

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

مهندسی معدن، گرایش اکتشاف

رساله دکتری

افزایش مقیاس چنددرجه تفکیکی دو ویژگی مخزن هیدروکربنی در دو بعد با استفاده از پنجره با پهنای متغیر

نگارنده: محمدرضا آزاد

اساتید راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر بهزاد تخم‌چی

استاد مشاور:

دکتر محمد آرشی

خرداد ۱۳۹۸

صورۃ جلسہ

تقدیم بہ ہمسرم و پسرم ہومن

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکراندرش فرید نعمت...

راز شکر در خنده است، خنده با سپاس زیباست، شگرتی که از سر دل نباشد ارزش ندارد...

به این وسیله مراتب سپاس خود را از تلاش و زحمات ارزشمند و صادقانه کسانی که در زمینه به ثمر رسیدن این رساله، بنده را یاری رسانند، تقدیم می‌دارم. از بهسرمد که در تمام مدت تحصیل یک حامی بزرگ بود، از جناب آقای دکتر کاکار و دکتر تخم‌چی که در تمامی مراحل انجام این رساله با خوشرویی و فراتر از یک استاد راهنما همراهم بودند و استاد عزیز جناب آقای دکتر آرشی، که با بهترین مشاوره‌ها و با بهترین ایده‌ها گره‌کشی‌های مسائل بودند، کمال شکر و قدردانی را دارم. از درگاه این دوستان دوام عزت و سلامت، تداوم حضور و تاثیر این بزرگواران را در عرضه دانش، مسئلت دارم.

باتقدیم احترام

محمدرضا آزاد

۱۳۹۸/۰۳/۲۲

اینجانب محمدرضا آزاد دانشجوی دکتری رشته معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده رساله، *افزایش مقیاس چنددرجه تفکیکی دو ویژگی مخزن هیدروکربنی در دو بعد با استفاده از پنجره با پهنای متغیر*، تحت راهنمایی آقایان دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر بهزاد تخمچی و مشاوره آقای دکتر محمد آرشی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۸/۰۳/۲۲

امضای دانشجو



مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته‌شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

مدل‌های ویژگی‌های مخزن که به منظور شبیه‌سازی جریان سیال در محیط‌های متخلخل استفاده می‌شوند، شامل میلیون‌ها سلول هستند که حل اینگونه مدل‌ها با این حجم سلول، از نظر محاسباتی منطقی نیست. برای کاهش تعداد سلول‌های مدل اولیه، از روش‌های افزایش مقیاس استفاده می‌شود. ایده اصلی افزایش مقیاس، جایگزین کردن یک سلول همگن با مقیاس بزرگ به جای چندین سلول ریز ناهمگن است. روش‌های متعددی در زمینه افزایش مقیاس توسعه داده شده است که عمدتاً بر مبنای میانگین‌گیری هستند. در این رساله یک روش قوی به نام پنجره با پهنای متغیر که ایده اصلی آن برگرفته از پهنای باند است، به عنوان روش افزایش مقیاس پیشنهاد می‌شود. هدف‌گذاری این تحقیق بر اساس این روش، افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی مخزن در دو بعد است. با توجه به اینکه برای تعیین تعداد سلول‌های مدل شبیه‌ساز، باید یک تقسیم‌بندی مناسب، بنا به الگوی تغییرپذیری صورت پذیرد، می‌توان این رویکرد را به تعیین پهنای باند مناسب در برآورد تابع توزیع تشبیه نمود. از آنجا که توزیع ویژگی مخزن در نواحی مختلف، متفاوت است، بنابراین فرایند درشت‌سازی باید بر اساس تغییرپذیری ویژگی انجام شود. با این روش، نواحی با تغییرپذیری شدید بصورت ریز باقی خواهد ماند و نواحی با تغییرپذیری هموار افزایش مقیاس خواهند یافت. فرایند افزایش مقیاس در چهار حالت بررسی شده است؛ افزایش مقیاس داده‌ها در یک بعد با یک و دو ویژگی مخزن و سپس تعمیم فرایند به دو بعد با یک و دو ویژگی مخزن بطور هم‌زمان. چالش اصلی در روش پنجره با پهنای متغیر، تعیین پهنای باند یا پهنای پنجره است. در این روش پهنای پنجره بنا به تغییرپذیری ویژگی مخزن متغیر است که خود توسط پهنای باند کنترل می‌شود. در حالت یک بعدی پهنای باند به صورت اسکالر و در دو بعد، به صورت یک بردار تعریف می‌شود. برای افزایش مقیاس هم‌زمان ویژگی‌های مخزن هیدروکربوری، از دو رویکرد حداکثر و حداقل پهنای باند استفاده شده است. مدل‌های افزایش مقیاس هم‌زمان، مدل‌هایی هستند که از نظر ساختاری برای هر کدام از ویژگی کاملاً شبیه به هم بوده

و تنها تفاوت آنها در کمیت سلول‌ها است. علاوه بر روش پیشنهادی، فرایند افزایش مقیاس داده‌ها بر اساس تبدیل موجک نیز انجام شده است. نتایج افزایش مقیاس حاصل از دو روش نشان می‌دهد که مدل‌های شبیه‌ساز به دست آمده از روش پیشنهادی رساله در مقایسه با تبدیل موجک شباهت بیشتری به مدل اولیه دارند. این موضوع در مقایسه خطای افزایش مقیاس مدل‌ها و واریانس داده‌ها مشخص است. افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر فرایندی کاملاً هوشمند است و تنها بر اساس تغییرپذیری سلول‌ها انجام می‌شود، درحالی‌که افزایش مقیاس با تبدیل موجک بر مبنای سیستم دودویی است. در روش پنجره با پهنای باند متغیر، این قابلیت وجود خواهد داشت که با تعیین خطای مورد انتظار و همچنین تعداد سلول مدل شبیه‌ساز، فرایند افزایش مقیاس انجام شود.

کلمات کلیدی: افزایش مقیاس، پهنای باند، روش پنجره با پهنای متغیر، تبدیل موجک، افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی، خطای افزایش مقیاس

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. آزاد، م.ر.، کامکار، ا.، تخم چی، آرشی، م. ۱۳۹۸، افزایش مقیاس پارامترهای ژئومکانیکی مخزن با استفاده از روش تابع هسته با پهنای باند تطبیقی و مقایسه آن با نتایج تبدیل موجک، **نشریه علمی ژئومکانیک نفت**، دوره ۲، شماره ۲، ۴۰-۵۴.

2. Azad, M.R, Kamkar, A, Tokhmechi, B. and Arashi, M. 2019, Determination of Optimal Threshold in Upscaling Process of Reservoir Data using Kernel Function Bandwidth, **Journal of Mining and Environment**, 10, 3, 613-521. DOI: 10.22044/JME.2019.7604.1615

3. Azad, M.R, Kamkar, A, Tokhmechi, B. and Arashi, M. 2019, Simultaneous upscaling of two properties of reservoirs in one dimension using adaptive bandwidth in kernel function method, **Petroleum Exploration and Development**, 46, 4, 746-752.

4. Azad, M.R, Kamkar, A, Tokhmechi, B. and Arashi, M. 2019, Two-dimensional upscaling of reservoirs data using adaptive bandwidth in kernel function method, **International Journal of Mining and Geo-Engineering**.

5. Azad, M.R, Kamkar, A, Tokhmechi, B. and Arashi, M. 2019, Multiresolution simultaneous upscaling of two features of the reservoir using the bandwidth of the kernel function and wavelet transformation, **Journal of Petroleum Science and Engineering** (In print).

۶. آزاد، م.ر.، کامکار، ا.، تخم چی، آرشی، م. ۱۳۹۷، افزایش مقیاس داده های زمین شناسی مخزن با استفاده از پهنای باند تطبیقی در روش تابع کرنل، چهارمین همایش ملی زمین شناسی و اکتشافات معدنی، آذر ۹۷، کرمان.

۷. آزاد، م.ر.، کامکار، ا.، تخم چی، آرشی، م. ۱۳۹۷، تعیین حد آستانه بهینه در فرایند افزایش مقیاس داده ها با استفاده از پهنای باند در روش تابع کرنل، چهارمین همایش ملی زمین شناسی و اکتشافات معدنی، آذر ۹۷، کرمان.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ تعریف مسئله.....	۳
۳-۱ تاریخچه افزایش مقیاس.....	۵
۵-۱ ضرورت انجام تحقیق.....	۱۱
۶-۱ نوآوری تحقیق.....	۱۲
۷-۱ ساختار رساله حاضر.....	۱۴
۱-۲ مقدمه.....	۱۸
۲-۲ افزایش مقیاس مخازن.....	۱۸
۳-۲ انواع روشهای افزایش مقیاس.....	۲۰
۱-۳-۲ روشهای تحلیلی افزایش مقیاس.....	۲۲
۲-۳-۲ روشهای جریان مینا.....	۲۵
۱-۲-۳-۲ روشهای تکفازی.....	۲۵
۲-۲-۳-۲ روشهای دوفازی.....	۲۶
۴-۲ موجک در افزایش مقیاس.....	۲۶
۵-۲ افزایش مقیاس در شبیه‌سازی جریان سیال.....	۳۱
۶-۲ پنجره با پهنای متغیر در افزایش مقیاس.....	۳۵
۷-۲ جمع‌بندی.....	۳۶
فصل سوم: روش‌شناسی تحقیق.....	۳۹
۱-۳ مقدمه.....	۴۰
۲-۳ روش تحقیق.....	۴۰
۱-۲-۳ تئوری تبدیل موجک.....	۴۰
۱-۱-۲-۳ تبدیل موجک در یک بعد.....	۴۱
۲-۱-۲-۳ تبدیل موجک در ابعاد بیشتر.....	۴۳
۳-۱-۲-۳ افزایش مقیاس با تبدیل موجک.....	۴۴

۴۸	۲-۲-۳ تئوری روش پنجره با پهنای متغیر
۴۹	۱-۲-۲-۳ افزایش مقیاس با استفاده از پنجره با پهنای متغیر
۵۵	۳-۳ داده‌های تحقیق
۵۵	۱-۳-۳ داده‌های یکبعدی
۵۶	۲-۳-۳ داده‌های دوبعدی
۵۹	۴-۳ جمع‌بندی
۶۱	فصل چهارم:
۶۱	افزایش مقیاس یکبعدی داده‌ها با یک و دو ویژگی مخزن
۶۴	۳-۴ افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر
۶۴	۱-۳-۴ افزایش مقیاس تکویژگی
۷۱	۲-۳-۴ افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی (SUTF) بر اساس پنجره با پهنای متغیر
۷۶	۴-۴ افزایش مقیاس بر اساس تبدیل مویک
۷۶	۱-۴-۴ افزایش مقیاس تکویژگی
۸۰	۲-۴-۴ افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی (SUTF) بر اساس تبدیل مویک
۸۲	۵-۴ مقایسه نتایج افزایش مقیاس حاصل از دو روش
۸۳	۶-۴ جمع‌بندی
۸۵	فصل پنجم:
۸۵	افزایش مقیاس دوبعدی داده‌ها با یک و دو ویژگی مخزن
۸۶	۱-۵ مقدمه
۸۶	۲-۵ افزایش مقیاس دوبعدی با یک ویژگی مخزن هیدروکربوری
۸۶	۱-۲-۵ افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر
۸۷	۱-۲-۵-۱ افزایش مقیاس یک ویژگی مخزن در دویعد با استفاده از الگوریتم جستج و
۹۴	۲-۲-۵-۱ افزایش مقیاس یک ویژگی در دو بعد با الگوریتم ماتریس فاصله
۹۹	۲-۲-۵-۲ افزایش مقیاس بر اساس تبدیل مویک
۱۰۳	۳-۵ افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی مخزن هیدروکربوری در دو بعد
۱۰۴	۱-۳-۵ افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی بر اساس پنجره با پهنای متغیر
۱۰۴	۱-۳-۵-۱ تعیین مدل افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی (SUTF) بر اساس خطای افزایش مقیاس

۵-۳-۱-۲ تعیین مدل افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی (SUTF) بر اساس حداقل و حداکثر پهنای باند..	۱۰۷
۵-۳-۱-۱ افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی بر اساس تبدیل موجک	۱۱۱
۵-۴ مقایسه نتایج دو روش	۱۱۳
۵-۵ جمع‌بندی	۱۱۵
۶-۱ نتایج	۱۲۰
۶-۲ پیشنهادات	۱۲۴
منابع و مآخذ	۱۲۴

فهرست اشکال

شکل ۱-۱	مراحل انجام تحقیق	۱۰
شکل ۱-۳	تجزیه سیگنال	۴۳
شکل ۲-۳	تاثیر پهنای باند در برآورد تابع توزیع، الف) پهنای باند ۱، ب) پهنای باند ۲/۶۶ و ج) پهنای باند ۱۰	۴۸
شکل ۳-۳	مدل افزایش مقیاس الف) ویژگی اول، ب) ویژگی دوم، ج) همزمان دو ویژگی	۵۳
شکل ۴-۳	الف) نگار فشار منفذی و ب) نگار مقاومت	۵۶
شکل ۵-۳	الف) توزیع تخلخل در مدل SPE-10 و ب) موقعیت چاهها	۵۷
شکل ۶-۳	توزیع تراوایی مدل PUNQ-S3	۵۹
شکل ۱-۴	الف) نگار فشار منفذی و ب) نگار مقاومت	۶۳
شکل ۲-۴	نحوه عملکرد الگوریتم افزایش مقیاس بر مبنای پهنای باند	۶۵
شکل ۳-۴	تعیین پهنای باند بهینه بر اساس، الف) تغییرات SSE در مقابل پهنای	۶۷
شکل ۴-۴	پارامترهای افزایش مقیاس به ازای پهنای باند کوچکتر و بزرگتر از پهنای باند بهینه	۶۷
شکل ۵-۴	الف) مدل اولیه نگار فشار منفذی، ب) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه ۵۰، ج) مدل افزایش	۶۸
شکل ۶-۴	الف) مدل اولیه نگار مقاومت، ب) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه	۷۰
شکل ۷-۴	نحوه ساخت مدل SUTF در یک بعد	۷۱
شکل ۸-۴	مدل SUTF با رویکرد حداقل پهنای باند، الف) ویژگی اول (فشار منفذی)	۷۳
شکل ۹-۴	مدل SUTF با رویکرد حداکثر پهنای باند	۷۴
شکل ۱۰-۴	الف) مدل اولیه ویژگی اول (فشار منفذی)، ب) مدل افزایش	۷۷
شکل ۱۱-۴	الف) مدل اولیه ویژگی دوم (مقاومت)، ب) مدل افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک	۷۹
شکل ۱۲-۴	مدل SUTF با رویکرد حداقل پهنای باند، الف) ویژگی اول (فشار منفذی)	۸۰
شکل ۱۳-۴	مدل SUTF با رویکرد حداکثر پهنای باند، الف) ویژگی اول (فشار منفذی)	۸۱
شکل ۱-۵	نحوه اجرای الگوریتم جستجو برای سه راس اصلی الف) شبکه اولیه	۹۰
شکل ۲-۵	توزیع تخلخل در شبکه ۳۰×۳۰	۹۱
شکل ۳-۵	الگوی افزایش مقیاس در حالات مختلف با استفاده از الگوریتم جستجو	۹۱
شکل ۴-۵	مدل افزایش مقیاس در حالات مختلف الف) اول، ب) دوم، ج) سوم و د) چهارم	۹۲
شکل ۵-۵	الف) مدل ریز اولیه و ب) مدل افزایش مقیاس یافته حالت ۱	۹۴
شکل ۶-۵	الف) مدل ریز PUNQS و ب) مدل افزایش مقیاس	۹۶

- شکل ۵-۷ شماره‌گذاری سلولهای با مقیاس بزرگ در مدل افزایش مقیاس..... ۹۷
- شکل ۵-۸ الف) مدل اولیه ویژگی تخلخل، ب) مدل افزایش مقیاس، ج) بزرگنمایی مدل اولیه..... ۹۹
- شکل ۵-۹ الف) مدل ریز اولیه ویژگی تخلخل، ب) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه ثابت ۱۰۱
- شکل ۵-۱۰ الف) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه کاهشی، ب) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه ثابت ۱۰۲
- شکل ۵-۱۱ الف) مدل افزایش مقیاس ویژگی تخلخل و ب) مدل افزایش مقیاس تراوایی..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۲ الف) مدل SUTF ویژگی تخلخل و ب) مدل SUTF ویژگی تراوایی ۱۰۶
- شکل ۵-۱۳ الف) مدل SUTF تخلخل، ب) مدل SUTF تراوایی، پ) بزرگنمایی قسمتی از مدل تخلخل ۱۰۹
- شکل ۵-۱۴ الف) مدل SUTF ویژگی تخلخل، ب) مدل SUTF ویژگی تراوایی ۱۱۰
- شکل ۵-۱۵ افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی بر اساس تبدیل موجک، الف) افزایش مقیاس تخلخل ۱۱۲

فهرست جداول

جدول ۱-۳	موقعیت چاه‌های حفر شده در مدل SPE-10	۵۸
جدول ۱-۴	تعیین حدود پهنای باند برای ویژگی‌های مخزن	۶۵
جدول ۲-۴	پارامترهای افزایش مقیاس بر مبنای پنجره با پهنای متغیر	۶۹
جدول ۳-۴	پارامترهای افزایش مقیاس در رویکرد حداقل پهنای باند	۷۲
جدول ۴-۴	پارامترهای افزایش مقیاس در رویکرد حداکثر پهنای باند	۷۵
جدول ۵-۴	مقایسه پارامترهای افزایش حاصل از دو روش برای ویژگی فشار منفذی	۷۸
جدول ۶-۴	مقایسه پارامترهای افزایش حاصل از دو روش برای ویژگی مقاومت	۷۹
جدول ۷-۴	پارامترهای افزایش مقیاس ویژگی‌های بر اساس تبدیل موجک	۸۱
جدول ۸-۴	مقایسه نتایج افزایش مقیاس روش تبدیل موجک و پنجره با پهنای متغیر	۸۲
جدول ۱-۵	پارامترهای افزایش مقیاس	۹۲
جدول ۲-۵	پارامترهای افزایش مقیاس مدل تخلخل	۹۹
جدول ۳-۵	پارامترهای افزایش مقیاس مدل تخلخل بر اساس تبدیل موجک	۱۰۳
جدول ۴-۵	پارامترهای افزایش مقیاس در تعیین مدل SUTG بر اساس خطای افزایش مقیاس	۱۰۶
جدول ۵-۵	پارامترهای افزایش مقیاس در رویکرد حداقل پهنای باند	۱۰۸
جدول ۶-۵	پارامترهای افزایش مقیاس در رویکرد حداکثر پهنای باند	۱۱۰
جدول ۷-۵	پارامترهای افزایش مقیاس بر مبنای موجک در رویکرد کمینه پهنای باند	۱۱۲
جدول ۹-۵	مقایسه نتایج افزایش مقیاس دو روش	۱۱۴

فصل اول:

کلیات

۱-۱ مقدمه

اصولاً مهندسان برای حل و شبیه‌سازی مدل‌های اولیه مخازن، با توجه به گستره داده‌ها و محدودیت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری با یک چالش جدی روبرو هستند. مدیریت داده‌ها در علوم زمین با توجه به اینکه داده‌های متنوعی با اهداف متفاوت برداشت می‌شود، موضوع آسانی نیست. داده‌های برداشت شده از محیط‌های متخلخل نیز از این قاعده مستثنی نیستند. در این محیط‌ها با طیفی از داده‌ها برخورد می‌کنیم که با مقیاس‌های مختلف برداشت می‌شوند. هر داده‌ای معرف ویژگی خاصی از زمین است. اصولاً از آنجا که هدف برداشت متفاوت است، بنابراین تلفیق این داده‌ها برای استفاده در یک هدف مشترک، آسان نخواهد بود؛ چرا که مقیاس‌های برداشت آنها متفاوت است. در حوزه علوم زمین بخش عظیمی از هزینه‌ها متوجه برداشت داده‌ها است، بنابراین باید سعی شود استفاده حداکثری از داده‌های برداشت‌شده در هر مقیاسی به عمل آید. چالش پیش رو در این زمینه حجم زیاد داده‌ها، تنوع‌پذیری و تفاوت مقیاس اندازه‌گیری داده‌ها است. اصولاً در علوم زمین از این تیپ داده‌ها برای تهیه مدل‌های اولیه زمین‌شناسی استفاده می‌شود. مدل‌هایی که دارای سلول‌های بسیار بوده و جزئیات زیادی را شامل می‌شوند. برای حل این قبیل مدل‌سازی، روش‌های عددی استفاده می‌شوند که با توجه به حجم بالای معادلات و مجهولات در هر مدل، نیاز به صرف زمان و هزینه زیادی احساس می‌شود. به طور معمول برای حل هر مدل، ابتدا باید مدل مفهومی آن ساخته شود که دارای جزئیات بسیار زیادی است. این مدل اولیه می‌تواند شامل $10^8 - 10^{10}$ سلول باشد. حل معادلات دیفرانسیلی برای این تعداد سلول چه از لحاظ نرم‌افزاری و چه از لحاظ سخت‌افزاری، کار بسیار پیچیده و زمان‌بری است. لذا برای حل این مشکل بایستی یک مدل شبیه‌ساز ارائه شود که حجم محاسبات را کاهش داده و در عین حال، معرفی از مدل اصلی نیز باشد. روش‌های افزایش مقیاس^۱ به منظور کاهش حجم محاسبات و همچنین کاهش هزینه‌ها می‌توانند به عنوان یک راهکار در نظر

¹ Upscaling

گرفته شوند. با استفاده از این روش‌ها می‌توان با کمترین میزان از بین رفتن اطلاعات مدل زمین‌شناسی اولیه، به یک مدل شبیه‌ساز با تعداد سلول‌های کمتر رسید، به گونه‌ای که این مدل بیشترین میزان تطابق را با مدل اولیه ریزمقیاس داشته باشد.

۱-۲ تعریف مسئله

شبیه‌سازی جریان سیال^۲ برای ارزیابی برنامه‌ریزی تولید در مهندسی مخزن استفاده می‌شود. مدل‌های زمین‌شناسی مخزن معمولاً شامل جزئیات زیادی هستند که به منظور حل مؤثر معادلات جریان در این قبیل مدل‌ها، نیاز به یک مرحله پیش‌پردازش است تا مدل اولیه به یک مدل شبیه‌ساز با ابعاد کوچکتر تبدیل شود. برای انتقال یک مدل زمین‌شناسی با مقیاس ریز اولیه به یک مدل با مقیاس بزرگ، از فرایند افزایش مقیاس استفاده می‌شود. بطور کلی به تمامی روش‌هایی که سعی در حفظ اطلاعات ویژگی‌های مخزن در واحد ریزمقیاس بهنگام تبدیل به مقیاس بزرگتر را دارند، افزایش مقیاس گویند. افزایش مقیاس دو فاز اصلی دارد: الف) کاهش تعداد سلول‌های مدل اولیه با ادغام نمودن سلول‌های ریز با همدیگر و تبدیل به سلول‌های درشت که تحت عنوان شبکه‌بندی^۳ شناخته می‌شود و ب) برآورد و محاسبه کمیت معادل سلول‌های درشت که به عنوان افزایش مقیاس تعریف می‌شود (Christie, 1996; Durlofsky, 1997).

هدف از افزایش مقیاس جایگزینی مدل‌های ریزدانه با جزئیات بسیار بالا با مدل‌های درشت با تعداد سلول کمتر است. این مدل‌های درشت نسبت به مدل‌های اولیه زمین‌شناسی کاربردی‌ترند. با این حال هدف از افزایش مقیاس، صرفاً افزایش سرعت محاسباتی نیست بلکه، تمرکز تکنیک‌های افزایش مقیاس در حفظ اطلاعات و خصوصیات مدل‌های ریز و همچنین نمایش ناهمگنی‌های آنها است و در کنار آن، زمان و هزینه محاسبات نیز کاهش خواهد یافت.

2 Fluid flow simulation

3 Upgridding

اصولاً اکثر ویژگی‌های مخزن می‌تواند هدف افزایش مقیاس قرار گیرد، اما دو ویژگی مهمی که هر مخزن هیدروکربوری با آن معرفی می‌شود؛ تخلخل^۴ و تراوایی^۵ است. منظور از تخلخل در واقع همان تخلخل مؤثر است که عبارتست از حجم خلل و فرج موجود در سنگ که با یکدیگر در ارتباط می‌باشند. تراوایی نیز قابلیت انتقال سیال از فضاهاى خالی است که معیار مهمی در بررسی رفتار تولید از مخزن است. فرایند افزایش مقیاس صحیح تخلخل، با توجه به اینکه یک پارامتر افزایشی است، معمولاً به صورت میانگین‌گیری خطی وزنی از مقادیر ریزمقیاس است؛ اما در تراوایی، افزایش مقیاس شدیداً به میزان ناهمگنی مخزن و شرایط مرزی وابسته است. جریان سیال در مخازن نفتی در طیف وسیعی از مقیاس‌ها اتفاق می‌افتد و در واقع یک پدیده چندمقیاسی است. دلیل این رفتار نیز وجود ناهمگنی و یا تغییرپذیری در سنگ مخزن است (Rasaei and Sahimi, 2008).

اصولاً فرایند شبیه‌سازی مستقیم نیازمند دو گام اساسی است: الف- ساخت مدل زمین‌شناسی با جزئیات بالا و ب- ساخت مدل شبیه‌ساز مخزنی از روی همین مدل زمین‌شناسی با در نظر گرفتن کلیه محدودیت‌های موجود. الگوریتم افزایش مقیاس باید به گونه‌ای طراحی شود که علاوه بر اینکه اثر پارامترهای ریزمقیاس در مقیاس بزرگتر حفظ شده و مقادیر مناسبی برای ویژگی‌های مخزن حاصل شود، دقت مدل اولیه نیز محفوظ و سرعت محاسبات به میزان قابل توجهی افزایش یابد. به طور کلی در هر فرایند افزایش مقیاس سه هدف کلی دنبال می‌شود که عبارتند از: الف) بتوان داده‌هایی که از منابع مختلف با مقیاس‌های متفاوت اندازه‌گیری شده‌اند را تلفیق نمود، ب) مشخصات اصلی و بارز مدل اولیه را در مدل شبیه‌ساز حفظ نمود و ج) زمان و هزینه محاسبات را با حفظ ویژگی‌های ساختاری مهم داده‌ها، کاهش داد (Mikes et al., 2006).

4 Porosity

5 Permeability

۳-۱ تاریخچه افزایش مقیاس

طیفی از روش‌های مختلف برای افزایش مقیاس مدل‌های زمین‌شناسی با جزئیات زیاد برای شبیه‌سازی ویژگی‌های مختلف مخزن بررسی شده است. الگوریتم‌های افزایش مقیاس گوناگونی تاکنون پیشنهاد شده‌اند. از دهه ۱۹۶۰ میلادی روش‌های مختلفی جهت انتقال توصیف تغییرات فضایی از فضای ریزدانه به مقیاسی درشت‌تر استفاده شده‌اند. همچنین در دو دهه اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در توسعه روش‌های اندازه‌گیری یا تخمین ویژگی‌های محیط‌های متخلخل از قبیل مخازن نفت و گاز، مخازن ژئوترمال و سفره‌های آب زیرزمینی مشاهده شده است. اولین گام در شبیه‌سازی مستقیم این قبیل محیط‌ها، ساختن مدل زمین‌شناسی دقیق و با جزئیات بالا است. این مدل‌ها در اغلب اوقات به طور مستقیم از داده‌های برداشت شده به دست می‌آیند، ولی از آنجا که در علوم زمین، بنا به هزینه برداشت، داده‌ها محدود می‌باشند (یا برداشت داده در بعضی نقاط ناممکن است)، بعضاً روش‌های درون‌یابی نیز برای تخمین نقاط استفاده می‌شوند. معمولاً ابعاد این مدل‌ها در مقیاس بزرگ طراحی شده و شبکه‌های ریزدانه دارند که حل اینگونه مدل‌ها، بسیار زمان‌بر و بعضاً غیرممکن است. پس از تعیین مدل زمین‌شناسی مناسب، بایستی مدل‌های شبیه‌ساز تهیه شوند که مسلماً حل این مسائل با همان ابعاد اولیه مدل زمین‌شناسی، امکان‌پذیر نخواهد بود. بنابراین با توجه به محدودیت‌های موجود، مدل شبیه‌ساز به گونه‌ای ساخته می‌شود که با کمترین میزان اتلاف اطلاعات در حداقل زمان ممکن، بتوان به نتیجه مورد نظر دست یافت که این موضوع بدون استفاده از روش‌های افزایش مقیاس، امکان‌پذیر نخواهد بود (Christie, 1996; Christie and Blunt, 2001; Durlofsky, 2003).

تاکنون دسته‌بندی‌های مختلفی از الگوریتم‌های افزایش مقیاس ارائه شده است. تقسیم‌بندی‌ها بر مبنای کاربرد می‌باشند. این الگوریتم‌ها بر اساس فاز جریان سیال در مخزن به دو نوع تک‌فازی^۶ و

^۶ Single phase

چندفازی^۷ تقسیم می‌شوند. روشی که تنها پارامترهای تک‌فازی را افزایش مقیاس می‌دهد (نفوذپذیری یا قابلیت انتقال)، تحت عنوان روش تک‌فازی طبقه‌بندی می‌شود. در مقابل روش‌هایی که در آنها، توابع تراوایی نسبی افزایش مقیاس می‌یابند، به عنوان روش دوفازی به شمار می‌آورند. به طور معمول روش‌های دوفازی پیچیده‌تر از روش‌های تک‌فازی هستند (Christie, 1996). همچنین بر اساس وابستگی به شرایط مرزی، روش‌ها متنوعند: محلی^۸، محلی بسط داده شده^۹، سراسری و شبه-سراسری^{۱۰} و روش‌های مستقیم. در روش‌های محلی فرض بر این است که تانسور کمیت معادل (تراوایی یا هدایت هیدرولیکی) هر سلول از مدل زمین‌شناسی، یک ویژگی ذاتی بوده و مستقل از مقادیر کمیت سلولی محاسبه می‌شود. در مقابل، در روش‌های غیر محلی و یا محلی بسط داده شده، کمیت معادل علاوه بر مقادیر سلولی به شرایط جریان نیز وابسته است. در واقع در این روش‌ها، شرایط مرزی در فرایند افزایش مقیاس دخیل هستند. در روش‌های سراسری، از شبیه‌سازی جریان در مدل ریزدانه و در کل مدل برای تعیین پارامترهای بزرگ مقیاس استفاده می‌شود و در روش شبه-سراسری نیز با جانشینی اطلاعات تخمینی به جای نتایج ریزمقیاس سراسری، به مدل درجه آزادی داده می‌شود. در روش‌های مستقیم نیز بدون نیاز به ساخت مدل زمین‌شناسی و با توجه به اندازه‌گیری‌های محدود در دسترس، کمیت معادل سلول درشت، تخمین زده می‌شود (Wen & Gomez-Hernandez, 1996; Durlofsky, 2000; Chen *et al.*, 2003).

ایده کلی روش‌های تحلیلی و سنتی افزایش مقیاس که اساس آنها میانگین‌گیری است، بر هموارسازی محیط بوده که در نهایت مدل افزایش مقیاس، مدلی یکنواخت خواهد بود، در حالی که در عمل اینگونه نیست. بعضاً کمیت مورد نظر، توزیع متفاوتی در مخزن نشان می‌دهد که لذا، نیاز است ابعاد سلول‌ها بسته به توزیع ویژگی، متفاوت در نظر گرفته شود. در نواحی‌ای که شدت تغییرات کمتر است، نیاز به درشت‌سازی بیشتری نسبت به مکان‌های با تغییرپذیری شدید احساس می‌شود. به

⁷ Tow phase

⁸ Local Techniques

⁹ Extended Local Techniques

¹⁰ Global & Quasi- Global Techniques

عنوان مثال، در نواحی نزدیک چاه که شاهد تغییرات شدید فشار و اشباع سیالات هستیم، حالت مطلوب، حفظ ساختار ریز شبکه در این نواحی خواهد بود. بنابراین در این نواحی نیاز به استفاده از روش‌هایی است که بتواند با توجه به توزیع تغییرپذیری کمیت، شبکه ریزش را به درشت‌ش تبدیل کند که احساس می‌شود با تکیه بر روش‌های سنتی این امر میسر نخواهد شد. لذا اولین کاربردهای آنالیز موجک در حل مسائل افزایش مقیاس رواج پیدا کرد. با پیشرفت روش‌ها و ادامه کار بر روی حل مشکلات شبیه‌سازی مدل‌های زمین‌شناسی ریزدانه، برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ از آنالیز موجک در مسئله افزایش مقیاس استفاده کردند و تاکنون نیز، افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک یکی از روش‌های رایج در فرایند افزایش مقیاس به شمار می‌رود. بر اساس فرایند افزایش مقیاس بر مبنای موجک، با تعیین ضرایب تقریب و ضرایب جزئیات و تعیین حدود آستانه مناسب، افزایش مقیاس به صورت هوشمند و غیریکنواخت انجام می‌شود (Panda et al., 2000; Sahimi, 2000). هرچند با پیشرفت تکنولوژی، تهیه مدل‌های زمین‌شناسی اولیه ساده‌تر شده است ولی کاربرد روش‌های افزایش مقیاس در مخازن متوقف نشده و محققین همواره در جستجو و بهبود روش‌های افزایش مقیاس هستند.

۴-۱ روش انجام تحقیق

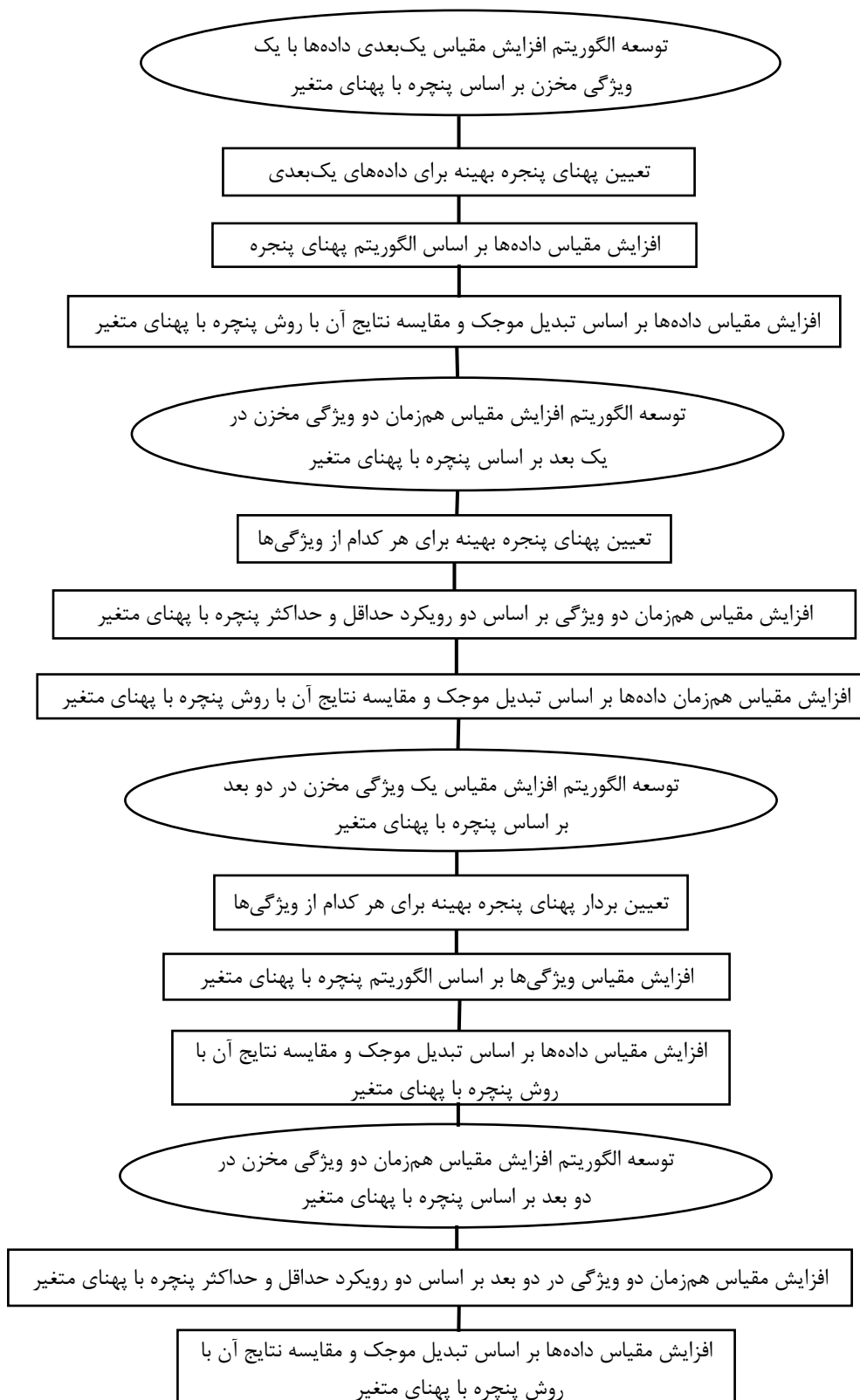
در این تحقیق از روشی نوین جهت افزایش مقیاس داده‌های مخزن تحت عنوان پنجره با پهنای متغیر استفاده شده که ایده اصلی آن برگرفته از پهنای باند است. با توجه به اینکه برای تعیین تعداد سلول‌ها باید یک تقسیم‌بندی مناسب، بنا به الگوی تغییرپذیری صورت پذیرد، می‌توان بر اساس پهنای باند، پنجره میانگین‌گیری با پهنای متغیر را تعیین نمود. در واقع با انتخاب پهنای پنجره مناسب، سلول‌ها تا زمانی افزایش مقیاس می‌یابند که تغییرپذیری آنها اجازه دهد. در این روش، افزایش مقیاس از نواحی دورتر از ناهمگنی‌ها شروع خواهد شد. در نتیجه سلول‌های با مشابهت بیشتر با همدیگر ادغام

شده و سلول‌های بزرگ را تشکیل خواهند داد. شرط توقف الگوریتم افزایش مقیاس، پهنای پنجره خواهد بود.

