نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این کار با ارزیابی نتایج آزمایشگاهی در دسترس (تحت شرایط مختلف عملیاتی و نمونه‌های مختلف) صورت می‌گیرد. در پایان، افزایش مقیاس آشام با رویکرد جامع‌تری که پیش‌تر توسط نویسندگان این مقاله ارائه شده است مقایسه خواهد شد. در این مقایسه، دامنه داده‌های آزمایشگاهی برای راستی‌آزمایی جامعیت رویکرد افزایش مقیاس آشام، گسترده‌تر شده و تعداد و تنوع بیشتری از شرایط آزمایشگاهی را دربر دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند در درک بهتر مبانی و نیز نقاط ضعف و قوت روابط افزایش مقیاس و استفاده صحیح از این روابط مفید و مؤثر باشد.

**کلمات کلیدی:** مخازن شکاف‌دار، آشام، شکاف، بلوک سنگ، افزایش مقیاس، حل تحلیلی

\*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: masihi@sharif.edu

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.3934.2790)

## مقدمه

به بیرون از بلوک سنگ و به درون شبکه‌ی شکاف پیرامونی می‌راند (ون گلف [۱]، ترز و فیروزآبادی [۵]، میرزائی‌پیامن و همکاران [۶]). نمونه کاربردی این حالت، بلوک‌های سنگی واقع در فصل مشترک آب و نفت در مخازن شکافدار است. از سوی دیگر، در آشام ناهمسو بلوک سنگی توسط آب درون شکاف احاطه شده و آب و نفت در جهت مخالف یکدیگر در جریان هستند (سعیدی [۲]، مسیحی [۷]). برای این مورد نیز می‌توان به بلوک‌های سنگی واقع در نواحی آبزده مخازن شکافدار (حین عملیات تزریق آب یا بالا آمدن آبران مخزن) اشاره نمود. ویژگی‌های رفتار جریان دو فرآیند آشام همسو و ناهمسو با یکدیگر متفاوت بوده به طوری که جریان همسو سریع‌تر و همراه با مقادیر تراوایی نسبی بیشتری است (بوربیاکس و کالایاجین [۸]).

به دلیل سادگی انجام آزمایش‌ها و کاربرد گسترده‌تر، بخش اعظمی از مطالعات مربوطه در زمینه فرآیند آشام، در زمینه مخازن شکافدار نفتی است. معمولاً با انتخاب و آماده‌سازی نمونه مغزه‌هایی با خواص مشخص و اجرای آزمایش‌های آشام خودبه‌خودی در شرایط آزمایشگاهی و عکس‌برداری فرآیند (مانند ژو و همکاران [۹] و سیل و همکاران [۱۰]) می‌توان به بررسی این پدیده پرداخت. سپس با بررسی و تحلیل آن‌ها، اثر عوامل مختلف بر فرآیند آشام و میزان بازیافت نفت، مانند نوع نفت، سطوح ورود و خروج دو فاز و شرایط مرزی (ما و همکاران [۱۱]، ژانگ و همکاران [۱۲])، ترشوندگی (بهبهانی و همکاران [۱۳])، گرانیروی سیالات، میزان اشباع اولیه آب و طول نمونه بررسی می‌گردد (ایفلی [۱۴]، هاتیگلکو و بابادگلی [۱۵-۱۶]، رانجل-جرمن و همکاران [۱۷]، حمیدپور و همکاران [۱۸]، بوربیاکس و کالایاجین [۸]، مخانوف و همکاران [۱۹]، ژو و همکاران [۲۰]).

آشام خودبه‌خودی<sup>۱</sup> (یا آشام موئین یا آشام آزاد) پدیده‌ای است که در آن فاز تر (برای نمونه آب شور) توسط نیروهای موئین، فاز غیرتر (برای نمونه نفت) را درون محیط متخلخل سنگ جابه‌جا می‌کند (ون گلف [۱]، سعیدی [۲]، میرزائی‌پیامن و همکاران [۳-۴]). این پدیده در بسیاری از علوم مهندسی حائز اهمیت است و در زندگی روزمره نیز در موارد متعددی با آن مواجه هستیم. برای نمونه، جذب آب توسط دستمال کاغذی و الیاف پارچه‌ای حوله، جذب آب توسط اسفنج، و باقی‌ماندن جوهر بر روی کاغذ از ساده‌ترین موارد کاربرد آشام خودبه‌خودی است. پدیده آشام در حوزه‌های متعددی از علوم زمین نیز دارای اهمیت است که از آن جمله می‌توان به آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط مواد هیدروکربوری، ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن، مهاجرت بخار آب داغ در مخازن زمین‌گرمایی، پایداری مکانیکی و توزیع رسوبات حاوی هیدرات گازی، به دام افتادن گاز دی‌اکسیدکربن در لایه‌های ذغال‌سنگی و تولید متان، ارزیابی ترشوندگی سنگ‌ها، و بازیافت نفت از مخازن شکافدار اشاره کرد. آشام خودبه‌خودی به عوامل مختلفی چون خواص سنگ و سیال و برهم‌کنش آن‌ها و نیز میزان اشباع اولیه آب درون سنگ وابسته است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

## فرآیند آشام و عوامل مؤثر

مکانیزم آشام به دو دسته آشام خودبه‌خودی و آشام اجباری تقسیم می‌گردد. آشام اجباری، که در شرایطی به آن آشام پویا یا دینامیک<sup>۲</sup> هم گفته می‌شود، در اثر وجود گرادیان فشاری درون شکاف‌ها ایجاد شده و می‌تواند بازیافت نفت از بلوک سنگ را تحت تاثیر قرار دهد. آشام خودبه‌خودی که موضوع اصلی این مقاله است، خود به دو طیف آشام خودبه‌خودی ناهمسو<sup>۳</sup> و آشام خودبه‌خودی همسو<sup>۴</sup> تقسیم می‌گردد. در آشام خودبه‌خودی همسو، آب و نفت در جهت یکسان حرکت کرده و آب، نفت را

1. Spontaneous or Capillary or Free Imbibition  
2. Dynamic Imbibition  
3. Counter-Current  
4. Co-Current

که مورد توجه پژوهش‌گران بعدی قرار گرفت، توسط متکس و کایت [۲۹] معرفی شد که دارای محدودیت‌ها و فرضیات ساده‌کننده بسیاری بود. این رابطه براساس روش بررسی سیستمی بود که پیش از آن توسط راپوپورت [۲۶] انجام شده بود. از فرضیات این مدل می‌توان به یکسان بودن تراوایی نسبی و هندسه مدل‌ها در دو مقیاس مورد بحث اشاره کرد. رابطه افزایش مقیاس متکس و کایت [۲۹] با استفاده از زمان بدون بعد به‌جای زمان واقعی، سعی در تجمیع نتایج آزمایشگاهی داشت که در برخی موارد موفق نبود. پژوهش‌گران متعددی پس از آن هر کدام سعی در رفع محدودیت‌های رابطه افزایش مقیاس متکس و کایت [۲۹] کردند و جنبه‌های مختلف کاربردی آن و عوامل مؤثر در آن مانند هندسه و اندازه نمونه، شرایط مرزی، نوع نفت و گرانیروی سیالات را مورد بررسی قرار دادند (ژانگ و همکاران [۱۲]، میسون و همکاران [۲۳]). برای نمونه، یکی از عوامل مهم، تأثیر گرانیروی در رابطه زمان بدون بعد بود که مورد توجه پژوهش‌گران زیادی قرار گرفت. جدول ۱ رویکردهای پیشنهادی برای عبارت گرانیروی در معادله را نشان می‌دهد. همچنین، جدول ۲ ارتباط بین طول واقعی نمونه و طول ویژه<sup>۶</sup> در معادله را نشان می‌دهد. از عوامل دیگری که در فرآیند آشام مؤثر است و کمتر به آنها پرداخته شده می‌توان به نرخ انتشار آب در شکاف (رانجل-جرمن و همکاران [۱۷])، وابستگی توابع تراوایی نسبی و فشار موئین به زمان (میرزایی‌پامان و مسیحی [۴])، اثر نیروی گرانشی<sup>۷</sup>، ناهمسان‌گردی در تراوایی سنگ و آشام همسو (ترز و فیروزآبادی [۵])، میرزایی‌پامان و مسیحی [۳۰-۳۱]، عباسی و همکاران [۳۲]، حمیدپور و همکاران [۳۳]، حریمی و همکاران [۳۴]) اشاره نمود.