در این روش با تعیین یک حد آستانه یا همان پهنای پنجره و محاسبه خطای افزایش مقیاس، می‌توان تعداد سلول‌های مدل درشت‌مقیاس را به کنترل درآورد. در واقع می‌توان سطح مورد انتظار خطای افزایش مقیاس را از قبل مشخص و بر این اساس تعداد سلول‌های بزرگ شده را تعیین نمود. با این کار علاوه بر حفظ ساختار اصلی شبکه، زمان شبیه‌سازی با رویکرد افزایش دقت، کاهش می‌یابد. در روش پیشنهادی در این تحقیق، میزان افزایش مقیاس به صورت تابعی از پهنای پنجره متغیر طراحی شده است. در افزایش مقیاس در خوش‌بینانه‌ترین حالت نیز برخی جزئیات مدل اولیه از بین می‌رود. همچنین ممکن است سلول افزایش مقیاس رفتار مشابهی در مقایسه با سلول‌های کوچک از خود نشان ندهد. با روش پهنای پنجره متغیر سعی می‌شود اطلاعات مربوط به جزئیات در فرایند افزایش مقیاس حفظ شود. با این مفهوم که میزان افزایش مقیاس سلول به عنوان تابعی از تغییرپذیری در نظر گرفته شود و تابع هدفی که باید برآورد شود، میزان افزایش مقیاس سلول خواهد بود. پهنای پنجره متغیر در این روش، میزان تغییرپذیری سلول در نظر گرفته می‌شود. با این تکنیک نواحی یکنواخت با تغییرپذیری هموار از حالت ریز به حالت درشت تبدیل خواهند شد و در نواحی با تغییرپذیری شدید، سلول‌ها به صورت ریز باقی خواهند ماند.

برای شبیه‌سازی مخازن، ویژگی‌های متعددی از مخازن در نظر گرفته می‌شوند. طبیعی است که هر کدام از این ویژگی‌ها تغییرپذیری منحصر به فردی خواهند داشت، بنابراین مدل افزایش مقیاس آنها متفاوت خواهد بود. در تمام مطالعات انجام شده در زمینه افزایش مقیاس، از یک مدل یکسان برای افزایش مقیاس ویژگی‌های مختلف استفاده می‌شود و این موضوع خود به تنهایی منجر به ایجاد خطا خواهد شد. به عنوان مثال ممکن است یک ویژگی خاص مانند تخلخل در یک ناحیه خاص تغییرپذیری همواری داشته باشد و طبیعی است که مدل افزایش مقیاس در این ناحیه دارای سلول-

های بزرگ خواهد بود. حال ممکن است ویژگی دیگری از مخزن بعنوان مثال تراوایی در همین ناحیه تغییرپذیری شدیدی داشته باشد و حالت مطلوب افزایش مقیاس آن، ریزنگه داشتن سلول‌ها در این ناحیه باشد. بنابراین وقتی یک مدل مشابه برای این دو ویژگی در نظر گرفته شود، ممکن است اثر ناهمگنی ویژگی تراوایی از بین برود. این مشکل می‌تواند با افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی برطرف شود. در واقع اگر بتوان به یک الگوی یکسان برای هر دو ویژگی بر اساس تغییرپذیری متفاوت ویژگی‌ها رسید، می‌توان امیدوار بود که کمترین میزان حذف اطلاعات و همچنین حداکثر راندمان محاسباتی در مدل افزایش مقیاس رعایت شود. الگوی افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی، یک مدل افزایش مقیاس است که در آن، تعداد سلول‌ها و همچنین موقعیت مکانی سلول‌های ریز و درشت برای هر دو ویژگی کاملاً منطبق بر هم خواهد بود. شکل ۱-۱ مراحل انجام تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ مراحل انجام تحقیق

۵-۱ ضرورت انجام تحقیق

اهداف این تحقیق می‌تواند در چهار دسته مجزا تقسیم‌بندی شود. اولین هدف، کاربرد روش پنجره با پهنای متغیر در افزایش مقیاس است. هدف دوم این تحقیق افزایش مقیاس دو ویژگی مخزن هیدروکربوری بطور همزمان در یک بعد و سپس تعمیم آن به دو بعد است. موضوع سوم، افزایش مقیاس غیریکنواخت و تعیین بهترین الگوی شبکه‌بندی محیط متخلخل است. در نهایت هدف نهایی این تحقیق، مقایسه نتایج افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر با روش متداول تبدیل موجک است.

چالش اصلی در ساخت مدل‌های شبیه‌ساز، بهینه‌سازی الگوریتم افزایش مقیاس است. تمرکز اصلی روش‌های افزایش مقیاس موجود، بر تعیین کمیت معادل سلول‌های با مقیاس بزرگ است و کمتر به نحوه درشت‌سازی سلول‌ها توجه شده است. چنانچه نحوه درشت‌سازی سلول‌ها بر اساس الگوی تغییرپذیری انجام شود، و سلول‌ها با توجه به تغییرپذیری‌شان افزایش مقیاس یابند (درشت شوند)، روش‌های افزایش مقیاس چیزی غیر از میانگین‌گیری نیستند و تمامی آنها از فرایندی یکسان پیروی می‌کنند. روش پنجره با پهنای متغیر، به عنوان یک روش منعطف در افزایش مقیاس ویژگی-های مخزن استفاده می‌شود. با توجه به اینکه اساس افزایش مقیاس یا درشت‌نمودن سلول‌ها باید تغییرپذیری آنها باشد، پهنای پنجره یا باند می‌تواند به عنوان عملگر افزایش مقیاس تعریف شود.

اغلب روش‌های معمول در زمینه افزایش مقیاس، سعی در هموارکردن مدل اولیه دارند چرا که الگوی افزایش مقیاس برای تمام ویژگی‌ها یکسان است. تمامی روش‌های افزایش مقیاس نوعی میانگین‌گیری اطلاعات هستند. زمانی که تعداد میانگین‌گیری کم و همچنین فرایند آن بهینه شود، امید به آن است که روش افزایش مقیاس، کمترین میزان هدررفت اطلاعات را داشته باشد. برای کاهش حذف اطلاعات و ساختارهای اصلی، از روش پنجره با پهنای متغیر استفاده شده است. برای افزایش مقیاس ایده پهنای باند پیشنهاد شده است که بسته به تغییرپذیری سلول‌ها، نحوه و تعداد

میانگین گیری قابل کنترل خواهد بود. کاهش خطا فقط در صورتی اتفاق می افتد که افزایش مقیاس بصورت غیریکنواخت و هوشمند و صرفاً بنا به تغییر پذیری انجام شود.

اکثر روش هایی که در زمینه افزایش مقیاس توسعه داده شده اند، به بررسی و افزایش مقیاس ویژگی های مخزن بطور جداگانه می پردازد. به تعبیری دیگر، در فرایند شبیه سازی جریان سیال، برای تمامی ویژگی های مخزن، یک الگوی یکسان افزایش مقیاس، فارغ از تغییرپذیری های مختلف ویژگی ها در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه تغییرپذیری ویژگی ها مستقل از همدیگر است، قطعاً الگوی یکسان برای ویژگی ها، تمامی اطلاعات مربوط به همه ویژگی ها را به تصویر نخواهد کشید و لذا در این بین، حذف اطلاعات اصلی اجتناب ناپذیر خواهد بود. به عنوان مثال فرض کنید در یک ناحیه مشخص، رفتار ویژگی تخلخل، همگن و ویژگی تراوایی بصورت کاملاً ناهمگن توزیع شده است. اگر الگوی افزایش مقیاس برای هر دو ویژگی در این ناحیه یکسان باشد، طبیعی است که افزایش مقیاس در این ناحیه برای این دو ویژگی، بهینه نخواهد بود. بنابراین نیاز است که ویژگی ها بطور همزمان و کاملاً غیریکنواخت و همچنین بر اساس تغییرپذیری و توزیع آنها افزایش مقیاس داده شوند. بنابراین الگوی به دست آمده در این ناحیه، اولاً اطلاعات مدل تخلخل را تا حد امکان حفظ نموده و ثانیاً محاسبات اضافی به موجب ویژگی تراوایی به سیستم تحمیل نخواهد نمود. این موضوع مهم ترین هدف تحقیق حاضر است. هدف نهایی این تحقیق بر مقایسه روش پیشنهادی و روش شناخته شده تبدیل موجک بنا شده است. معیارهای مختلفی جهت مقایسه وجود دارد. خطای افزایش مقیاس و تغییر واریانس داده ها می توانند معیارهای مناسبی جهت مقایسه نتایج دو روش باشند.

۱-۶ نوآوری تحقیق

در این تحقیق، روشی جدید با عنوان پنجره با پهنای متغیر جهت افزایش مقیاس ویژگی های مخزن هیدروکربوری استفاده می شود که بر این اساس، میزان افزایش مقیاس تابعی از پهنای پنجره خواهد بود، که این می تواند اولین وجه تمایز تحقیق حاضر نسبت به اکثر مطالعات قبلی باشد.

در اغلب مطالعات تنها یک ویژگی مخزن به منظور افزایش مقیاس، هدف قرار داده شده و هیچ کدام از آنها اشاره‌ای به افزایش مقیاس دو پارامتر مخزن به طور همزمان ندارند. در روش‌های معمول افزایش مقیاس، الگوی درشت‌سازی برای تمام ویژگی‌ها اعم از تخلخل، تراوایی، درصد اشباع، لیتولوژی و ... یکسان در نظر گرفته می‌شود، در حالیکه بسته به تغییرپذیری این ویژگی‌ها، الگوی افزایش مقیاس آنها نیز متفاوت خواهد بود. در این رساله با ایده افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی این مشکل برطرف خواهد شد. در واقع هدف از پیشنهاد انجام این تحقیق، کاربرد روش پنجره با پهنای متغیر برای افزایش مقیاس دو ویژگی مخزن به طور همزمان است.

نقطه تمایز دیگر این تحقیق، استفاده از پنجره با پهنای متغیر دومتغیره به منظور افزایش مقیاس ویژگی‌های مخزن در دو بعد است؛ هرچند که حالت تک‌متغیره (یک‌بعدی) آن نیز روشی نوین محسوب می‌شود. در فضای دوبعدی، بسته به تغییرپذیری متفاوت در جهات مختلف، پهنای پنجره برای جهت x و جهت y متغیر خواهد بود.

در روش افزایش مقیاس با موجک در حالت دوبعدی، سیستم به صورت دودویی^{۱۱} عمل می‌کند. به عبارتی در هر سطح تجزیه، دو سلول در جهت x و دو سلول در جهت y ترکیب شده و چنانچه شرایط لازم را داشته باشند، ۴ سلول ریز افزایش مقیاس می‌یابند و یک سلول بزرگ را تشکیل می‌دهند. این فرایند در هر سطح تجزیه اتفاق خواهد افتاد. اما در افزایش مقیاس با استفاده از پنجره با پهنای متغیر با توجه به تغییرپذیری و تعیین پهنای باند در جهات مختلف، می‌توان انتظار داشت که افزایش مقیاس در جهات مختلف، متفاوت باشد. در واقع با این رویکرد می‌توان سلول‌های افزایش مقیاس را به صورت نامنظم و غیرمربعی تولید نمود. اهمیت این خصوصیت به واسطه استفاده در محیط‌های شکسته بخوبی نمایش داده خواهد شد. در یک زون شکسته با توجه به انتخاب پهنای باند در امتداد و عمود بر امتداد شکستگی، می‌توان فرایند افزایش مقیاس را به صورت کنترلی انجام داد به

¹¹ Binary

نحوی که در راستای شکستگی تعداد سلول‌های بیشتری را نسبت به جهت عمود بر آن افزایش مقیاس داد.

۱-۷ ساختار رساله حاضر

بررسی کامل تمامی روش‌ها و فعالیت‌های انجام شده در زمینه افزایش مقیاس مخازن، نیاز به یک مرور مطالعاتی جامع دارد که در فصل دوم به آن پرداخته شده است. در واقع در فصل دوم تاریخچه‌ای از کاربرد روش‌های افزایش مقیاس در علوم زمین و حوزه نفت بیان شده است. هدف این فصل معرفی کارهای انجام شده در زمینه افزایش مقیاس در علوم زمین است و سعی شده تمامی کارهای انجام شده در این زمینه، گردآوری و مزایا و معایب کلیه روش‌های معمول به کاررفته در زمینه افزایش مقیاس تاکنون بررسی شود.

در فصل سوم به روش‌شناسی تحقیق اشاره شده است. در این فصل، افزایش مقیاس با دو روش پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک معرفی شده و مبانی تئوری و عملی آن تشریح خواهد شد. هدف این فصل معرفی روش و بررسی معادلات حاکم بر روش است و سعی شده که به صورت گام به گام، مراحل مختلف پیاده‌سازی روش‌ها، تشریح گردد. همچنین در این فصل، الگوریتم مربوط به تمامی حالات بررسی شده در این رساله، شامل رویکرد افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک در حالت یک‌بعدی و دوبعدی به ازای یک ویژگی و دو ویژگی و سپس فرایند افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر با شرایط مشابه، بیان خواهد شد.

در فصل چهارم، نتایج حاصل از فرایند افزایش مقیاس در یک بعد به ازای هر دو روش با حالات تک‌ویژگی و دو ویژگی بررسی خواهد شد. در این فصل، نتایج افزایش مقیاس بر روی داده‌های یک

چاه با دو روش پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک بررسی شده و در نهایت، نتایج حاصل از دو روش مقایسه خواهند شد.

در فصل پنجم، فضای بررسی از حالت یک‌بعدی به حالت دوبعدی تعمیم داده خواهد شد و افزایش مقیاس در دو بعد بررسی می‌شود. در ابتدای این فصل، افزایش مقیاس در دو بعد و با یک ویژگی انجام و سپس نتایج افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی با هر دو روش پهنای باند و تبدیل موجک بررسی خواهد شد و در نهایت، نتایج حاصل از دو روش مقایسه می‌شوند.

در پایان نیز، نتیجه‌گیری کلی رساله در فصل ششم آورده شده و پیشنهاداتی در مورد ادامه مطالعات در زمینه افزایش مقیاس بیان خواهد گردید.

فصل دوم:

مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه افزایش مقیاس

۲-۱ مقدمه

با وجود پیشرفت‌های محاسباتی در تهیه مدل‌های زمین‌شناسی برای مقاصد شبیه‌سازی جریان سیال مخزن، کاربرد روش‌های افزایش مقیاس به عنوان یک رابط بین ویژگی‌های مخزن و شبیه‌سازی جریان سیال، به طور مرتب افزایش می‌یابد. در فرایند افزایش مقیاس باید نسبت به ترکیب سلول‌های کوچک مدل زمین‌شناسی برای ایجاد یک شبکه با سلول‌های با مقیاس بزرگتر، و همچنین اختصاص ویژگی‌های مخزن به این سلول‌های بزرگ اقدام نمود. در این فصل یک مرور جامع و کلی بر روش‌های افزایش مقیاس انجام خواهد شد. هدف از این مرور، درک عمیق‌تر روش‌های افزایش مقیاس موجود، مزایا و معایب آنها، بررسی محدودیت‌ها و چالش‌های مرتبط با آنهاست. در واقع هدف از این فصل، بررسی و ارزیابی تمام روش‌های افزایش مقیاس نیست، بلکه درک درست مفاهیم اصلی و همچنین معرفی روش‌های کاربردی در زمینه افزایش مقیاس خواهد بود. طیفی از روش‌های مختلف برای افزایش مقیاس مدل‌های اولیه ویژگی‌های مخزن با جزئیات زیاد تاکنون بررسی شده است. الگوریتم افزایش مقیاس بگونه‌ای باید طراحی شود که مقادیر مناسبی برای ویژگی‌های مخزن نظیر تخلخل و تراوایی و سایر خصوصیات مخزنی به دست آیند تا شبیه‌سازی جریان سیال، با حداکثر دقت و سرعت ممکن صورت پذیرد. در این فصل، ابتدا انواع روش‌های افزایش مقیاس با دسته‌بندی‌های مختلف بیان شده و سپس مطالعات انجام شده در زمینه افزایش مقیاس با رویکرد توسعه و پیشرفت روش‌ها با گذشت زمان، معرفی می‌شوند. حتی‌الامکان سعی شده است به تمامی مطالعات انجام شده در زمینه افزایش مقیاس اشاره، و مزایا و معایب آنها مطرح شود.

۲-۲ افزایش مقیاس مخازن

مدل‌های زمین‌شناسی مخازن معمولاً با استفاده از ده‌ها و یا صدها میلیون سلول ریز ساخته می‌شوند که هر کدام از این سلول‌ها، معرف یک بخشی از مخزن خواهند بود که با پارامترهای مخزن مانند تخلخل و تراوایی مشخص می‌شوند. این پارامترها معمولاً نتیجه مدل‌سازی با روش‌های زمین‌آماري

هستند. شبیه‌سازی جریان سیال در چنین محیط‌هایی با تعداد زیاد سلول ریز و حجم زیاد اطلاعاتی، بسیار سخت و در بعضی موارد غیرممکن است. بنابراین لازم است که تعداد سلول‌ها کاهش یابد و داده‌های آنها میانگین‌گیری شود که بتوان در یک فضای عملی مسئله را حل کرد. کاهش تعداد سلول‌های ریز با ادغام و درشت‌سازی سلول‌ها انجام می‌شود. به دنبال این عملیات، طبیعی است که باید یک مقدار معادل برای ویژگی‌های مخزن در سلول‌های درشت شده محاسبه نمود. فرایند درشت‌سازی و سپس میانگین‌گیری ویژگی‌های مخزن به عنوان افزایش مقیاس شناخته می‌شود.

افزایش مقیاس ویژگی‌های مخزن در دو دهه اخیر برای شبیه‌سازی جریان سیال در محیط‌های متخلخل و تولید مدل‌های شبیه‌ساز استفاده شده است. این مدل‌ها فرایند شبیه‌سازی را تسهیل نموده‌اند. هدف افزایش مقیاس صرفاً تسریع شبیه‌سازی مخازن نیست، بلکه ایده اصلی ساخت مدل‌های درشت است که بتواند ویژگی‌ها و خصوصیات مهم مدل‌های ریز را حفظ نموده و ناهمگنی‌های موجود را به تصویر کشیده و در کنار این اهداف، زمان و هزینه محاسبات را نیز کاهش دهد. به عبارت دیگر هدف از افزایش مقیاس جایگزینی حجم عظیمی از جزئیات داده‌های مخزن با ویژگی‌های معادل در یک مقیاس بزرگتر است (Christie 1996 and 2001). نحوه افزایش مقیاس ویژگی‌های مخزن بنا به ماهیت ویژگی متفاوت است. در خصوص تخلخل و اشباع آب که پارامترهایی جمع‌پذیر هستند، روش‌های میانگین‌گیری برای افزایش مقیاس استفاده می‌شوند. چالش اصلی در خصوص پارامترهای جمع‌ناپذیر مانند تراوایی است. در این شرایط روش‌های معمول میانگین‌گیری مناسب نخواهند بود (Renard and Marsily, 1997).

روش‌های افزایش مقیاس زیادی از قبیل روش‌های تحلیلی، روش‌های افزایش مقیاس تک‌فازی و دوفازی در تاریخچه افزایش مقیاس به کار برده شده است. روش‌های تحلیلی که شامل اکثر روش‌های میانگین‌گیری می‌شوند، نیازمند اجرای شبیه‌سازی جریان سیال نبوده و فرضیات ساده‌ای دارند و به دلیل همین سادگی، کاربردی آسان و سریع دارند. از طرفی این روش‌ها نیازمند برقراری یک سری

شرایط ایده‌آل هستند که عملاً کاربرد آنها در مخازن پیچیده را ناممکن می‌سازد. در مقابل، روش‌های افزایش مقیاس بر مبنای جریان تک‌فازی و دوفازی، نتایج به مراتب بهتری نسبت به روش‌های تحلیلی ارائه می‌دهند. هدف روش‌های تک‌فازی، افزایش مقیاس تراوایی مطلق با حل معادله فشار است. چالش اصلی در این روش‌ها، شرایط مرزی است. نتایج افزایش مقیاس در این روش‌ها فوق‌العاده وابسته به شرایط مرزی و همچنین نحوه انتخاب شرایط مرزی است (Christie et al., 2001). این روش‌ها بنا به تقسیم‌بندی دورلوفسکی (۲۰۰۳)، و بر اساس شرایط مرزی به انواع مختلفی تفکیک می‌شوند. افزایش مقیاس تراوایی نسبی با روش‌های افزایش مقیاس دوفازه انجام می‌شود (Durlufsky, 2003).

روش‌های تحلیلی برای افزایش مقیاس پارامتر تخلخل مناسب است؛ ولی برای افزایش مقیاس تراوایی نیازمند این است که محیط و یا مخزن همگن باشد. روش‌های تک‌فازه نسبت به روش‌های دوفازی کاربردی‌ترند ولی در شرایط مخزن ناهمگن دقت پایین‌تری دارند. به طور کلی انتخاب روش مناسب افزایش مقیاس می‌تواند وابسته به دو اصل مهم باشد: الف) روش تولید و ب) سطح ناهمگنی. اصولاً صرف نظر از نوع روش، فرایند افزایش مقیاس باید به گونه‌ای انجام شود که نتایج مدل افزایش مقیاس، مشابه و نزدیک به مدل زمین‌شناسی اولیه باشد و به نوعی بتوان به عنوان جایگزین از آن استفاده نمود (Durlufsky, 2003).

۲-۳ انواع روش‌های افزایش مقیاس

الگوریتم‌های افزایش مقیاس بر اساس فاز جریان سیال در مخزن به دو نوع تک‌فازی و چندفازی تقسیم می‌شوند. تکنیکی که تنها پارامترهای تک‌فازی را افزایش مقیاس می‌دهد (نفوذپذیری یا قابلیت انتقال)، تحت عنوان روش تک‌فازی طبقه‌بندی شده و در مقابل روش‌هایی که در آن، سعی در افزایش مقیاس تراوایی نسبی مخازن است، را به عنوان روش دوفازی به شمار می‌آورند. به طور معمول روش‌های دوفازی پیچیده‌تر از روش‌های تک‌فازی هستند (Christie, 1996). در مورد روش‌های تک-

فازی، مهم‌ترین پارامتری که باید افزایش مقیاس یابد، تراوایی مطلق است، که البته روش‌های بسیار متعددی در این زمینه ارائه شده است.

همچنین بنا به شرایط مرزی، انواع مختلف روش‌های افزایش مقیاس وجود دارد؛ در روش‌های محلی فرض بر این است که تانسور کمیت معادل (تراوایی یا هدایت هیدرولیکی) هر سلول از مدل زمین‌شناسی، یک ویژگی ذاتی بوده و مستقل از مقادیر کمیت سلولی محاسبه می‌شود. در مقابل، در روش‌های غیرمحلی و یا محلی بسط‌داده شده، کمیت معادل علاوه بر مقادیر سلولی به شرایط جریان نیز وابسته است. در واقع در این روش‌ها، شرایط مرزی در فرایند افزایش مقیاس دخیل می‌باشد. در روش‌های سراسری از شبیه‌سازی جریان در مدل ریزدانه در کل مدل برای تعیین پارامترهای بزرگ مقیاس استفاده می‌شود و روش شبه‌سراسری نیز با جانشینی اطلاعات تخمینی به جای نتایج ریزمقیاس سراسری، به مدل درجه آزادی می‌دهد. روش‌های مستقیم نیز بدون نیاز به ساخت مدل زمین‌شناسی و با توجه به اندازه‌گیری‌های محدود در دسترس، کمیت معادل سلول درشت، تخمین زده می‌شود (Wen & Gomez-Hernandez, 1996; Chen *et al.*, 2003).

نوع دیگری از طبقه‌بندی، الگوریتم‌های افزایش مقیاس بر اساس نحوه توسعه روش به دو نوع تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های تحلیلی، زمانی که ساختار مدل پیچیده می‌شود جواب خوبی ارائه نمی‌دهند؛ ولی در مقابل روش‌های عددی یا تقریبی می‌توانند مفید باشند. روش‌های تحلیلی نسبت به عددی سریع‌ترند. البته یک سری معایب دارند که در شرایطی خاص دقت‌شان کاهش می‌یابد. روش‌های عددی دقیق‌ترند اما زمان محاسباتی بیشتری دارند (Oz and Deutsch, 2000).

بر اساس ماهیت روش نیز، انواع الگوریتم‌های افزایش مقیاس به قطعی و تصادفی تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های قطعی فرض بر آن است که مدل زمین‌شناسی و توزیع پارامترهای آن کاملاً

معلوم است در صورتی که در روش‌های تصادفی یا احتمالی تنها یک دید تقریبی از مدل در اختیار می‌باشد (Renard and de Marsily, 1997).

۲-۳-۱ روش‌های تحلیلی افزایش مقیاس

از اولین روش‌هایی که در زمینه افزایش مقیاس توسعه داده شده‌اند، می‌توان به روش‌های سنتی میانگین توانی^{۱۲}، نرمال‌سازی مجدد^{۱۳}، لوله جریان^{۱۴} و حل معادلات فشار^{۱۵} اشاره نمود. کاردول و پارسون در سال ۱۹۴۵ نشان دادند که مقدار هدایت سلولی معادل بین میانگین ریاضی و هارمونیک قرار دارد (Cardwell and Parsons, 1945). سپس وارن و پرایس ۱۹۶۱، میانگین هندسی را به عنوان بهترین تخمین‌گر معرفی کردند (Warren and Price, 1961). این رویکرد که اساساً برای سلول‌های بزرگ استفاده می‌شود، به طور وسیعی در زمینه محیط‌های متخلخل در ابعاد مختلف بکار رفته است. با توجه به مطالعات انجام شده توسط ایشان در نهایت جورنل و همکاران (۱۹۸۶) استفاده از میانگین توانی برای تعیین کمیت معادل را پیشنهاد کردند (Journel et al., 1986). درلوفسکی در سال ۱۹۹۲ از روش‌های مختلف میانگین‌گیری هندسی، حسابی، هارمونیک، حسابی-هارمونیک و هارمونیک-حسابی برای این منظور استفاده کرد و به این نتیجه رسید که هیچ‌گونه میانگین‌گیری ساده برای فضاها ناهمگن^{۱۶} مفید نمی‌باشد (Durllofsky, 1992).

در جستجوی روش‌های پیشرفته‌تر، کینگ (۱۹۸۹)، روش نرمال‌سازی مجدد را که قبل‌ها در فیزیک کوانتومی استفاده می‌شد، برای افزایش مقیاس به کار برد (King, 1989). سپس روش توسعه داده شده نرمال‌سازی مجدد، توسط ویلیامز در سال ۱۹۸۹ ارائه شد. نرمال‌سازی مجدد روشی به مراتب سریع‌تر از میانگین‌گیری ساده است اما دقت پایینی دارد. این روش یک الگوریتم تکرارشونده

¹² Averaging Means

¹³ Renormalization

¹⁴ Flow Tube

¹⁵ Solution Pressure Equations

¹⁶ Heterogenic

است که تراوایی معادل یک شبکه ریزدانه بوسیله عملیات تناوبی محاسبه می‌شود. این روش کاربرد مؤثری در محیط‌های همسانگرد نشان داد اما در فضاها و ناهمگن و محیط‌های با خواص ناهمسانگردی زیاد، نظیر سازندهای رسی، قابلیت مطلوبی نداشت. ایده اصلی کاربرد این روش، سرعت آن است. محدودیت اصلی این روش مربوط به شرایط مرزی غیرواقعی است (Williams, 1989). مالک و هیوت (۱۹۹۴) نشان دادند که وقتی این شرایط مرزی بصورت پی‌درپی در حین عملیات نرمال‌سازی مجدد اعمال شوند، می‌تواند منجر به خطای زیادی در تراوایی نهایی سلول شود (Malick and Hewett, 1994). دورلوفسکی (۲۰۰۰) از روش نرمال‌سازی مجدد و درشت‌نمایی غیریکنواخت برای افزایش مقیاس تراوایی مطلق و نسبی، برای توصیف جریان دوفازه استفاده کرد. منحنی‌های برش نفت در مدل‌های افزایش مقیاس و مدل اولیه قابل مقایسه بودند. وی عنوان کرد که پیشرفت‌های اخیر (قبل از ۲۰۰۰) هزینه محاسبات را کاهش داده ولی خطای محاسبات افزایش می‌یابد. روش استفاده شده در این تحقیق هزینه محاسبات را بسیار کاهش می‌دهد چرا که تعداد سلول‌های محاسباتی بسیار کمتر می‌شود و در عین حال دقت شبیه‌سازی نیز قابل قبول می‌باشد (Durlofsky, 2000). مالیک نشان داد که تراوایی‌های بدست آمده از نرمال‌سازی مجدد در مورد مخازن ماسه سنگی شیلی هموزن تا ۲۰٪ خطا دارد (Malick, 1996).

هالدرسن و لیک در سال ۱۹۸۴ از روش لوله جریان برای محاسبه کمیت معادل استفاده نمودند (Haldorsen and Lake, 1984). از این روش به طور گسترده در صنعت نفت استفاده می‌شد و نتایج خوبی نیز به همراه داشت (Wen and Gomez-Hernandez, 1996).

روش دیگری که به طور سنتی استفاده می‌شد، حل معادله فشار بود. حل معادله فشار که یک روش عددی است، اولین بار توسط وارن و پرایس در سال ۱۹۶۱ پیشنهاد شد. در این مسیر از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود. نتیجه این روش به شرایط مرزی وابسته است، به گونه‌ای که اگر

شرایط مرزی بدون جریان، مورد استفاده قرار گیرد، تانسور تراوایی مؤثر قطری به دست می‌آید و به طور مستقیم در شبیه‌ساز مخزن وارد می‌شود (Warren and Price, 1961).

تمامی این روش‌هایی که در قرن نوزدهم برای محاسبه کمیت معادل در الگوریتم‌های افزایش مقیاس استفاده می‌شدند، ولی نقطه ضعف اصلی آنها این است که اغلب تمایل به همگن‌سازی اطلاعات موجود در داده‌ها داشته و در این صورت اطلاعات محلی مانند گسل‌ها، شکستگی‌ها و مرزهای شیلی دیده نمی‌شدند. از آنجا که به طور معمول در نفت و هیدروژئولوژی، تشخیص ناپیوستگی‌های منفرد مانند گسل‌ها و شکستگی‌ها، تغییرات رخساره‌های زمین‌شناسی و رگه‌های دارای تراوایی بالا امری ضروری است، لذا چنین روش‌هایی عملاً نمی‌توانستند در این حوزه‌ها کارایی لازم را داشته باشند. بنابراین در حوزه دانش رو به روش‌هایی آوردند که بتواند اطلاعات جزئی را حفظ نموده و در محیط‌های متخلخل کارایی بهتری داشته باشد. این روش‌ها به مراتب روش‌های سخت‌تر و وقت‌گیرتری از رویکردهای سنتی خواهند بود (Panda et al., 2000).

چن و همکاران در سال ۲۰۰۳ یک روش جدید را نسبت به روش‌های قبلی برای تولید مدل‌های با مقیاس درشت در سازندهای ناهمگن توسعه دادند. در این تحقیق از ترکیب روش محلی - ناحیه‌ای برای تعیین شرایط مرزی و همچنین تراوایی معادل سلول‌ها استفاده شده است. در این روش به طور مستقیم از اطلاعات جریال ناحیه‌ای یا سراسری برای تعدیل شرایط مرزی محلی در محاسبه پارامترهای افزایش مقیاس داده شده استفاده شده است. منظور از جریان سراسری در اینجا دو جریان کلی در جهت x و y است. برای سیستم‌های کانالیزه ناهمگن، افزایش مقیاس مستقیم قابلیت انتقال توسط روش ترکیبی، نتایج به مراتب بهتری نسبت به افزایش مقیاس تراوایی داشت. علاوه بر آن در افزایش مقیاس قابلیت انتقال، تعداد تکرارهای کمتری نیاز است. نتایج شبیه‌سازی توسط روش ترکیبی پیشنهادی، نتایج مطلوب‌تری نسبت به مدل‌های توسعه داده شده توسط فرایندهای محلی نشان می‌داد. در برخی موارد مدل‌های با مقیاس بزرگ بر اساس روش‌های قبلی، کمیت‌های جریان

سراسری پیش‌بینی شده را با خطای ۵۰٪ به بالا نشان می‌داد، درحالی که با روش ترکیبی، خطا به حدود ۱۰٪ کاهش می‌یافت (Chen et al., 2003). ون و همکاران در سال ۲۰۰۳، در تحقیق مشابهی، از روش ترکیبی برای سیستم‌های سه‌بعدی استفاده کردند. عملکرد این روش برای سه محیط متفاوت بررسی شد و دقت بالایی در محاسبه کمیت معادل و همچنین کاهش چشم‌گیر هزینه محاسباتی مشاهده گردید (Wen et al., 2003).

همان طور که اشاره شد، ایده کلی روش‌های تحلیلی بر هموارسازی محیط بوده که در نهایت مدل افزایش مقیاس مدلی یکنواخت خواهد بود. در خصوص مخازن پیچیده، عملاً استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر میانگین‌گیری ساده امکان‌پذیر نخواهد بود و بنابراین در این شرایط نیاز به استفاده از روش‌هایی است که بتواند با توجه به توزیع تغییرپذیری کمیت، شبکه ریزمش را به درشت‌مش تبدیل کند.

۲-۳-۲ روش‌های جریان‌مبنا^{۱۷}

در این روش‌ها برای افزایش مقیاس نیاز به اجرای شبیه‌سازی جریان در مدل ریز اولیه است. علاوه بر این، شرایط مرزی نیز لحاظ خواهد شد و انتخاب مناسب شرایط مرزی، اصلی مهم در عملکرد روش می‌باشد. این روش‌ها به دو نوع تک‌فازی و دوفازی تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به اینکه هدف این رساله به کارگیری این روش‌ها نیست و اصولاً شبیه‌سازی جریان سیال در موضوع تحقیق جایی ندارد، بنابراین در ادامه به اختصار در خصوص این روش‌ها توضیح داده خواهد شد.

۲-۳-۲-۱ روش‌های تک‌فازی

روش‌های تک‌فازی در مقایسه با دوفازی کاربردی‌ترند و محاسبات کمتری دارند. در روش‌های تک‌فازی فرض بر این است که جریان سیال پایدار و خطی است و یک فاز سیال را بررسی می‌کند. دقت نتایج این روش به پارامترهای متعددی مانند سطح ناهمگنی و شرایط مرزی وابسته است. هدف

¹⁷ Flow-based methods

افزایش مقیاس در این روش‌ها، افزایش مقیاس تراوایی مطلق خواهد بود. چالش اصلی در این روش‌ها تعیین و انتخاب شرایط مرزی است. به طور معمول نتایج این قبیل روش‌ها تحت تأثیر شدید شرایط مرزی هستند (Christie and Blunt, 2001; Lohne *et al.*, 2006).

۲-۲-۳-۲ روش‌های دوفازی

روش‌های دوفازی افزایش مقیاس، ابزاری مناسب برای افزایش مقیاس تراوایی نسبی و فشار مؤئینه برای به تصویر کشیدن اثر ناهمگنی‌های ریز است. به طور معمول روش‌های دوفازی زمانی استفاده می‌شوند که روش‌های تک‌فازی قادر به شناسایی ناهمگنی‌های ریز مقیاس و رفتار جریان سیال نباشند، اما ممکن است هزینه‌های محاسباتی آنها بالا باشد. همچنین علاوه بر گران بودن آن، به علت غیرعملی بودن این روش‌ها مخصوصاً در موارد واقعی، روش‌های دوفازی روش‌های جذابی نیستند.

۲-۴ موجک در افزایش مقیاس

اگرچه روش‌های زیادی در زمینه افزایش مقیاس توسعه داده شده است، اما بهبود دقت پارامترها و ویژگی‌های مخزن، دغدغه بزرگ برای محققین بوده است. بعلت خاصیت چندمقیاسی ناهمگنی‌ها در مخازن نفت، ویژگی‌های معادل مخزن در مقیاس‌های مختلفی اتفاق می‌افتد. بنابراین افزایش مقیاس این ویژگی‌ها بدون در نظر گرفتن منبع ناهمگنی و شناسایی ناهمگنی‌ها امکان‌پذیر نخواهد بود. آنالیز موجک یک روش مناسب برای افزایش مقیاس ویژگی‌های مخزن در محیط‌های ناهمگن پیچیده است (Chu *et al.*, 1998). در تئوری موجک، سیگنال به صورت متوالی به بخش‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین تفکیک می‌شود که به هر کدام یک زیرباند^{۱۸} گویند و دو گروه ضریب به دست می‌آید. گروه اول که اطلاعات فرکانس پایین هستند، نمایانگر روند اصلی سیگنال و ضرایب تقریب^{۱۹} نامیده می‌شوند و

¹⁸ Sub-band

¹⁹ Approximation coefficient

گروه دوم که حاوی اطلاعات فرکانس بالا هستند، ضریب جزئیات^{۲۰} نامیده می‌شوند. در حوزه علوم زمین عموماً اطلاعات در ضرایب تقریب نهفته است (Graps, 1995).

پاندا و همکاران (۲۰۰۰) برای اولین بار از آنالیز موجک در مسئله افزایش مقیاس استفاده کردند (Panda et al., 2000). سهمی نیز در همین سال با ذکر اینکه، روش‌های سنتی بسیار ساده و غیرواقعی هستند و همچنین راندمان محاسباتی پایینی دارند، لزوم کاربرد موجک در حوزه افزایش مقیاس را بیان کرد. ایشان با رویکرد شبکه عصبی فرکتالی- موجک به تحلیل داده‌های محیط متخلخل ریزدانه پرداخته و به نتایج مطلوبی دست یافت. سهمی نشان داد که فرایند افزایش مقیاس با موجک نه تنها اطلاعات اصلی را حفظ می‌کند بلکه راندمان محاسباتی را تا چندبرابر روش‌های قبلی افزایش می‌دهد (Sahimi, 2000). رسایی با بیان ماهیت چنددرجه تفکیکی تبدیل موجک عنوان کرد که فرایند افزایش مقیاس با این تبدیل، بصورت کاملاً هوشمند و غیریکنواخت انجام می‌شود که نقطه مقابل روش‌های سنتی است (رسایی، ۱۳۸۴). سهمی و همکاران سال ۲۰۰۵، برای مدلسازی مخازن ناهمگن از تبدیل موجک هار استفاده کردند و دقت و راندمان کار را براساس آنالیز فشار گذرا، جابجایی امتزاج‌پذیر و جریان دوفازی بررسی کردند. با اعمال ضرایب آستانه مناسب برای هر پارامتر به نتایج قابل قبولی در مقایسه با مدل ریزدانه رسیدند. ایشان مهمترین پارامتر در کارایی مدل افزایش مقیاس یافته را، تعیین مناسب حدود آستانه معرفی کردند. آنها همچنین در مطالعات بعدی از تبدیل موجک‌های هار در مخزن سه‌بعدی و db4 در محیط‌های با ناهمگنی بالا در دو بعد استفاده کردند و به نتایج مطلوبی در این زمینه دست یافتند (Sahimi et al., 2005).

افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک با روش‌های رایج میانگین‌گیری مانند میانگین ساده، هندسی و توانی مقایسه و مشاهده شد که آنالیز موجک قادر به حفظ ویژگی‌های ناهمگن موجود در مقیاس ریز، هنگام افزایش مقیاس و تولید سلول‌های بزرگ نسبت به روش‌های میانگین‌گیری است

²⁰ Details coefficient

(Marquez and Araujo, 2006). رسایی و سهیمی (۲۰۰۸) از این روش برای مدل‌سازی سیلاب‌زنی در محیط‌های متخلخل در سه بعد استفاده کردند. با استفاده از این روش، نواحی نزدیک چاه و همچنین نواحی با تراوایی بالا، ریزدانه باقی مانده و بقیه شبکه، افزایش مقیاس یافته است. فرایند افزایش مقیاس با مدل SPE-10 که توسط انجمن مهندسی نفت با مدل ریزدانه تهیه شده بود، مقایسه و دقت خوبی ارائه کرد. آنها سناریوهای مختلف افزایش مقیاس را امتحان کردند و نتایج را با مدل ریزدانه مقایسه نموده که در این بین، افزایش مقیاس غیریکنواخت بر اساس تکنیک موجک، بیشترین شباهت با مدل واقعی را نشان داد. همچنین این روش حداقل زمان ممکن با کمترین فضای اشغالی CPU را برای حل مسئله نیاز داشت (Sahaimi and Rasaei, 2008; 2009).

در ادامه مطالعات، رسایی و سهیمی (۲۰۰۹) از تبدیل موجک db4 به منظور افزایش مقیاس تراوایی مخزن، با رویکرد چنددرجه تفکیکی موجک استفاده کردند. این روش یک شبکه غیریکنواخت با سطح افزایش مقیاس پایین در نواحی با تراوایی بالا و سطح افزایش مقیاس بالا در نواحی دیگر به همراه داشت و بعد از تولید شبکه با مقیاس بزرگ، برای محاسبه تراوایی معادل سلول‌ها، از ۶ تکنیک که شامل سه روش تحلیلی (میانگین هارمونیک- حسابی، مقایسه با شبکه‌های الکتریکی و تبدیل موجک معکوس) و سه روش عددی (حل معادله فشار، حل معادله فشار پنجره‌ای و یک روش نابایاس) بودند، بهره برده و نتایج با مدل زمین‌شناسی مقایسه شدند. مدل مصنوعی تولید شده در این تحقیق با استفاده از حرکت براونی شبیه‌سازی شده است. در هر روش، فشار میانگین مخزن، نرخ تولید نفت و آب برش در چاه تولید محاسبه شده است. نتایج با دو حد آستانه ضرایب تقریب و جزئیات ۱ و ۰/۸ با همدیگر مقایسه شده‌اند. در حالتی که حدود آستانه برابر ۱ هستند، تراوایی محاسبه شده با هر ۶ روش در محاسبه فشار میانگین مخزن با دقت بالایی مشابه مدل زمین‌شناسی است. در محاسبه تولید نفت نیز نتایج مشابهی مشاهده شد. تفاوت بین دقت روش‌ها در مورد آب برش آشکار می‌شود. تمامی روش‌های عددی، میزان آب برش را بیشتر از مقدار آن در مدل زمین‌شناسی تخمین زده‌اند. در تبدیل موجک و با حدود آستانه برابر ۰/۸، وقتی فشار مخزن و نرخ تولید نفت بررسی می‌شود نتایجی با دقت

بالا به دست آمده است. در مورد نرخ آب برش، تمامی روش‌های عددی بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده‌اند ولی در این بین روش‌های تحلیلی نتایج بهتری دارند. نتایج ایشان نشان می‌دهد وقتی حدود آستانه کاهش یابد، اختلاف بین خروجی روش‌های مختلف نیز کاهش می‌یابد چرا که با کاهش این ضرایب، نتایج افزایش مقیاس به مدل زمین‌شناسی نزدیکتر شده است (Rasaei and Sahimi, 2009a). ایشان همچنین افزایش مقیاس تراوایی با استفاده از تابع موجک در محیط‌های متخلخل همراه با جریان‌های چندفازی را بررسی کردند و نشان دادند که بسته به درجه ناهمگنی مدل، سرعت محاسبات تا سه برابر افزایش می‌یابد (Rasaei and Sahimi, 2009b).

در سال ۲۰۱۱ عزیزمحمدی و متی، طی مطالعه‌ای به مقایسه تبدیل موجک و روش‌های میانگین ساده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اگر مدل ریزمقیاس، ناهمگنی بالایی داشته باشد و پیچیدگی‌های زمین‌شناسی متعددی همچون گسل‌ها و شکستگی‌ها در مدل اولیه موجود باشد، میانگین ساده نمی‌تواند مدل افزایش مقیاس یافته مناسبی ارائه دهد و در این موقعیت‌ها تبدیل موجک به مراتب کارایی بیشتری دارد (Azizmohammadi and Matthai, 2011). در مطالعه‌ای مشابه، بابایی و کینگ در سال ۲۰۱۱ به مقایسه دو روش تبدیل موجک و نرمال‌سازی مجدد پرداختند و اثبات کردند که تبدیل موجک نیز می‌تواند روشی قوی در بیان مدل افزایش مقیاس یافته باشد (Babaei and King, 2011).

قریشی (۱۳۹۳) برای تلفیق داده‌های لرزه‌ای و چاه‌نگاری و افزایش مقیاس داده‌ها در یک بعد با رویکرد موجک و با معیار انتخاب موجک مادر بهینه، روشی جدید را توسعه دادند. آنها نشان دادند که موجک مادر بهینه در سیگنال اولیه و در زیربخش‌های همگن آن متفاوت است و در نتیجه برای تعیین موجک مادر بهینه تصمیم به منطقه‌بندی سیگنال گرفتند و برای هر بخش از داده‌ها یک موجک بهینه معرفی کردند. انتخاب موجک مادر بهینه در کارهای قبلی بر اساس روش تطابق انرژی انجام شده است ولی در این مطالعه از تبدیل ساده تفریق میانگین بعنوان یک پیش‌پردازش برای

داده‌ها استفاده شده است و سپس با کاربرد موجک‌های مادر مختلف و تعیین بهینه آن، قدرت تفکیک داده‌های چاه‌نگاری به قدرت تفکیک داده‌های لرزه‌ای افزایش مقیاس است. در این کار از نرم‌افزار همپسون راسل^{۲۱} نیز برای تلفیق داده‌ها استفاده شده است و در نهایت خروجی‌ها با هم مقایسه شده‌اند. قریشی در مسیر یافتن موجک مادر بهینه برای انتخاب سطح نهایی تجزیه، از حدود آستانه استفاده کرده است. روش‌ها در دو میدان نفتی بررسی و نتایج حاصل با هم مقایسه شده و به این نتیجه رسیدند که سیگنال افزایش مقیاس یافته با روش پیشنهادی در مقایسه با عملکرد نرم‌افزار، شباهت بیشتری با سیگنال اولیه (داده‌های نگار چگالی) داشته است (قریشی، ۱۳۹۳).

واحدی و همکاران (۲۰۱۶) با ساخت یک مدل مصنوعی دارای شکستگی‌ها در امتدادهای مختلف، افزایش مقیاس سه‌بعدی مخازن نفتی شکافدار با رویکرد موجک را بررسی کردند. آنها با این ذهنیت که هدف از افزایش مقیاس با استفاده از تبدیل موجک، حفظ ساختار ریز شبکه در نواحی با تغییرات شدید است، سناریوهای مختلفی را با تغییرات پارامترهای تأثیرگذار و همچنین تست انواع موجک مادر بررسی کردند. در همین راستا به این نتیجه رسیدند که در هر مرحله از افزایش مقیاس، سلول‌ها در صورتی درشت خواهند شد که: الف) ضرایب جزئیات و مقیاس آنها کوچکتر از مقادیر آستانه‌ای تعریف شده باشد، ب) از یک مقدار مشخص به چاه‌ها نزدیکتر نباشند و ج) اندازه آنها در مقایسه با سلول‌های مجاور از یک مقدار مشخصی عبور نکند. توابع موجک به کار رفته در این تحقیق شامل موجک هار، داوبچیس^{۲۲} ۴ (db4)، کوایفلت^{۲۳} یک و بایور اس‌پی‌لاین^{۲۴} ۱/۳ و ۵/۵ می‌باشند که هدف از کاربرد آنها بررسی عملکرد فرایند افزایش مقیاس با رویکرد تعیین تابع موجک بهینه بوده است. میزان افزایش سرعت محاسبات مدل افزایش مقیاس به تعداد سلول‌ها، میزان ناهمگنی مخزن، نوع موجک مورد استفاده و مقادیر ضرایب آستانه و تعداد سطح افزایش مقیاس بستگی دارد و در هر کدام از حالت‌های مختلف سرعت تولید نفت در مخزن، تولید کل، فشار متوسط مخزن و همچنین

²¹ Hampson russell

²² Daubechies

²³ Coiflet

²⁴ Bior spline

زمان محاسبات بررسی شد و در نهایت به این نتیجه رسیدند که مدل افزایش مقیاس یافته توسط تابع موجک بایور اسپیلاین $1/3$ بیشترین دقت و سرعت شبیه‌سازی را نسبت به سایر مدل‌ها دارد (Vahedi et al., 2016).

مصلحی و همکاران (۲۰۱۶) با رویکرد موجک به مدل‌سازی جریان و انتقال محلول در محیط‌های متخلخل پرداختند. آنها با این ایده که مطالعات قبلی در این حوزه، صرفاً افزایش مقیاس تراوایی و هدایت هیدرولیکی بوده است، هدف‌شان را به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند پارامترهای هندسی و ساختاری بر روی هدایت هیدرولیکی در رفتار کلی انتقال، مانند زمان ورود، پیک غلظت و گشتاورهای فضایی متمرکز کردند. آنها با بررسی سناریوهای مختلف و همچنین بررسی پارامترهای مختلف، نتایج مدل‌سازی را با هم مقایسه کردند. پارامترهایی که در مدل‌سازی بررسی شدند عبارت بودند از: شدت تغییرپذیری هدایت هیدرولیکی، ماهیت همبستگی بین آنها (مثبت یا منفی) و ابعاد محدوده محاسباتی. عملکرد روش برای دامنه وسیعی از پارامترهای ذکرشده امتحان شد و مشاهده شد که وقتی ابعاد محدوده محاسباتی و دامنه هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد، همبستگی بیشتری بین مدل افزایش مقیاس داده شده و مدل ریزدانه برقرار می‌شود. ایشان به این نتیجه رسیدند که در تمام سناریوهای مورد بررسی و تهیه منحنی‌های مختلف، وقتی مدل افزایش مقیاس یافته با مدل ریزمقیاس اولیه مقایسه می‌شود، نتایج قابل قبولی به دست می‌آید. مدل افزایش مقیاس یافته با آنالیز موجک تنها با $2/1$ درصد از تعداد سلول‌های اولیه توانسته است ویژگی‌های مدل اولیه ریزدانه را منتقل کند (Moslehi et al., 2016).

۲-۵ افزایش مقیاس در شبیه‌سازی جریان سیال

شبیه‌سازی جریان سیال بمنظور آنالیز و پیش‌بینی رفتار سیال در مخازن استفاده می‌شود. حل عددی مدل‌های زمین‌شناسی اولیه با حجم معادلات زیاد امکان‌پذیر نیست. بنابراین به منظور حل مؤثر معادلات جریان، افزایش مقیاس برای انتقال یک مدل زمین‌شناسی ریزمقیاس (حدود 10^{10} سلول

ریز) به یک مدل درشت مقیاس (حدود 10^6 سلول درشت) استفاده می‌شود. نتایج مدل افزایش مقیاس به دلیل از بین رفتن ناهمگنی‌ها، تحریف اتصالات و پراکندگی عددی دقت مناسبی ندارند. هر منشأ خطای افزایش مقیاس، فاکتورهای مؤثر به خود را دارد. شناخت این فاکتورها و رفتار خطا در طراحی ابعاد مناسب سلول‌های شبکه مفید است (Ganjeh_ Ghazvini, 2019).

رفتار جریان و شبیه‌سازی سیال در محیط متخلخل شدیداً تحت تاثیر تغییرپذیری فضایی در ویژگی‌هایی مانند ناهمگنی‌ها است (Green and Willhite, 2003; Jonoud *et al.*, 2013). ناهمگنی در مقیاس کوچک را می‌توان در مدل‌های زمین‌شناسی با میلیون‌ها سلول شبکه نشان داد. با این حال، دینامیک جریان را نمی‌توان در این مدل‌ها با توجه به محدودیت‌های زمان و حافظه در دسترس شبیه‌سازی کرد. یک مدل شبیه‌سازی اغلب با ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابر سلول کمتر نسبت به مدل اولیه می‌تواند مفید باشد (Durlinsky, 2005). شبیه‌سازی جریان سیال بر روی مدل افزایش مقیاس یافته می‌تواند در صرف زمان برای مدیریت مخازن مختلف کمک زیاد کند (Krogstad *et al.*, 2015).

بطور معمول نتایج مدل درشت شده حاوی مقداری خطا در مقایسه با مدل ریزمقیاس هستند. افزایش ابعاد سلولها دقت را بدلیل؛ پراکندگی عددی، از بین رفتن ناهمگنی و تحریف اتصالات کاهش می‌دهد (Preux, 2016; Ganjeh-Ghazvini *et al.*, 2015a, 2015b). در سفره‌های آب زیرزمینی با ناهمگنی بالا، به علت عدم درک صحیح از ساختارهای زمین، در اکثر اوقات ناهمگنی نادیده گرفته می‌شود. برای شناسایی این ناهمگنی روش‌های متنوعی به کار می‌رود که البته مقیاس‌های اندازه‌گیری متفاوتی دارند. داده‌های ژئوفیزیکی می‌توانند در این مسیر مفید باشند اما اغلب با این چالش روبرو هستیم که مقیاس این داده‌ها با آنچه که مدنظر ماست مطابقت ندارد. بنابراین برای مدل‌سازی نیاز است که ناهمگنی‌های هر چند محلی، اما با دقت بالا نیز دیده شوند. لازمه این کار استفاده از افزایش مقیاس می‌باشد (de Marsily *et al.*, 2005; Koltermann and Georelik, 1996; Webb and Anderson, 1996). به طور معمول تراوایی یا هدایت هیدرولیکی معادل از طریق میانگین‌های فضایی

محاسبه می‌شود. عموماً کمیت معادل توسط روش‌های تصادفی، قطعی و غیرمستدل محاسبه می‌شود (Fleckenstein and Fogg, 2008; Matheron, 1967).

در شبیه‌سازی بزرگ مقیاس مخازن ناهمگن، توابع جریان افزایش مقیاس داده شده می‌توانند برای ارائه ناهمگنی در مقیاس‌های ریزشبکه‌ای به کار روند. تراوایی نسبی مؤثر عموماً همراه با تراوایی مطلق از مدل متخلخل زمین‌شناسی افزایش مقیاس می‌یابد. با این حال اگر هیچ اطلاعاتی در مقیاس-های زمین‌شناسی در اختیار نباشد اثر ناهمگنی‌های با مقیاس کوچک (در حد سانتی‌متر تا متر)، در تراوایی مطلق و مویرگی توسط این روش آشکار نخواهند شد.

ژنگ و فو در سال ۲۰۱۰ از روش ترکیبی اجزاء محدود و افزایش مقیاس برای بررسی نشست و تغییر شکل محیط‌های اشباع متخلخل استفاده کردند. آنها از تکنیک عددی اجزاء محدود به منظور محاسبه پارامترهای مؤثر محیط متخلخل و از تکنیک افزایش مقیاس برای شبیه‌سازی جریان سیال (فاز مایع) و انتقال جرم (فاز جامد) به طور همزمان استفاده نمودند. در این روش بطور همزمان تانسورهای مدول‌های الاستیک و تراوایی برای هر سلول درشت‌شده محاسبه شده است. نتایج به دست آمده از روش ترکیبی بر روی مدل افزایش مقیاس یافته به طور مطلوبی با نتایج روش اجزاء محدود بر روی محدوده دانه‌ریز مطابقت داشت. در عین حال به طور قابل توجهی زمان محاسبات و حافظه پردازنده مصرفی در این روش، نسبت به روش عددی مدل ریزدانه کاهش یافته است (Zhang and Fu, 2010).

در سال ۲۰۱۴ دیکسون و همکاران با ترکیب روش‌های ژئوفیزیک هوایی، ژئوفیزیک زمینی و روش‌های افزایش مقیاس و مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی، روشی نوین برای شناسایی ویژگی‌های سفره آب زیرزمینی پیشنهاد کردند. داده‌های ژئوفیزیکی هوایی با فاصله خطوط برداشت ۲۰۰ متر شامل داده‌های مغناطیس، رسانندگی الکتریکی و رادیومتریک در منطقه مورد مطالعه برداشت شده و البته در تحقیق مورد بحث بیشتر از داده‌های مغناطیس استفاده شد. داده‌های مغناطیس نیز در

مقیاس زمینی برداشت شده بودند. برای تأیید و بررسی دقت و اعتبارسنجی مدل نیز، اندازه‌گیری‌های با مقیاس ریز برداشت شده است. ایشان با تلفیق داده‌های موجود و افزایش مقیاس توانستند یک مدل مفهومی زمین‌شناسی قوی از منطقه تهیه نموده و پارامترهای هیدروژئولیکی به مراتب مستندتری از مدل‌سازی بدست آورند. برای ارزیابی خطا نیز مقدار خطای ریشه میانگین مربعات^{۲۵} (RMSE) مدل-ها محاسبه و مقایسه شدند و مشاهده شد که مدل افزایش مقیاس یافته، کمترین اختلاف ممکن با مدل عددی را داشته و در عین حال ناهمگنی‌های سفره نیز به خوبی شناسایی شده است (Dickson et al., 2014).

در ادامه کاربرد روش‌های افزایش مقیاس در سفره‌های آب زیرزمینی و مدل‌سازی جریان آب، چن و همکاران (۲۰۱۵) از یک روش افزایش مقیاس یافته نوین برای محیط‌های متخلخل شکافدار و به طور خاص سفره‌های آب زیرزمینی شکافدار استفاده کردند. مدل‌سازی سریع و دقیق جریان سیال در محیط متخلخل شکافدار برای مدیریت منابع آب، منابع هیدروکربن و انرژی ژئوترمال مهم می‌باشد (Chen et al., 2015). در ادامه، یک روش تحلیلی برای محاسبه تراوایی معادل بر اساس خصوصیات هندسی شکستگی‌ها ارائه شد (Oda, 1985). در مقایسه با این روش تحلیلی، روش افزایش مقیاس بر مبنای جریان بر اساس معادله فشار برای مدل شکستگی ناپیوسته به کاربرده شده که در شبیه‌سازی مخازن توسعه زیادی یافته است. سپس این روش افزایش مقیاس بر اساس نحوه محاسبه نرخ جریان و گرادیان فشار به دو نوع ادغام مرزی و میانگین حجمی تقسیم‌بندی شده است (Durlofsky, 2005; Zhou et al., 2010). چن و همکاران (۲۰۱۵) با توسعه روش لانگ و همکاران (۱۹۸۲) و درولوفسکی (۱۹۹۱)، که افزایش مقیاس شکستگی تک‌مرزی نامیده می‌شد، توانستند روش جدیدی تحت عنوان افزایش مقیاس شکستگی چندمرزی ابداع کنند. هر دو روش زیرمجموعه رویکرد ادغام مرزی می‌باشند. بعلاوه تغییر مقیاس، تراوایی معادل در محیط متخلخل تغییر می‌کند. وقتی مقیاس اندازه‌گیری بزرگ باشد، شکستگی‌های بیشتری در این مقیاس دیده می‌شوند و احتمالاً یک شبکه شکستگی

²⁵ Root mean square error

وجود خواهد داشت. برعکس، اگر مقیاس اندازه‌گیری کوچک باشد، مقیاس مدنظر فقط بخشی از یک شکستگی را ظاهر می‌سازد. فرایند افزایش مقیاس جریان- مبنای بکاربرده شده، سه مرحله اصلی داشت: الف- ناحیه شکستگی به شبکه‌هایی در سیستم مختصات تقسیم می‌شود، ب- مسئله بصورت تک‌فاز، تراکم‌پذیر و جریان پایا یا بدون چشمه یا هدر رفتی در هر شبکه حل می‌شود و ج- با استفاده از قانون داری، تراوایی معادل برای هر شبکه محاسبه می‌شود. ایشان با کاربرد روش جدید نشان دادند که نتایج حاصل از این روش، نسبت به روش رایج، بهبود یافته و در عین حال برای محیط‌های با انواع شکستگی‌ها مناسب است (Chen et al., 2015).

۲-۶ پنجره با پهنای متغیر در افزایش مقیاس

با توجه به این که تغییرپذیری ویژگی‌های مخزن در فضای مخزن هیدروکربوری متغیر است و شرایط همگن کمتر پیش می‌آید، استفاده از روش‌های افزایش مقیاس مبتنی بر میانگین‌گیری با الگوی یکنواخت، کارایی لازم را خصوصاً در مخازن شکسته و کاملاً پیچیده نخواهد داشت. در روش‌های غیریکنواخت مانند موجک نیز چون افزایش مقیاس بنا به یک الگوی خاص دودویی انجام می‌شود، نمی‌توان اثبات نمود که مدل به دست آمده بر اساس تبدیل موجک، مدل بهینه افزایش مقیاس است، کمااینکه برتری موجک نسبت به روش‌های معمول، کاهش تعداد میانگین‌گیری و پیرو آن کاهش خطای افزایش مقیاس است. با تمام این تفاسیر، روش افزایش مقیاس زمانی که بنا به تغییرپذیری سلول‌ها به صورت کاملاً محلی طراحی شود و شرط درشت‌شدن سلول‌ها صرفاً مقدار کمیت آن سلول و اختلاف آن با همسایگی‌های آن باشد، انتظار می‌رود که با این رویکرد، میزان هدر رفت اطلاعات اصلی مدل اولیه به حداقل رسیده و خطای افزایش مقیاس به طبع این اصل، کاهش یابد.

در تئوری موجک انتخاب سطح تجزیه مناسب (کافی) به شناخت فرد از ذات سیگنال و نظر وی بستگی دارد و این خود یک نقطه ضعف بشمار می‌آید. علاوه بر این، در هر سطح تجزیه باید موجک مادر بهینه از بین انواع مختلف انتخاب شود که این نیز مستلزم کاربرد تمام موجک‌های مادر در هر

سطح و مقایسه آنها با یکدیگر می‌باشد. فرایند افزایش مقیاس در مोजک بر اساس فرایند دودویی است و عملاً دو سلول یا با همدیگر ادغام می‌شوند و یا نمی‌شوند و حالت بینابینی وجود ندارد. پنجره با پهنای متغیر به عنوان یک روش نوین، اولین بار توسط عبادی (۱۳۹۵) تحت عنوان افزایش مقیاس بر اساس پهنای باند به منظور افزایش مقیاس چاه‌های نفتی استفاده شده است. ایشان از روش پهنای باند متغیر در داده‌های یک‌بعدی ۵ چاه نفتی میدان جنوب غرب ایران استفاده کردند و به نتایج خوبی دست یافتند. از آنجایی که باید میزان افزایش مقیاس به تغییرپذیری سلول ارتباط داشته باشد، پهنای باند، میزان تغییرپذیری سیستم در نظر گرفته می‌شود. در این روش می‌توان با تعیین حد آستانه یا پهنای باند، میزان افزایش مقیاس هر سلول را کنترل کرد. علاوه بر این، یک روش جدید برای تعیین پهنای باند متغیر ارائه شد که با توجه به وجود حد آستانه قابل کنترل، از تطبیق‌پذیری بالایی برخوردار بود (عبادی، ۱۳۹۵).

۲-۷ جمع‌بندی

اولین مرحله شبیه‌سازی جریان سیال در مخازن، تهیه مدل‌های زمین‌شناسی و سپس مدل شبیه‌ساز برای بررسی رفتار سیال بمنظور پیش‌بینی تولید مخازن است. ارائه مدل شبیه‌ساز بدون روش‌های افزایش مقیاس امکان‌پذیر نیست. تمرکز تمامی روش‌های افزایش مقیاس بر محاسبه کمیت معادل سلول‌های با مقیاس بزرگ است و کمتر به نحوه شبکه‌بندی مخزن پرداخته شده است. تا زمانی که رفتار ویژگی‌های مخزن خطی باشد، روش‌های افزایش مقیاس بر مبنای میانگین‌گیری ساده می‌توانند نتایج خوبی ارائه دهند. اما زمانی که مخزن ناهمگنی‌های مختلف در مقیاس‌های متفاوت داشته باشد، روش‌های میانگین‌گیری، دقت کافی را نخواهند داشت. در این شرایط نیاز به روش‌های غیریکنواخت برای شناسایی ناهمگنی‌ها در مدل‌های زمین‌شناسی است. تبدیل مोजک یکی از این روش‌هاست. تبدیل مोजک با رویکرد افزایش مقیاس چندمقیاسی سعی بر حفظ اطلاعات و ناهمگنی‌های مخزن دارد که با روش‌های تحلیل ساده امکان‌پذیر نیست. افزایش مقیاس زمانی که بر اساس تغییرپذیری

ویژگی مخزن طراحی شود، می‌توان انتظار داشت که حداکثر ناهمگنی‌های مدل اولیه حفظ شده و در عین حال سرعت زمان محاسبات افزایش یابد.

فصل سوم:

روش‌شناسی تحقیق

۳-۱ مقدمه

از مرور مطالعات قبلی (فصل دوم)، این نتیجه حاصل شد که افزایش مقیاس خیلی وابسته به نحوه درشت‌سازی سلول‌ها است. نحوه ترکیب و ادغام سلول‌ها یک اصل مهم در افزایش مقیاس است و وقتی الگوی درشت‌سازی سلول‌ها بر مبنای تغییرپذیری باشد، می‌توان امیدوار بود که تعیین کمیت معادل ویژگی مورد نظر با کمترین خطای ممکن اتفاق بیفتد. افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر می‌تواند ناهمگنی‌ها در مقیاس ریز را حفظ نموده و خطای ناشی از افزایش مقیاس را تا حد امکان کاهش دهد. روش‌های متعددی در فصل دوم ارائه شدند که هر کدام از آنها دارای مزایا و معایبی بودند و فقط تعداد کمی از آنها شرایط مناسبی را برای افزایش مقیاس مخازن فراهم می‌کنند. بنابراین نیاز به توسعه یک روش قوی در این زمینه احساس می‌شود. در این فصل یک الگوریتم افزایش مقیاس جدید بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر^{۲۶} که برگرفته از پهنای باند تطبیقی، برای افزایش مقیاس مخازن ناهمگن ارائه خواهد شد. در ادامه این فصل، ابتدا تئوری روش تبدیل موجک، بعنوان یک روش شناخته شده در زمینه افزایش مقیاس، تشریح شده و سپس روش پنجره با پهنای متغیر به عنوان روش پیشنهادی رساله آورده شده است.

۳-۲ روش تحقیق

۳-۲-۱ تئوری تبدیل موجک

تئوری تبدیل موجک به منظور غلبه بر مشکلات تبدیل‌های فوری و فوریه زمان کوتاه در تجزیه و تحلیل سیگنال‌های ناپایا ارائه شده است. تبدیل موجک یک تبدیل خطی است که تابع را در فضای زمان-مقیاس (فرکانس) نمایش می‌دهد. در واقع تابع از حوزه زمان به حوزه زمان-مقیاس تبدیل می‌شود. در تبدیل موجک گسسته، تابع از فیلترهای بالاگذر برای آنالیز فرکانس‌های بالا و فیلترهای پایین‌گذر برای آنالیز فرکانس‌های پایین عبور داده می‌شود. بنابراین سیگنال به دو بخش تقسیم می‌-

²⁶ variable bandwidth Window

شود: بخش حاصل از عبور سیگنال از فیلتر بالاگذر که شامل اطلاعات فرکانس بالا (از جمله نوفه) است و ضرایب جزئیات نامیده می‌شود و بخش حاصل از عبور سیگنال از فیلتر پایین‌گذر که شامل اطلاعات فرکانس پایین است و دربرگیرنده مشخصات هویتی سیگنال است و کلیات نامیده می‌شود (Graps, 1995; Ganzalo and Jesus, 2004).

۳-۲-۱-۱ تبدیل موجک در یک بعد

توابع پایه در تبدیل فوری تا بی‌نهایت ادامه دارند و رفتار آنها قابل پیش‌بینی است؛ درحالی که موجک‌ها دارای دامنه متمرکز بوده و نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی می‌باشند. موجک مادر یک تابع محلی است که مقدار آن قبل و بعد از بازه‌ای مشخص، صفر است. میانگین هر موجک مادر نیز مطابق رابطه (۳-۱)، صفر است.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (۳-۱)$$

موجک‌ها از انتقال و تغییر مقیاس یک تابع اولیه به نام موجک مادر بوجود می‌آیند. با تغییر مقیاس ψ به اندازه a و انتقال به اندازه b با استفاده از رابطه (۳-۲)، سایر موجک‌ها ساخته می‌شوند.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (۳-۲)$$

که در این رابطه، a پارامتر تغییر مقیاس و b پارامتر انتقال و موقعیت زمانی (مکانی) است. فشردگی، جابجایی و بازشدگی موجک مادر توسط این دو پارامتر کنترل می‌شود. قدرت تفکیک موجک که مشخص‌کننده فرکانس موجک است با a نسبت عکس دارد و b نیز موقعیت و مکان موجک (مرکز اثر موجک) را مشخص می‌کند. این خاصیت تغییرپذیری مقیاس و خاصیت جابجایی آن، ابزار بسیار قوی در تحلیل چندتفکیکی داده‌ها فراهم می‌کند. دو پارامتر مقیاس و انتقال می‌توانند بطور پیوسته تغییر کنند که تبدیل موجک پیوسته نام دارد؛ ولی در کاربردهای عملی با تبدیل ناپیوسته سروکار خواهیم داشت. در این صورت دو پارامتر از روابط $a = 2^j$, $b = ka$ بدست خواهند آمد که k و

z اعداد صحیح هستند. در این حالت موجک‌ها با دو شاخص نمایش داده می‌شوند $(\psi_{j,k})$. بنابراین تبدیل موجک تابع را می‌توان به صورت رابطه (۳-۳) تعریف کرد:

$$D_j(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (3-3)$$

این ضرایب نشانگر میزان همبستگی بین موجک و بخش محلی سیگنال است و ضرایب جزئیات موجک نامیده می‌شوند. این ضرایب تغییرات تابع f در پنجره همسایگی b و به اندازه a را نشان می‌دهد. تغییرات شدید و ناگهانی در تابع f منجر به تولید جزئیات بزرگ خواهد شد. از این رابطه می‌توان به سادگی نشان داد که:

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} D_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (4-3)$$

در واقع یک تابع چیزی نیست جز مجموع جزئیات آن در تمام مقیاس‌ها و مکان‌ها. ضرایب جزئیات موجک شامل اطلاعات مربوط به تفاوت بین دو تقریب از یک تابع در دو مقیاس متوالی است و در واقع معرف اطلاعات از دست رفته در هر گام تجزیه است. تقریب یک تابع را می‌توان از تابع مقیاس‌بندی به دست آورد. این توابع بر موجک مادر متعامد بوده و مطابق رابطه ۳-۵ دارای میانگین واحد هستند:

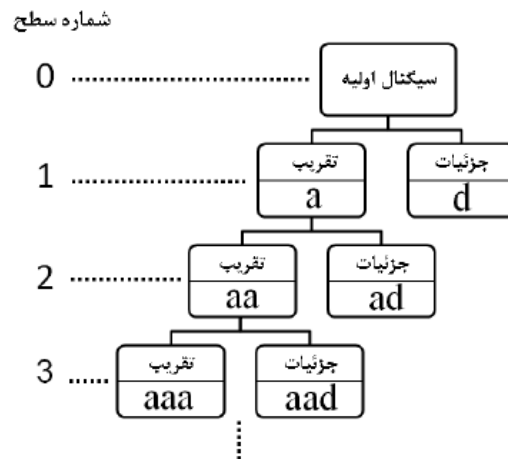
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 1 \quad (5-3)$$

انتقال‌ها و تغییر مقیاس‌های تابع مقیاس‌بندی نیز مشابه موجک مادر است. برای یک خانواده مشخص، تابع مقیاس‌بندی (۳-۶) تغییرات آرام‌تری نسبت به موجک مادر دارد. از این تابع می‌توان برای محاسبه تقریب $f(x)$ در مقیاس و مکان مشخص استفاده نمود:

$$S_j(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi_{j,k}(t) dt \quad (6-3)$$

این ضرایب به عنوان ضرایب تقریب موجک تعریف می‌شوند. از آنجا که توابع مقیاس بر موجک‌ها عمودند، لذا ضرایب تقریب تکمیل‌کننده ضرایب جزئیات بوده و هر تابع در هر مقیاسی قابل تجزیه به

دو بخش تقریب و جزئیات خواهد بود. اگر تجزیه در هر گام فقط بر روی بخش تقریب انجام شود، تبدیل موجک دسته اول حاصل خواهد شد که به اختصار تبدیل موجک نامیده می‌شود. اگر بخش جزئیات نیز در هر سطح تجزیه شود، موجک دسته دوم یا موجک پاکتی بدست خواهد آمد. شماتیک تجزیه تبدیل موجک تا سطح سوم در شکل ۳-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱ تجزیه سیگنال

۳-۱-۲ تبدیل موجک در ابعاد بیشتر

با استفاده از تعمیم روابط موجک در حالت یک‌بعدی و با استفاده از ضرب تانسوری، می‌توان روابط موجک در دو بعد یا بیشتر را به دست آورد. تابع مقیاس‌بندی و توابع موجک در راستاهای مختلف x و y و قطری از طریق روابط (۳-۷) به دست خواهد آمد که برای محاسبه ضرایب تقریب و جزئیات از آنها استفاده می‌شود (Mallat, 1999):

$$\begin{aligned}
 \varphi_{j,k1,k2}(x,y) &= \varphi_j^{k1}(x)\varphi_j^{k2}(y) \\
 \psi_{j,k1,k2}^{(1)}(x,y) &= \psi_j^{k1}(x)\varphi_j^{k2}(y) \\
 \psi_{j,k1,k2}^{(2)}(x,y) &= \varphi_j^{k1}(x)\psi_j^{k2}(y) \\
 \psi_{j,k1,k2}^{(3)}(x,y) &= \psi_j^{k1}(x)\psi_j^{k2}(y)
 \end{aligned} \tag{۳-۷}$$

همانطور که مشخص است تابع مقیاس‌بندی یا ضرایب تقریب هر تابع در دو بعد یا ابعاد بالاتر یکتا بوده که از طریق رابطه (۳-۸) به دست می‌آید. همچنین سه موجک متفاوت مادر برای دو بعد

منجر به ایجاد سه سری ضرایب جزئیات متناظر با سه جهت مختلف خواهد شد. ضریب جزئیات در هر راستا از رابطه (۸-۳) به دست خواهد آمد که d نماینده جهت محاسبه ضرایب است.

$$S_j(k1, k2) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \varphi_{j, k1, k2}(x, y) dx dy \quad (8-3)$$

$$D_j^{(d)}(k1, k2) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \psi_{j, k1, k2}^{(d)}(x, y) dx dy$$

در حالت دوبعدی تجزیه سیگنال بصورت زیر است: ابتدا ماتریس تبدیل در یکی از جهات به عنوان مثال x اعمال می‌شود و ضرایب تقریب و ضرایب جزئیات برای جهت x به دست می‌آید. سپس ماتریس تبدیل بر روی مقادیر تقریب و جزئیات حاصل از مرحله قبل اعمال شده و مقادیر تقریب نهایی و جزئیات در دو بعد به دست خواهد آمد.

۳-۲-۱-۳ افزایش مقیاس با تبدیل موجک

در تمامی روش‌های افزایش مقیاس همواره بخشی از اطلاعات به واسطه متوسط‌گیری حین تبدیل سلول‌های ریز به درشت از بین می‌رود؛ ولی با رویکردهای متفاوت می‌توان این متوسط‌گیری‌ها را به حداقل رساند و این دقیقاً ایده اصلی در کاربرد تبدیل موجک در افزایش مقیاس می‌باشد. در روش افزایش مقیاس با رویکرد تبدیل موجک، پس از تجزیه سیگنال تا سطح مورد نظر، بخش ضرایب تقریب آخرین سطح به عنوان سیگنال افزایش مقیاس معرفی می‌شود. در این حالت عملاً افزایش مقیاس تک تفکیکی رخ خواهد داد.