لازم به‌ذکر است که موضوع فرآیند آشام خودبه‌خودی تنها محدود به مخازن شکافدار نفتی نبوده و می‌تواند در مخازن گازی متصل به سفره‌های آبی یا تحت فرآیند تزریق آب هم مطرح گردد. در تحلیل عملکرد نتایج آزمایشگاهی سیستم‌های آب-گاز فرضیاتی مختلفی می‌تواند در نظر گرفته شود که از آن جمله می‌توان به ثابت بودن مشتق فشار موئینگی یا در نظر گرفتن نقاط انتهایی تراوایی نسبی در بررسی جریان اشاره نمود (لی و هورن [۲۱]، فیشر و همکاران [۲۲]، میسون و همکاران [۲۳]، میرزایی‌پامان [۲۴-۲۵]).

### مبانی توسعه روابط افزایش مقیاس آشام خودبه‌خودی ناهمسو

روابط افزایش مقیاس یکی از رویکردهای مناسب برای ایجاد ارتباط بین میزان بازیافت نفت ناشی از فرآیند آشام در دو مقیاس متفاوت آزمایشگاهی و مخزنی است. روابط افزایش مقیاس می‌تواند از یکی از روش‌های بررسی سیستمی<sup>۱</sup> روابط پایه (راپوپورت [۲۶]، میرزایی‌پامان [۲۴])، مدل‌های تجربی<sup>۲</sup>، یا حل تحلیلی معادله حاکم به‌دست آید. با وجود اینکه در طول شش دهه گذشته روابط بسیاری جهت افزایش مقیاس نتایج بازیافت نفت آشام خودبه‌خودی ناهمسو از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس مخزنی ارائه شده است، تقریباً تمامی این روابط فاقد ویژگی کلی و جهان‌شمولی هستند بدین معنی که هر کدام دارای فرضیات و ساده‌سازی‌هایی هستند که استفاده از آنان را تنها در موارد خاصی ممکن می‌سازد و در بسیاری از حالات دیگر استفاده از آنها همراه با خطای قابل توجهی است. مرور کارهای پیشین، بیان‌گر استفاده از شیوه‌های مختلفی همچون روش‌های تجربی برازش‌پایه<sup>۳</sup>، تحلیلی و عددی است. از روش‌های تجربی می‌توان به مدل نمایی<sup>۴</sup> آرونفسکی [۲۷] یا رابطه توانی<sup>۵</sup> بوکرزمن [۲۸] اشاره نمود که محدودیت‌هایی مانند ثابت بودن پارامترهای مشخصه نرخ جریان در طول فرآیند دارند. نخستین رابطه افزایش مقیاسی

1. Inspectional Analysis  
2. Empirical Models  
3. Regression-Based  
4. Exponential Model  
5. Power law Model  
6. Characteristics Length  
7. Gravity Force

جدول ۱ رویکردهای پیشنهادی برای عبارت گرانی در معادله زمان بدون بعد

منبع	عبارت گرانی	توضیحات
متکس و کایت [۲۹]، گوپتا و سیوان [۳۵]، بهبهانی و همکاران [۱۳]	$\mu_w$	-
توسلی و همکاران [۳۶]، ایفلی [۱۴]	$\mu_{nw}$	-
ما و همکاران [۱۱]	$\sqrt{\mu_w \mu_{nw}}$	-
فیشر و همکاران [۲۲]	$\frac{a.b}{\mu_w + b^2 \mu_{nw}}$	a و b ضرایب ثابت هستند
استندنس [۳۷]	$\sqrt{\mu_w^{VE} \mu_{nw}^{1-VE}}$	VE یک ضریب ثابت است
میسون و همکاران [۳۸]	$\mu_w + \sqrt{\mu_w \mu_{nw}}$	-

جدول ۲ رویکردهای پیشنهادی برای تعریف طول ویژه در معادله زمان بدون بعد

منبع	طول ویژه یا ضریب هندسه <sup>۱</sup>	توضیحات
راپوپورت [۲۶]، متکس و کایت [۲۹]	L	L طول بلوک است
کاظمی و همکاران [۳۹]	$F_{KGE} = \frac{1}{V_{ma}} \sum_{i=1}^n \frac{A_{ma,i}}{d_{ma,i}}$	V حجم ماتریس، A سطح عمود بر جریان و d فاصله از سطح تا مرکز بلوک است
ما و همکاران [۱۱]، میسون و همکاران [۲۳]	$\frac{1}{V_{ma}} \sum_{i=1}^n \frac{A_{ma,i}}{l_{ma,i}} = \frac{1}{L_c^2}$	l فاصله از سطح تا مرکز بلوک است

مشتقات جزئی است. به‌طور کلی، مطالعات مربوطه در این خصوص به سه دسته مطالعات آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی تقسیم‌بندی می‌شود (ون گلف [۱]، مسیحی [۷]). در زمینه‌ی کارهای تحلیلی که مورد بحث این مقاله است کارهای متعددی با هدف ارائه حل تحلیلی مسئله آشام خودبه‌خودی ناهمسو صورت گرفته است که معمولاً از یک یا چندین فرض ساده‌شونده جهت حل معادلات دیفرانسیلی جزئی<sup>۳</sup> (PDE) درجه ۲ استفاده کرده‌اند.

به هر حال به‌دلیل اینکه هیچ‌کدام از روابط تجربی از حل تحلیلی دقیق مسئله استفاده نکردند، روابط افزایش مقیاس مربوطه همواره فاقد ویژگی جهان‌شمولی بودند. توانمندی‌ها و محدودیت‌های این روابط افزایش مقیاس در مقاله میرزائی‌پایمان و مسیحی [۳۰] موجود است.

### معادله جریان در فرآیند آشام خودبه‌خودی

معادله حاکم<sup>۲</sup> بر فرآیند آشام خودبه‌خودی در یک محیط متخلخل که حل آن بتواند منجر به پیش‌بینی تولید نفت گردد، یک رابطه به‌شدت غیرخطی

1. Shape Factor  
2. Governing Equation  
3. Partial Differential Equations

مربوطه پرداختند.

همچنین، میرزائی پیامن و همکاران [۴۵-۴۶] با استفاده از پاسخ تحلیلی یادشده و دسته‌بندی مناسب عوامل اثرگذار در آن، شاخصی را جهت ارزیابی ترشوندگی سنگ‌های مخزنی با استفاده از آزمایش‌های آشام خودبه‌خودی ناهمسو ارائه کردند. این شاخص نخستین روش ارزیابی ترشوندگی سنگ مخزن بوده که دارای پایه و اساس روشن و مشخص فیزیکی است. سپس، میرزائی پیامن و مسیحی [۳۱] نشان دادند که از حل تحلیلی مسئله جریان دو فاز همسو نیز که توسط مک‌وارتر و سونادا [۴۲] ارائه شده است می‌توان جهت به‌دست آوردن روابط افزایش مقیاس آشام خودبه‌خودی همسو استفاده کرد. در پژوهش دیگری، میرزائی پیامن و صبوریان جویباری [۴۷] با استفاده از حل تحلیلی مورد نظر برای مسئله آشام خودبه‌خودی ناهمسو به ارائه روشی جهت تعیین گونه‌های سنگی (راک تایپ<sup>۲</sup>) پرداختند. کاربرد این روش ساده، ارزان قیمت و سریع بوده و به‌دلیل اینکه مبتنی بر خواص جریان دو فاز سیالات در محیط متخلخل است، بنابراین کلی و جامع بوده و برای تمامی انواع سنگ کاربردی است.

### حل تحلیلی مسئله آشام خودبه‌خودی ناهمسو

در این بخش به بررسی ریاضی جریان دو فاز در محیط متخلخل یک‌بعدی با ترکیب قانون داریسی، معادله پیوستگی و شرایط مرزی مناسب پرداخته می‌شود. معادله جریان حاصله، یک معادله دیفرانسیلی جزئی درجه دو است. جریان یک‌بعدی و افقی دو سیال امتزاج‌ناپذیر تراکم‌ناپذیر در محیط متخلخلی که تنها یک وجه آن در مقابل جریان تراوا است را در نظر بگیرید. در چنین شرایطی، فاز تر از این وجه وارد محیط متخلخل شده و فاز غیرتر نیز دقیقاً از همین وجه به‌صورت ناهمسو خارج می‌شود.

این امر سبب می‌شود که حل تحلیلی ارائه شده از نوع تخمینی<sup>۱</sup> باشد (ژو و همکاران [۲۰]، توسلی و همکاران [۳۶]، لی و هرن [۲۱]، فیشر و همکاران [۲۲]، میسون و همکاران [۲۳]، میرزائی پیامن [۲۴-۲۵]). بدین معنی که حل مربوطه، به برخی شرایط خاص محدود شده و جواب کلی و جامع نمی‌باشد. فهرست کامل این حل‌های تخمینی توسط اشمیت و گیگر [۴۰-۴۱] ارائه شده است. یکی از پاسخ‌های تحلیلی ارائه شده برای مسئله‌ی جریان ناهمسوی دو فاز امتزاج‌ناپذیر در محیط متخلخل که نیروهای مؤین را نیز لحاظ می‌کند، توسط مک‌وارتر و سونادا [۴۲] ارائه شده است. برای رسیدن به این حل تحلیلی فرض شده است که سرعت نفوذ فاز تر به درون محیط متخلخل متناسب با معکوس جذر زمان است. اشمیت و همکاران [۴۳] نشان دادند که به‌دلیل اینکه در فرآیند آشام خودبه‌خودی ناهمسو، به‌طور طبیعی سرعت آشام فاز تر توسط محیط متخلخل متناسب با معکوس جذر زمان است بنابراین پاسخ تحلیلی ارائه شده توسط مک‌وارتر و سونادا [۴۲] برای چنین مسئله‌ای تخمینی نبوده و از نوع پاسخ دقیق و کامل است. بدین معنی که پاسخ ارائه شده بدون هیچ‌گونه فرض و محدودیتی پدیده‌ی آشام خودبه‌خودی ناهمسو را توصیف کرده و بنابراین یک پاسخ جامع و دارای ویژگی جهان‌شمولی است. البته این یافته‌ها ایشان پیش از آن و به‌صورت ضمنی توسط پولادی‌درویش و فیروزآبادی [۴۴] منتشر شده بود که ظاهراً اشمیت و گیگر [۴۳] از آن ناآگاه بوده‌اند.

اشمیت و گیگر [۴۰-۴۱] سپس با استفاده از حل تحلیلی مورد نظر و به‌دست آوردن میزان تولید نفت، رابطه‌ای را جهت افزایش مقیاس نتایج آزمایش‌های آشام به مقیاس مخزنی پیشنهاد دادند. میرزائی پیامن و مسیحی [۳۰] نشان دادند که رابطه افزایش مقیاسی که توسط اشمیت و گیگر [۴۰-۴۱] پیشنهاد شده است مناسب و سازگار با کاربردهای معمول مهندسی مخزن نبوده و لذا به تصحیح روش

1. Approximate Solution

2. Rock Type

آن توسط ویژگی‌های سیستم سنگ و سیال کنترل می‌شود و برای هر سیستم مقدار آن قابل محاسبه است. پارامتر  $A$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = \sqrt{\frac{\phi}{2} \int_{S_{wi}}^{S_{w,BC}} \frac{(S_w - S_{wi}) D(S_w)}{F(S_w)} dS_w} \quad (7)$$

در این رابطه  $S_{w,BC}$  میزان اشباع فاز تر در وجه تراوای سنگ است که در تماس با محیط شکاف قرار دارد. همچنین،  $F$  تابع جریان کسری با لحاظ نیروهای موئین است که مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$F(S_w) = 1 - \frac{\int_{S_w}^{S_{w,BC}} \frac{(\beta - S_w) D(\beta)}{F(\beta)} d\beta}{\int_{S_{wi}}^{S_{w,BC}} \frac{(S_w - S_{wi}) D(S_w)}{F(S_w)} dS_w} \quad (8)$$

حل تحلیلی رابطه ۱ با استفاده از شرایط مرزی مندرج در روابط ۴، ۵ و ۶ مطابق زیر است. با توجه به اینکه در رابطه ۵ از فرض محیط متخلخل با طول بی‌نهایت استفاده شده است، در نتیجه حل تحلیلی ارائه شده تنها برای حالتی صادق است که جبهه آشام به مرزهای بی‌جریان<sup>۴</sup> نرسیده باشد. در فرآیند آشام خودبه‌خودی، بخش اعظمی از بازیافت نفت پیش از رسیدن جبهه جریان به مرزهای بی‌جریان رخ می‌دهد (به‌ویژه در سنگ‌های به شدت آب‌دوست).

$$x(S_w, t) = \frac{2A}{\phi} F'(S_w) t^{1/2} \quad (9)$$

در این رابطه،  $F'$  مشتق  $F$  نسبت به اشباع فاز تر است. برای استفاده از رابطه ۹ و به دست آوردن اشباع فاز تر در زمان‌ها و مکان‌های مختلف، ابتدا می‌بایست با دانش قبلی  $S_{w,BC}$  مقدار  $F$  را از رابطه ۸ محاسبه کرد. سپس با استفاده از رابطه ۷ مقدار نیز تعیین می‌گردد. استفاده از رابطه ۸ از نوع غیرمستقیم است. به دلیل اینکه این رابطه دارای ویژگی ضمنی است می‌بایست این رابطه را از طریق روش تکرار آزمون و خطا حل کرد. به عنوان تخمین اولیه می‌توان از  $F(S_w) = 1$  استفاده کرد.

1. Effective Porosity
2. Capillary Diffusion Function
3. Fractional Flow Function
4. No-flow Boundary

ترکیب رابطه داری برای فازهای تر و غیرتر با رابطه فشار موئین (که بنا به تعریف، برابر با تفاضل فشار جزئی فازهای تر و غیرتر است) و قانون بقای جرم برای فاز تر به رابطه معروف زیر ختم می‌شود که به شدت غیرخطی و از نوع مشتقات جزئی درجه دو است (دولین [۴۸]، مک‌وارتر و سونادا [۴۲]).

$$\phi \frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(S_w) \frac{\partial S_w}{\partial x} \right) \quad (1)$$

در این رابطه  $D$  تخلخل موثر<sup>۱</sup>،  $S_w$  میزان اشباع فاز تر،  $t$  زمان،  $x$  فاصله مختصات و  $D$  تابع نفوذ موئین<sup>۲</sup> است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D(S_w) = -f(S_w) k \frac{k_{mw}}{\mu_{mw}} \frac{dP_c}{dS_w} \quad (2)$$

در رابطه بالا  $k$  تراوایی مطلق،  $k_{mw}$  تراوایی نسبی فاز غیرتر (از نوع ناهمسو)،  $\mu_{mw}$  گرانیوی فاز غیرتر،  $P_c$  فشار موئین و  $f$  تابع جریان کسری<sup>۳</sup> با تعریف زیر است:

$$f(S_w) = \frac{k_{rw} \mu_{nw}}{k_{rw} \mu_{nw} + k_{mw} \mu_w} \quad (3)$$

در این رابطه، عبارات  $k_{rw}$  و  $\mu_w$  به ترتیب تراوایی نسبی (از نوع ناهمسو) فاز تر و گرانیوی فاز تر می‌باشند. مک‌وارتر و سونادا [۴۲] برای حل تحلیلی رابطه ۱ از شرایط اولیه زمانی و مرزی زیر استفاده کردند:

$$S_w(x, 0) = S_{wi} \quad (4)$$

$$S_w(+\infty, t) = S_{wi} \quad (5)$$

$$u_w(0, t) = At^{-1/2} \quad (6)$$

رابطه ۴ شرط زمانی اولیه بوده و بیانگر این است که در زمان صفر پیش از شروع فرآیند آشام، محیط متخلخل دارای میزان اشباع اولیه فاز تر  $S_{wi}$  و ترشوندگی سنگ از نوع آب دوست است. رابطه ۵ شرط مرزی سیستم نیمه بی‌نهایت بوده و بیانگر وجود میزان اشباع فاز تر  $S_{wi}$  در فاصله بی‌نهایت از وجه تراوای سنگ است. رابطه ۶ شرط مرزی بوده که توسط مک‌وارتر و سونادا [۴۲] جهت به دست آوردن حل تحلیلی مورد نظر اعمال شد. در این رابطه فرض شده است که سرعت نفوذ فاز تر به درون محیط متخلخل  $u_w$  متناسب با معکوس جذر زمان است. در رابطه ۶،  $A$  پارامتر مثبتی است که مقدار