حد آستانه موجک، تعمیم یافته روش موجک معمول است که طی آن بر روی ضرایب به دست آمده از تجزیه سیگنال، یک حد آستانه اعمال می‌شود. در هر گام با آستانه‌گذاری بر روی بخش جزئیات و تقریب، سیگنال نهایی از ضرایب باقیمانده جزئیات و بخش تقریب بدست خواهد آمد. در این صورت سیگنالی جدید با تعداد برابر اما مقدارهای متفاوت ضرایب حاصل می‌شود و عملاً افزایش

مقیاس چندتفکیکی حاصل خواهد شد. حد آستانه به دو صورت سخت و نرم بر روی ضرایب جزئیات اعمال می‌شود. با در نظر گرفتن یک مقدار ضریب، تمامی ضرایب جزئیات کوچکتر از این مقدار صفر شده و ضرایب بزرگتر از آن به عنوان اطلاعات اضافی به تقریب اضافه می‌شوند (رسایی، ۱۳۸۴). تعیین حدود آستانه در افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک، یک پارامتر کلیدی است. برای افزایش مقیاس بر مبنای موجک، دو مقدار حد آستانه ϵ_D ، ϵ_S تعریف می‌شود. ϵ_S یک مقدار از ویژگی سلول‌ها است که به ضرایب تقریب موجک وابسته است و بر اساس بزرگترین ضریب تقریب در شبکه تنظیم می‌شود. ϵ_D نیز مقدار حد آستانه برای ضرایب جزئیات است و مشابه ϵ_S بر اساس بزرگترین مقدار ضریب جزئیات اندازه‌گیری و تعیین می‌شود. در فرایند افزایش مقیاس، ϵ_S با ضریب مقیاس هر سلول مقایسه می‌شود و اگر ضریب مقیاس سلول بزرگتر از حد آستانه باشد به این مفهوم است که ویژگی این سلول بزرگ و مهم است، بنابراین هیچ عملی روی آن انجام نمی‌شود و سلول بعدی بررسی می‌شود. اگر ضریب مقیاس سلول کوچکتر از ϵ_S باشد، ضرایب جزئیات این سلول به شرطی که کمتر از ϵ_D باشد، معادل صفر در نظر گرفته می‌شود و سلول با سلول مجاور خود ادغام می‌شود. بنابراین بسته به وسعت و ساختار توزیع فضایی ویژگی و مقادیر عددی حدود آستانه، تعدادی از سلول‌ها در مدل اولیه ریز، افزایش مقیاس خواهند داشت (Ebrahimi and Sahimi, 2002; Mehrabi and Sahimi, 1999). انتخاب حد آستانه یکی از پارامترهای کلیدی در افزایش مقیاس پارامترهای مخزنی سیگنال است.

برای افزایش مقیاس ویژگی‌های مخزن بر اساس تبدیل موجک از موجک هار استفاده شده است. دلیل استفاده از موجک هار، کارایی بیشتر در علوم زمین است. فرض کنید که مدل اولیه ریز زمین-شناسی یک ویژگی مخزن $k(x, y)$ در دسترس است و مقدار ویژگی به هر کدام از سلول‌های ریز آن اختصاص داده شده است. بنا به الگوریتم تبدیل موجک، افزایش مقیاس مدل اولیه در راستای x و y با یک عامل دو انجام خواهد شد. در واقع هدف تبدیل ۴ سلول ریز به یک سلول درشت در شبکه جدید است. در اولین گام از افزایش مقیاس تابع هدف $k(x, y)$ ، دو سری ضرایب S_1 و D_1 که به ترتیب

ضرایب تقریب و جزئیات هستند، به دست خواهد آمد. این ضرایب از طریق رابطه ۳-۸ محاسبه می-شوند. در نتیجه برای ویژگی مورد نظر رابطه (۳-۹) را می توان نوشت (رسایی، ۱۳۸۴):

$$k(x, y) = S_1 + D_1 \quad (۳-۹)$$

بر اساس الگوریتم افزایش مقیاس در تبدیل موجک، چنانچه ضرایب S_1 کوچکتر از حد آستانه تقریب باشد و همچنین ضرایب D_1 در ناحیه مفروض کوچکتر از حد آستانه جزئیات باشد، آنگاه می توان به این نتیجه رسید که سلول های ریز با یک فاکتور ۲، درشت سازی شده و یک سلول بزرگ ایجاد شود. در غیر اینصورت، درشت سازی در ناحیه مورد نظر امکان پذیر نبوده و بایستی مدل ریز در این ناحیه حفظ شود. در سطح بعد نیز این رویه تکرار می شود. در مرحله دوم تجزیه ویژگی مخزن به صورت رابطه (۳-۱۰) نوشته می شود.

$$k(x, y) = (S_2 + D_2) + D_1 \quad (۳-۱۰)$$

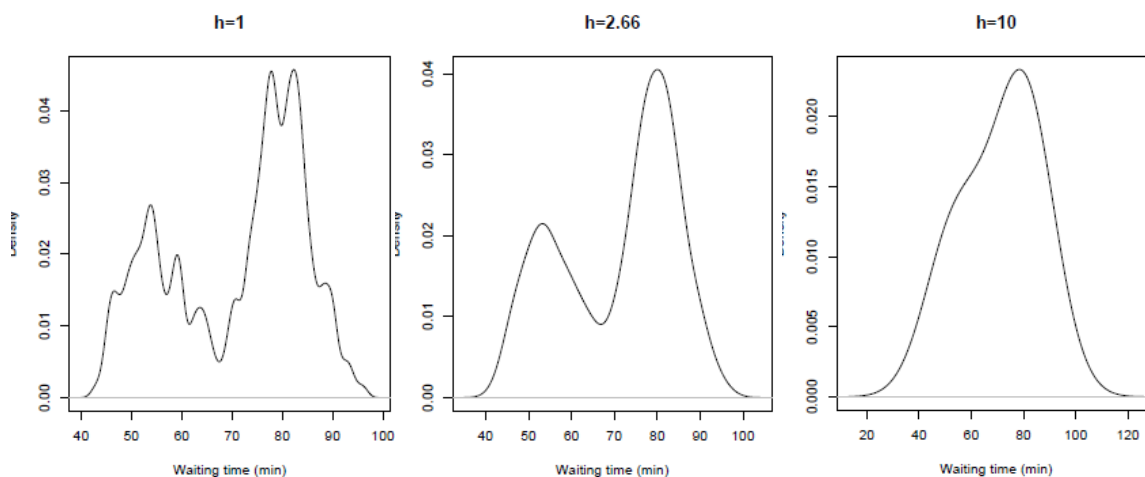
در مرحله دوم فقط ضریب تقریب تجزیه خواهد شد. مجدداً می توان ضرایب جزئیات و تقریب را مورد بررسی قرار داد. بدیهی است نواحی ای که در مرحله قبل بصورت ریز باقی مانده است، در این مرحله نیز ریز باقی خواهند ماند و نواحی ای درشت خواهند شد که در مرحله قبل درشت شده باشند. چالش اصلی در افزایش مقیاس به روش تبدیل موجک، اهمیت ضرایب جزئیات و نحوه تشخیص آنها است و اینکه کدام بخش باید حفظ شود. به طور کلی در فرایند افزایش مقیاس با تبدیل موجک سه نکته کلیدی باید در نظر گرفته شود: الف) سلول ها در صورتی درشت می شوند که اولاً ضرایب جزئیات و مقیاس آنها کمتر از مقادیر حد آستانه تعیین شده باشد، ب) اندازه سلول های مجاور پس از فرایند افزایش مقیاس نباید تفاوت زیادی با اندازه سلول های ریز داشته باشند. مطالعات نشان داده که قرارگرفتن سلول های کوچک با سلول هایی که تا ۵ مرحله درشت شده اند مجاز است، ج) با توجه به اینکه در نواحی نزدیک چاه، تغییرات پارامتر مخزنی شدید است، بنابراین لازم است که در این نواحی، برای حفظ اطلاعات مهم، سلول ها در حالت ریز باقی بمانند.

با توجه به نحوه تجزیه سیگنال با تبدیل موجک، سیگنال با یک فاکتور دو مطابق رابطه (۳-۹) تجزیه می‌شود و ضرایب را می‌توان بر اساس روابط (۳-۸) محاسبه نمود. نحوه محاسبه ضرایب در موجک هار به این ترتیب است که؛ ضریب تقریب سلول‌ها در هر ناحیه با استفاده از میانگین‌گیری مقادیر سلول‌ها و ضرایب جزئیات آنها نیز از اختلاف آنها در جهات مختلف محاسبه می‌شود. با تعیین ضرایب تقریب و ضرایب جزئیات در کل شبکه و با تعیین حدود آستانه آنها، می‌توان شرایط افزایش مقیاس را بررسی نمود. چنانچه ضریب تقریب نواحی کمتر از حد آستانه تقریب باشد و همزمان، ضرایب جزئیات آنها نیز کمتر از حد آستانه جزئیات باشد، سلول‌ها شرط افزایش مقیاس را خواهند داشت. این فرایند تا پوشش تمام داده‌ها ادامه دارد. در سطح بعد نیز عملیات تکرار خواهد شد. طبیعی است که در سطح دوم، سلول‌هایی که در سطح اول تجزیه ریز باقی مانده‌اند، نیاز به محاسبه ضرایب تقریب و جزئیات‌شان نیست و در سطوح بعدی نیز ریز باقی می‌مانند.

حد آستانه ضرایب در موجک به دو صورت سخت و نرم اعمال می‌شود. نوع حد آستانه بسته به هدف متغیر است؛ اگر هدف از آستانه‌گذاری کاهش نوفه است، حد آستانه نرم استفاده می‌شود ولی اگر هدف جداسازی و حفظ نمونه‌های دارای مقادیر بزرگ باشد، حد آستانه سخت ابزار بهتری برای رسیدن به این هدف خواهد بود. بطور کلی خطای مربع میانگین روش حد آستانه نرم کمتر از روش سخت می‌باشد. روش‌های زیادی در زمینه تعیین حد آستانه توسعه داده شده است که یکی از آنها، حد آستانه تعریف شده توسط دونوهو و جانستون است که تحت عنوان حد آستانه عمومی شناخته می‌شود و با رابطه $\gamma = \sigma \sqrt{2 \log(n)}$ محاسبه می‌شود (Donoho and Jhonstone,). در این رابطه σ ، انحراف معیار استاندارد ضرایب جزئیات است و n تعداد نمونه‌های آن می‌باشد (Xiao and Zhang 2011; Jain and Tiwari 2017; Liu et al. 2017).

۳-۲-۲ تئوری روش پنجره با پهنای متغیر

ایده اصلی روش پنجره با پهنای متغیر از پهنای باند گرفته شده است. برای برآورد تابع توزیع در نواحی با تغییرپذیری شدید، پهنای باند تا حد امکان کوچک در نظر گرفته می‌شود و برعکس در نواحی با تغییرپذیری هموار، پهنای باند به اندازه کافی، می‌تواند برآورد بهتری از توزیع داشته باشد. شکل ۳-۲ تاثیر تغییر پهنای باند در برآورد تابع توزیع را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در پهنای باندهای کوچک، توزیع بسیار نوسانی است و در پهنای باندهای بزرگ، تابع توزیع بسیار هموار شده است. عیناً از همین ایده در روش افزایش مقیاس می‌توان استفاده نمود. در نواحی‌ای از مخزن که تغییرپذیری ویژگی شدید باشد، با در نظر گرفتن پهنای باند کوچک، سلول‌ها تا حد امکان ریز باقی می‌مانند و عمل افزایش مقیاس کمتری انجام خواهد شد و در نواحی‌ای از مخزن که ویژگی رفتاری همگن داشته باشد، پهنای باند می‌تواند بزرگ در نظر گرفته شود و تعداد سلول‌هایی که افزایش مقیاس می‌یابند، بیشتر خواهد شد. پهنای باند اساس تعیین ابعاد پنجره میانگین‌گیری در روش پنجره با پهنای متغیر خواهد بود.



شکل ۳-۲ تاثیر پهنای باند در برآورد تابع توزیع، الف) پهنای باند ۱، ب) پهنای باند ۲/۶۶ و ج) پهنای باند ۱۰

در روش پنجره با پهنای متغیر، مبنای تعیین طول پنجره، پهنای باند است. در واقع پهنای باند کنترل‌کننده پنجره میانگین‌گیری است. بطور کلی پهنای باند به دو صورت ثابت و متغیر بکار برده

می‌شود. پهنای باند ثابت به این مفهوم است که طول پنجره میانگین‌گیری در تمام نقاط یکسان باشد. زمانیکه پهنای باند ثابت در نظر گرفته شود، پهنای پنجره نیز ثابت خواهد بود و در واقع افزایش مقیاس بصورت تک‌تفکیکی انجام می‌شود. این ایده اصلی روش‌های تحلیلی است. پهنای باند متغیر به مفهوم تغییر پهنای باند در نقاط مختلف است. وقتی پهنای باند متغیر باشد، پهنای پنجره نیز متغیر خواهد بود. با تغییر پهنای پنجره، تعداد سلول‌هایی که در نواحی مختلف افزایش مقیاس می‌یابند، متفاوت خواهد بود.

بنابراین در این تحقیق، از ایده تغییر رفتار تابع توزیع بر اساس تغییرات پهنای باند در فرایند افزایش مقیاس استفاده شده است. هر جا که تغییرپذیری مخزن شدید باشد، می‌توان با تعیین پهنای باند کوچک و یا پهنای پنجره کوچک، ساختار ریز مدل اولیه را حفظ نموده و کمترین میزان افزایش مقیاس در این نواحی را شاهد بود. برعکس در نواحی‌ای از مخزن که تغییرپذیری ویژگی مورد نظر آرام باشد، با در نظر گرفتن پهنای پنجره بزرگ، می‌توان تعداد سلول‌های بیشتری را با همدیگر ادغام نمود و طبیعی است که در این نواحی افزایش مقیاس بیشتری رخ خواهد داد. با این رویکرد به دو هدف اصلی در ساخت مدل شبیه‌ساز خواهیم رسید: الف) در نواحی با تغییرپذیری شدید، ساختارهای اصلی مدل تا حد امکان حفظ خواهد شد و ب) در نواحی با تغییرپذیری آرام، تعداد سلول‌های مدل اولیه تا حد امکان کاهش خواهد یافت.

۳-۲-۱ افزایش مقیاس با استفاده از پنجره با پهنای متغیر

در فرایند افزایش مقیاس با روش پنجره با پهنای متغیر، افزایش مقیاس یا میانگین‌گیری با طول پنجره‌های مختلف انجام می‌شود که طول پنجره نیز با پهنای باند کنترل خواهد شد. در این روش در واقع عملکرد افزایش مقیاس، پهنای باند است. پهنای باند می‌تواند تابعی از شدت تغییرپذیری داده‌ها باشد. در نواحی‌ای که تغییرپذیری آرام است، عملاً می‌توان داده‌های بیشتری را با همدیگر ادغام نمود

و گاهی چندده سلول را می‌توان به یک سلول درشت نمود. ولی در مقابل در نقاط با تغییرپذیری شدید ممکن است حالت ریز در کل ناحیه باقی بماند. همانطور که پیشتر اشاره شده از آنجایی که باید میزان افزایش مقیاس به تغییرپذیری سلول ارتباط داشته باشد، رهیافت پهنای باند ثابت کارایی چندانی نداشته و در عوض پهنای باند متغیر مورد نظر می‌باشد که در این تحقیق پهنای باند متغیر، نشان‌دهنده میزان تغییرپذیری محلی سیستم است. سیستم به مفهوم ویژگی مخزن است.

با توجه به اینکه برای تعیین تعداد سلول‌های مدل شبیه‌ساز باید یک تقسیم‌بندی مناسب بر اساس تغییرپذیری سلول‌ها انجام شود، این فرایند را می‌توان به رویکرد تعیین پهنای باند در برآورد تابع توزیع تشبیه نمود و از ایده تعیین پهنای باند در نواحی مختلف استفاده نمود. میزان افزایش مقیاس می‌تواند تابعی از تغییرپذیری داده‌ها باشد که این تغییرپذیری با پهنای پنجره قابل کنترل است و همچنین پهنای پنجره را می‌توان تابعی از پهنای باند در نظر گرفت. فرایند الگوریتم افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر در حالت‌های مختلف در ادامه بیان شده است. الگوریتم افزایش مقیاس در هر حالتی با زبان برنامه‌نویسی متلب توسط نگارنده تحقیق نوشته شده است.

• الگوریتم افزایش مقیاس یک ویژگی مخزن در یک بعد

در حالت اول، افزایش مقیاس یک بعدی یک ویژگی مخزن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. منظور از یک بعد، یک چاه مخزن است. پهنای باند تابعی از تغییرپذیری است که مستقیماً به مقادیر سلول‌ها مرتبط است. در این فرایند، به ازای حدود آستانه‌ها و یا پهنای باندهای مختلف، پهنای پنجره تغییر خواهد کرد و بر اساس این پهنای پنجره، مقدار خطای محاسباتی و تعداد سلول‌های افزایش مقیاس تعیین می‌شود. بنابراین با طول متغیر پهنای پنجره نتایج افزایش مقیاس تغییر می‌کند. علاوه بر این، حد آستانه یا پهنای باند بهینه نیز جهت افزایش مطلوبیت فرایند بررسی خواهد شد. بنابراین در این شرایط امکان این وجود دارد که با در نظر گرفتن خطای افزایش مقیاس مورد نظر، تعداد سلول نهایی

مدل افزایش مقیاس مشخص باشد. کافی است پهنای باند متناظر با این میزان خطا تعیین شود. الگوریتم افزایش مقیاس پارامتر مخزن در یک بعد و بر اساس پنجره با پهنای متغیر بصورت زیر تعریف می‌شود که اساس افزایش مقیاس تمامی حالت‌های مورد بررسی در این بخش خواهد بود. روند اجرای الگوریتم در زیر آورده شده است:

۱- تغییرات پهنای باند و همچنین گام افزایش آن برای داده‌ها بر اساس تغییرپذیری محاسبه می‌شود. پهنای باند طول پنجره است.

۲- به ازای پهنای باند مشخص، سلول یا داده اولیه به عنوان نقطه شروع الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.

۳- قدر مطلق اختلاف ویژگی سلول اول با سلول دوم محاسبه می‌شود، اگر اختلاف دو سلول کمتر از پهنای باند است، این دو سلول می‌توانند با هم ادغام شوند و سلول سوم با سلول دوم مقایسه می‌شود. چنانچه اختلاف این دو نیز کمتر از پهنای باند باشد، فرایند تکرار می‌شود تا زمانی که اختلاف دو سلول متوالی از پهنای باند تجاوز کند. تمامی سلول‌ها از نقطه شروع تا این مرحله با هم ادغام شده و پس از میانگین‌گیری به یک سلول بزرگ تبدیل خواهند شد.

۴- اگر اختلاف دو سلول بیشتر از پهنای باند باشد، بنابراین دو سلول شرایط افزایش مقیاس را ندارند. نقطه شروع الگوریتم به سلول بعدی منتقل شده و سلول اول ریز باقی می‌ماند و عملیات به مرحله ۲ باز می‌گردد.

۵- این فرایند تا پوشش کل داده‌ها ادامه می‌یابد.

۶- پس از اتمام داده‌ها، اختلاف مدل اصلی با مدل افزایش مقیاس محاسبه و به عنوان خطای افزایش مقیاس (SSE) معرفی می‌شود.

۷- پهنای باند به اندازه گام افزایش، اضافه شده و مراحل ۲ تا ۶ تکرار می‌شود.

۸- بنابراین به ازای هر پهنای باندی که معرف یک پنجره با پهنای متغیر است، یک مدل افزایش مقیاس محاسبه می‌شود.

در پایان فرایند، به تعداد پهنای باند بررسی شده، مدل افزایش مقیاس بدست خواهد آمد. از بین تمام این مدل‌ها تنها یک مدل بهینه خواهد بود. این مدل بر اساس پهنای باند بهینه تعیین می‌شود. جهت محاسبه SSE، به ازای هر پهنای باند دلخواه، فرض کنید داده‌های $x_1, x_2, \dots, x_n$ داده‌هایی باشند که در بازه پهنای باند قرار گرفته‌اند. چنانچه میانگین داده‌های بازه را معادل $\bar{x}$ در نظر بگیریم،

آنگاه می‌توان خطای این بازه را بصورت رابطه ۳-۱۷ به دست آورد. میزان خطای افزایش مقیاس نیز از جمع این خطا در کل داده‌ها به دست خواهد آمد. خطای افزایش مقیاس، مجموع خطاهای تمام باندها خواهد بود. N تعداد باندها یا سلول‌های با مقیاس بزرگ مدل افزایش مقیاس است.

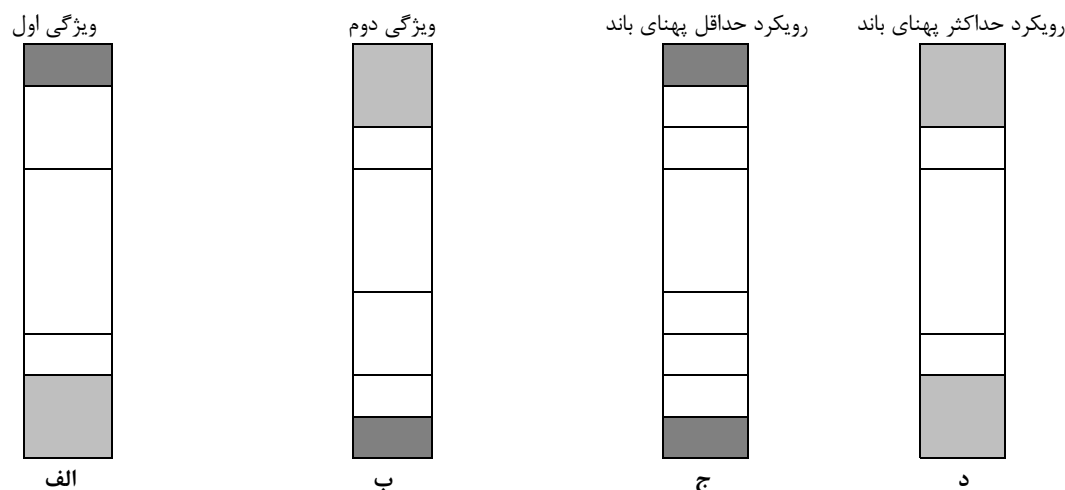
$$Error = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad , \quad SSE = \sum_{j=1}^N (Error_j) \quad (۱۷-۳)$$

• الگوریتم افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی^{۲۷} مخزن در یک بعد

در حالت دوم، افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی مخزن در یک بعد بررسی می‌شود. تمامی مطالعات انجام شده در زمینه افزایش مقیاس، سعی در تعیین الگوی افزایش مقیاس برای یک ویژگی خاص دارد. در شبیه‌سازی جریان سیال با توجه به اینکه پارامترهای زیادی از مخزن بکارگیری می‌شود، الگوی افزایش مقیاس برای تمام ویژگی‌ها، فارغ از توزیع فضایی آنها یکسان است. در واقع برای تمام ویژگی‌های مخزن، یک ساختار افزایش مقیاس یکسان در نظر گرفته می‌شود. این درحالیست که بنا به تغییرپذیری ویژگی‌ها، الگوی افزایش مقیاس آنها نیز متفاوت خواهد بود. بنابراین بنا به توزیع فضایی ویژگی‌ها، الگویی تهیه می‌شود که همزمان بتواند تغییرپذیری تمام ویژگی‌ها را مدیریت کند. برای شروع کار نیاز است که افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی انجام شود. به همین منظور بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر، ابتدا مدل افزایش مقیاس هر کدام از ویژگی‌ها بر اساس پهنای باند تعریف شده محاسبه می‌شود و سپس با رویکردهای مختلف، مدل افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی (SUTF) به دست می‌آید. در این شرایط، به ازای هر کدام از ویژگی‌ها می‌توان پهنای باند بهینه را به دست آورد و عملیات افزایش مقیاس را به طور جداگانه به ازای هر ویژگی انجام داد. هدف از افزایش مقیاس دو ویژگی به طور همزمان، افزایش مقیاس یکسان دو ویژگی است. در واقع باید به مدل شبیه‌سازی رسید که اولاً تعداد سلول‌های نهایی آن و ثانیاً جانمایی و موقعیت سلول‌های افزایش مقیاس

²⁷ Simultaneous Upscaling of Two Features

برای هر دو ویژگی دقیقاً منطبق باشد. برای این منظور از دو رویکرد حداقل پهنای باند^{۲۸} (ابعاد سلول) و حداکثر پهنای باند^{۲۹} استفاده خواهد شد. بنابراین پهنای پنجره تابعی از پهنای باند حداقل و حداکثر خواهد بود. شکل ۳-۳، افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی را بصورت شماتیک نمایش داده است.



شکل ۳-۳ مدل افزایش مقیاس (الف) ویژگی اول، (ب) ویژگی دوم، (ج) همزمان دو ویژگی با رویکرد حداقل پهنای باند و (د) همزمان دو ویژگی با رویکرد حداکثر پهنای باند

در رویکرد حداقل پهنای باند، پهنای پنجره بر اساس ابعاد سلول کوچکتر تعیین می‌شود. مدل‌های افزایش مقیاس محاسبه شده برای دو ویژگی مورد نظر مستقیماً مقایسه می‌شود و هر کدام از ویژگی‌ها که ابعاد سلول کوچکتری دارند، بعنوان پهنای پنجره در افزایش مقیاس همزمان در نظر گرفته می‌شوند. طبیعی است که تعداد سلول‌های مدل افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی بیشتر از تعداد آنها در حالت تک‌ویژگی خواهد بود چرا که در این فرایند برخی از سلول‌ها شکسته خواهند شد.

در رویکرد حداکثر پهنای باند، پهنای پنجره افزایش مقیاس بر اساس ابعاد سلول بزرگتر تعیین خواهد شد. طبیعی است که در رویکرد حداکثر پهنای باند، تعداد سلول مدلی نهایی SUTF همیشه کوچکتر یا مساوی تعداد سلول مدل تک‌ویژگی خواهد بود. با توجه به اینکه تعداد میانگین‌گیری در باندهای مختلف، در رویکرد حداقل پهنای باند کمتر از مدل‌های تک‌ویژگی است، انتظار می‌رود خطای

²⁸ Minimum bandwidth approach

²⁹ Maximum bandwidth approach

افزایش مقیاس مدل SUTF به مراتب کمتر از میزان خطای افزایش مقیاس مدل‌های تک‌ویژگی باشد. همچنین با توجه به اینکه تعداد میانگین‌گیری یا در واقع تعداد سلول‌هایی که در یک باند با همدیگر ادغام می‌شوند، در رویکرد حداکثر پهنای باند بیشتر از مدل تک‌ویژگی است، بنابراین خطای افزایش مقیاس مدل SUTF بیشتر از خطای افزایش مقیاس مدل‌های تک‌ویژگی خواهد بود.

بنابراین بر اساس پهنای باند به ازای هر کدام از رویکردها، یک مدل افزایش مقیاس یکسان برای دو ویژگی حاصل خواهد شد که این مدل، ساختاری یکسان برای داده‌های هر دو ویژگی ارائه می‌دهد. با توجه به اینکه مدل‌های افزایش مقیاس هر کدام از ویژگی‌ها بر اساس تغییرپذیری آنها محاسبه شده است، مدل افزایش مقیاس هم‌زمان آنها نیز صرفاً بر اساس توزیع فضایی ویژگی‌ها به دست می‌آید. با این رویکرد دو هدف اصلی در ساخت مدل شبیه‌ساز فراهم شده است، الف) ساختارهای مهم هر دو ویژگی در مدل SUTF حفظ شده است و ب) تعداد سلول‌های مدل افزایش مقیاس در نواحی با تغییرپذیری یکسان هر دو ویژگی کاهش خواهد داشت. در فصل چهارم بطور مفصل در مورد این حالت صحبت شده است.

• الگوریتم افزایش مقیاس یک ویژگی مخزن در دو بعد

در حالت سوم، فضای بررسی از یک بعد به دو بعد تغییر خواهد کرد. تاکنون افزایش مقیاس در یک بعد و در واقع در یک چاه انجام شده است. در حالت سوم و چهارم، فرایند افزایش مقیاس در یک سطح بررسی خواهد شد. چالش اصلی در دو بعد تعیین پهنای باند و پنجره با پهنای متغیر ویژگی مورد نظر در دو جهت x و y و همچنین الگوی افزایش مقیاس خواهد بود. در حالت دوبعدی پنجره به صورت چندضلعی و با پهنای متغیر در جهات x و y تعریف می‌شود. پهنای پنجره از طریق پهنای باند در دو جهت x و y قابل کنترل است. برای افزایش مقیاس ویژگی مخزن هیدروکربوری در دو بعد، دو

الگوریتم متفاوت پیشنهاد شده و نتایج بر اساس این دو الگوریتم به دست آمده که در فصل پنجم بطور مفصل به این بحث پرداخته شده است.

• الگوریتم افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی مخزن در دو بعد

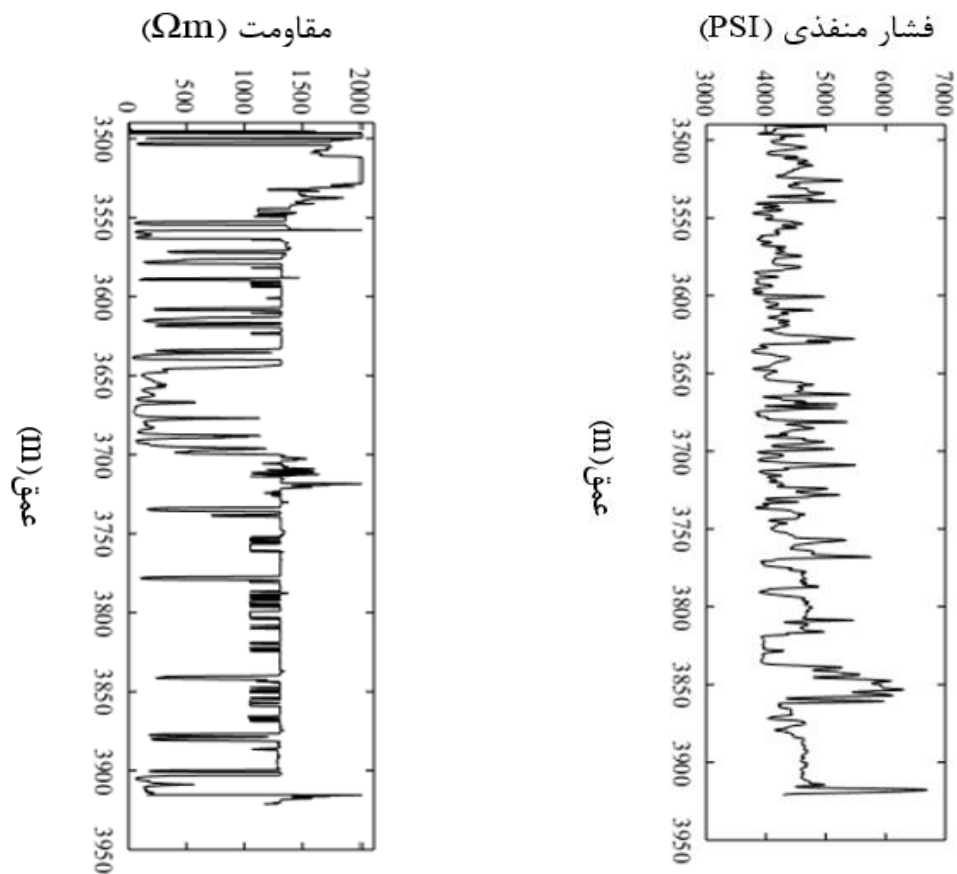
در حالت چهارم، هدف افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی مخزن در دو بعد خواهد بود. مشابه حالت دوم، با این تفاوت که در این مقطع، هدف تعیین یک سطح مشترک افزایش مقیاس برای دو ویژگی است. برای تعیین سطح افزایش مقیاس برای دو ویژگی به طور همزمان از دو روش انطباق بر اساس خطای افزایش مقیاس و همچنین رویکردهای حداکثر و حداقل پهنای باند استفاده می‌شود که این الگوریتم‌ها در فصل پنجم به طور مفصل تشریح شده است.

داده‌های مورد نظر در این تحقیق در چهار حالت افزایش مقیاس بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر آنالیز شده و سپس نتایج افزایش مقیاس در تمامی حالت‌ها با روش تبدیل موجک نیز انجام خواهد شد. در نهایت نیز نتایج حاصل از دو روش با همدیگر مقایسه می‌شوند.

۳-۳ داده‌های تحقیق

۳-۳-۱ داده‌های یک بعدی

به منظور افزایش مقیاس داده‌ها در یک بعد، از داده‌های چاه یکی از میدان‌های نفتی جنوب ایران استفاده شده است. دو نگار مقاومت الکتریکی و نگار فشار منفذی به عنوان دو ویژگی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر نگار شامل ۲۴۱۳ داده که با قدرت تفکیک حدود ۱۵ cm برداشت شده است. تغییرپذیری داده‌ها در شکل ۳-۴ نمایش داده است. استفاده از دو نگار مذکور دلیلی بر محدودیت در فرایند افزایش مقیاس نیست و هر دو ویژگی‌ای را می‌توان برای این منظور به کار برد. صرفاً جهت سادگی و درک راحت موضوع از این داده‌ها استفاده شده است.



الف

ب

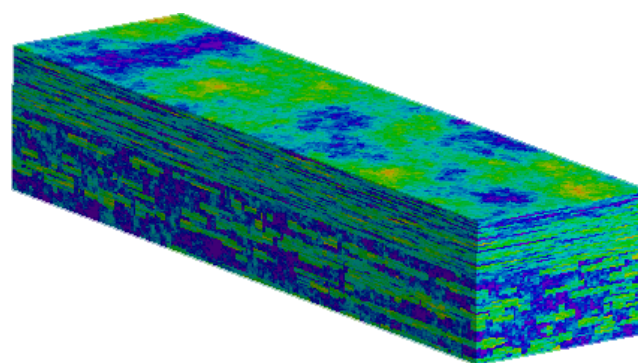
شکل ۳-۴ الف) نگار فشار منفذی و ب) نگار مقاومت

۳-۳-۲ داده‌های دوبعدی

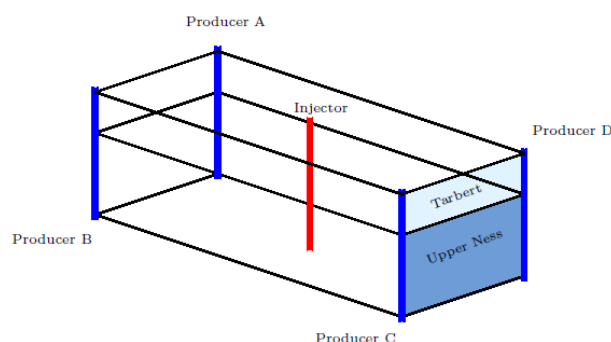
• مدل SPE-10

داده‌های انتخاب شده برای افزایش مقیاس دوبعدی، از مدل SPE-10 گرفته شده است. این مدل با هندسه ساده مکعبی و بدون ساختار شکستگی به منظور سادگی کار در ساخت سلول‌های افزایش مقیاس در نظر گرفته شده است. مدل زمین‌شناسی با مقیاس ریز به صورت منظم در مختصات کارتزین با گستردگی $170 \times 2200 \times 1200$ فوت در جهات x ، y و z تعریف شده است. ضخامت 170 فوتی این مدل، از 70 فوت بالایی که شامل 35 لایه فوقانی است و مربوط به سازند زمین‌شناسی

تاربت^{۳۰} بوده و ۱۰۰ فوت پایینی مدل که شامل ۵۰ لایه زیرین است و نشانگر سازند نس بالایی^{۳۱} می‌باشد، تشکیل شده است. ابعاد هر سلول در حالت ریز زمین‌شناسی $2 \times 10 \times 20$ فوت است. بنابراین با این توزیع سلولی، تعداد کل سلول‌های مدل زمین‌شناسی اولیه مدل SPE-10، به صورت $85 \times 220 \times 60$ است که مجموعاً ۱۱۲۲۰۰۰ سلول را شامل خواهد شد. توزیع ویژگی تخلخل مدل مذکور در شکل ۳-۵ الف، نمایش داده شده است که در این شکل، تخلخل در محدوده و دامنه ۰ تا ۵۰ درصد تغییر می‌کند. مدل زمین‌شناسی اولیه SPE-10 دارای مسیرهایی به شکل کانال‌های مختلفی است که در این نواحی نسبت تراوایی عمودی به افقی برابر $3/0$ است و در سایر نواحی تا $1/0000$ کاهش نشان می‌دهد. شکل ۳-۵ ب، موقعیت چاه‌های حفر شده در مدل را نمایش می‌دهد (Christie, 1996). تمامی چاه‌های حفر شده در این مدل به صورت قائم هستند و کل سازندها را در برگرفته‌اند. موقعیت آنها در جدول ۳-۱ نمایش داده شده است.



الف



ب

شکل ۳-۵ الف) توزیع تخلخل در مدل SPE-10 و ب) موقعیت چاه‌ها (Christie, 1996)

³⁰ Tarbet

³¹ Upper Ness

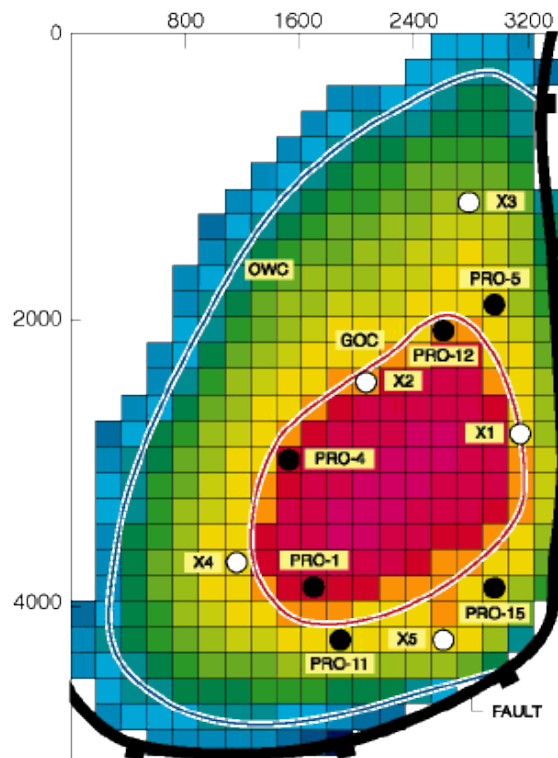
جدول ۱-۳ موقعیت چاه‌های حفر شده در مدل SPE-10 (Christie, 1996)

چاه	X	Y
چاه تزریق (Injector)	۶۰۰	۱۱۰۰
چاه تولید C	۰	۰
چاه تولید D	۱۲۰۰	۰
چاه تولید A	۱۲۰۰	۲۲۰۰
چاه تولید B	۰	۲۲۰۰

از ۵ چاه حفر شده در این مدل، چاه مرکزی تزریقی است و ۴ چاه گوشه مدل، چاه تولیدی هستند. چاه تزریقی مرکزی با شدت ۵۰۰۰ bbl/day و تا حداکثر فشار ته‌چاهی معادل ۱۰۰۰۰ psi، عملیات تزریق آب انجام می‌شود. چهار چاه تولیدی نیز با فشار ته‌چاهی ثابت ۴۰۰۰ psi عملیات تولید را انجام می‌دهند. برای افزایش مقیاس در دوبعد، یک لایه اطلاعاتی از مدل ریزمقیاس در نظر گرفته شده است. با توجه به توزیع داده‌ها، لایه به صورت قائم در صفحه xy با ۱۳۲۰۰ داده معرفی می‌شود.