توسط فولادی‌درویش و فیروزآبادی [۴۴] منتشر شده بود. مطابق بررسی‌ها و نتایج میرزائی‌پيامن و مسیحی [۳۰] این رابطه افزایش مقیاس با وجود اینکه مبتنی بر حل تحلیلی مسئله است اما به دلیل در نظر نگرفتن حالات مختلف بدون بعدسازی میزان بازیافت (مثلاً براساس حجم حفره یا حجم نفت درجا) جامع نبوده و سازگار با کاربردهای معمول مهندسی مخازن نمی‌باشد. میرزائی‌پيامن و مسیحی [۳۰] با تکیه بر حل تحلیلی موردنظر و با در نظر گرفتن کاربردهای معمول در مهندسی مخازن به ارائه "روابط افزایش مقیاس" مربوطه به جای "یک رابطه" پرداختند که تمامی روابط منتشر شده قبلی را می‌توان از آن‌ها استخراج نمود. در ادامه به مبانی این رویکرد جامع پرداخته می‌شود. در فرآیند آشام خودبه‌خودی، میزان بازیافت حجمی انباشتی در هر زمان  $Q$  را می‌توان با انتگرال‌گیری از رابطه ۶ به صورت زیر به دست آورد:

$$Q = S \int_0^t u_w dt = 2SA t^{1/2} \quad (10)$$

در این رابطه  $S$  سطح عبوری سیال در جهت عمود بر جریان است. به طریق مشابه می‌توان بازیافت حجمی انباشتی نهایی  $Q_\infty$  را نیز با استفاده از انتگرال‌گیری از رابطه ۶ تعیین کرد. بازیافت حجمی انباشتی نهایی عبارت است از بازیافت انباشتی تا زمانی که جبهه جریان هنوز به مرزهای بی‌جریان نرسیده است. زمان رسیدن جبهه جریان به مرزهای بی‌جریان را  $t^*$  می‌نامیم.

$$Q_\infty = S \int_0^{t^*} u_w dt = 2SA t^{*1/2} \quad (11)$$

با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ می‌توان نسبت بازیافت انباشتی در هر زمان به بازیافت انباشتی نهایی را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{Q}{Q_\infty} = \left( \frac{t}{t^*} \right)^{1/2} \quad (12)$$

با توجه اینکه  $t^*$  زمانی است که در آن جبهه آشام به مرزهای بی‌جریان می‌رسد، بنابراین می‌توان نوشت که:

$$x(S_{wi}, t^*) = L_c \quad (13)$$

برای رسیدن به حل تحلیلی مسئله (رابطه ۹) مکورت‌تر و سونادا [۴۲] از فرض متناسب بودن سرعت نفوذ فاز تر به درون محیط متخلخل با معکوس جذر زمان (رابطه ۶) استفاده کردند. این تنها فرض محدودکننده استفاده از حل تحلیلی موردنظر در کاربردهای جریان دو فازی است. همان‌گونه که پیش از این نیز بیان شد، فولادی‌درویش و فیروزآبادی [۴۴] و سپس اشمیت و همکاران [۴۳] نشان دادند که به دلیل اینکه در فرآیند آشام خودبه‌خودی ناهمسو به‌طور طبیعی سرعت آشام فاز تر توسط محیط متخلخل متناسب با معکوس جذر زمان است، بنابراین پاسخ تحلیلی ارائه شده توسط مکورت‌تر و سونادا [۴۲] برای چنین مسئله‌ای تخمینی نبوده و از نوع دقیق است. به عبارت دیگر، پاسخ ارائه شده بدون هیچ‌گونه فرض و محدودیتی پدیده‌ی آشام خودبه‌خودی ناهمسو را توصیف کرده و دارای ویژگی کلی و جهان‌شمولی است. با وجود بودن حل تحلیلی مسئله می‌توان کاربردهای متنوعی را متصور شد که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها که افزایش مقیاس آشام است پرداخته می‌شود. سایر کاربردها که مورد بحث این مقاله نیست عبارتند از توصیف ترشوندگی (میرزائی‌پيامن و همکاران [۴۵-۴۶]) و ساختار درونی شبکه حفرات محیط متخلخل (میرزائی‌پيامن و صبوریان‌جوریبیاری [۴۷]).

### روابط افزایش مقیاس جهان‌شمول میرزائی‌پيامن و مسیحی

اشمیت و گیگر [۴۰-۴۱] ایده ارائه رابطه افزایش مقیاس با استفاده از حل تحلیلی دقیق مسئله جریان دو فازی را بیان و به توسعه رابطه افزایش مقیاس جدیدی پرداختند. آن‌ها تاکید داشتند که حل تحلیلی مکورت‌تر و سونادا [۴۲] می‌تواند برای توصیف آشام بدون استفاده از شرایط مرزی غیرواقعی به کار رود. همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، این یافته ایشان پیش از آن و به صورت ضمنی

$$t_{D,new V_p} = \frac{2A}{\phi L_c} t^{1/2} \quad (۱۸)$$

### ارزیابی آزمایشگاهی روابط افزایش مقیاس

به منظور راستی‌آزمایی و نشان دادن عملکرد روابط افزایش مقیاس (میرزائی‌پیامن و مسیحی [۳۰]) و بررسی جامعیت آن‌ها، از مجموعه‌ی بزرگی از داده‌ها با دامنه وسیع ویژگی‌ها و تنوع شرایط آزمایشگاهی استفاده شده است. این داده‌ها دربرگیرنده آزمایش‌های آشام خودبه‌خودی ناهمسو در سیستم‌هایی با دامنه گسترده‌ی شرایط مرزی، گرانیروی سیالات، تراوایی، میزان اشباع اولیه آب و ترشوندگی است. شکل‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نمودارهای بازیافت نسبت به زمان را در حالاتی که بازیافت نسبت به بازیافت نهایی، نفت درجا و فضای حفرات سنگ بیان شده است نشان می‌دهد. همان‌گونه که واضح است پراکندگی نمودارهای بازیافت قابل توجه است. یک رابطه افزایش مقیاس مناسب می‌بایست تمامی نمودارهای بازیافت را بهم نزدیک کرده و نموداری واحد و یکتا را ایجاد کند. در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ داده‌های بازیافت که نسبت به بازیافت نهایی، نفت درجا و فضای حفرات سنگ بیان شده است نسبت به روابط افزایش مقیاس مربوطه ترسیم شده است. در تمامی حالات، روابط افزایش مقیاس جدید سبب یکپارچگی نمودارهای بازیافت شده و نمودارهایی واحد و یکتا را ایجاد می‌کنند. این ویژگی بیانگر جهان‌شمولی روابط افزایش مقیاس یاد شده و کاربرد آن‌ها در تمامی سیستم‌ها است. ضعف و عدم کارایی سایر روابط افزایش مقیاس که در طول چند دهه گذشته منتشر شده است در مقاله میرزائی‌پیامن و مسیحی [۳۰] موجود است. در پایان لازم به اشاره است که نمودارهای یکتای نشان داده شده در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ می‌تواند در افزایش مقیاس نتایج بازیافت نفت از مقیاس آزمایشگاهی (چند سانتی‌متری) به مقیاس بلوک‌های سنگی در مخازن شکاف‌دار (چندمتری) به‌کار گرفته شود

که در آن  $L_c$  طول ویژه سنگ است و مطابق رابطه معروف ما و همکاران [۱۱] محاسبه می‌گردد. با جای‌گذاری رابطه ۱۳ در رابطه ۹ می‌توان  $t^*$  را مطابق زیر تعیین کرد.

$$t^* = \left( \frac{\phi L_c}{2AF'(S_{wi})} \right)^2 \quad (۱۴)$$

با جای‌گذاری رابطه ۱۴ در رابطه ۱۲ می‌توان نوشت:

$$\frac{Q}{Q_\infty} = \frac{2AF'(S_{wi})}{\phi L_c} t^{1/2} \quad (۱۵)$$

براساس میرزائی‌پیامن و مسیحی [۳۰] از رابطه ۱۵ می‌توان جهت ارائه یک رابطه افزایش مقیاس به شرح زیر استفاده کرد. برای استفاده از این رابطه می‌بایست در نمودارهای مربوطه از  $\frac{Q}{Q_\infty}$  به دست آمده از آزمایش روی محور عمود و از  $\frac{2AF'(S_{wi})}{\phi L_c} t^{1/2}$  روی محور افقی به‌عنوان رابطه افزایش مقیاس استفاده کرد.