• مدل PUNQ-S3

مدل PUNQ-S3 از یک مطالعه مهندسی مخزن بر روی داده‌های واقعی گرفته شده است. این مدل شامل ۱۹×۲۸×۵ سلول ریز هست. ساختار بالایی مدل از شرق و جنوب به یک گسل محدود و از سمت غرب و شمال به یک سفره آب زیرزمینی وصل می‌شود. مدل اولیه شامل ۶ چاه تولید است. به علت وجود سفره قوی، نیاز به چاه تزریق نبوده است. مدل داده‌های تراوایی و تخلخل بر اساس مدلسازی زمین‌آماري تولید شده است. تراوایی و تخلخل مدل، همبستگی خوبی نشان می‌دهد (Imperial College). توزیع تراوایی مدل PUNQ-S3 در شکل ۳-۶ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۶ توزیع تراوایی مدل PUNQ-S3 (Imperial College)

۳-۴ جمع بندی

در این فصل الگوریتم افزایش مقیاس بر اساس دو روش پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک معرفی شده است. در فرایند افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر، با تعیین پهنای باند و سپس بهینه کردن آن، سلول‌ها بر اساس تغییرپذیری ویژگی درشت خواهند شد. دو سلول مادامی که اختلاف آنها کمتر از پهنای باند باشد، قابلیت ادغام داشته و می‌توانند به سلول با مقیاس بزرگ تبدیل شوند. در این روش امکان این وجود دارد که با تعیین خطای قابل قبول و همچنین بر اساس تعداد سلول‌های درشت مقیاس، فرایند افزایش مقیاس انجام شود. کافی است پهنای باند متناظر با این مقادیر را تعیین نمود و سپس مدل افزایش مقیاس را بر اساس این پهنای باند محاسبه کرد. در روش تبدیل موجک، در هر مرحله از تجزیه می‌توان با تعیین حدود آستانه برای ضرایب تقریب و جزئیات مدل افزایش مقیاس را محاسبه نمود. الگوریتم افزایش مقیاس برای داده‌های مورد بررسی در ۴ فاز مختلف پیاده‌سازی می‌شود. در حالت اول، داده‌های یک‌بعدی با یک ویژگی مشخص بررسی شده و

مدل افزایش مقیاس برای آن محاسبه می‌شود. در فاز بعدی، در یک بعد و دو ویژگی مخزن بصورت هم‌زمان با رویکردهای مختلف افزایش مقیاس می‌یابند. سپس فضای بررسی از یک بعد به دو بعد افزایش یافته و حالت‌های اول و دوم برای دوبعد نیز توسعه داده شده است. در فصل چهارم این تحقیق، نتایج افزایش مقیاس با دو روش پنچره با پهنای متغیر و تبدیل موجک برای داده‌ها در یک بعد و سپس نتایج دوبعدی در فصل پنجم تحقیق آورده شده است.

فصل چهارم:

افزایش مقیاس یک بعدی داده‌ها یک و دو ویژگی مخزن

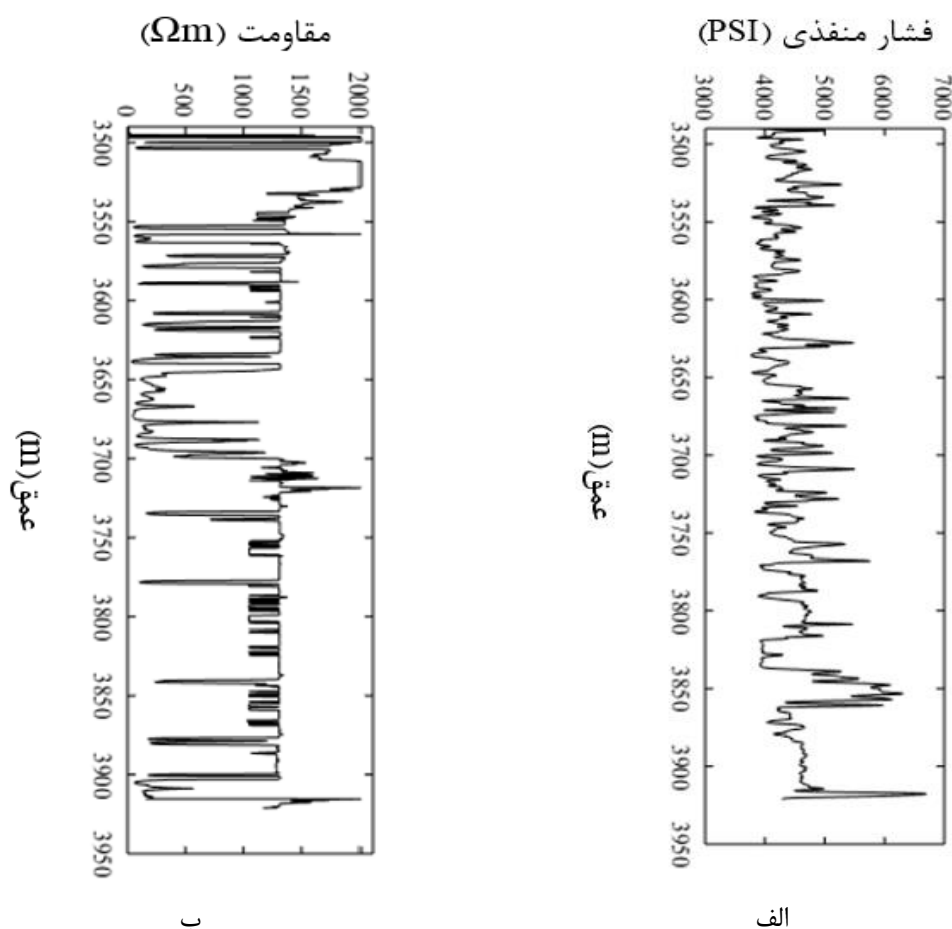
۴-۱ مقدمه

در فصل سوم، روشی نوین در زمینه افزایش مقیاس ویژگی‌های مخزن هیدروکربوری معرفی شد و الگوریتم افزایش مقیاس بر مبنای پنجره با پهنای متغیر تشریح گردید. در این فصل، افزایش مقیاس یک‌بعدی داده‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا نتایج افزایش مقیاس با یک ویژگی مخزن با استفاده از روش‌های پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک بررسی شده و سپس نتایج افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی توسعه داده خواهد شد. در هر مرحله، نتایج حاصل از دو روش با همدیگر مقایسه می‌شوند.

در تئوری موجک، سیگنال به صورت متوالی به بخش‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین تفکیک می‌شود. در این روش پس از تجزیه سیگنال تا سطح دلخواه مسئله، بخش ضرایب تقریب آخرین سطح، به عنوان افزایش مقیاس یافته سیگنال اولیه معرفی می‌شود. حالت بهبودیافته این روش، حد آستانه موجک است که بر روی ضرایب به دست آمده از تبدیل موجک در زیرباندهای فرکانس بالا و فرکانس پایین، حد آستانه‌ای اعمال می‌شود. در هر گام بعد از آستانه‌گذاری بر روی بخش جزئیات و تقریب، سیگنال افزایش مقیاس با کمک ضرایب باقیمانده و بخش تقریب همان سطح به دست خواهد آمد. در این صورت سیگنالی جدید با تعداد برابر نمونه اما با مقادیر ضرایب متفاوت ایجاد می‌شود. در افزایش مقیاس با استفاده از پنجره با پهنای متغیر، پهنای باندی تعریف می‌شود که در واقع کنترل‌کننده پنجره با پهنای متغیر بوده که تابعی از تغییرپذیری ویژگی مورد نظر است. این پنجره با پهنای متغیر بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. بنابراین در روش پنجره با پهنای متغیر، افزایش مقیاس ویژگی مخزن صرفاً بر اساس تغییرپذیری سلول‌ها انجام خواهد شد.

۲-۴ داده‌های یک بعدی

در این بخش از داده‌های نگار مقاومت الکتریکی و نگار فشار منفذی یک چاه، به عنوان دو ویژگی مخزن جهت افزایش مقیاس استفاده شده است؛ هرچند که این امر عامل محدودکننده نبوده و هر پارامتر دیگری از مخزن را می‌توان برای این منظور استفاده نمود. چاه انتخاب شده مربوط به یکی از میادین نفتی جنوب ایران است. در طول چاه ۲۴۱۳ نمونه با قدرت تفکیک حدود ۱۵ cm برداشت شده که عمق قسمت مورد بررسی چاه ۳۶۲ متر است. در شکل ۱-۴ دو نگار فشار منفذی و مقاومت نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱-۴ (الف) نگار فشار منفذی و (ب) نگار مقاومت

۴-۳ افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر

۴-۳-۱ افزایش مقیاس تک‌ویژگی

در افزایش مقیاس داده‌ها بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر، همان‌طور که در قسمت روش تحقیق بیان شد، به ازای هر پهنای باند مشخص، مدل اولیه ریزمقیاس طی فرایندی به مدلی با مقیاس بزرگ تبدیل خواهد شد. هر مدل درشت شده، یک تعداد سلول یا باند افزایش مقیاس خواهد داشت که اختلاف آن نسبت به مدل اولیه ریز با محاسبه SSE تعیین شده و به عنوان خطای افزایش مقیاس هر مدل شناخته می‌شود. شکل ۴-۲ نحوه انجام الگوریتم افزایش مقیاس یک ویژگی در یک بعد را به صورت عددی و برای درک آسان‌تر نمایش می‌دهد. تاثیر پهنای باند در مدل نهایی مشخص است. مدل اولیه با ۱۰ سلول ریز و مدل‌های افزایش مقیاس بر اساس پهنای باند مختلف محاسبه شده‌اند. پهنای باند مختلف، پنجره با پهنای مختلف ایجاد می‌کند. به عنوان مثال در پهنای باند 0.2 ، اختلاف دو داده سلول اول و دوم 0.6 است. بنابراین این دو سلول قابلیت بزرگ شدن را نداشته و سلول اول باید به صورت ریز باقی بماند. اختلاف بین سلول دوم (0.9) و سلول سوم (1.2) بیشتر از پهنای باند است، بنابراین این دو سلول نیز ادغام نخواهند شد. سپس مقایسه بین سلول سوم و چهارم انجام می‌شود. اختلاف بین سلول سوم (1.2) و سلول چهارم (1.1) کوچکتر یا مساوی پهنای باند است، بنابراین در این صورت عملیات متوقف شده و فقط سلول‌های سوم و چهارم ادغام خواهند شد. سپس سلول بعدی به عنوان نقطه شروع الگوریتم در نظر گرفته شده و این فرایند تا پایان تکرار می‌شود. مدل افزایش مقیاس نهایی با پهنای باند 0.2 ، ۸ سلول درشت خواهد داشت که در شکل ۴-۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که از روی نتایج مشخص است، با افزایش پهنای باند، طول پنجره میانگین‌گیری بزرگتر خواهد شد و داده‌های بیشتری در هر باند، افزایش مقیاس می‌یابند، بطوریکه با پهنای باند صفر، هیچ‌گونه افزایش مقیاس انجام نخواهد شد ولی با پهنای باند حداکثر (اختلاف بین حداقل و حداکثر تغییرپذیری ویژگی)، تمام داده‌ها به یک سلول بزرگ افزایش مقیاس می‌یابند.

۰/۳	۰/۹	۱/۲	۱/۱	۱/۵	۲/۹	۲/۶	۳	۳/۱	۲
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---	-----	---

مدل اولیه ریزمقیاس

۰/۳	۱/۲	۲/۹	۲
-----	-----	-----	---

مدل افزایش مقیاس یافته با پهنای باند
۰/۵

۰/۳	۰/۹	۱/۲	۱/۵	۲/۹	۲/۶	۳/۱	۲
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

مدل افزایش مقیاس یافته با پهنای باند
۰/۲

۰/۹	۱/۵	۲/۷
-----	-----	-----

مدل افزایش مقیاس یافته با پهنای باند ۱

شکل ۴-۲ نحوه عملکرد الگوریتم افزایش مقیاس بر مبنای پهنای باند

بنا به الگوریتم افزایش مقیاس، ابتدا لازم است تغییرات و همچنین میزان گام افزایش پهنای باند برای هر کدام از ویژگی‌های فشار منفذی و مقاومت چاه تعیین شود. این مقادیر بر اساس داده‌ها و توزیع ویژگی مورد نظر تعیین می‌شود. بازه تغییرات پهنای باند می‌تواند بر اساس اختلاف بین حداکثر و حداقل داده‌ها تعیین شود. طبیعی است که از یک پهنای باندی به بعد، افزایش مقیاس قابل توجهی در داده‌ها انجام نمی‌شود. گام تغییر پهنای باند را نیز می‌توان از اختلاف دو سلول متوالی بعد از صعودی کردن داده‌ها محاسبه نمود. جدول ۴-۱ این مقادیر را برای ویژگی‌های فشار منفذی و مقاومت الکتریکی نمایش می‌دهد. در رابطه با ویژگی اول، تغییرات پهنای باند از صفر تا حداکثر ۱۴۰۰ خواهد بود. گام تغییر پهنای باند نیز ۲/۵ انتخاب شده است.

جدول ۴-۱ تعیین حدود پهنای باند برای ویژگی‌های مخزن

ویژگی	حداقل و حداکثر تغییرات پهنای باند	گام افزایش پهنای باند
ویژگی اول (فشار منفذی)	۰ - ۱۰۰۰	۲/۵
ویژگی دوم (مقاومت)	۰ - ۴۰۰	۱/۵

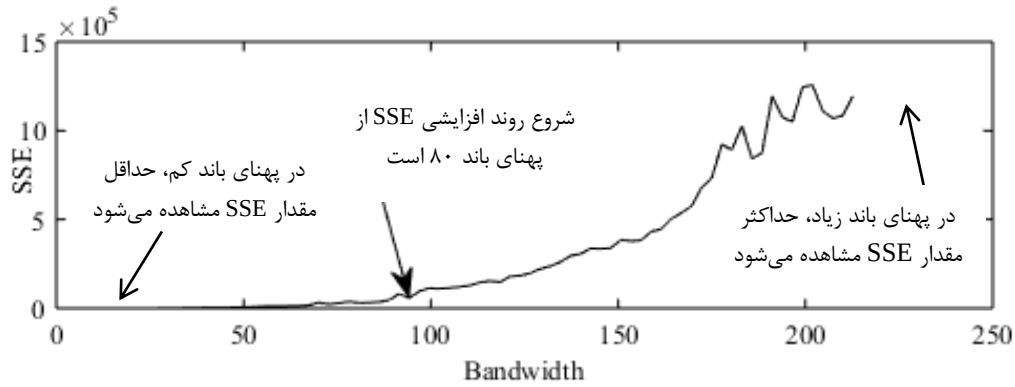
به ازای هر مقدار پهنای باند، مدل بزرگ مقیاس منحصر به پهنای باند به دست خواهد آمد. به عنوان مثال برای ویژگی اول با توجه به دامنه تغییرات پهنای باند، ۴۰۰ مدل افزایش مقیاس بدست خواهد آمد. انتخاب مدل بهینه، چالشی در تعیین مدل افزایش مقیاس ویژگی مورد نظر است. تعیین مدل

بهینه بر اساس تعیین پهنای باند و به نوعی تعیین پنجره با پهنای متغیر بهینه خواهد بود. بنابراین برای فرایند افزایش مقیاس بر اساس پهنای باند، تعیین حد آستانه یا پهنای باند بهینه امری ضروری است. پهنای باند بهینه بر اساس رویکردهای مختلف مانند تغییرات SSE در مقابل پهنای باند، دیفرانسیل SSE در مقابل پهنای باند و تقاطع دو نمودار SSE و تعداد سلول بر اساس پهنای باند، بررسی شده است. شکل ۳-۴ نحوه تعیین حد آستانه یا پهنای باند بهینه، برای ویژگی فشار منفذی بر اساس دو رویکرد اول را نمایش می‌دهد. ایده‌ی دیگری که می‌تواند در تعیین پهنای باند بهینه مناسب باشد و همچنین به عنوان یک پارامتر کنترل‌کننده زمان محاسبات نیز مدنظر قرار گیرد، تعداد باندها یا سلول‌های افزایش مقیاس است. این تعداد می‌تواند بصورت درصدی از تعداد سلول‌های ریز مدل اولیه بیان شود. به عنوان مثال فرض کنید، هدف از افزایش مقیاس، ساخت یک مدل شبیه‌ساز با n سلول بزرگ است. با توجه به قابلیت روش پنجره با پهنای متغیر، پهنای باند متناظر با این تعداد سلول بر اساس نتایج افزایش مقیاس، بعنوان پهنای باند بهینه معرفی خواهد شد.

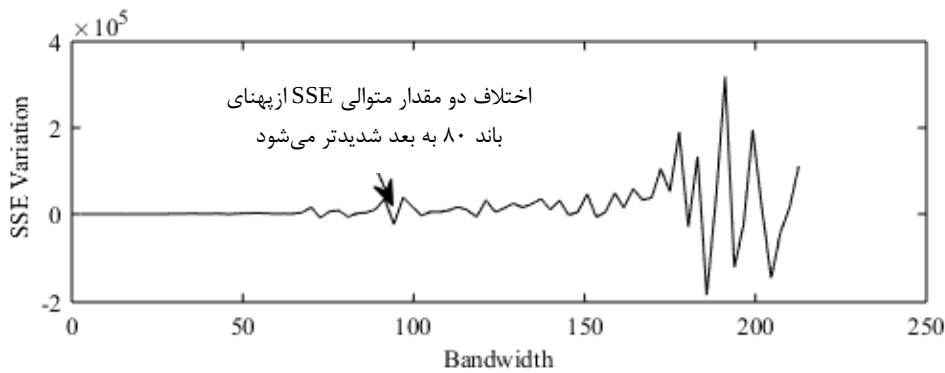
در رویکرد تغییرات SSE در مقابل پهنای باند، در پهنای باندهای کوچک، مقدار خطای افزایش مقیاس مدل شبیه‌ساز خیلی کمتر از خطای افزایش مقیاس حاصل از پهنای باندهای بزرگ است. در رویکرد دیفرانسیل SSE در مقابل پهنای باند، با محاسبه اختلاف مقادیر SSE دو مدل متوالی، پهنای باندی که اختلاف‌ها در آن تشدید می‌شود، می‌تواند به عنوان پهنای باند بهینه منظور گردد.

پهنای باند بهینه برای ویژگی اول و بر اساس تغییرات SSE در مقابل پهنای باند، معادل با ۸۰ بدست آمده است. بدیهی است که هر چه پهنای باند بزرگتر در نظر گرفته شود، تغییرپذیری‌ها هموارتر شده و تعداد سلول‌های بیشتری با همدیگر ادغام خواهند شد، که این امر منجر به افزایش SSE و کاهش N (تعداد سلول) می‌شود. در مدل افزایش مقیاس بهینه، مدل ریز با ۲۴۱۳ سلول اولیه به یک مدل درشت با تعداد ۶۸۲ سلول تبدیل شده است. همچنین در این حالت میزان خطای

افزایش مقیاس برابر با ۱۷۶ واحد است. مشخصاً با افزایش پهنای باند، اطلاعات اصلی مدل ریز از بین می‌رود، هرچند زمان محاسبات کاهش خواهد داشت.



الف

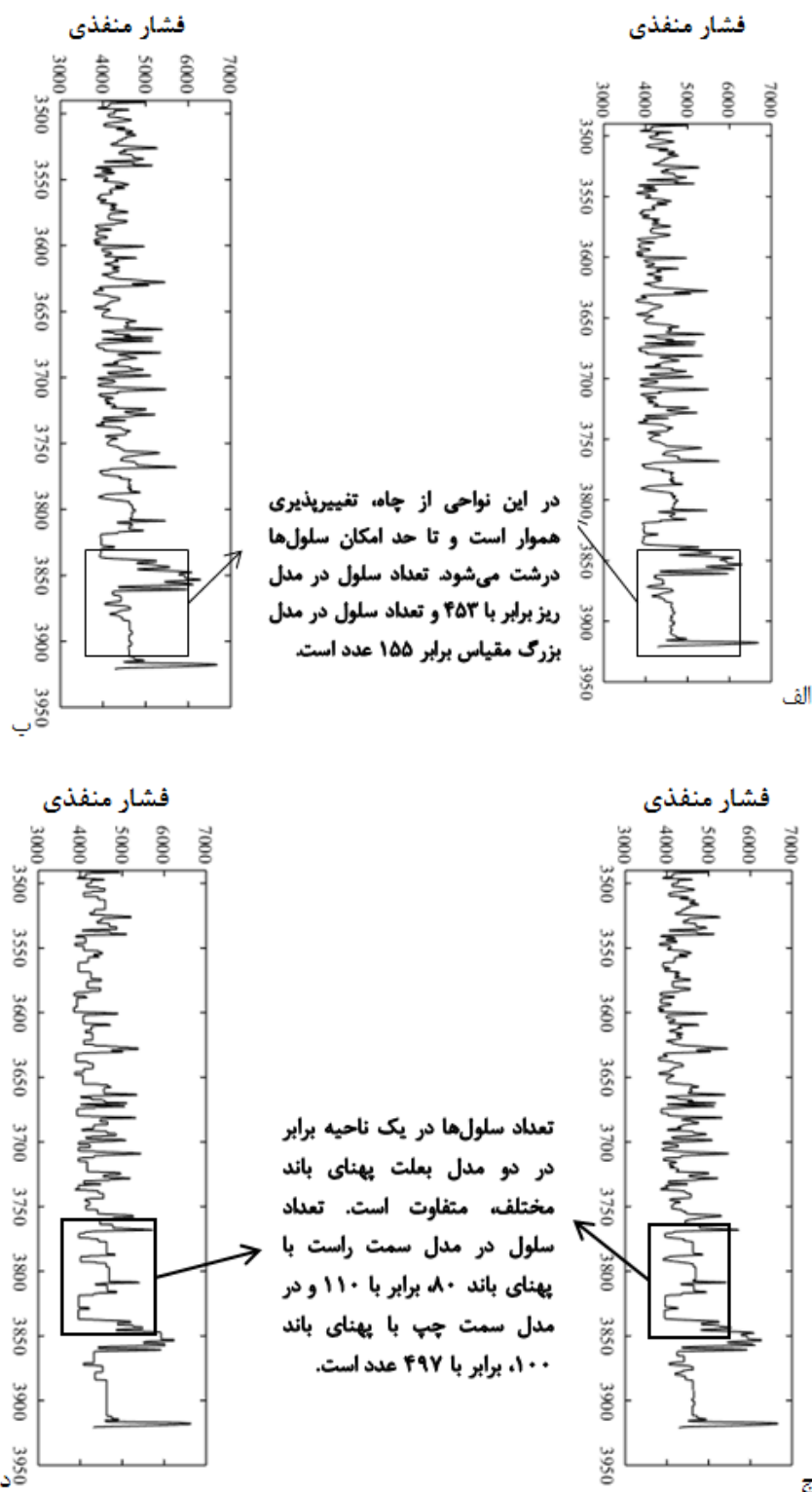


ب

شکل ۴-۳ تعیین پهنای باند بهینه بر اساس، الف) تغییرات SSE در مقابل پهنای باند، و ب) دیفرانسیل SSE در مقابل پهنای باند

پهنای باند کوچکتر از پهنای باند بهینه		پهنای باند بزرگتر از پهنای باند بهینه	
تعداد سلولهای	۵۰	تعداد سلولهای	۱۰۰
مدل بزرگ مقیاس	۹۴۰	مدل بزرگ مقیاس	۵۵۴
خطای افزایش مقیاس	۸۶	خطای افزایش مقیاس	۳۳۱

شکل ۴-۴ پارامترهای افزایش مقیاس به ازای پهنای باند کوچکتر و بزرگتر از پهنای باند بهینه

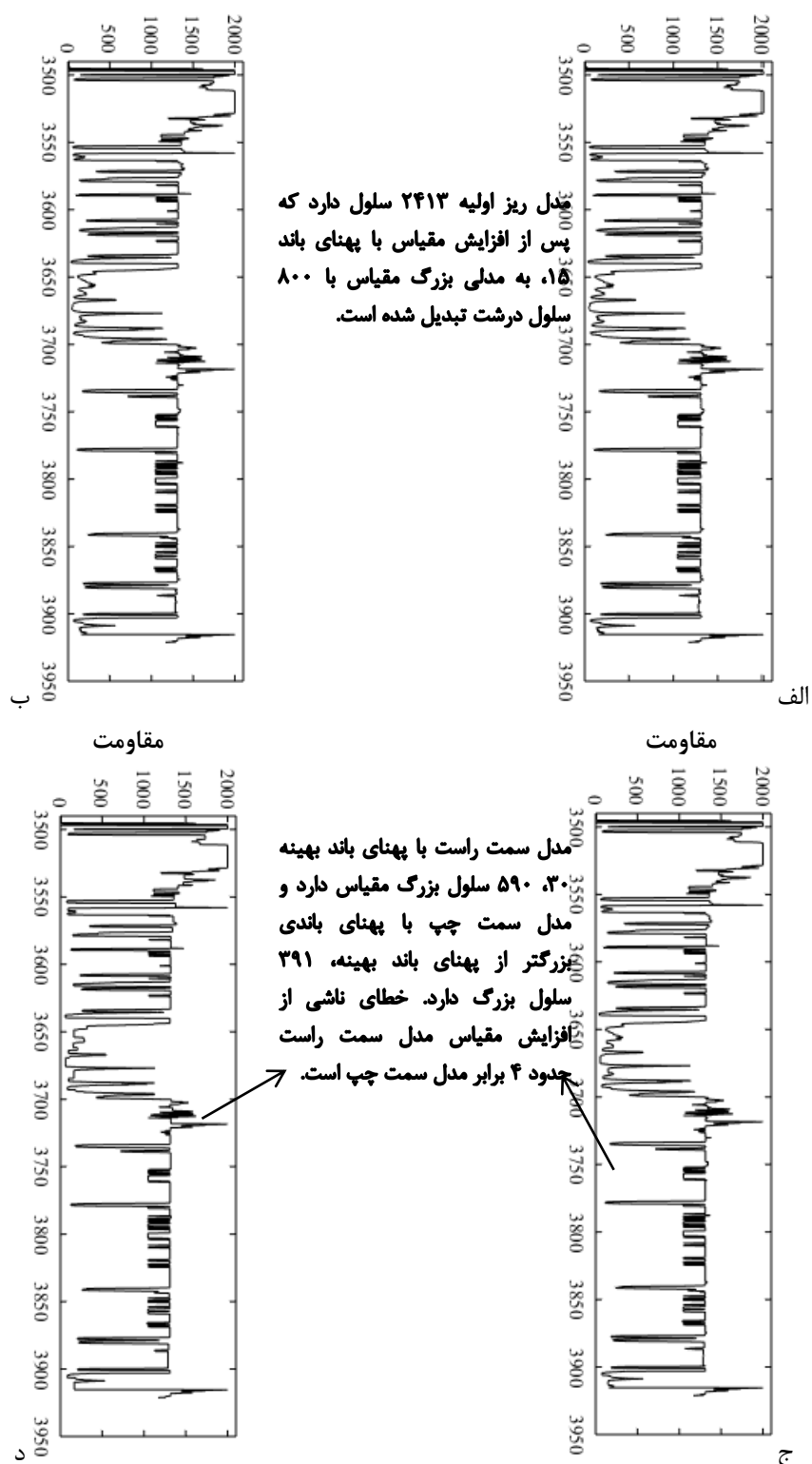


شکل ۴-۵ (الف) مدل اولیه نگار فشار منفذی، (ب) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه ۵۰، (ج) مدل افزایش مقیاس یافته با حد آستانه بهینه ۸۰ و (د) مدل افزایش مقیاس یافته با حد آستانه ۱۰۰

مشابه فرایندی که برای فشار منفذی مخزن به عنوان ویژگی اول بیان شد، افزایش مقیاس برای مقاومت الکتریکی بعنوان ویژگی دوم نیز قابل پیاده‌سازی است. نتایج افزایش مقیاس در شکل ۴-۶ نمایش داده شده است. پهنای باند بهینه برای ویژگی دوم برابر با ۳۰ به دست آمده است و در دو حالت بیشتر و کمتر از این مقدار نیز، نتایج افزایش مقیاس محاسبه شده است. در حالت بهینه تعداد سلول خطای مدل افزایش مقیاس به ترتیب ۵۹۰ عدد و ۴۸ واحد است. قابل ذکر است که افزایش مقیاس با پهنای باندی کمتر از پهنای باند بهینه، قطعاً نتایج بهتری به همراه خواهد داشت، ولی به عنوان یک گام رو به جلو در فرایند افزایش مقیاس با روش پنجره با پهنای متغیر، زمان محاسبات نیز در نظر گرفته شده است. به طور خلاصه، با توجه به تغییرپذیری داده‌های هر ویژگی و تعیین پهنای باند بهینه، برای هر کدام از ویژگی‌های مورد بررسی، مدل افزایش مقیاس بهینه محاسبه شده و پارامترهای افزایش مقیاس برای هر دو ویژگی در جدول ۴-۲ نمایش داده شده است.

جدول ۴-۲ پارامترهای افزایش مقیاس بر مبنای پنجره با پهنای متغیر

ویژگی						ویژگی اول (فشار منفذی)		ویژگی دوم (مقاومت)	
پهنای باند						۱۰۰	۸۰	۵۰	۳۰
خطای افزایش مقیاس (SSE)						۳۳۱	۱۷۶	۸۶	۴۸
تعداد سلول مدل افزایش مقیاس یافته (N)						۵۵۴	۶۸۲	۹۴۰	۵۹۰
مقاومت						مقاومت			



شکل ۴-۶ الف) مدل اولیه نگار مقاومت، ب) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه ۱۵، ج) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه بهینه ۳۰ و د) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه ۸۰

۴-۳-۲- افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی (SUTF) بر اساس پنجره با پهنای

متغیر

اصولاً افزایش مقیاس ویژگی‌های مخزن، زمانی اعتبار و قطعیت بیشتری پیدا می‌کند که به صورت هم‌زمان پیاده‌سازی شود. هدف از افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی این است که، بتوان با در نظر گرفتن تغییرات هر دو ویژگی بطور هم‌زمان، مدل شبیه‌سازی با ساختار یکسان برای هر دو ویژگی ارائه داد. در واقع هدف از این کار، تبدیل دو مدل ریز فشار منفذی و مقاومت به یک مدل درشت با دو کمیت فشار منفذی و مقاومت خواهد بود. برای افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی مخزن بر اساس پنجره با پهنای متغیر، ابتدا لازم است که افزایش مقیاس داده‌ها در فضای تک‌ویژگی به صورت جداگانه انجام و پهنای باند بهینه هر ویژگی تعیین شود. سپس به منظور تعیین مدل SUTF از دو رویکرد متفاوت استفاده شده است؛ رویکرد حداقل پهنای باند و حداکثر پهنای باند.

۰/۳	۰/۹	۱/۲	۱/۱	۱/۵	۲/۹	۲/۶	۳	۱/۱	۲
		۱	۱					۳	

مدل اولیه ریزمقیاس ویژگی اول

۶/۵	۹	۸/۵	۸/۹	۳	۵	۵/۲	۶	۷	۱۳
-----	---	-----	-----	---	---	-----	---	---	----

مدل اولیه ریزمقیاس ویژگی دوم

۰/۳	۰/۹	۱/۱۵	۱/۵	۲/۹	۲/۶	۳/۰۵	۲
-----	-----	------	-----	-----	-----	------	---

مدل افزایش مقیاس ویژگی اول با پهنای باند ۰/۲

۶/۵	۸/۸	۴	۶/۰۶	۱۳
-----	-----	---	------	----

مدل افزایش مقیاس ویژگی دوم با پهنای باند ۲

۰/۳	۰/۹	۱/۱۵	۱/۵	۲/۹	۲/۶	۳/۰۵	۲/۶
-----	-----	------	-----	-----	-----	------	-----

مدل SUTF ویژگی اول با حداقل پهنای باند

۶/۵	۹	۸/۷	۳	۵	۵/۲	۶/۵	۱۳
-----	---	-----	---	---	-----	-----	----

مدل SUTF ویژگی دوم با حداقل پهنای باند

۰/۳	۱/۰۶	۲	۲/۹	۲/۶
-----	------	---	-----	-----

مدل SUTF ویژگی اول با حداکثر پهنای باند

۶/۵	۸/۸	۴	۶/۰۶	۱۳
-----	-----	---	------	----

مدل SUTF ویژگی اول با حداکثر پهنای باند

شکل ۴-۷ نحوه ساخت مدل SUTF در یک بعد

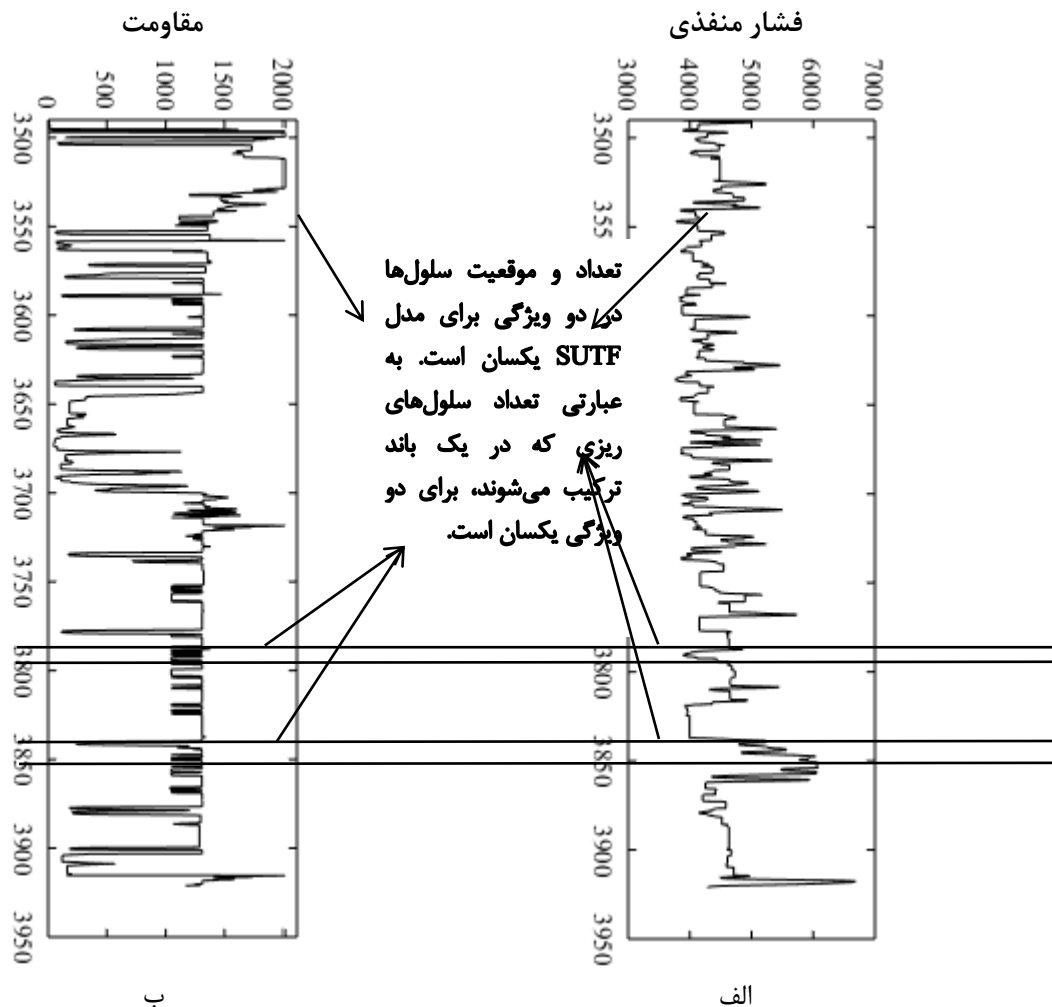
با هر کدام از این رویکردها می‌توان به یک مدل نهایی افزایش مقیاس برای هر دو ویژگی دست یافت، به گونه‌ای که تعداد سلول‌های افزایش مقیاس و همچنین موقعیت سلول‌ها برای هر دو ویژگی، دقیقاً مشابه یکدیگر باشد و تنها کمیت این سلول‌ها برای هر ویژگی متفاوت خواهد بود. نحوه تعیین مدل SUTF بر اساس الگوریتم افزایش مقیاس بر مبنای پنجره با پهنای متغیر در شکل ۴-۷ به صورت عددی نمایش داده شده است.

همان‌طور که قبلاً بررسی شد، مدل بهینه افزایش مقیاس برای ویژگی اول و ویژگی دوم به ترتیب ۶۸۲ و ۵۹۰ سلول با مقیاس بزرگ دارد. برای افزایش مقیاس هم‌زمان، الگوریتم به گونه‌ای است که علاوه بر این که تعداد سلول افزایش مقیاس با همدیگر برابر خواهد شد، موقعیت مکانی این سلول‌ها نیز همسان می‌شود. در روش حداقل پهنای باند، ملاک افزایش مقیاس، پهنای باند کوچکتر ویژگی‌ها خواهد بود. با مقایسه باندهای افزایش مقیاس دو ویژگی، هر کدام که کوچکتر باشد به عنوان باند مطلوب افزایش مقیاس SUTF و یا همان پنجره با پهنای مطلوب محاسبه خواهد گردید. طبیعی است که در این حالت، تعداد سلول نهایی مدل SUTF برای هر دو ویژگی، بیشتر از تعداد آنها در حالت تک ویژگی خواهد بود؛ چرا که بر اساس این رویکرد نیاز به شکست یک سری سلول‌های درشت‌شده است. نتایج افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی با رویکرد حداقل پهنای باند در شکل ۴-۸ نمایش داده شده است. همچنین پارامترهای افزایش مقیاس برای ویژگی‌های فشار منفذی و مقاومت الکتریکی نیز در جدول ۴-۳ آورده شده است.

جدول ۴-۳ پارامترهای افزایش مقیاس در رویکرد حداقل پهنای باند

ویژگی	ویژگی اول (فشار منفذی)	ویژگی دوم (مقاومت)	SUTF ویژگی اول (فشار منفذی)	SUTF ویژگی دوم (مقاومت)
تعداد سلول	۶۸۲	۵۹۰	۸۴۸	۸۴۸
خطای افزایش مقیاس	۱۷۶	۴۸	۱۳۲	۳۹

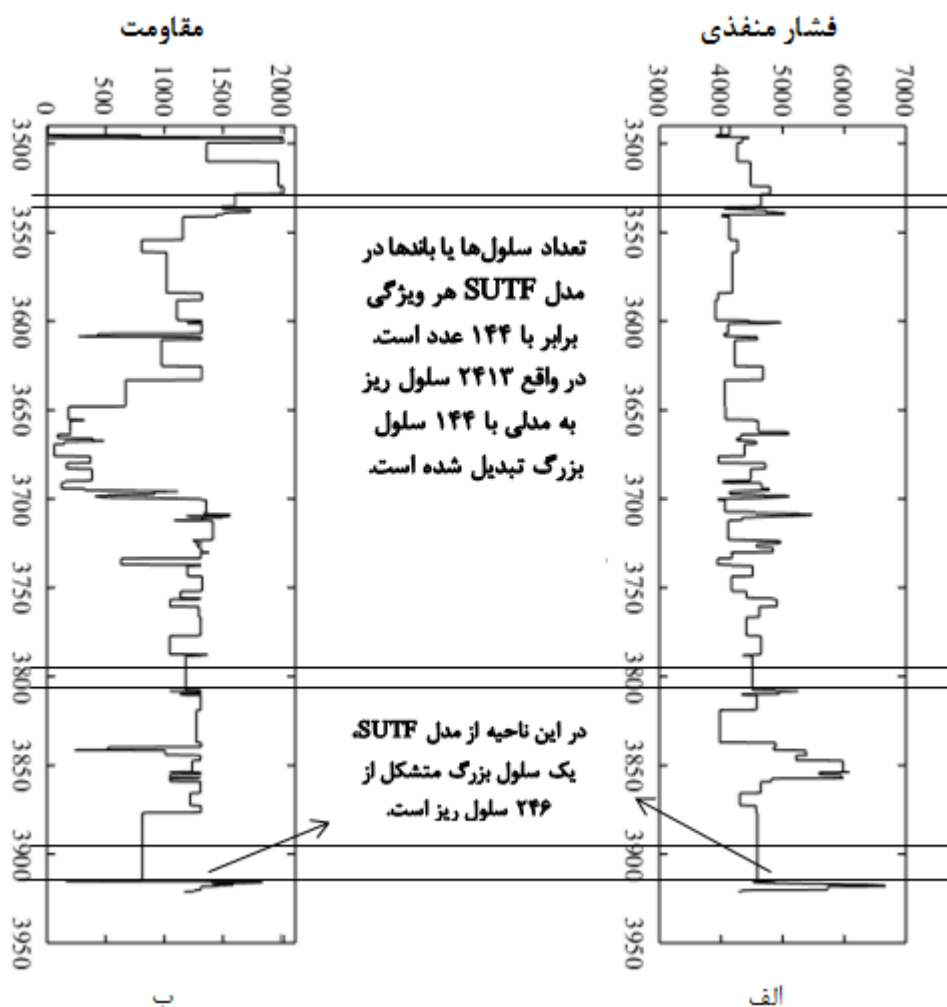
بنابراین بر اساس رویکرد حداقل پهنای باند، مدل ریزمقیاس اولیه به یک مدل درشت‌مقیاس SUTF با تعداد ۸۴۸ سلول تبدیل شده است که به ازای این سلول‌ها، مقادیر ویژگی اول و دوم محاسبه می‌شود. طبیعی است که خطای مدل SUTF هر ویژگی کمتر از مدل افزایش مقیاس تک‌ویژگی‌ها باشد.



شکل ۴-۸ مدل SUTF با رویکرد حداقل پهنای باند، الف) ویژگی اول (فشار منفذی)، ب) ویژگی دوم (مقاومت)

در رویکرد حداکثر پهنای باند، ملاک افزایش مقیاس هم‌زمان، پهنای باند بزرگتر یا طول پنجره بزرگتر خواهد بود به گونه‌ای که با جستجو در هر کدام از ویژگی‌ها، پهنای باند بزرگتر به عنوان پهنای باند مطلوب انتخاب و مدل SUTF نهایی بر این اساس محاسبه خواهد شد. در این رویکرد با توجه به انتخاب حداکثر پهنای باند، تعداد سلول نهایی کمتر از حالت تک‌ویژگی است. نتایج افزایش مقیاس

همزمان دو ویژگی بر اساس رویکرد حداکثر پهنای باند در شکل ۴-۹ نمایش داده شده است. طبیعی است که در این حالت، خطای افزایش مقیاس نسبت به رویکرد حداقل پهنای باند، بیشتر خواهد شد.



شکل ۴-۹ مدل SUTF با رویکرد حداکثر پهنای باند، الف) ویژگی اول (فشار منفذی)، ب) ویژگی دوم (مقاومت)

پارامترهای افزایش مقیاس ویژگی‌ها در جدول ۴-۴ نمایش داده شده است. تعداد سلول مدل SUTF بر اساس حداکثر پهنای باند، ۱۴۴ عدد است، درحالی‌که مدل اولیه ریزمقیاس حاوی ۲۴۱۳ سلول بوده است. در واقع با این رویکرد تنها با ۶٪ داده‌های اولیه، مدل اولیه ویژگی‌ها قابل بازیابی است.

جدول ۴-۴ پارامترهای افزایش مقیاس در رویکرد حداکثر پهنای باند

ویژگی	ویژگی اول (فشار منفذی)	ویژگی دوم (مقاومت)	SUTF ویژگی اول (فشار منفذی)	SUTF ویژگی دوم (مقاومت)
تعداد سلول	۶۸۲	۵۹۰	۱۴۴	۱۴۴
خطای افزایش مقیاس	۱۷۶	۴۸	۴۳۰	۲۸۹

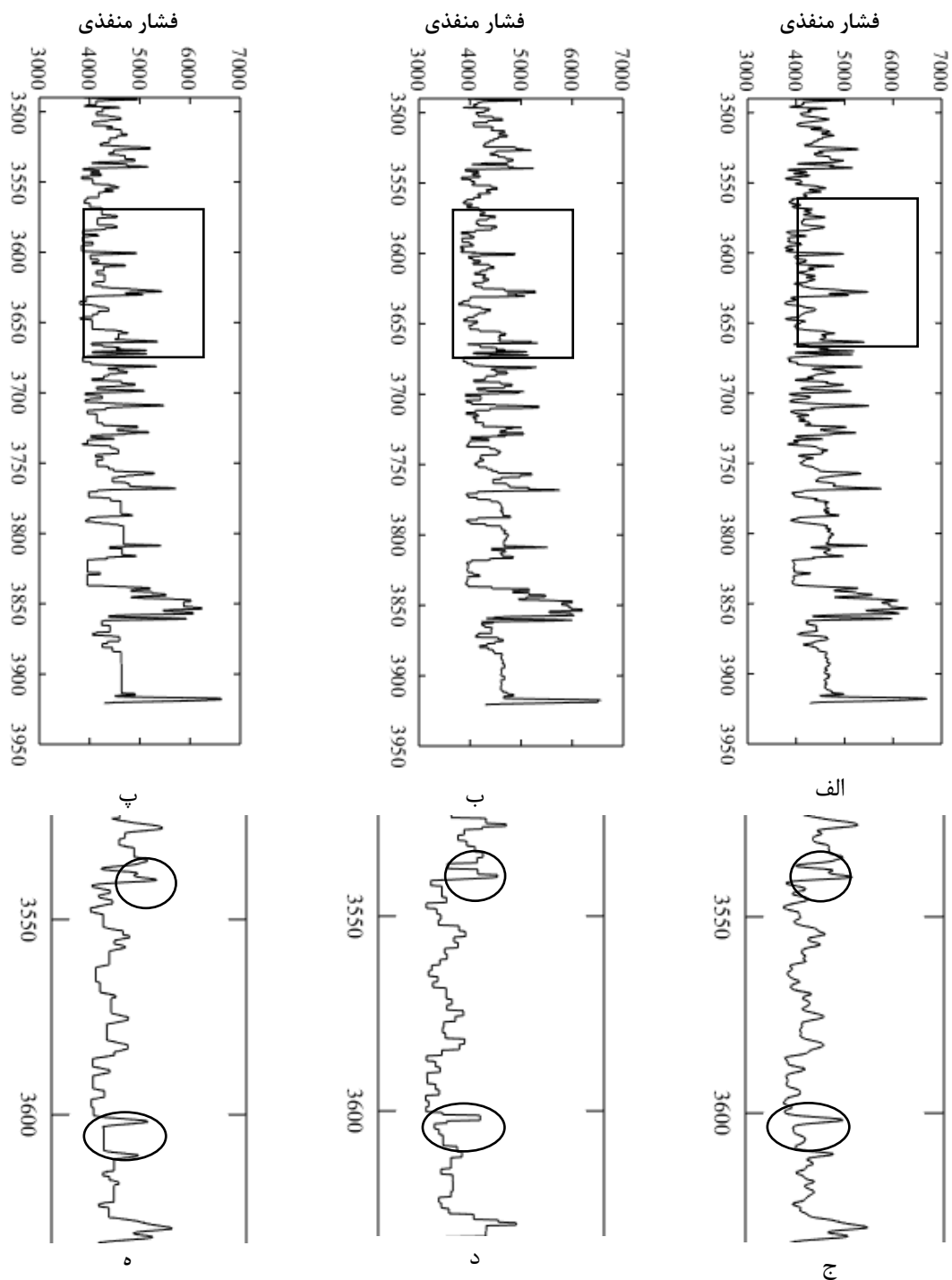
بطور خلاصه در این بخش، به منظور افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی مخزن، دو رویکرد بر مبنای پهنای باند استفاده شده است. مدل SUTF به دست آمده از رویکرد حداقل پهنای باند دارای ۸۴۸ سلول درشت شده است و همچنین مدل نهایی بدست آمده از رویکرد حداکثر پهنای باند، ۱۴۴ سلول افزایش مقیاس دارد. در رویکرد حداقل پهنای باند، پنجره با پهنای کوچکتر به عنوان عملگر افزایش مقیاس در نظر گرفته شده و در رویکرد حداکثر پهنای باند، پنجره بزرگتر برای افزایش مقیاس لحاظ گردیده است. خطای افزایش مقیاس در هر کدام از دو مدل متفاوت است. طبیعی است که هرچه تعداد سلولها بیشتر، خطای افزایش مقیاس کمتر خواهد بود.

چنانچه هدف از افزایش مقیاس حفظ اطلاعات مهم ویژگی‌های مخزن و در نتیجه دقت مدل باشد، روش حداقل پهنای باند می‌تواند بعنوان الگوریتم بهینه افزایش مقیاس استفاده شود. برعکس، چنانچه هدف از افزایش مقیاس، کاهش هزینه محاسبات و همچنین افزایش راندمان محاسباتی باشد، رویکرد حداکثر پهنای باند می‌تواند روشی مفید در افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی باشد. بدیهی است که زمان محاسبات مدل شبیه‌ساز بر اساس پهنای باند حداکثر کمتر از مدل شبیه‌ساز بر اساس پهنای باند حداقل است.

۴-۴- افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک

۴-۴-۱ افزایش مقیاس تک‌ویژگی

نکته مهم در فرایند افزایش مقیاس، تعیین حدود آستانه است که خود کسری از بزرگترین ضرایب جزئیات و تقریب در هر مرحله هستند. در این تحقیق برای داده‌های مورد نظر، بترتیب $\epsilon_s = 70\%$, $\epsilon_D = 90\%$ تعیین شده است. این مقادیر به این مفهوم‌اند که در هر مرحله از تبدیل موجک، نواحی‌ای که ضریب مقیاس آنها کمتر از 90% حداکثر ضریب تقریب باشد و در عین حال ضرایب جزئیات آنها نیز کمتر از 70% حداکثر ضریب جزئیات باشد، مجاز به افزایش مقیاس خواهند بود. هر چه مقادیر آستانه کوچکتر انتخاب شود، جزئیات بیشتری حفظ شده و افزایش مقیاس از نواحی دورتر از ناهمگنی‌های مخزن شروع خواهد شد. افزایش مقیاس برای فشار منفذی بعنوان ویژگی اول در قسمت ب شکل ۴-۱۰ نمایش داده شده است. تعداد سلول‌های نگار افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک به ازای ویژگی اول برابر با ۴۱۸ سلول است. پارامترهای افزایش مقیاس نیز در جدول ۴-۵ آورده شده است.



شکل ۴-۱۰ الف) مدل اولیه ویژگی اول (فشار منفذی)، ب) مدل افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک و پ) مدل افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر، ج) بزرگنمایی مدل اولیه، د) بزرگنمایی مدل افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک و ه) بزرگنمایی مدل افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر

برای مقایسه معتبر نتایج افزایش مقیاس حاصل از دو روش تبدیل موجک و پنجره با پهنای متغیر، ابتدا لازم است که، مدل افزایش مقیاس بر اساس پهنای باند با تعداد ۴۱۸ سلول محاسبه شود. بر اساس آنچه که قبلاً نیز اشاره شد، در روش پنجره با پهنای متغیر، می‌توان بر اساس تعداد سلول درشت شده، مدل افزایش مقیاس با تعداد مشخص سلول را بر مبنای پهنای باند مربوطه ارائه نمود. شکل ۴-۱۰ قسمت ج، مدل افزایش مقیاس بر مبنای پهنای باند را نشان می‌دهد. برای درک بهتر عملکرد هر کدام از روش‌ها علاوه بر مشاهده خطای ناشی از افزایش مقیاس، می‌توان به مدل‌ها رجوع نمود. قسمت‌های پایین شکل ۴-۱۰، بخش بزرگ‌شده از نگار فشار منفذی را نشان می‌دهد.

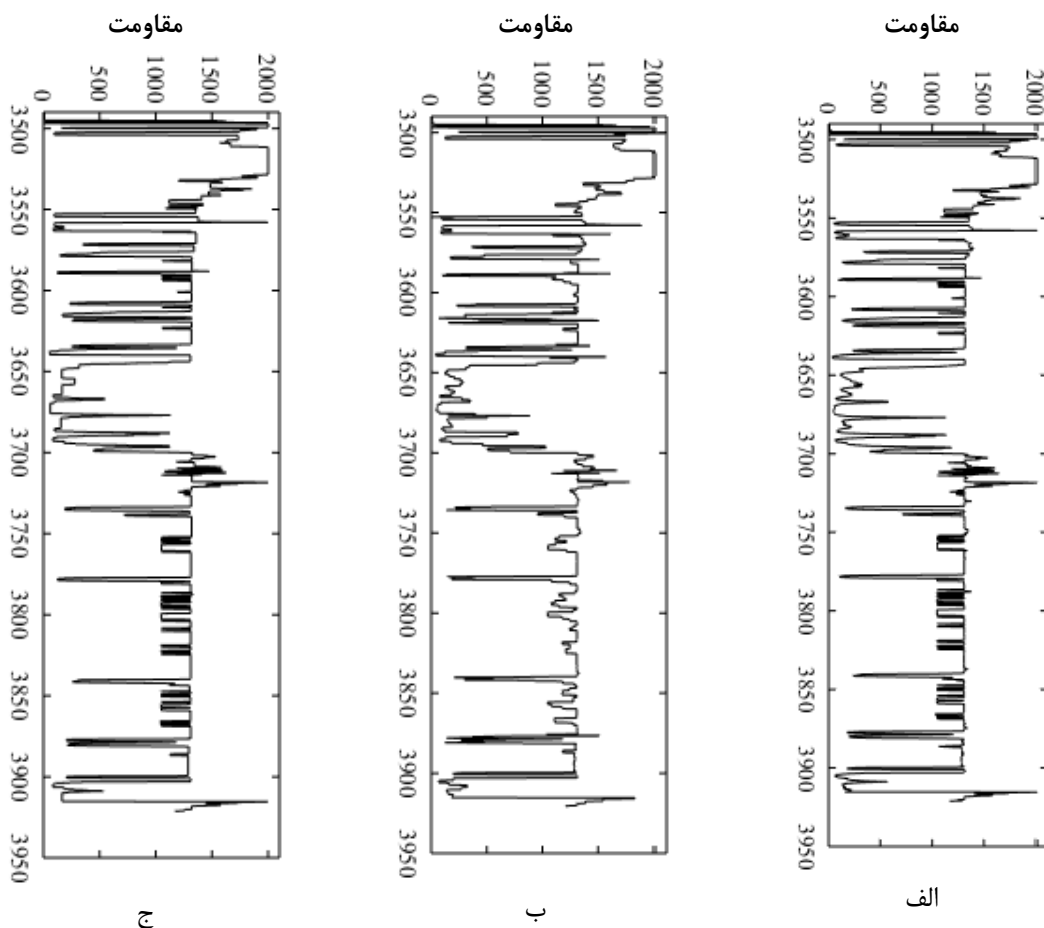
همانطور که در شکل ۴-۱۰ مشخص است، در روش پنجره با پهنای متغیر نسبت به روش تبدیل موجک، پیک‌ها که حاوی اطلاعات مهم ویژگی‌ها هستند، شباهت بیشتری به نگار اصلی فشار منفذی دارند. پارامترهای افزایش مقیاس حاصل از دو روش برای ویژگی فشار منفذی در جدول ۴-۵ نمایش داده شده است. خطای افزایش مقیاس روش تبدیل موجک حدود ۱۴ برابر خطای روش پنجره با پهنای متغیر است.

جدول ۴-۵ مقایسه پارامترهای افزایش مقیاس حاصل از دو روش برای ویژگی فشار منفذی

خطای افزایش مقیاس	تعداد سلول مدل با مقیاس بزرگ	روش
۵۶۳۲	۴۱۸	تبدیل موجک
۳۹۸	۴۱۸	پنجره با پهنای متغیر

مشابه آنچه در مورد فشار منفذی بیان شد، فرایند افزایش مقیاس برای مقاومت به عنوان ویژگی دوم نیز قابل اجرا است. شکل ۴-۱۱ نگار افزایش مقیاس با تبدیل موجک بنا به فرایند مشابه ویژگی اول را نمایش می‌دهد. تعداد سلول مدل افزایش مقیاس برابر با ۳۸۱ عدد است که خطای ناشی از این درشت‌سازی معادل با ۴۷۶۴ واحد است. بنابراین نگار ویژگی مقاومت با مدل ریزدانه با ۲۴۱۳ سلول، به یک مدل با مقیاس بزرگ با ۳۸۱ سلول با رویکرد افزایش مقیاس چندمقیاسی موجک تبدیل شده

است. همچنین در قسمت ج شکل ۴-۱۱، مدل افزایش مقیاس ویژگی دوم بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر نمایش داده شده است. تعداد سلول این مدل برابر با مدل بدست آمده از تبدیل موجک است که فرایند مقایسه نتایج را تسهیل نماید. این مدل در ازای پهنای باند $82/2$ محاسبه شده است که خطای حاصل از این افزایش مقیاس برابر با ۱۸۵ واحد است. جدول ۴-۶ پارامترهای افزایش مقیاس ویژگی مقاومت را برای هر دو روش نشان می‌دهد. خطای افزایش مقیاس بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر نسبت به روش تبدیل موجک به مراتب کمتر است.



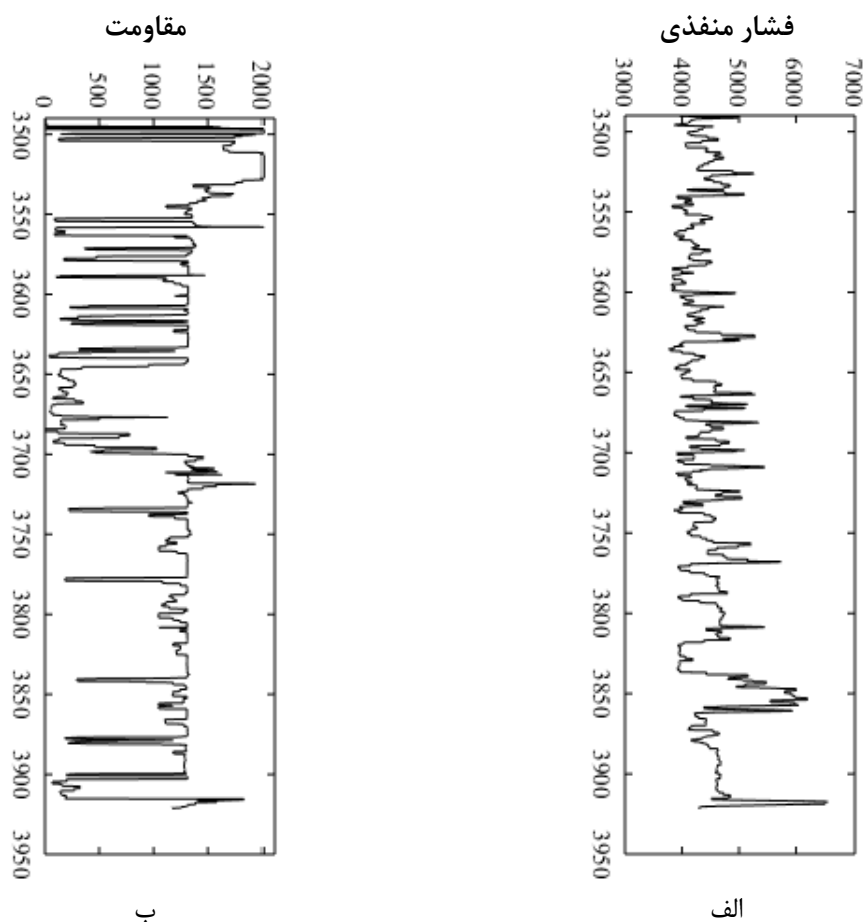
شکل ۴-۱۱ (الف) مدل اولیه ویژگی دوم (مقاومت)، (ب) مدل افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک و (پ) مدل افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر

جدول ۴-۶ مقایسه پارامترهای افزایش مقیاس حاصل از دو روش برای ویژگی مقاومت

روش	تعداد سلول مدل با مقیاس بزرگ	خطای افزایش مقیاس
تبدیل موجک	۳۸۱	۴۷۶۴
پنجره با پهنای متغیر	۳۸۱	۱۸۰

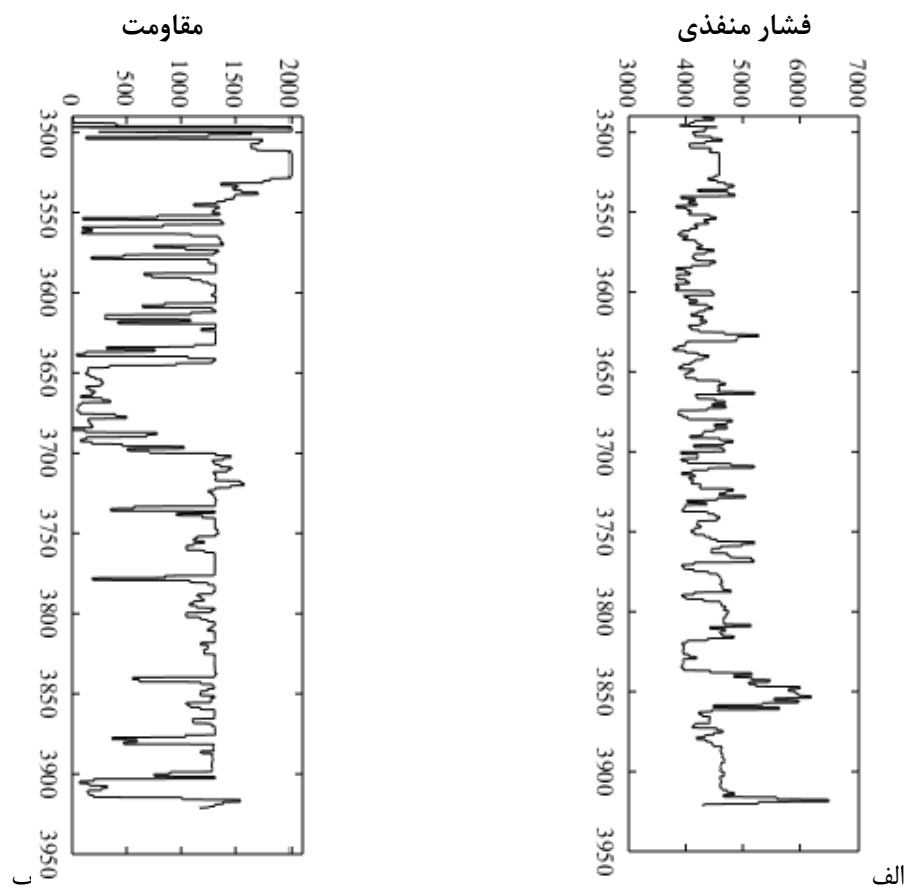
۴-۲- افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی (SUTF) بر اساس تبدیل موجک

افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی بر اساس تبدیل موجک موضوعی جدید است و تاکنون هیچ مطلبی در این زمینه مشاهده نشده است. برای این منظور از رویکرد مشابه آنچه در فرایند افزایش مقیاس بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر بیان شده، استفاده خواهد شد. با کنار هم قراردادن دو ویژگی و با رویکرد حداقل و حداکثر پهنای باند، مدل نهایی افزایش مقیاس برای هر دو ویژگی محاسبه خواهد شد که علاوه بر تعداد یکسان سلول‌های درشت شده، موقعیت این سلول‌ها نیز همسان خواهد بود. شکل ۴-۱۲، مدل SUTF مخزن را بر اساس نتایج تبدیل موجک با رویکرد حداقل پهنای باند نمایش می‌دهد. تعبیر پهنای باند همان ابعاد سلول‌های درشت شده است. مدل افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی ۵۰۶ سلول با مقیاس بزرگ دارد.



شکل ۴-۱۲ مدل SUTF با رویکرد حداقل پهنای باند، الف) ویژگی اول (فشار منفذی) و ب) ویژگی دوم (مقاومت)

نتایج افزایش مقیاس دو ویژگی به طور همزمان با رویکرد حداکثر پهنای باند نیز در شکل ۴-۱۳ نمایش داده شده است. در این حالت، مدل SUTF دارای ۲۹۲ سلول خواهد بود. طبیعی است که خطای ناشی از افزایش مقیاس بر اساس رویکرد حداکثر پهنای باند بیشتر از حالت حداقل پهنای باند باشد. لذا خطای مدل افزایش مقیاس برای ویژگی اول ۷۰۳۰ و برای ویژگی دوم ۸۶۴۲ واحد است. جدول ۴-۷ پارامترهای افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی را بر اساس تبدیل موجک نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۳ مدل SUTF با روش حداکثر پهنای باند، الف) ویژگی اول (فشار منفذی) و ب) ویژگی دوم (مقاومت)

جدول ۴-۷ پارامترهای افزایش مقیاس ویژگی‌های بر اساس تبدیل موجک

رویکرد حداقل پهنای باند		رویکرد حداکثر پهنای باند		ویژگی
SSE	تعداد سلول مدل SUTF	خطای افزایش مقیاس	تعداد سلول مدل SUTF	
۷۰۳۰	۲۹۲	۳۷۶۴	۵۰۶	ویژگی اول
۸۶۴۲	۲۹۲	۳۸۳۳	۵۰۶	ویژگی دوم

۴-۵- مقایسه نتایج افزایش مقیاس حاصل از دو روش

نتایج حاصل از افزایش مقیاس داده‌ها با دو روش پنجره با پهنای متغیر و همچنین تبدیل مویک به طور خلاصه در جدول ۴-۸ گردآوری شده است. همانطور که مشخص است در هر حالت، خطای افزایش مقیاس بر مبنای پنجره با پهنای متغیر که توسط پهنای باند قابل کنترل است، کمتر از مقدار متناظر آن در تبدیل مویک به ازای هر دو ویژگی است. ملاک مقایسه نتایج دو روش، خطای افزایش مقیاس یا SSE است. در حالت افزایش مقیاس تک‌ویژگی، خطای افزایش مقیاس برای ویژگی اول و دوم، به ازای تعداد سلول برابر در مدل افزایش مقیاس، در روش پنجره با پهنای متغیر نسبت به تبدیل مویک، به ترتیب حدود ۱۳ و ۲۵ برابر کمتر است. همچنین در فرایند افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی مخزن با رویکرد حداقل پهنای باند، تعداد سلول مدل افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی در روش پنجره با پهنای متغیر برابر با ۸۴۸ و در روش تبدیل مویک برابر با ۵۰۶ عدد است. میزان خطای افزایش مقیاس به ازای ویژگی اول حدود ۳۰ برابر و به ازای ویژگی دوم حدود ۱۰۰ برابر در روش پنجره با پهنای متغیر کمتر از تبدیل مویک است. در رویکرد حداکثر پهنای باند نیز با وجود این که تعداد سلول نهایی در روش پهنای باند کمتر از تعداد سلول افزایش مقیاس تبدیل مویک است، اما خطای ناشی از فرایند افزایش مقیاس آن به مراتب کمتر است.

جدول ۴-۸ مقایسه نتایج افزایش مقیاس روش تبدیل مویک و پنجره با پهنای متغیر

حالت		تک‌ویژگی				دو ویژگی هم‌زمان			
ویژگی		ویژگی اول		ویژگی دوم		ویژگی اول		ویژگی دوم	
رویکرد		حداقل پهنای باند		حداکثر پهنای باند		حداقل پهنای باند		حداکثر پهنای باند	
پارامتر		N	SSE	N	SSE	N	SSE	N	SSE
پنجره با پهنای متغیر		۳۸۱	۱۸۵	۴۱۸	۳۹۸	۱۴۴	۴۳۰	۸۴۸	۳۹
تبدیل مویک		۳۸۱	۴۷۶۴	۴۱۸	۵۳۶۲	۲۹۲	۷۰۳۰	۵۰۶	۳۸۳۳

۴-۶ جمع‌بندی

هدف از افزایش مقیاس هم‌زمان ویژگی‌های مخزن، ایجاد سلول‌هایی با خواص مشخص برای شبیه‌سازی جریان سیال است. در این فصل به منظور افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی از دو روش پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک استفاده شد. در روش پنجره با پهنای متغیر، ابتدا مدل افزایش مقیاس هر کدام از ویژگی‌ها بر اساس پهنای باند بهینه محاسبه شده است. سپس از دو رویکرد حداقل پهنای باند و حداکثر پهنای باند برای افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی استفاده شده است. طبیعی است که مدل‌های افزایش مقیاس ویژگی‌ها بسته به تغییرپذیری و توزیع متفاوت ویژگی‌ها، متمایز از همدیگر باشند. ممکن است در یک ناحیه یکسان، بنا به تغییرپذیری متفاوت، ویژگی اول ساختار ریز آن حفظ شده باشد و در ویژگی دوم با توجه به همگن‌بودن ناحیه، سلول‌ها با همدیگر ادغام شده باشند. بنابراین مدل هم‌زمان باید بگونه‌ای عمل کند که یک الگوی یکسان برای هر دو ویژگی در این ناحیه ارائه دهد. در رویکرد حداقل پهنای باند، اشتراک مدل افزایش مقیاس دو ویژگی به عنوان مدل افزایش مقیاس هم‌زمان محاسبه می‌شود و در رویکرد حداکثر پهنای باند نیز اجتماع دو مدل تک-ویژگی به عنوان مدل SUTF در نظر گرفته شده است. در هر کدام از این رویکردها، یک مدل نهایی SUTF برای هر دو ویژگی محاسبه شده که علاوه بر یکسان بودن تعداد سلول‌های افزایش مقیاس، موقعیت مکانی آنها نیز یکسان خواهد بود. تنها تفاوت مدل SUTF ویژگی‌ها در کمیت سلول‌ها است.

در روش تبدیل موجک، بنا به تعیین ضرایب تقریب و جزئیات و همچنین تعیین حدود آستانه، افزایش مقیاس برای هر کدام از ویژگی‌ها انجام شده است. برای تعیین مدل SUTF ویژگی‌ها بر اساس تبدیل موجک از رویکرد مشابه آنچه در روش پنجره با پهنای متغیر به کار برده شده، استفاده شده است. در روش تبدیل موجک، قبل از انجام فرایند هیچگونه ایده‌ای در خصوص تعداد سلول‌های مدل با مقیاس بزرگ وجود ندارد.

با توجه به تعداد سلول مدل افزایش مقیاس به دست آمده از روش تبدیل موجک، و نظر به اینکه برای مقایسه نتایج حاصل از دو روش باید شرایط یکسانی فراهم شود، مدل به دست آمده بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر نیز باید بر اساس همین تعداد سلول محاسبه شده است. به همین دلیل بر اساس تعداد سلول و تعیین پهنای باند متناظر با این تعداد، مدل افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر محاسبه شده است. این یکی از قابلیت‌های روش پنجره با پهنای متغیر بر اساس پهنای باند است. ملاک مقایسه نتایج، خطای افزایش مقیاس دو روش است. مشاهده می‌شود که برای هر کدام از ویژگی‌ها و همچنین برای مدل SUTF محاسبه شده، خطای افزایش مقیاس مدل‌ها در روش پنجره با پهنای متغیر به مراتب کمتر از روش تبدیل موجک است. لذا روش پنجره با پهنای متغیر که اساس آن تعیین پهنای باند بر اساس تغییرپذیری داده‌ها است، در زمینه افزایش مقیاس داده‌ها روشی قوی به شمار می‌آید.

فصل پنجم:

افزایش مقیاس دوی بعدی داده ها

بایک و دوی ترکی مخزن

۵-۱ مقدمه

اکثر روش‌های افزایش مقیاس که در دو بعد توسعه داده شده‌اند، در فرایند درشت‌سازی به گونه‌ای عمل می‌کنند که سلول‌های نهایی مدل شبیه‌ساز به صورت منظم باشند. بعنوان مثال در فرایند افزایش مقیاس با تبدیل موجک، چهار سلول در راستای x و y ، به یک سلول با مقیاس بزرگ تبدیل می‌شوند، در صورتی که شرط افزایش مقیاس را داشته باشند و یا چهار سلول به صورت ریز باقی می‌مانند. بنابراین حالتی وجود ندارد که بعنوان مثال، بنا به تغییرپذیری متفاوت متغیر، سه سلول درشت و یکی از آنها به صورت ریز باقی بماند. افزایش مقیاس با استفاده از پنجره با پهنای متغیر بر اساس پهنای باند این مسئله را حل خواهد کرد. بنا به تغییرپذیری در راستاهای مختلف می‌توان حد آستانه یا پهنای باند را بگونه‌ای تعریف نمود که سلول‌ها تا زمان برقراری شرط درشت شدن، ترکیب شوند و تنها شرط ادغام سلول‌ها، صرفاً تغییرپذیری آنها است و هیچ محدودیتی از طریق روش اعمال نخواهد شد. در این روش، پنجره با پهنای متغیر، تابعی از تغییرپذیری ویژگی سلول خواهد بود که با توجه به تغییرپذیری متفاوت در دو جهت، با یک بردار پهنای باند قابل کنترل است. در این فصل که به دو بخش جداگانه تقسیم می‌شود، ابتدا فرایند افزایش مقیاس دوبعدی با یک ویژگی مخزن هیدروکربوری با استفاده از پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک بیان خواهد شد و سپس با تعمیم این حالت به دو ویژگی مخزن، نتایج افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی تخلخل و تراوایی بررسی می‌شود.

۵-۲ افزایش مقیاس دوبعدی با یک ویژگی مخزن هیدروکربوری

۵-۲-۱ افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر

به منظور افزایش مقیاس خصوصیات مخزن در یک شبکه بر اساس پنجره با پهنای متغیر، ایده‌های متفاوتی بررسی و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. دو الگوی متفاوت افزایش مقیاس

پیمایش گراف، همان‌طور که از نام آن پیداست «جستجوی عمیق‌تر در گراف تا زمانی که امکان دارد»، است. الگوریتم از ریشه شروع می‌کند (در گراف‌ها یا درخت‌های بدون ریشه رأس دلخواهی به عنوان ریشه انتخاب می‌شود) و در هر مرحله همسایه‌های رأس جاری را از طریق یال‌های خروجی رأس جاری به ترتیب بررسی کرده و به محض روبه‌رو شدن با همسایه‌ای که قبلاً دیده نشده باشد، به صورت بازگشتی برای آن رأس، به عنوان رأس جاری اجرا می‌شود. در صورتی که همه همسایه‌ها قبلاً دیده شده باشند، الگوریتم عقب‌گرد می‌کند و اجرای الگوریتم برای رأسی که از آن به رأس جاری رسیده است، ادامه می‌یابد. به عبارتی الگوریتم تا آنجا که ممکن است، به عمق بیشتر و بیشتر می‌رود و در مواجهه با بن‌بست عقب‌گرد می‌کند. این فرایند تا زمانی که همه رأس‌های قابل دست‌یابی از ریشه دیده شوند، ادامه می‌یابد (Even, 2011).

در الگوریتم افزایش مقیاس دوبعدی بر اساس پنجره با پهنای متغیر، هر سلول به عنوان یک رأس گراف در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه الگوریتم در محیط MATLAB نوشته شده است، شبکه دوبعدی بصورت یک ماتریس در الگوریتم تعریف خواهد شد. نقطه شروع فرایند جستجو دلخواه است. به عنوان مثال مبدأ مختصات می‌تواند نقطه شروع الگوریتم باشد. به ازای نقطه شروع، تمامی همسایگی‌ها در یک پشته^{۳۸} یا ستون داده قرار می‌گیرند. هر نقطه بسته به موقعیت مکانی خود، پهنای باندی منحصری خواهد داشت که در مرحله قبل به دست آمده است. نقطه با تمامی همسایگی‌های موجود در پشته بررسی می‌شود. چنانچه اختلاف دو داده کمتر از حد آستانه یا پهنای باند تعریف شده باشد، این دو سلول قابلیت ترکیب شدن را خواهند داشت. اگر اختلاف دو داده بزرگتر از حد آستانه باشد، به این مفهوم است که این دو داده اهمیت زیادی دارند و باید به صورت ریز باقی بمانند. این رویه ادامه داشته و تمامی داده‌ها بررسی خواهند شد. در نهایت در یک شبکه محاسباتی، یک تعداد سلول بصورت ریز باقی خواهند ماند و یک تعداد سلول نیز با همدیگر ادغام شده و سلول‌های درشت

³⁸ Stack

را خواهند ساخت. سلول‌هایی که افزایش مقیاس می‌یابند، برای محاسبه ویژگی معادل آنها، میانگین تمام سلول‌ها محاسبه می‌شود و بصورت یک سلول بزرگ در نظر گرفته خواهد شد.