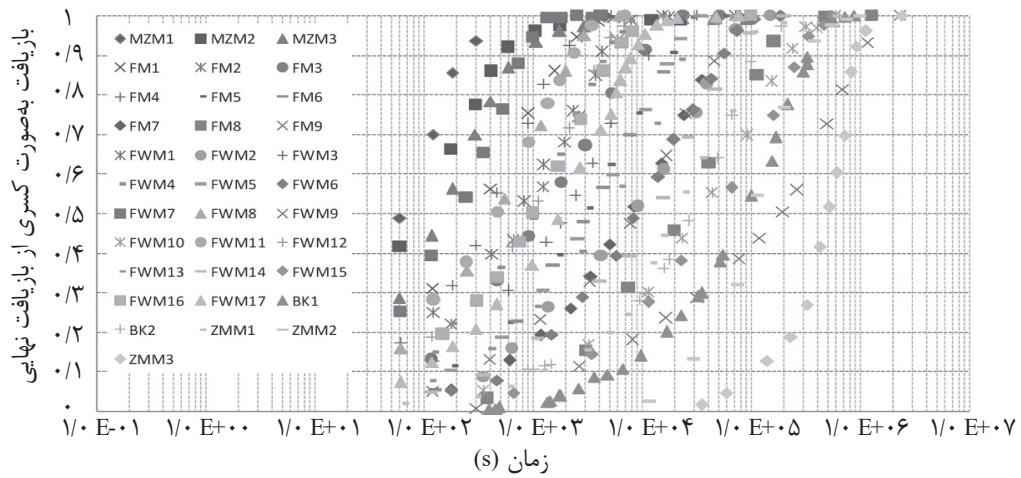
$$t_{D,new} = \frac{2AF'(S_{wi})}{\phi L_c} t^{1/2} \quad (۱۶)$$

رابطه افزایش مقیاس فوق دارای تمامی عوامل مؤثر بر فرآیند آشام بوده و بنابراین برای تمامی سیستم‌ها کاربرد داشته و هیچ‌گونه محدودیتی ندارد. چنانچه در کارهای افزایش مقیاس هدف بیان کردن بازیافت به‌صورت کسری از میزان نفت درجا یا فضای حفرات سنگ باشد، می‌بایست از رابطه بین بازیافت نهایی و دو کمیت یاد شده استفاده کرد. به طریق مشابه چنانچه در نمودارهای افزایش مقیاس بر روی محور عمودی بازیافت به‌صورت کسری از میزان نفت درجا بیان شود می‌بایست از رابطه افزایش مقیاس زیر بر روی محور افقی نمودار استفاده کرد:

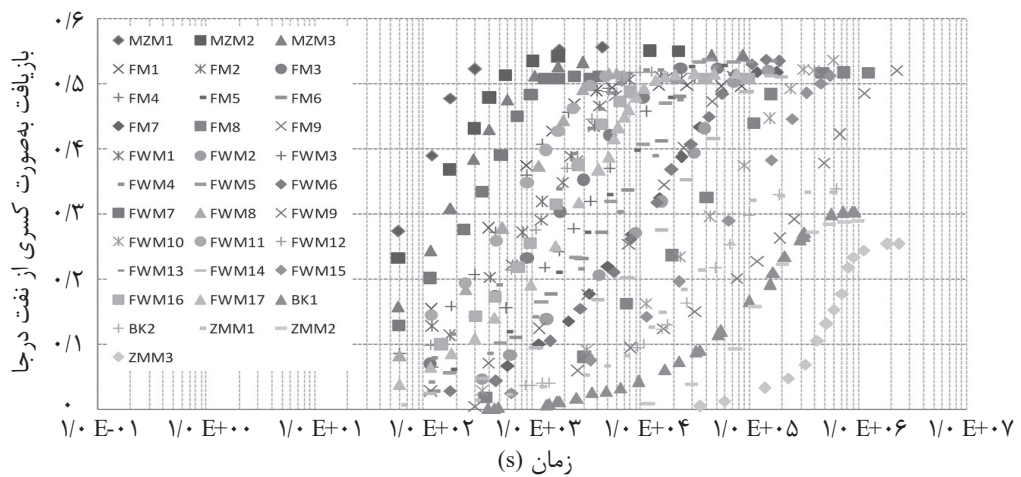
$$t_{D,new V_i} = \frac{2A}{\phi L_c (1 - S_{wi})} t^{1/2} \quad (۱۷)$$

همچنین چنانچه در نمودارهای افزایش مقیاس بر روی محور عمودی بازیافت به‌صورت کسری از میزان فضای حفرات سنگ بیان شود می‌بایست از رابطه افزایش مقیاس زیر بر روی محور افقی نمودار استفاده کرد:

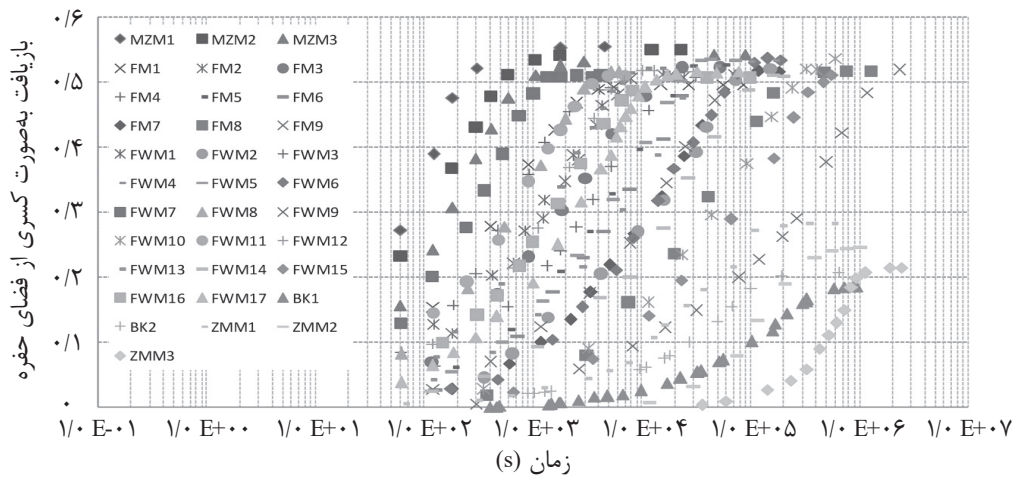




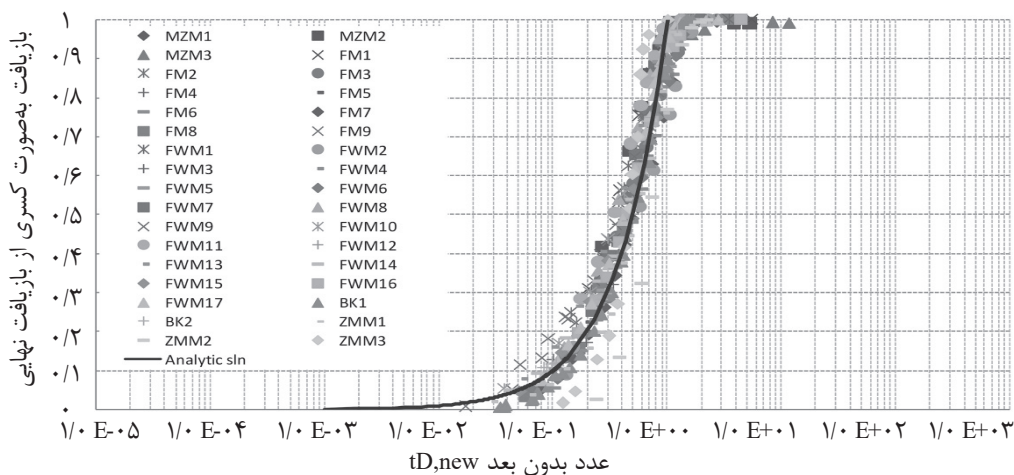
شکل ۱ داده‌های بازیافت به صورت کسری از بازیافت نهایی نسبت به زمان



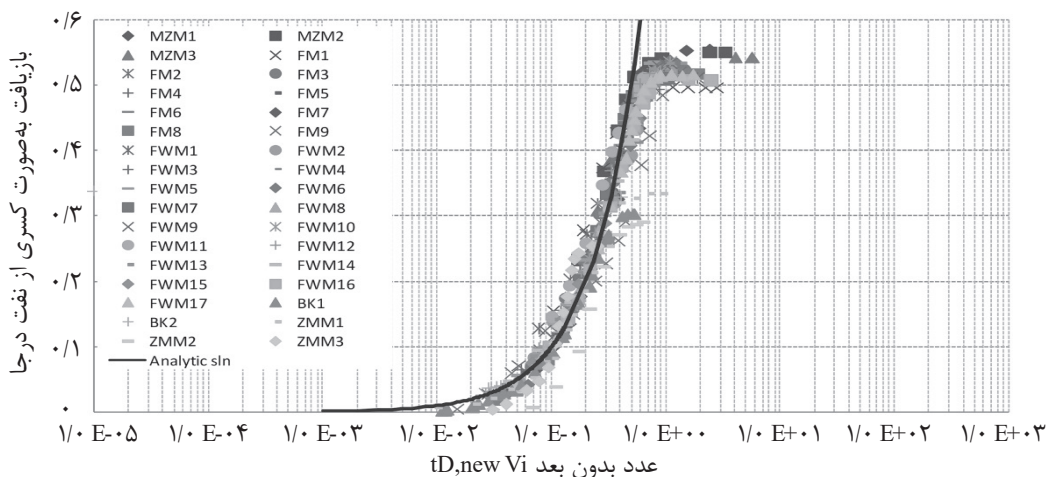
شکل ۲ داده‌های بازیافت به صورت کسری از نفت درجا نسبت به زمان



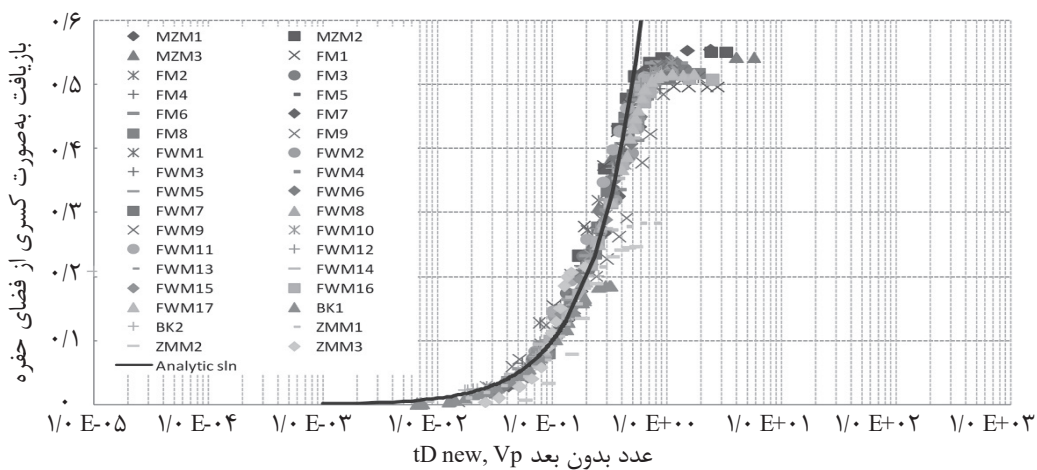
شکل ۳ داده‌های بازیافت به صورت کسری از فضای حفرات نسبت به زمان



شکل ۴ داده‌های بازیافت به صورت کسری از بازیافت نهایی نسبت به رابطه افزایش مقیاس مربوطه (رابطه ۱۶)



شکل ۵ داده‌های بازیافت به صورت کسری از نفت درجا نسبت به رابطه افزایش مقیاس مربوطه (رابطه ۱۷)



شکل ۶ داده‌های بازیافت به صورت کسری از فضای حفرات سنگ نسبت به رابطه افزایش مقیاس مربوطه (رابطه ۱۸)

توانایی‌های آن‌ها، جدیدترین روابط در این حوزه معرفی و مبانی ارائه‌ی آن‌ها نیز بازگو گردید. به‌طور خاص، با به‌کارگیری اطلاعات گسترده و متنوع آزمایش‌گاهی آشام خودبه‌خودی، عملکرد و راندمان یکی از رویکردهای افزایش مقیاس جامع که می‌تواند با کاربردهای مهندسی مخازن سازگاری خوبی داشته باشد مورد ارزیابی قرار گرفت. این روابط نشان می‌دهند که از حل تحلیلی مسأله‌ی آشام خودبه‌خودی می‌توان جهت مدل‌سازی فرآیند آشام در شبیه‌سازی مخازن شکافدار استفاده کرد.

### تشکر و قدرانی

این مقاله برگرفته از بخشی از یک پروژه پژوهشی تحصیلات تکمیلی مورد حمایت مالی، فنی و اطلاعاتی شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب است که در دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف به انجام رسیده است. نویسندگان از شرکت یاد شده و نیز دانشگاه صنعتی شریف جهت تمام پشتیبانی‌های به‌عمل آمده سپاس‌گزاری می‌نمایند.

چراکه محور عمودی نمودارها براساس کاربردهای مهندسی مخازن آنها می‌تواند بر پایه کسری از بازیافت نهایی، کسری از نفت در جا و کسری از فضای حفرات سنگ و محور افقی نمودارها زمان بدون‌بعدی است که عوامل مختلف مانند اندازه نمونه، میزان گرانیروی و نوع ترشوندگی و ... را در بر دارد.

### نتیجه‌گیری

آشام خودبه‌خودی از مهم‌ترین مکانیزم‌های تولیدی در مخازن شکافدار در عملیات مختلف مانند تزریق آب و نیز بالا آمدن آبران است. به‌منظور پیش‌بینی نرخ تولید از بلوک‌های مخزنی، نیاز است آزمایش‌های آشام در آزمایش‌گاه برروی نمونه‌های مغزه صورت پذیرفته و سپس نتایج توسط روابط ریاضی افزایش مقیاس به مقیاس بلوک‌های مخزنی تعمیم داده شود. در این مقاله، روابط افزایش مقیاس آشام خودبه‌خودی ناهمسو بررسی گردید و مبانی علمی (برای موارد پایه تحلیلی) و تجربی (برای موارد پایه آزمایشگاهی) آن‌ها تشریح شد. همچنین ضمن اشاره به محدودیت‌ها و