برای کنترل و اعتبارسنجی مدل نیز می‌توان از میانگین مربع خطا استفاده نمود. طبیعی است که هر چه تعداد سلول‌های افزایش مقیاس در مدل نهایی کمتر باشد، خطای ناشی از افزایش مقیاس بیشتر خواهد بود. با توجه به اینکه حدود آستانه در هر ردیف داده چه در راستای x و چه در راستای y ، بصورت بهینه انتخاب می‌شود، بنابراین مدل شبیه‌ساز بدست آمده، مدل بهینه خواهد بود.

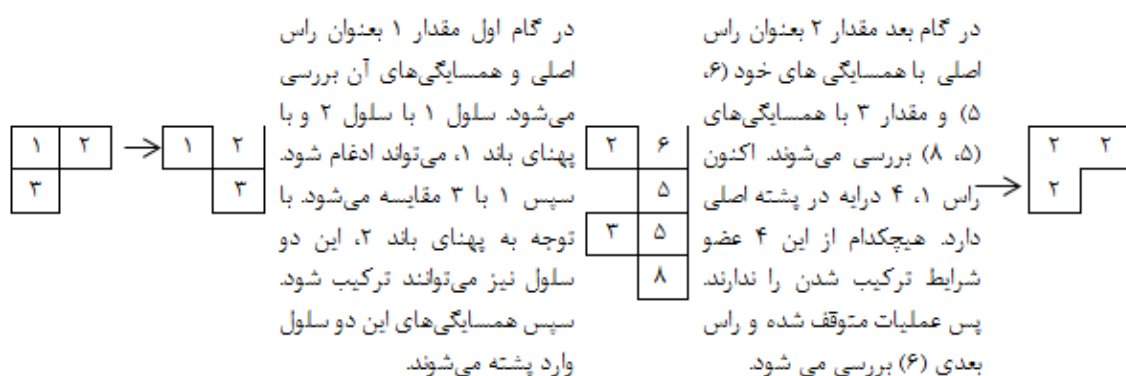
نحوه اجرای الگوریتم در شکل ۵-۱ نمایش داده شده است. یک شبکه 5×5 را در نظر بگیرید. بسته به موقعیت سلول و همچنین جهت حرکت الگوریتم، پهنای باند متفاوت خواهد بود که این خاصیت افزایش مقیاس چندمقیاسی است. پهنای باند بهینه در این شبکه، بردار $(1, 2)$ در نظر گرفته شده است.

۳	۳	۶	۷/۵	۷/۵
۳	۵	۹	۷/۵	۷/۵
۸	۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸
۸	۸	۱/۸	۱/۸	۶
۴	۱	۶/۵	۶/۵	۹

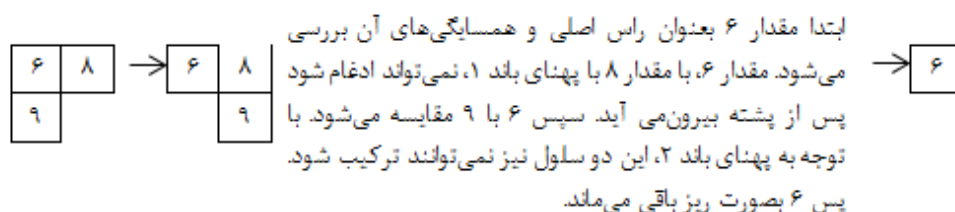
ب

۱	۲	۶	۸	۹
۳	۵	۹	۶	۷
۸	۹	۱	۲	۱
۷	۸	۲	۳	۲
۴	۱	۶	۷	۹

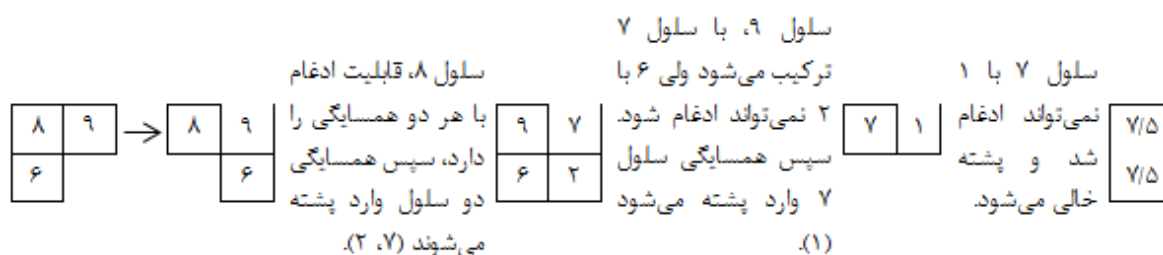
الف



ج



د



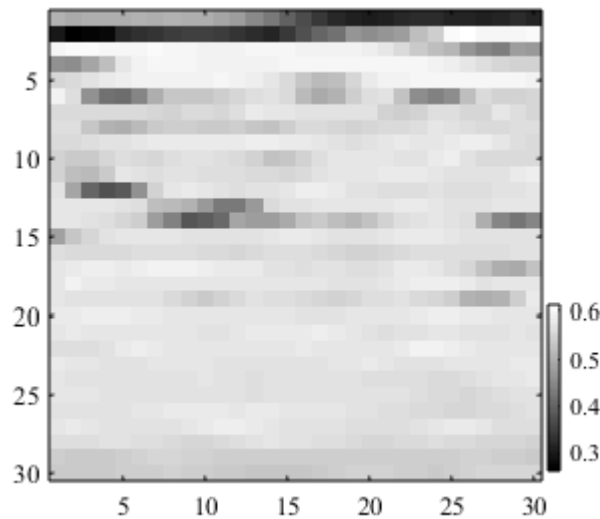
ه

شکل ۵-۱ نحوه اجرای الگوریتم جستجو برای سه راس اصلی (الف) شبکه اولیه، (ب) شبکه بزرگ مقیاس، (ج) جستجو برای راس سلول ۱، (د) جستجو برای راس سلول ۶ و (ه) جستجو برای راس سلول

به منظور بررسی الگوریتم افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر در دو بعد، یک شبکه

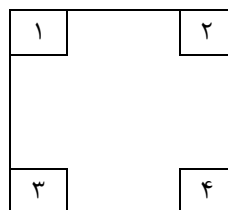
۳۰×۳۰ با ۹۰۰ سلول ریز در نظر گرفته شده است. توزیع تخلخل در این شبکه که معرف یک سطح از

مخزن است، بصورت شکل ۵-۲ نمایش داده شده است. داده‌های تخلخل به صورت مصنوعی تولید شده‌اند. حداکثر مقدار تخلخل در این مدل، ۶۵٪ و حداقل مقدار تخلخل ۲۵٪ است. داده‌ها از یک توزیع نرمال با میانگین ۵۰٪ و انحراف معیار ۷۰٪ برداشت شده‌اند.



شکل ۵-۲ توزیع تخلخل در شبکه ۳۰×۳۰

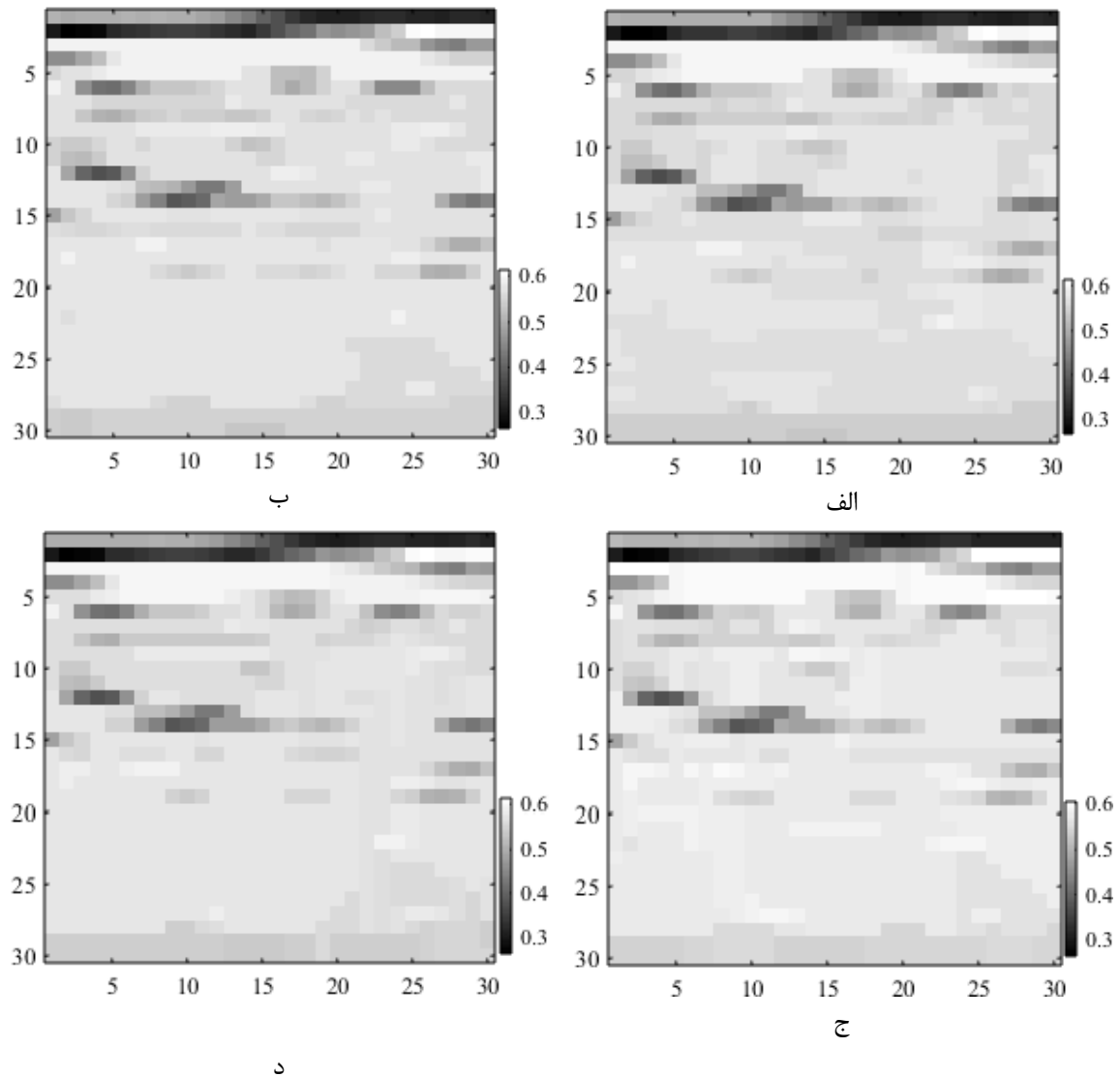
در این الگوریتم نقطه شروع افزایش مقیاس اختیاری است. برای افزایش مقیاس هر ویژگی مخزن، ۴ حالت برای نقطه شروع فرایند مطابق شکل ۵-۳ در نظر گرفته شده است. بنابراین چهار الگوی متفاوت افزایش مقیاس به دست خواهد آمد.



شکل ۵-۳ الگوی افزایش مقیاس در حالات مختلف با استفاده از الگوریتم جستجو

طبیعی است که بسته به شروع نقطه جستجو، نتایج افزایش مقیاس متفاوت است و باید الگوی بهینه افزایش مقیاس تعیین شود. معیار انتخاب در تعیین الگوی بهینه، خطای افزایش مقیاس است. نتایج

افزایش مقیاس در شکل ۵-۴ نمایش داده شده و جدول ۵-۱ نیز پارامترهای افزایش مقیاس در هر حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴ مدل افزایش مقیاس در حالات مختلف بنا به الگوی شکل ۵-۳ (الف) حالت اول، (ب) حالت دوم، (ج) حالت سوم و (د) حالت چهارم

جدول ۵-۱ پارامترهای افزایش مقیاس

نقطه شروع افزایش مقیاس	خطای افزایش مقیاس مدل	تعداد سلول مدل
نقطه ۱	۰/۴۱۸۳	۲۳۶
نقطه ۲	۰/۴۲۱۱	۲۲۷
نقطه ۳	۰/۴۰۵۵	۲۷۲
نقطه ۴	۰/۴۰۵۶	۲۷۱

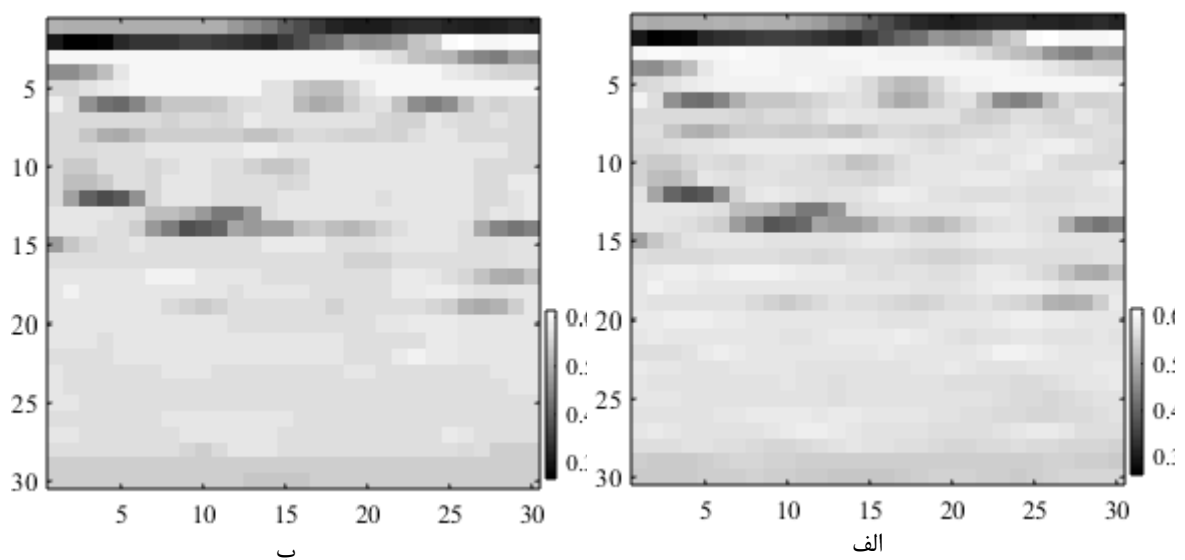
بر اساس افزایش مقیاس بر مبنای پنجره با پهنای متغیر، ۴ الگوی متفاوت به دست آمده است. در تمامی الگوها، در نقاطی که تغییرپذیری شدید است و در واقع ناهمگنی حاکم است، سلول‌ها به صورت ریز باقی مانده و در نواحی همگن، سلول‌ها با همدیگر ادغام شده و سلول‌های با مقیاس بزرگتر تولید کرده‌اند. دو حالت ۳ و ۴، تعداد سلول‌ها و همچنین میزان خطا تقریباً برابر است، با این تفاوت که چینش سلول‌ها متفاوت است ولی نواحی همگن در هر دو الگو تقریباً همخوانی مناسبی دارند. الگوی ۱ و ۲ نیز به لحاظ خطای افزایش مقیاس و تعداد سلول‌ها تقریباً مشابه یکدیگر هستند.

همانطور که مشخص است، نتایج افزایش مقیاس بر اساس الگوی جستجو، شدیداً به نقطه شروع و همچنین جهت حرکت وابسته است. با توجه به اینکه هدف از افزایش مقیاس در محیط‌های متخلخل، جستجوی مناطق همگن و درشت‌سازی سلول‌ها در این نواحی است، جهت حرکت می‌تواند بر اساس تغییرپذیری داده‌ها تعیین شود. با فرض انتخاب نقطه شروع جستجو، در دو راستای x و y ، اختلاف ۵ داده اول محاسبه و میانگین این اختلاف‌ها تعیین می‌شود. جهتی که مقدار میانگین این اختلاف‌ها کمتر باشد، می‌تواند جهت حرکت الگوریتم باشد. بعنوان مثال در الگوی ۱، اختلاف ۵ داده اول که شامل نقطه شروع جستجو نیز هست، دو به دو محاسبه شده و سپس میانگین آن‌ها بدست آمده، که در راستای x برابر $0/076$ و در راستای y معادل $0/193$ است. بنابراین با توجه به اینکه شدت تغییرات ویژگی مورد نظر، در راستای x و در همسایگی نقطه جستجو، کمتر از راستای y است، جهت حرکت الگوی افزایش مقیاس، x انتخاب شده است. با همین روش، راستای حرکت در حالات ۲، ۳ و ۴ بترتیب، x, y و x تعیین شده است.

معیار انتخاب مدل بهینه در فرایند افزایش مقیاس، تعداد سلول‌های افزایش مقیاس و مربع خطای تجمعی یا SSE است. در بین دو انتخاب در شرایط مشابه تعداد سلول، الگویی که خطای افزایش مقیاس کمتری داشته باشد، می‌تواند الگوی مناسب‌تری باشد و همچنین در شرایط مشابه

خطای افزایش مقیاس، الگویی که تعداد سلول‌های نهایی کمتری داشته باشد، الگوی مطلوب‌تری بشمار می‌آید.

با توجه به پارامترهای افزایش مقیاس الگوریتم‌های مختلف، برای تعیین الگوی بهینه با توجه به تعداد سلول‌ها و همچنین میزان خطای افزایش مقیاس، الگوی ۱ می‌تواند الگوی مناسب‌تری نسبت به بقیه حالت‌ها باشد. در شکل ۵-۵، مدل ریز مقیاس اولیه و درشت‌مقیاس حاصل از الگوی ۱ بطور جداگانه نمایش داده شده است.



شکل ۵-۵ (الف) مدل ریز اولیه و (ب) مدل افزایش مقیاس یافته حالت ۱

جهت حرکت الگوریتم افزایش مقیاس، در الگوی ۱ قابل درک است. از پنج سلول ابتدایی شبکه در راستای x ، ۴ سلول با همدیگر ادغام شده‌اند و تنها یک سلول ریز باقی مانده است. اما در راستای y ، هر پنج سلول بعلت تغییرپذیری بالا، بصورت ریز باقی مانده‌اند.

۵-۲-۱-۲ افزایش مقیاس یک ویژگی در دو بعد با الگوریتم ماتریس فاصله

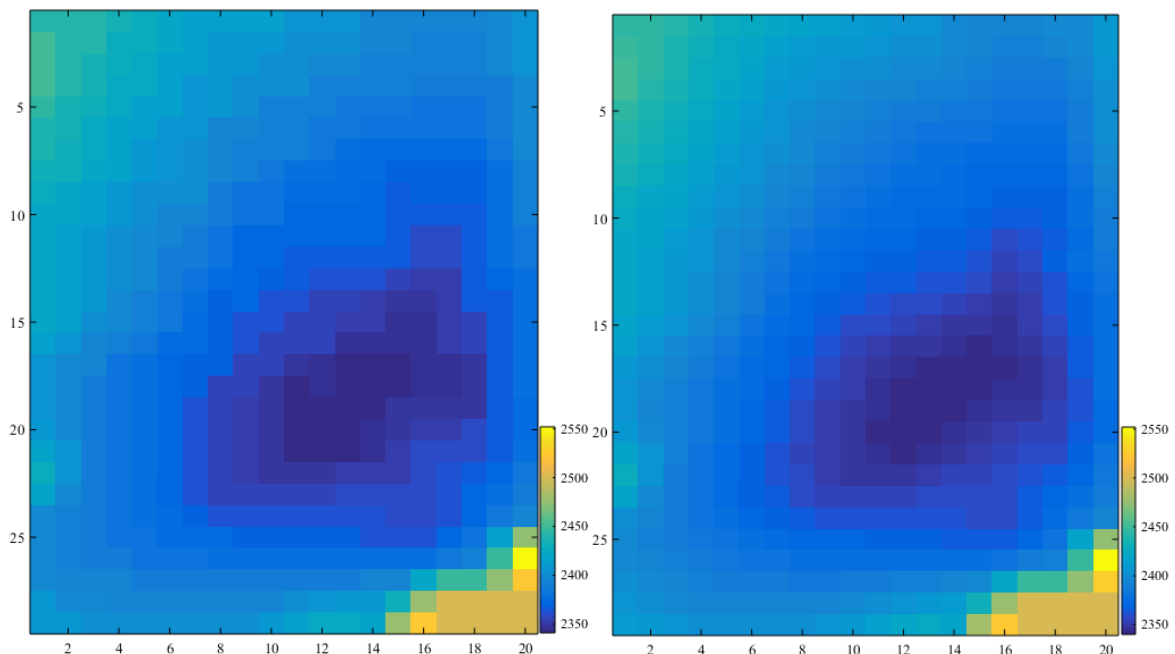
در الگوریتم جستجو، نقطه شروع افزایش مقیاس مشخص نیست و بسته به انتخاب نقطه شروع، نتایج افزایش مقیاس متفاوت خواهند بود. بنابراین برای رفع این مشکل، از الگوریتم ماتریس فاصله استفاده

شده است. در این الگوریتم، در مرحله اول فاصله دو سلول مجاور در دو راستای x و y اندازه‌گیری می‌شود و در ماتریس‌های با ابعاد $n \times m - 1$ در جهت x و $n - 1 \times m$ در جهت y ذخیره می‌شود. در این حالت n تعداد ردیف‌ها و m تعداد ستون داده خواهد بود. هدف از افزایش مقیاس، ترکیب سلول‌هایی با تغییرپذیری مشابه و نزدیک به هم است. بنابراین کوچکترین درایه ماتریس فاصله می‌تواند بعنوان نقطه شروع و همچنین جهت حرکت الگوریتم در نظر گرفته شود. بنابراین در وهله اول، ماتریس فاصله در دو جهت دستگاه مختصات محاسبه و حداقل درایه آن مشخص خواهد شد. درایه‌های ماتریس فاصله با بردار پهنای باند بهینه مقایسه می‌شوند. چنانچه فاصله دو سلول مورد نظر کمتر از پهنای باند مربوطه باشد، دو سلول با هم ترکیب شده و یک سلول بزرگ را تشکیل خواهند داد. به ازای هر گام افزایش مقیاس، ماتریس فاصله مجدد محاسبه خواهد شد، به این دلیل که فاصله سلول-های مجاور دو سلول ادغام شده تغییر خواهد کرد. این فرایند قابل تکرار است. شرط توقف الگوریتم همان پهنای باندها هستند. در صورتی که اختلاف دو سلول بیشتر از پهنای باند باشد، عمل افزایش مقیاس انجام نخواهد شد. با این الگوریتم، اصولاً افزایش مقیاس از نواحی دور از ناهمگنی‌های مخزن شروع و در گام‌های بعد به نواحی ناهموار با تغییرپذیری شدید نزدیک می‌شود. بنابراین دو مشکل اصلی الگوریتم جستجو حل خواهد شد: الف) نقطه شروع افزایش مقیاس و ب) جهت حرکت الگوی افزایش مقیاس. برای افزایش مقیاس ویژگی‌های مخزن در دو بعد، دو سری داده استاندارد استفاده شده است.

• مدل PUNQS-3

مدل اولیه PUNQS-3، یک مدل سه‌بعدی شامل $19 \times 28 \times 5$ سلول ریز است که در این تحقیق از یک سطح مخزن با ابعاد 19×28 استفاده شده است. داده‌های تراوایی مدل با میانگین ۲۳۸۷ و واریانس $3/7896 \times 10^5$ در فضای مخزن توزیع شده‌اند. بردار پهنای باند بهینه برای داده‌های مدل مورد نظر،

بصورت (۶/۰۸۷، ۴/۷۰۸) به دست آمده است. شکل ۵-۶، مدل ریز و همچنین مدل افزایش مقیاس بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر را بر اساس الگوریتم ماتریس فاصله را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۶ الف) مدل ریز PUNQS و ب) مدل افزایش مقیاس

همانطور که از روی شکل مشخص است، افزایش مقیاس بصورت کاملاً نامنظم انجام شده است. مدل افزایش مقیاس داده‌های PUNQS-3، ۱۶۹ سلول با مقیاس بزرگ دارد. واریانس مدل افزایش مقیاس $3/72530 \times 10^5$ است. تعداد سلول‌های مدل افزایش مقیاس حدود ۲۹٪ تعداد سلول‌های مدل اولیه ریزمقیاس است، درحالی‌که با این تعداد سلول، ۹۸٪ واریانس مدل اولیه حفظ شده است. خطای افزایش مقیاس مدل نیز $1/02 \times 10^3$ است. نحوه شماره‌گذاری و همچنین روند افزایش مقیاس سلول-های مدل ریز در شکل نمایش داده شده است.

1	1	1	36	37	54	55	55	55	55	91	91	91	115	115	115	115	115	146	157
2	1	1	37	37	54	55	69	69	69	77	77	77	115	115	120	120	120	146	157
2	1	26	37	38	55	55	69	69	77	77	101	101	92	120	120	120	120	146	157
2	1	26	38	38	55	56	69	77	77	77	92	92	92	92	128	128	128	128	158
3	16	27	38	45	55	56	69	77	78	92	92	102	102	102	116	116	116	128	158
4	16	28	39	45	56	56	70	70	78	92	102	102	116	116	116	116	116	128	158
4	5	28	39	46	57	47	70	78	78	78	102	108	94	94	94	94	94	147	158
5	5	29	39	46	57	47	70	78	86	93	93	94	94	121	121	121	121	148	159
6	17	30	40	47	47	47	71	79	79	94	94	94	95	122	121	121	121	148	159
7	17	30	40	47	58	58	71	79	79	95	95	95	95	122	122	122	122	148	159
7	18	31	41	48	58	59	72	80	80	95	95	95	95	96	129	129	122	148	160
7	18	31	41	48	59	59	72	80	80	96	96	96	96	96	129	129	122	148	160
7	18	31	41	48	59	64	73	80	87	96	103	103	103	123	130	130	122	149	161
7	18	31	42	49	60	65	66	80	81	81	88	88	109	124	124	130	122	150	161
7	18	32	42	49	60	61	66	81	81	88	88	109	109	110	110	130	140	150	161
8	19	33	43	50	61	61	66	82	88	88	88	110	110	110	110	130	140	150	161
9	20	33	44	51	62	66	66	83	88	97	104	111	105	105	110	110	125	150	161
9	20	34	44	51	62	66	74	83	89	98	104	105	105	105	110	110	125	150	161
9	20	34	44	51	62	67	74	84	89	98	105	105	105	125	125	125	125	150	162
10	20	34	44	51	62	67	74	84	89	98	105	105	117	125	131	131	141	150	162
11	21	34	44	51	62	67	74	84	89	98	98	98	117	112	113	113	141	150	163
12	21	34	44	51	62	67	74	84	89	89	89	112	112	112	113	135	142	151	164
13	22	34	44	51	62	67	74	74	74	74	74	113	113	113	113	135	143	152	165
14	23	34	44	51	63	68	75	75	75	75	75	75	75	113	113	135	143	153	166
14	23	34	44	44	63	63	63	85	85	85	85	85	75	75	75	136	144	154	167
14	23	34	34	52	52	52	76	76	76	76	76	76	76	76	76	137	145	155	168
14	24	24	24	53	53	53	53	53	53	53	53	53	118	118	132	138	138	156	169
15	25	25	24	24	24	24	24	24	24	99	106	114	114	126	133	139	139	139	139
15	15	35	35	35	35	35	35	35	90	100	107	107	119	127	134	139	139	139	139

شکل ۵-۷ شماره گذاری سلول های با مقیاس بزرگ در مدل افزایش مقیاس

مدل شبیه ساز PUNQS-3، ۱۶۹ سلول با مقیاس بزرگ دارد که اولین سلول آن حاصل افزایش مقیاس ۷ سلول ریز و آخرین سلول آن، بصورت یک سلول ریز مشاهده می شود. پهنای پنجره متغیر در فرایند افزایش مقیاس کاملاً مشهود است. با توجه به شماره گذاری سلول ها و همچنین مدل افزایش مقیاس در شکل ۵-۶، مشخص است که در گوشه جنوب شرقی مدل، سلول ها به علت تغییر پذیری شدید با همدیگر به صورت ریز باقی مانده اند. برعکس در نواحی مرکزی تا شمالی، سلول ها تا حد امکان بزرگ شده اند.

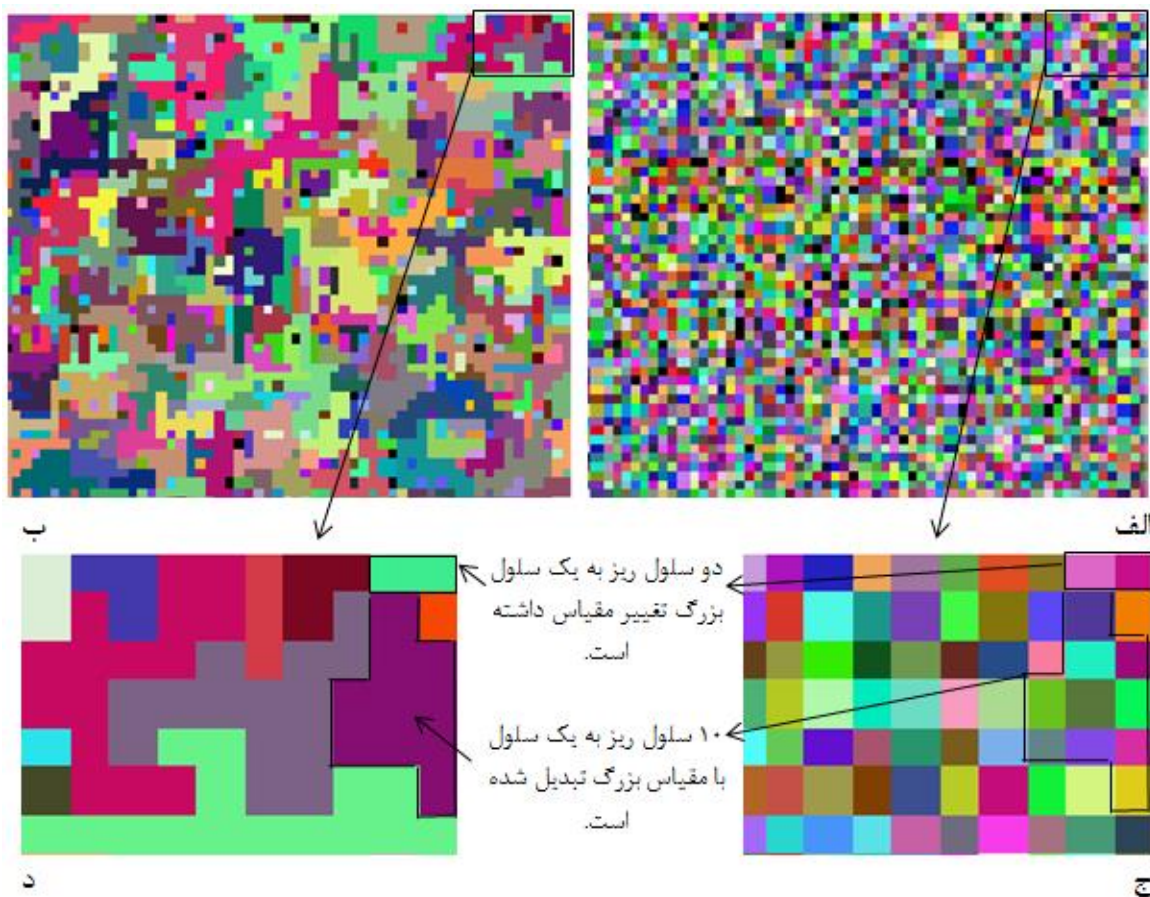
• مدل SPE_10

الگوریتم افزایش مقیاس بر اساس ماتریس فاصله بر روی داده‌های تخلخل مدل SPE-10 (Christie, 1996) انجام شده است. مدل اولیه با مقیاس ریز شامل ۱۳۲۰۰ سلول با گستردگی 60×220 در شبکه دوبعدی است. برای داده‌های ذکر شده ابتدا بردار بهینه پهنای باند بر اساس تغییرپذیری در دو راستای مختلف تعیین شده است. بردار $(0/1454, 0/1365)$ ، پهنای باند بهینه است. در واقع دو داده در راستای x تا زمانی که اختلاف آنها بیشتر از $0/1365$ نباشد، قابلیت درشت‌شدن را خواهند داشت. پارامترهای خروجی الگوریتم افزایش مقیاس، تعداد سلول‌های درشت‌شده و مقدار خطای افزایش مقیاس خواهد بود. به منظور جلوگیری از قرارگرفتن سلول‌های بزرگ در مجاورت با سلول‌های ریز می‌توان با اضافه نمودن یک قید به ابعاد سلول‌های درشت، این موضوع را کنترل نمود. در شبیه‌سازی جریان سیال، ابعاد سلول‌های مجاور نباید از ۲ تا ۳ برابر همدیگر تجاوز نماید. جدول ۵-۲ پارامترهای افزایش مقیاس ویژگی تخلخل را نمایش می‌دهد. طبیعی است هر چه پهنای باند کوچکتر انتخاب شود، مدل افزایش مقیاس شباهت بیشتری به مدل اولیه خواهد داشت و برعکس هرچه پهنای باند بزرگتر انتخاب شود، اطلاعات بیشتری از مدل اولیه حذف خواهد شد. این موضوع در میزان خطای افزایش مقیاس در پهنای باندهای مختلف مشاهده می‌شود.

شکل ۵-۸ مدل اولیه و مدل افزایش مقیاس داده‌ها را نمایش می‌دهد. قسمت الف شکل ۵-۸، مدل ریزمقیاس یا همان مدل اولیه داده‌های تخلخل است. قسمت ب شکل ۵-۸، نمایش مدل افزایش مقیاس بر اساس پهنای باند بهینه و الگوریتم افزایش مقیاس بر مبنای الگوریتم فاصله است. قسمت‌های ج و د شکل ۵-۸، فرم بزرگ شده یک قسمت از شبکه اصلی را نمایش می‌دهد که در این شکل‌ها نحوه افزایش مقیاس سلول‌های ریز به طور واضح مشخص است.

جدول ۵-۲ پارامترهای افزایش مقیاس مدل تخلخل

ویرژگی	تعداد سلول	خطای افزایش مقیاس	واریانس
مدل ریزمقیاس تخلخل	۱۳۲۰۰	۰	۰/۰۰۸۳
مدل بزرگ مقیاس تخلخل با پهنای باند (۰/۱۴۵۴، ۰/۱۳۶۵)	۳۵۹۳	۱۰/۸	۰/۰۰۶۹۳
مدل بزرگ مقیاس تخلخل با پهنای باند (۰/۱۶۵، ۰/۱۴۳)	۲۴۰۹	۴۱/۹۶	۰/۰۰۵۰۵
مدل بزرگ مقیاس تخلخل با پهنای باند (۰/۱۲۲، ۰/۱۰۵)	۴۵۹۳	۴/۶۳	۰/۰۰۷۳



شکل ۵-۸ (الف) مدل اولیه ویرژگی تخلخل، (ب) مدل افزایش مقیاس، (ج) بزرگنمایی مدل اولیه و (د) بزرگنمایی مدل افزایش مقیاس

۵-۲-۲ افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک

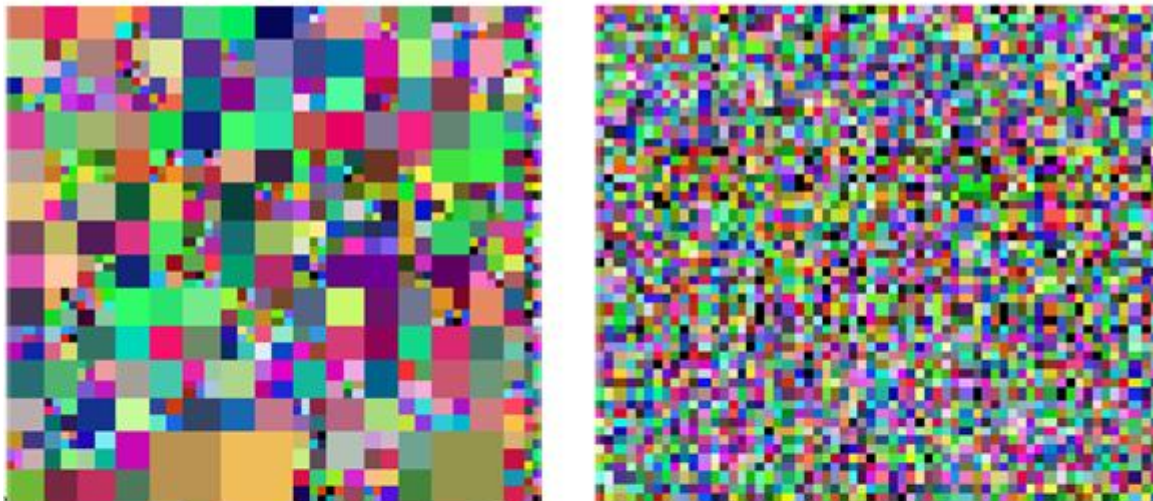
هدف از افزایش مقیاس، ایجاد سلول‌هایی با خواص مشخص برای شبیه‌سازی جریان سیال است. هر روش افزایش مقیاس شامل تعدادی میانگین‌گیری است که در این فرایند، حذف برخی جزئیات در

سلول‌های درشت شده اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی هر چه تعداد متوسط‌گیری کمتر شود، انتظار می‌رود که بخش کمتری از اطلاعات مدل زمین‌شناسی حذف شود. ایده اصلی افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک، کاهش تعداد میانگین‌گیری و نتیجتاً حفظ اطلاعات اصلی و مهم مدل اولیه است. همانطور که قبلاً اشاره شد، افزایش مقیاس با رویکرد تبدیل موجک، بصورت یکنواخت نیست و شبکه به صورت کاملاً هوشمند درشت خواهد شد.