### مراجع

- [1]. Van Golf T D (1982) Fundamental of reservoir engineering, Elsevier Scientist Publishing Company, Amsterdam, The Netherland.
- [2]. Saidi A M (1987) Reservoir engineering of fractured reservoir (fundamental and practical aspects), TOTAL Edition press.
- [3]. Mirzaei-Paiaman A, Masihi M, Standnes D C (2011) An analytic solution for the frontal flow period in 1-D counter-current spontaneous imbibition into fractured porous media including gravity and wettability effects, *Transp Porous Med* 89 (1), 49-62, . <http://dx.doi.org/10.1007/s11242-011-9751-8>.
- [4]. Mirzaei-Paiaman A Masihi M, Standnes D C (2011) Study on non-equilibrium effects during spontaneous imbibition, *Energy Fuels* 25 (7), 3053-3059, <http://dx.doi.org/10.1021/ef200305q>.
- [5]. Terez I E, Firoozabadi A (1999) Water injection in water-wet fractured porous media: Experiments and a new model with modified Buckley-Leverett theory, *SPE Journal*, 4 (2), 134.
- [6]. Mirzaei-Paiaman A Kord S Hamidpour E, Mohammadzadeh O (2017) Scaling one- and multi-dimensional co-current spontaneous imbibition processes in fractured reservoirs, *Fuel* 196, 458-472, . <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.120>.
- [7]. محسن مسیحی، مهندسی مخازن شکافدار با رویکرد مدل‌سازی و شبیه‌سازی، انتشارات پژوهشگاه صنعت نفت، ۹۷۸-۶۰۰-۵۹۶۱-۸۴-۳، ۱۳۹۵
- [8]. Bourbiaux B J, Kalaydjian F J (1990) Experimental study of cocurrent and countercurrent flows in natural porous media, *SPE Reservoir Engineering* 5, 03: 361-368.
- [9]. Zhou X Morrow N R, Ma S (2000) Inter relationship of wettability, initial water saturation, aging time, and oil recovery by spontaneous imbibition and waterflooding, *SPE Journal* 5, 2: 199.

- [10]. Cil M Reis J C Miller MA, Misra D (1998) An Examination of countercurrent capillary imbibition recovery from single matrix-blocks and recovery predictions by analytical matrix/fracture transfer functions, SPE 49005, proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA.
- [11]. Ma S, Morrow N R, Zhang X (1995) Generalized scaling of spontaneous imbibition data for strongly water-wet systems, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 18, 165.
- [12]. Zhang X, Morrow N R, Ma S (1996) Experimental verification of a modified scaling group for spontaneous imbibition, *SPE Reservoir Engineering* 11, 280.
- [13]. Behbahani H, Blunt M J (2005) Analysis of imbibition in mixed-wet rocks using pore-scale modeling *SPE Journal*, 10, 4: 466-474.
- [14]. Iffly R, Rousselet DC, Vermeulen JL (1972) Fundamental study of imbibition in fissured oil fields, SPE 4102, proceedings of the 47 the SPE Annual Fall Meeting of AIME, San Antonio, Texas, USA 8-11 October.
- [15]. Hatiboglu C, Babadagli T (2004) Experimental analysis of primary and secondary oil recovery from matrix by counter-current diffusion and spontaneous imbibition, SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [16]. Hatiboglu C U, Babadagli T (2010) Experimental and visual analysis of co-and counter-current spontaneous imbibition for different viscosity ratios, interfacial tensions, and wettabilities, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 70, 3-4: 214-228.
- [17]. Rangel-German E R, Kovscek A R (2001) Experimental and analytical study of multidimensional imbibition in fractured porous Media, Report Prepared for U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Fossil Energy, October.
- [18]. Hamidpour E, Mirzaei-Paiaman A, Masihi M, Harimi B (2015) Experimental study of some important factors on nonwetting phase recovery by cocurrent spontaneous imbibition, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 27, 1213-1228.
- [19]. Makhanov K, Dehghanpour H, Kuru E (2012) An experimental study of spontaneous imbibition in Horn River shales, SPE Canadian unconventional resources conference, Society of Petroleum Engineers.
- [20]. Zhou D, Jia L, Kamath J, Kovscek RA (2001) Scaling of counter-current imbibition processes in low permeability porous media, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 33 (1-3) , 61.
- [21]. Li K, Horne R N (2004) An analytical scaling method for spontaneous imbibition in gas/water/rock systems, *SPE Journal* 9, 03: 322-329.
- [22]. Fischer H, Wo S, Morrow N R (2008) Modeling the effect of viscosity ratio on spontaneous imbibition, In SPE Annual Technical Conference and Exhibition 577-589.
- [23]. Mason G, Fischer H, Morrow N R, Ruth D W (2009) Spontaneous Counter-Current Imbibition into Core Samples with All Faces Open, *Transp, Porous Media* 78, 199-216.
- [24]. Mirzaei-Paiaman A (2015) Analysis of counter-current spontaneous imbibition in presence of resistive gravity forces: Displacement characteristics and scaling, *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources* 12, 68-86.
- [25]. Mirzaei-Paiaman A (2016) A full approximate analytic solution to the problem of spontaneous imbibition in porous media, *Special Topics & Reviews in Porous Media: An International Journal* 7, 2: 141-147.
- [26]. Rapoport LA (1955) Scaling laws for use in design and operation of water-oil flow models, *Transactions of the AIME* 204, 143-150.
- [27]. Aronofsky JS, Masse L (1958) A model for the mechanism of oil recovery from the porous matrix due to water invasion in fractured reservoirs, *Petroleum Transactions, AIME* 213, 17-19.
- [28]. Bokserman A A, Zheltov Y P, Kocheshkov A A (1964) Motion of immiscible liquids in a cracked porous medium, *Soviet Physics Doklady* 9, 4: 285-287.
- [29]. Mattax C C, Kyte J R (1962) Imbibition oil recovery from fractured, water-drive reservoir, *SPE Journal* 2, 2: 177-184.
- [30]. Mirzaei-Paiaman A, Masihi M (2013) Scaling equations for oil/gas recovery from fractured porous media by counter-current spontaneous imbibition: from development to application, *Energy Fuels* 27, 4662-4676.
- [31]. Mirzaei-Paiaman A, Masihi M (2014) Scaling of recovery by cocurrent spontaneous imbibition in fractured petroleum reservoirs, *Energy Technology* 2 :166-175.
- [32]. Abbasi J, Riazi M, Ghaedi M, Mirzaei-Paiaman A (2017) Modified shape factor incorporating gravity effects for scaling countercurrent imbibition, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 150, 108-114.
- [33]. Hamidpour E, Fathollahi S, Mirzaei-Paiaman A, Bardestani M, Kamalifar H (2018) The study of spontaneous Co-current and counter-current imbibition in heavy oil fractured reservoirs with the focus on their distinctions in numerical simulation methods, SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition. 10-12 December, Kuwait City, Kuwait.
- [34]. Harimi B, Masihi M, Mirzaei-Paiaman A, Hamidpour E (2019) Experimental study of dynamic imbibition during water flooding of naturally fractured reservoirs, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 174: 1-13.



- [35]. Gupta A, Civan F (1994) An Improved model for laboratory measurement of matrix to fracture transfer function parameters in immiscible displacement, SPE 28929, proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Los Angeles, USA, 25-28 September.
- [36]. Tavassoli Z, Zimmerman R, W, Blunt M J (2005) Analytic analysis for oil recovery during counter-current imbibition in strongly water-wet systems, *Transp. Porous Media* 58: 173–189.
- [37]. Standnes D C (2010) Scaling group for spontaneous imbibition including gravity, *Energy Fuels* 24: 2980–2984.
- [38]. Mason G, Fischer S, Morrow NR, Ruth DW (2010) Correlation for the effect of fluid viscosities on counter-current spontaneous imbibition, *Journal of petroleum science and engineering* 72: 195–205.
- [39]. Kazemi H, Gilman J R, Elsharkawy A M (1992) Analytical and numerical solution of oil recovery from fractured reservoirs using empirical transfer functions, *SPE Reservoir Engineering* 7, 2: 219–227.
- [40]. Schmid K S, Geiger S (2013) Universal scaling of spontaneous imbibition for arbitrary petrophysical properties: Water-wet and mixed-wet states and Handy's conjecture, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 101: 44–61.
- [41]. Schmid KS, Geiger S (2012) Universal scaling of spontaneous imbibition for water-wet systems, *Water Resources Research* 48.
- [42]. McWhorter DB, Sunada DK (1990) Exact integral solutions for two-phase flow, *Water Resources Research* 26, 3: 399–413.
- [43]. Schmid K S, Geiger S, Sorbie K S (2011) Semianalytical solutions for co- and countercurrent imbibition and dispersion of solutes in immiscible two-phase flow, *Water Resources Research* 47, 2.
- [44]. Pooladi-Darvish M, Firoozabadi A (2000) Cocurrent and Countercurrent Imbibition in a Water-Wet Matrix Block, *SPE Journal*, <https://doi.org/10.2118/38443-PA>, 5, 01.
- [45]. Mirzaei-Paiaman A, Masihi M, Standnes DC, (2013) Index for characterizing wettability of reservoir rocks based on spontaneous imbibition recovery data, *Energy Fuels* 27: 7360–7368.
- [46]. Mirzaei-Paiaman A, Saboorian-Jooybari H, Masihi M (2017) Incorporation of viscosity scaling group into analysis of MPMS index for laboratory characterization of wettability of reservoir rocks, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 7, 1: 205–216.
- [47]. Mirzaei-Paiaman A, Saboorian-Jooybari H (2016) A method based on spontaneous imbibition for characterization of pore structure: application in pre-SCAL sample selection and rock typing, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 35: 814–25,.
- [48]. Dullien F A L (1992) *Porous media: fluid transport and pore structure*, 2nd edn. Academic Press, San Diego, USA.



# A review on Analytical Scaling Equations for Counter-Current Spontaneous Imbibition in Naturally Fractured Oil Reservoirs

Abouzar Mirzaei-Paiaman<sup>1,2,3</sup>, Mohsen Masihi<sup>1\*</sup> and Ramin Roghanian<sup>2</sup>

1. Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2. National Iranian South Oil Company (NISOC), Department of Petroleum Engineering, Ahvaz, Iran

3. State University of Campinas (UNICAMP), SP, Brazil

masihi@sharif.edu

DOI: 10.22078/pr.2020.3934.2790

Received: September/16/2019

Accepted: May/12/2020

## Introduction

Spontaneous imbibition is defined as the process of displacing a non-wetting fluid by a wetting fluid in a porous medium by action of natural capillary forces. This phenomenon is of significant importance in oil recovery from matrix blocks in naturally fractured reservoirs in the cases which water in fracture system surrounds the oil-saturated blocks. This could happen during aquifer rise and also during water flooding of these reservoirs. As naturally fractured reservoirs host a significant portion of the World's and Iran's oil and gas reserves, spontaneous imbibition can be regarded as one of the most important phenomena in petroleum engineering.

Spontaneous imbibition can be either counter-current or co-current. In counter-current spontaneous imbibition, oil and water flow in the opposite directions, whereas in co-current mode they flow in the same direction. Most of the previous studies on imbibition have been focused on counter-current spontaneous imbibition. The counter-current experiments are easy to conduct, and the recovery is obtained by either core scanning or volumetric measurements. Various factors affecting this process can be investigated in the laboratory.

Prediction of recovery by spontaneous imbibition is important and has been subject of active research over the past decades [1, 2, 3]. One approach to deal

this problem is to use scaling equations. Scaling equations are kinds of dimensionless time equations that represent the interplay between different forces in this process. In this paper, we present a review of the past analytical scaling equations. In particular, we discuss the universal scaling equations presented in [1].

## Scaling Spontaneous Imbibition

Many scaling equations have been proposed up to date. All these equations use simplifying assumptions which makes their use limited. A summary of various approaches to get such a scaling relation can be found in [1,2,3].

McWhorther and Sunada [4] presented the governing equation for two phase co-current and counter-current displacements in porous media. For counter-current flows, their analytical solution assumes that the rate of water intake varies linearly by square root of time. Pooladi-Darvish and Firoozabadi [5] were the first researchers who noticed that the analytical solution of [4] applies to the problem of spontaneous imbibition. They verified their numerical experiments with the aforementioned analytical solution. Later, Schmid and Geiger [2,3] used this analytical solution to derive a scaling equation.

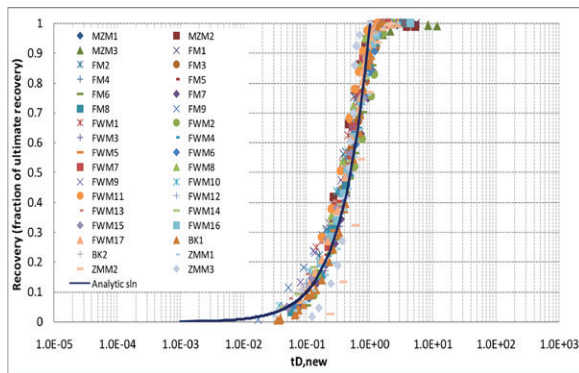
Mirzaei-Paiaman and Masihi [1] showed that the proposed scaling relation by [2,3] can be extended



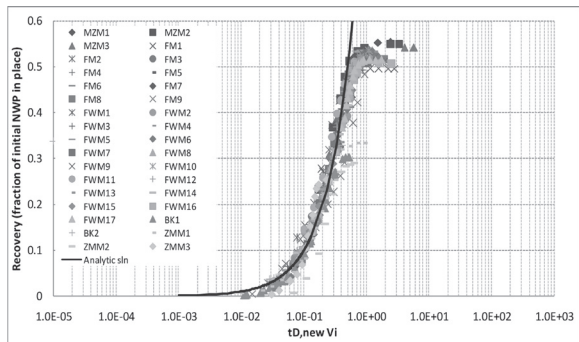
to cover its field applications. They proposed the normalization of oil recovery by either ultimate recovery, volume of oil in place, or rock pore volume, and defined three dimensionless times.

## Results and Discussion

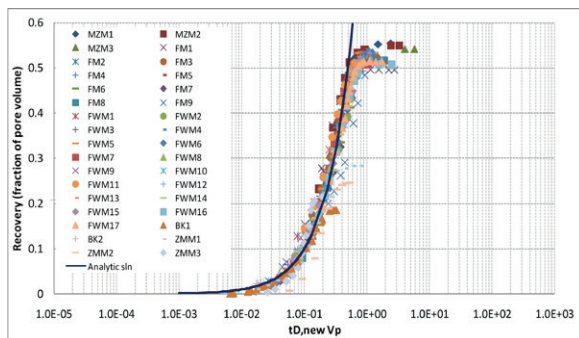
A diverse set of data belonging to counter-current spontaneous imbibition experiments were collected from the literature papers. These data represent a variety of rock and fluid systems. Figures 1-3 illustrate the results of scaling spontaneous imbibition recovery data available in literature by the scaling equations presented by [1]. These figures show the perfect performance of these equations in scaling imbibition curves. By these scaling equations (or dimensionless times), all data collapse into a single universal curve.



**Fig. 1** Scaling spontaneous imbibition experiments where recovery is normalized by ultimate recovery.



**Fig. 2** Scaling spontaneous imbibition experiments where recovery is normalized by the volume of the original nonwetting phase.



**Fig. 3** Scaling of spontaneous imbibition experiments where recovery is normalized by pore volume of samples.

## Conclusions

Imbibition is one the most important production mechanisms in fractured reservoirs. To predict the production from matrix blocks, imbibition test results are required. Then the results should be upscaled to simulation blocks for simulation purposes. In this paper, the scaling relations for counter-current spontaneous imbibition were reviewed. The analytical scaling equations proposed by [1] work very well in analysis of data.

## References

1. Mirzaei-Paiaman A, Masihi M (2013) Scaling equations for oil/gas recovery from fractured porous media by counter-current spontaneous imbibition: from development to application, *Energy Fuels* 27, 4662-4676.
2. Schmid KS, Geiger S (2013) Universal scaling of spontaneous imbibition for arbitrary petrophysical properties: Water-wet and mixed-wet states and Handy's conjecture, *J. Pet. Sci. Eng.*, 101, 44–61.
3. Schmid KS, Geiger S (2012) Universal scaling of spontaneous imbibition for water-wet systems, *Water Resour. Res.*, 48.
4. McWhorter DB, Sunada DK (1990) Exact integral solutions for two-phase flow, *Water Resour. Res.* 26 (3), 399–413.
5. Pooladi-Darvish M, Firoozabadi A (2000) Cocurrent and Countercurrent Imbibition in a Water-Wet Matrix Block, *SPE J.* 5 (01), <https://doi.org/10.2118/38443-PA>.