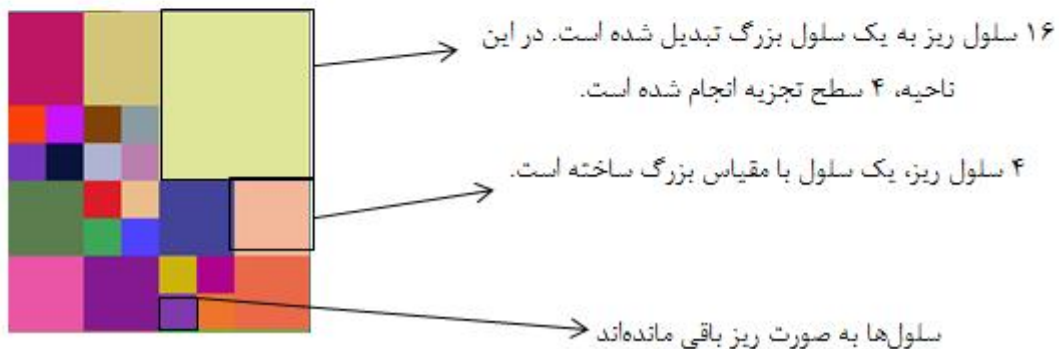
اساس درشت‌سازی در تبدیل موجک مطابق آنچه که در فصل سوم بیان شد، محاسبه ضرایب تقریب و جزئیات است. در هر سطح تجزیه، شبکه با یک عامل ۲، در دو جهت مختصات درشت خواهد شد. در واقع ۴ سلول ریز در صورت داشتن شرط درشت‌سازی، به یک سلول بزرگ تبدیل خواهند شد. نواحی‌ای که در مرحله قبل ریز باقی مانده‌اند، در مراحل بعد نیز بصورت ریز خواهند بود. نکته کلیدی در افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک، تعیین حدود آستانه برای ضرایب تقریب و جزئیات است. هر چقدر این ضرایب آستانه کوچکتر باشند، جزئیات به میزان بیشتری حفظ شده و عمل درشت‌سازی از مناطق دور از ناهمگنی‌ها شروع خواهد شد. علت انتخاب حد آستانه برای ضرایب تقریب، حفظ ساختار ریز شبکه در مناطقی با مقادیر بالای متغیر است که باید برای جلوگیری از حذف اطلاعات مهم، بصورت ریز باقی بماند. در هر مرحله از افزایش مقیاس، سلول‌ها در صورتی درشت خواهند شد که ضرایب جزئیات و تقریب آنها کمتر از حدود آستانه باشد. ضرایب بزرگتر از حدود آستانه، نشان از اهمیت بالای سلول است. حدود آستانه می‌تواند به دو صورت اعمال شود: الف) به صورت ثابت در هر مرحله و ب) بصورت متغیر و کاهشی.

در وهله اول، ضرایب آستانه بصورت ثابت در تمام سطوح تجزیه در نظر گرفته شده است. برای داده‌های مورد مطالعه در این تحقیق، $\varepsilon_d = 90\%$ ، $\varepsilon_s = 90\%$ تعیین شده است. مفهوم این حدود آستانه این است که در هر مرحله، نواحی با ضرایب تقریب کمتر از ۹۰٪ بزرگترین ضریب در آن سطح، که در عین حال ضرایب جزئیات آن نیز کمتر از ۸۰٪ بزرگترین مقدار ضریب جزئیات باشد،

درشت‌سازی خواهند شد. شکل ۵-۹ نتایج حاصل از افزایش مقیاس با حدود آستانه معین را نمایش می‌دهد.



الف

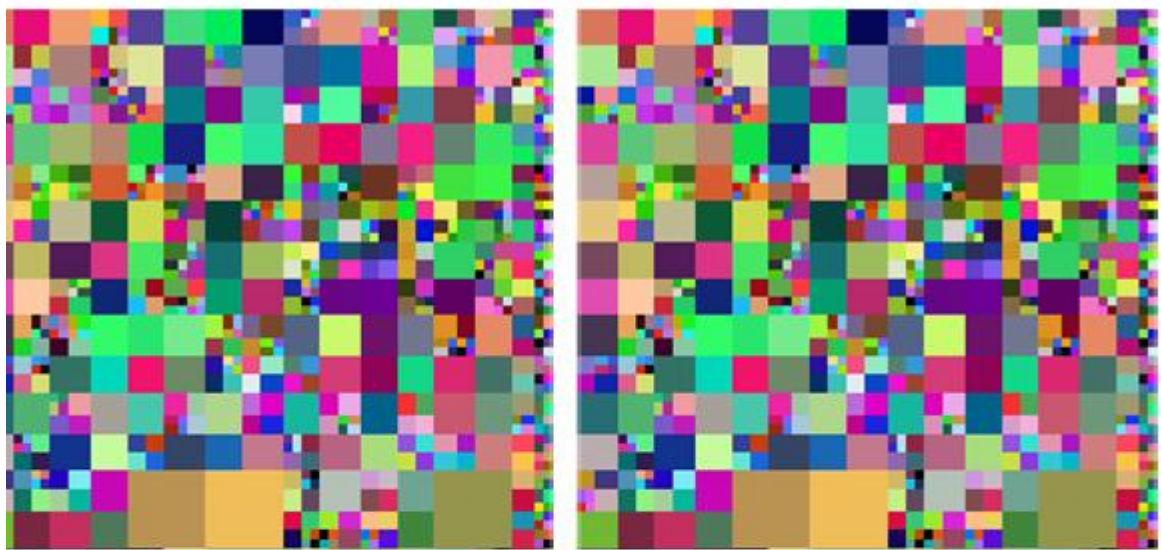


ج

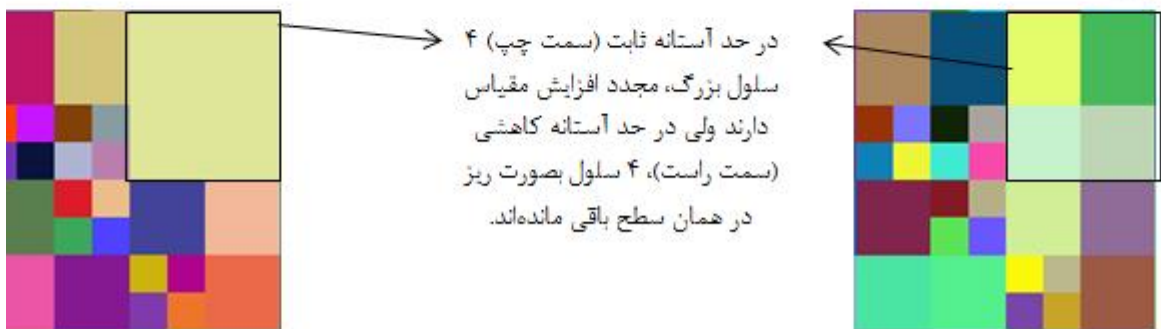
شکل ۵-۹ الف) مدل ریز اولیه ویژگی تخلخل، ب) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه ثابت، ج) بزرگنمایی مدل ریز ود) بزرگنمایی مدل درشت مقیاس

داده‌های اولیه مدل تخلخل SPE-10 پس از افزایش مقیاس با استفاده از تبدیل موجک تا سطح چهارم، مدلی با ۲۸۸۱ سلول درشت شده و خطای افزایش مقیاسی معادل ۸۵ واحد خواهد داشت. مفهوم تجزیه تا سطح ۴ این است که در فرایند افزایش مقیاس، حداکثر ابعاد سلول درشت ۱۶ برابر سلول ریز خواهد بود. برای این که اثرات توزیع ویژگی مورد نظر در مراحل مختلف درشت‌سازی بهتر دیده شود، می‌توان مقادیر آستانه را به صورت کاهشی در سطوح بالاتر تجزیه انتخاب نمود. با کاهش

حدود آستانه در مراحل بالاتر، افزایش مقیاس ناگهانی سلول‌ها کنترل شده و این عمل منجر به عدم قرارگیری سلول‌های کوچک با مقیاس ریز در کنار سلول‌های بسیار بزرگ خواهد شد. شکل ۵-۱۰ نتیجه افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک با حد آستانه کاهشی در ۴ سطح به صورت $\{0.06, 0.07, 0.08, 0.09\}$ را نشان می‌دهد. طبیعی است که در این حالت، تعداد سلول‌های درشت شده بیشتر از حالت حد آستانه ثابت بوده و همچنین خطای ناشی از افزایش مقیاس نیز کمتر باشد.



الف



در حد آستانه ثابت (سمت چپ) ۴ سلول بزرگ، مجدد افزایش مقیاس دارند ولی در حد آستانه کاهشی (سمت راست)، ۴ سلول بصورت ریز در همان سطح باقی مانده‌اند.

ج

شکل ۵-۱۰ الف) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه کاهشی، ب) مدل افزایش مقیاس با حد آستانه ثابت و ج) بزرگنمایی قسمت الف و د) بزرگنمایی قسمت ب

جدول ۵-۳ پارامترهای افزایش مقیاس تخلخل بر اساس تبدیل موجک را نشان می‌دهد. واریانس داده‌ها می‌تواند معیاری از حذف اطلاعات مدل اصلی باشد. در مدل افزایش مقیاس بر اساس حد

آستانه ثابت موجک، واریانس داده‌های تخلخل تا ۰/۰۰۱۵ کاهش می‌یابد. همچنین واریانس داده‌ها در حد آستانه کاهشی تا ۰/۰۰۲۵ کاهش داشته ولی نسبت به حد آستانه ثابت، نتیجه بهتری ارائه می‌دهد. خطای افزایش مقیاس در دو حالت نیز موید این موضوع است.

جدول ۵-۳ پارامترهای افزایش مقیاس مدل تخلخل بر اساس تبدیل موجک

مدل	تعداد سلول	خطای افزایش مقیاس	واریانس
مدل ریزمقیاس تخلخل	۱۳۲۰۰	۰	۰/۰۰۸۳
مدل افزایش مقیاس تخلخل با حد آستانه ثابت	۲۸۸۱	۸۵	۰/۰۰۱۵
مدل افزایش مقیاس تخلخل با حد آستانه کاهشی	۳۵۸۸	۷۹	۰/۰۰۲۵

۵-۳ افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی مخزن هیدروکربوری در دو بعد

در قسمت ۵-۲، افزایش مقیاس دوبعدی برای یک ویژگی مخزن هیدروکربوری با دو روش تبدیل موجک و پنچره با پهنای متغیر بررسی شد. هدف این بخش، افزایش مقیاس دو ویژگی مخزن و بطور خاص ویژگی‌های تخلخل و تراوایی، بطور هم‌زمان در دو بعد است. به این منظور، داده‌های تخلخل و تراوایی مدل SPE-10 به ترتیب به عنوان ویژگی اول و ویژگی دوم در نظر گرفته شده است. بر اساس الگوریتم تعریف شده، هدف از افزایش مقیاس دو ویژگی به طور هم‌زمان (SUTF)، ارائه یک مدل افزایش مقیاس یکسان، برای هر دو ویژگی تخلخل و تراوایی است. مدل SUTF مدلی شبیه‌ساز با تعداد یکسان سلول برای هر کدام از ویژگی‌های تخلخل و تراوایی است که تنها تفاوت آنها در مقادیر سلول‌ها است. در ادامه این مبحث، ابتدا نتایج افزایش مقیاس ویژگی‌های مخزن در دو بعد بر اساس پنچره با پهنای متغیر و تبدیل موجک بررسی می‌شود و سپس نتایج حاصل از دو روش با همدیگر مقایسه خواهند شد.

۵-۳-۱ افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی بر اساس پنجره با پهنای متغیر

به منظور افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی در دو بعد، ابتدا بایستی بردار پهنای باند بهینه برای ویژگی‌های تخلخل و تراوایی تعیین شود. بر اساس آنچه قبلاً گفته شد، بردار پهنای باند بهینه برای ویژگی‌های تخلخل و تراوایی به ترتیب $(0/1454, 0/1365)$ و $(322, 311)$ است. با توجه به اینکه توزیع تغییرپذیری دو ویژگی متفاوت است و ممکن است در یک ناحیه تغییرپذیری تراوایی همگن باشد ولی تخلخل رفتاری ناهمگن داشته باشد، مدل شبیه‌ساز باید به گونه‌ای رفتار کند که؛ از یک طرف اطلاعات مهم ویژگی تخلخل از بین نرود و از طرفی، اطلاعات اضافی ویژگی تراوایی به مدل تحمیل نشود. در این تحقیق دو ایده کلی برای محاسبه مدل SUTF استفاده شده که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

۵-۳-۱-۱ تعیین مدل افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی (SUTF) بر اساس خطای افزایش

مقیاس

در این رویکرد، ابتدا مدل افزایش مقیاس هر کدام از ویژگی‌ها بطور جداگانه بر اساس پهنای باند بهینه، محاسبه می‌شود. در وهله اول این دو مدل کاملاً متفاوت‌اند؛ چه از نظر تعداد سلول‌ها و چه از نظر خطای افزایش مقیاس. هدف از افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی، تعیین یک مدل بهینه است که در آن بتوان به ازای هر سلول درشت، یک مقدار تخلخل و یک مقدار تراوایی به آن نسبت داد. یعنی مدلی که به ازای هر ویژگی، تعداد سلول یکسان داشته و موقعیت مکانی سلول‌ها چه با مقیاس ریز و چه با مقیاس درشت در ویژگی‌ها یکسان باشد. ساده‌ترین رویکرد در تعیین مدل نهایی، محاسبه خطای افزایش مقیاس است. پس از محاسبه مدل افزایش مقیاس برای هر کدام از ویژگی‌ها، دو مدل با مقیاس بزرگ برای تخلخل و تراوایی در دسترس خواهد بود. فرض کنید برای ویژگی تخلخل، مدل ۱ با خطای افزایش مقیاس $SSE_{porosity}$ و برای ویژگی تراوایی، مدل ۲ با خطای $SSE_{permeability}$ به دست آمده است. اکنون می‌توان، مدل افزایش مقیاس داده‌های اولیه تراوایی را، به ازای شبکه مدل ۱ و همچنین مدل افزایش مقیاس داده‌های تخلخل را، به ازای شبکه مدل ۲ محاسبه و خطای افزایش

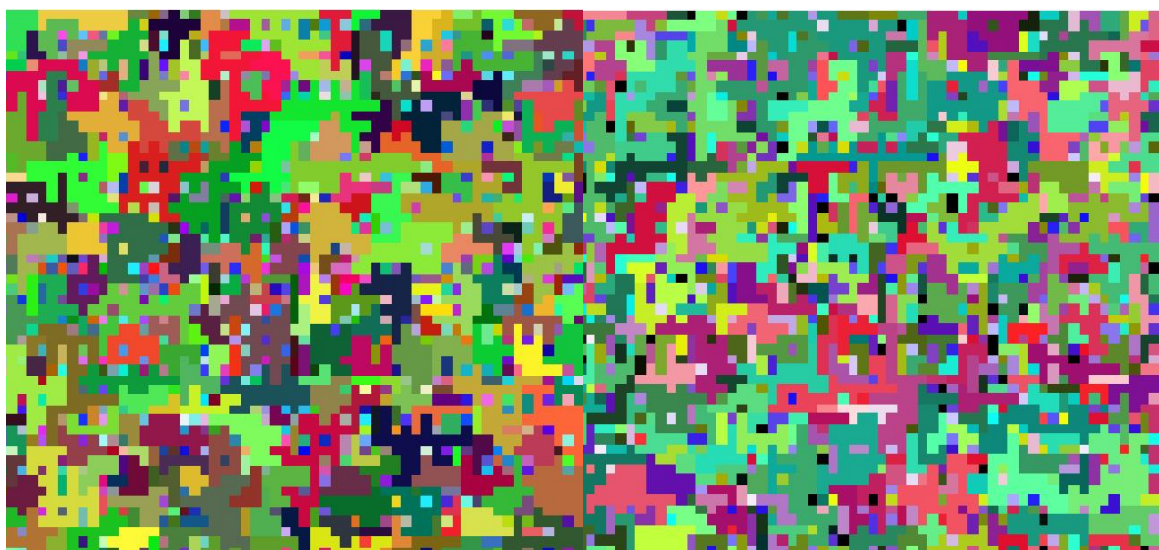
مقیاس را مجدداً به دست آورد. اکنون خطای افزایش مقیاس داده‌های تخلخل روی مدل تراوایی بصورت $SSE_{porosity/permeability}$ و خطای افزایش مقیاس داده‌های تراوایی بر روی مدل تخلخل به صورت $SSE_{permeability/porosity}$ در نظر گرفته می‌شود. سپس با محاسبه نسبت خطاها می‌توان مدل مطلوب را تعیین نمود. با ایجاد رابطه ۵-۱، اگر این رابطه برقرار باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل ۱، مدلی مناسب برای هر دو ویژگی خواهد بود و بعنوان SUTF معرفی خواهد شد، در غیر این صورت مدل ۲ به عنوان مدل SUTF برای هر دو ویژگی در نظر گرفته می‌شود. طبیعی است که همواره $SSE_{porosity/permeability}$ بزرگتر از $SSE_{porosity}$ و همچنین $SSE_{permeability/porosity}$ بزرگتر از $SSE_{permeability}$ خواهد بود.

$$\frac{SSE_{porosity}}{SSE_{porosity/permeability}} < \frac{SSE_{permeability}}{SSE_{permeability/porosity}} \quad (۵-۱)$$

بر اساس پهنای باند بهینه ویژگی‌ها، مدل افزایش مقیاس هر ویژگی به طور جداگانه محاسبه شده که در شکل ۵-۱۱ نمایش داده شده است. اکنون برای تعیین مدل SUTF، مدل تخلخل بر روی شبکه تراوایی و مدل تراوایی بر روی شبکه تخلخل محاسبه شده و برای تعیین مدل مطلوب از رابطه ۵-۱ استفاده می‌شود. در داده‌های مورد بررسی با توجه به رابطه ۵-۱، مدل تراوایی به عنوان مدل SUTF انتخاب شده است. بنابراین کافی است که داده‌های اولیه ویژگی تخلخل بر اساس مدل افزایش مقیاس ویژگی تراوایی محاسبه گردد که به عنوان مدل SUTF تخلخل شناخته می‌شود. نتایج مدل SUTF ویژگی‌ها در شکل ۵-۱۲ نمایش داده شده است. جدول ۵-۴ پارامترهای افزایش مقیاس برای تعیین مدل SUTF بر اساس روش خطای افزایش مقیاس نشان می‌دهد. همان‌طور که از روی شکل ۵-۱۱ مشخص است، مدل‌های افزایش مقیاس تک‌ویژگی داده‌ها کاملاً متفاوت‌اند و ابعاد سلول‌های درشت و همچنین تعداد آنها در دو ویژگی هیچ‌گونه سازگاری با همدیگر ندارند. پس از تعیین مدل SUTF در شکل ۵-۱۲ مشاهده می‌شود که مدل‌ها از نظر تعداد سلول و همچنین جانمایی سلول‌های بزرگ و ریز کاملاً مشابه یکدیگر هستند. تنها تفاوت مدل‌های SUTF تخلخل و تراوایی در مقدار کمیت سلول‌ها است.

جدول ۴-۵ پارامترهای افزایش مقیاس در تعیین مدل SUTF بر اساس خطای افزایش مقیاس

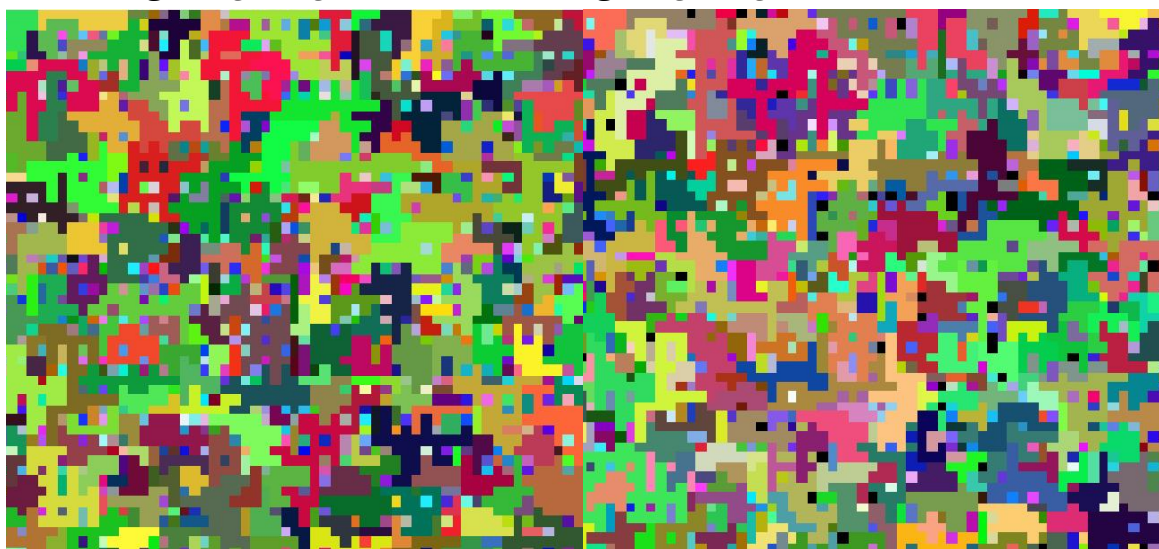
مدل	تعداد سلول	SSE	واریانس داده‌ها
مدل ریز ویژگی تخلخل	۱۳۲۰۰	۰	۰/۰۰۸۳
مدل ریز ویژگی تراوایی	۱۳۲۰۰	۰	$10^6 \times 1/5340$
مدل بزرگ مقیاس ویژگی تخلخل	۳۵۹۳	۱۰/۸	۰/۰۰۶۳۹
مدل بزرگ مقیاس ویژگی تراوایی	۳۴۲۷	$10^7 \times 3/01$	$10^6 \times 1/5300$
مدل SUTF ویژگی تخلخل	۳۴۲۷	۶۲/۸۹	۰/۰۰۵۳
مدل SUTF ویژگی تراوایی	۳۴۲۷	$10^7 \times 3/01$	$10^6 \times 1/5300$



ب

الف

شکل ۵-۱۱ الف) مدل افزایش مقیاس ویژگی تخلخل و ب) مدل افزایش مقیاس تراوایی



ب

الف

شکل ۵-۱۲ الف) مدل SUTF ویژگی تخلخل و ب) مدل SUTF ویژگی تراوایی

۵-۳-۱-۲ تعیین مدل افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی (SUTF) بر اساس حداقل و حداکثر

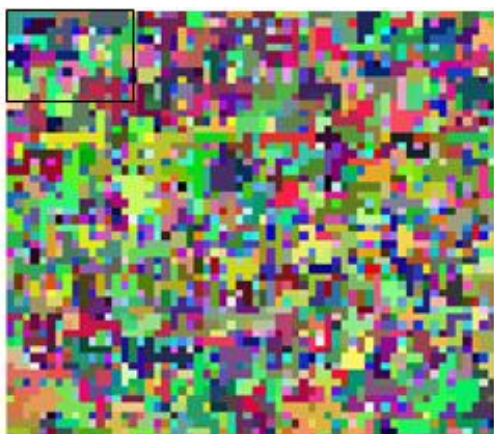
پهنای باند

در این روش، برای تعیین مدل SUTF، مدل‌های افزایش مقیاس ویژگی تخلخل و ویژگی تراوایی مستقیماً مقایسه می‌شوند. این روش دو رویکرد متفاوت خواهد داشت. مشابه آنچه که در حالت افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی در یک‌بعد در فصل چهارم انجام شد، برای حالت دوبعدی نیز قابل تعمیم خواهد بود. در رویکرد حداقل پهنای باند، دو مدل افزایش مقیاس دو ویژگی با همدیگر مقایسه می‌شوند و بسته به نحوه درشت شدن سلول‌ها، کوچکترین بعد سلول درشت شده به عنوان گام افزایش مقیاس در نظر گرفته خواهد شد. بعنوان مثال فرض کنید که در راستای x ، در مدل تراوایی تعداد ۳ سلول و برای مدل تخلخل، تعداد ۸ سلول با همدیگر ادغام شده باشند. بنابراین بر اساس رویکرد کمینه پهنای باند، تعداد ۳ بعنوان پهنای باند یا ابعاد سلول درشت شده در راستای x برای مدل SUTF در نظر گرفته خواهد شد. این فرایند در جهت y نیز روندی مشابه خواهد داشت. در نهایت مدل به دست آمده از این روش، اشتراک دو مدل تراوایی و تخلخل خواهد بود. در واقع با جستجو در دو مدل، پنجره با پهنای کوچکتر انتخاب می‌شود و بر اساس این پنجره، مدل افزایش مقیاس همزمان ویژگی‌ها به دست می‌آید. طبیعی است که تعداد سلول مدل افزایش مقیاس همزمان، از تعداد سلول مدل‌های افزایش مقیاس تک‌ویژگی بیشتر خواهد بود. پس از تعیین مدل SUTF، داده‌های تخلخل و تراوایی به ازای سلول‌های بزرگ مقیاس موجود در مدل نهایی محاسبه خواهند شد. بنابراین در نهایت، یک مدل افزایش مقیاس یکسان بر اساس رویکرد کمینه پهنای باند و ساخت پنجره با پهنای متغیر، به ازای هر دو ویژگی محاسبه خواهد شد. انتظار می‌رود خطای هر ویژگی به ازای مدل نهایی SUTF، متفاوت از مدل اولیه افزایش مقیاس باشد و بطور خاص کمتر از شرایط تک‌ویژگی باشد. مدل SUTF، یک مدل یکسان برای ویژگی‌های تخلخل و تراوایی است که تفاوت آن برای دو ویژگی، فقط مقادیر سلول‌ها است و گرنه ابعاد و مکان سلول‌های درشت شده برای هر دو ویژگی یکسان خواهد بود. نتایج مدل SUTF در جدول ۵-۵ نمایش داده شده است.

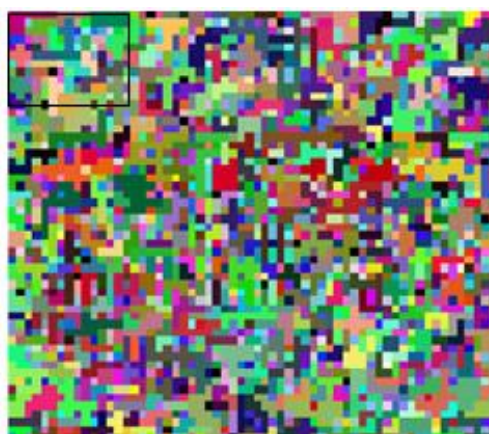
جدول ۵-۵ پارامترهای افزایش مقیاس در رویکرد حداقل پهنای باند

مدل	تعداد سلول	SSE	واریانس داده‌ها
مدل ریز ویژگی تخلخل	۱۳۲۰۰	۰	۰/۰۰۸۳
مدل ریز ویژگی تراوایی	۱۳۲۰۰	۰	$۱۰^۶ \times ۱/۵۳۴۰$
مدل بزرگ مقیاس ویژگی تخلخل	۳۵۹۳	۱۰/۸	۰/۰۰۶۳۹
مدل بزرگ مقیاس ویژگی تراوایی	۳۴۲۷	$۱۰^۷ \times ۳/۰۱$	$۱۰^۶ \times ۱/۵۳۰۰$
مدل SUTF ویژگی تخلخل	۵۳۴۲	۴/۹۶	۰/۰۰۶۸
مدل SUTF ویژگی تراوایی	۵۳۴۲	$۱۰^۷ \times ۶/۱۴$	$۱۰^۶ \times ۱/۵۳۱۹$

مدل SUTF به دست آمده برای ویژگی‌های تخلخل و تراوایی، ۵۳۴۲ سلول با مقیاس بزرگ دارد. در افزایش مقیاس دو ویژگی به طور هم‌زمان، مدل SUTF با این تعداد سلول با مقیاس بزرگ، بهترین مدل برای نمایش تغییرپذیری هم‌زمان دو ویژگی مخزن است که بیشترین همخوانی را با مدل ریز مقیاس ویژگی‌ها دارد. طبیعی است که تعداد سلول مدل SUTF بیشتر از مدل‌های تک‌ویژگی باشد؛ چرا که بسته به تعیین حداقل پهنای پنجره، بعضی از سلول‌های مدل تک‌ویژگی شکسته خواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود که خطای ناشی از این افزایش مقیاس نیز نسبت به افزایش مقیاس تک‌ویژگی کاهش می‌یابد. شکل ۵-۱۳ نتایج افزایش مقیاس و مدل SUTF بر اساس رویکرد حداقل پهنای باند را نشان می‌دهد. همان‌طور که در قسمت بزرگ شده مدل‌ها مشخص است، افزایش مقیاس به صورت کاملاً غیریکنواخت و بدون هیچ نظم‌ی انجام شده است. مشاهده می‌شود که دو مدل در این نواحی کاملاً یکسان و تنها تفاوت در نوع ویژگی و مقدار سلول است. پهنای پنجره‌ها در نواحی مختلف، متفاوت است.



ب



الف



ج

108	108	108	108	108	108	21.5	21.5
108	108	3977	2.32	2.32	2.32	21.5	80
108	108	2.32	2.32	2.32	50.1	80	80
1831	1831	2656	158	158	50.1	0.34	80
710	53.2	604	0.61	158	50.1	50.1	80
53.2	53.2	53.2	140	140	140	49.9	49.9
2317	53.2	5273	16.3	16.3	16.3	79	175

ه



پ

0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18
0.19	0.19	0.35	0.08	0.08	0.08	0.18	0.24
0.19	0.19	0.08	0.08	0.08	0.18	0.24	0.24
0.32	0.32	0.31	0.22	0.22	0.18	0.02	0.24
0.29	0.17	0.25	0.04	0.22	0.18	0.18	0.24
0.17	0.17	0.17	0.21	0.21	0.21	0.19	0.19
0.31	0.17	0.38	0.18	0.18	0.18	0.24	0.27

ز

شکل ۵-۱۳ الف) مدل SUTF تخلخل، ب) مدل SUTF تراوایی، پ) بزرگنمایی قسمتی از مدل تخلخل، ج) بزرگنمایی قسمتی از مدل تراوایی، ز) تغییرپذیری داده‌های قسمت پ و ه) تغییرپذیری داده‌های قسمت ج

در رویکرد حداکثر پهنای باند، تعداد سلول بزرگتر و یا پهنای باند بزرگتر ملاک انتخاب مدل SUTF خواهد بود. بنابراین در این حالت، پنجره با پهنای بزرگتر انتخاب می‌شود. به لحاظ آماری در هر ناحیه، اجتماع دو مدل بعنوان سلول درشت شده برگزیده خواهد شد. جدول ۵-۶ پارامترهای افزایش مقیاس مدل SUTF در رویکرد حداکثر پهنای باند را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۶ پارامترهای افزایش مقیاس در رویکرد حداکثر پهنای باند

مدل	تعداد سلول	SSE	واریانس داده‌ها
مدل ریز ویژگی تخلخل	۱۳۲۰۰	۰	۰/۰۰۸۳
مدل ریز ویژگی تراوایی	۱۳۲۰۰	۰	$۱۰^6 \times ۱/۵۳۴۰$
مدل بزرگ مقیاس ویژگی تخلخل	۳۵۹۳	۱۰/۸	۰/۰۰۶۳۹
مدل بزرگ مقیاس ویژگی تراوایی	۳۴۲۷	$۱۰^7 \times ۳/۱$	$۱۰^6 \times ۱/۵۳۰۰$
مدل SUTF ویژگی تخلخل	۲۴۴۸	۴۴/۶	۰/۰۰۵۳
مدل SUTF ویژگی تراوایی	۲۴۴۸	$۱۰^9 \times ۹/۰۹$	$۱۰^5 \times ۸/۴۶۰۴$

با توجه به اینکه تعداد سلول مدل SUTF کمتر از مدل‌های تک‌ویژگی است، این موضوع باعث افزایش خطای محاسباتی می‌شود. مشاهده می‌شود که خطای افزایش مقیاس برای تخلخل از ۱۰/۸ به ۴۴/۶ و همچنین خطای افزایش مقیاس ویژگی تراوایی از $۱۰^7 \times ۳/۱$ به $۱۰^9 \times ۹/۰۹$ افزایش یافته است. نتایج افزایش مقیاس بر اساس این رویکرد در شکل ۵-۱۴ نمایش داده شده است.



ب



الف



د



ج

شکل ۵-۱۴ (الف) مدل SUTF ویژگی تخلخل، (ب) مدل SUTF ویژگی تراوایی، (ج) بزرگنمایی قسمتی از مدل تخلخل، (د) بزرگنمایی قسمتی از مدل تراوایی

بنا به آنچه گفته شد، مدل SUTF با رویکرد حداقل و حداکثر پهنای پنجره، بترتیب ۵۳۴۲ و ۲۴۴۸ سلول با مقیاس بزرگ دارد. خطای افزایش مقیاس در رویکرد حداکثر پهنای باند افزایش می‌یابد چرا که تعداد و عمل میانگین‌گیری سلول‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. این مسئله به وضوح در قسمت بزرگ شده شکل ۵-۱۴ دیده می‌شود. در یک ناحیه با تعداد 8×8 سلول ریز، با استفاده از رویکرد حداقل پهنای باند و حداکثر پهنای باند، ۴۰ و ۱۸ سلول درشت شده، نتیجه افزایش مقیاس بوده است که به ترتیب ۶۲ و ۲۸ درصد مدل ریز حفظ شده است. طبیعی است که در این حالت خطای ناشی از افزایش مقیاس بیشتر خواهد شد.

۵-۳-۱ افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی بر اساس تبدیل موجک

افزایش مقیاس دو ویژگی به طور هم‌زمان در ادبیات موجک وجود ندارد و تاکنون در این زمینه مطلبی مشاهده نشده است. مشابه آنچه در روش پنجره با پهنای متغیر بیان شد، می‌توان در تبدیل موجک نیز استفاده نمود، با این تفاوت که مدل افزایش مقیاس برای ویژگی‌ها، بر اساس روش تبدیل موجک بدست آمده است. مدل افزایش مقیاس تخلخل بر مبنای موجک، ۲۸۸۱ سلول دارد که خطای افزایش مقیاس آن معادل ۸۵ واحد است. همچنین مدل شبیه‌ساز برای تراوایی، شامل ۱۲۱۸ سلول درشت است که خطای ناشی از این افزایش مقیاس $1/72 \times 10^4$ است. مدل SUTF با رویکرد حداقل پهنای باند مشابه آنچه در مورد روش قبل بیان شد، با ورودی‌های مشخص، در شکل ۵-۱۵ نمایش داده شده است. جدول ۵-۷ نیز پارامترهای افزایش مقیاس مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. مدل SUTF ویژگی‌های مخرن بر اساس تبدیل موجک، ۳۰۰۵ سلول با مقیاس بزرگ دارد که تنها ۲۲ درصد از داده‌های اولیه را شامل می‌شود. خطای افزایش مقیاس مدل SUTF برای هر دو ویژگی کمتر از حالت افزایش مقیاس تک‌ویژگی‌ها است و دلیل آن افزایش تعداد سلول‌های درشت شده در مدل افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی است. این موضوع در مقایسه واریانس داده‌ها نیز مشهود است.

جدول ۵-۷ پارامترهای افزایش مقیاس بر مبنای موجک در رویکرد کمینه پهنای باند

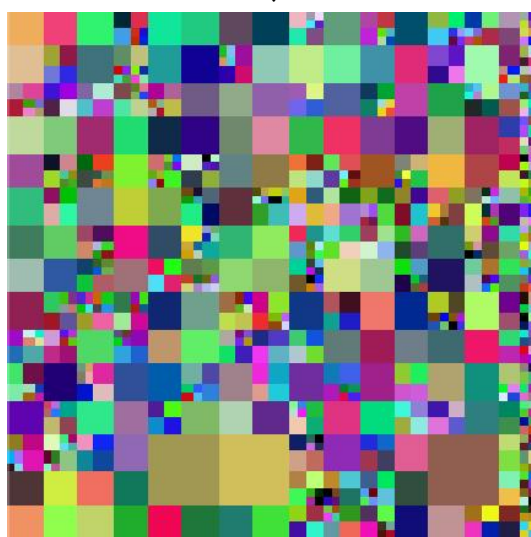
مدل	تعداد سلول	SSE	واریانس داده‌ها
مدل ریزمقیاس ویژگی تخلخل	۱۳۲۰۰	۰	۰/۰۰۸۳
مدل ریزمقیاس ویژگی تراوایی	۱۳۲۰۰	۰	$۱۰^6 \times ۱/۵۳$
مدل بزرگ مقیاس ویژگی تخلخل	۲۸۸۱	۸۵	۰/۰۰۲
مدل بزرگ مقیاس ویژگی تراوایی	۱۲۸۱	$۱۰^{۱۰} \times ۱/۷۲$	$۱۰^۵ \times ۳/۳۹$
مدل SUTF ویژگی تخلخل	۳۰۰۵	۸۴	۰/۰۰۲۳
مدل SUTF ویژگی تراوایی	۳۰۰۵	$۱۰^{۱۰} \times ۱/۵۹$	$۱۰^۵ \times ۱/۹۳$



ب



الف



د



ج

شکل ۵-۱۵ افزایش مقیاس همزمان دو ویژگی بر اساس تبدیل موجک، الف) افزایش مقیاس تخلخل، ب) افزایش مقیاس تراوایی، ج) مدل SUTF تخلخل و د) مدل SUTF تراوایی

مدل بزرگ مقیاس ویژگی تراوایی و مدل SUTF آن بسیار متفاوت‌اند. این تفاوت در اختلاف SSE و واریانس داده‌ها نیز دیده می‌شود. برعکس، مدل‌های بزرگ مقیاس ویژگی تخلخل و SUFT آن شباهت بیشتری به همدیگر دارند.

۴-۵ مقایسه نتایج دو روش

در این بخش، نتایج افزایش مقیاس حاصل از دو روش پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک مقایسه خواهد شد. هدف از مقایسه نتایج، بررسی کارایی روش پنجره با پهنای متغیر در مقابل روش شناخته شده موجک در زمینه افزایش مقیاس است. نتایج افزایش مقیاس بر اساس هر کدام از روش‌ها و برای ویژگی‌های تخلخل و تراوایی در قسمت‌های قبل آورده شده است. ملاک مقایسه دو روش، خطای افزایش مقیاس و واریانس مدل‌ها است. به این ترتیب که در شرایط یکسان، هر روشی که خطای افزایش مقیاس کمتری داشته باشد، روشی قوی‌تر خواهد بود. منظور از شرایط یکسان، تعداد برابر سلول‌های افزایش مقیاس یا همان تعداد سلول‌های درشت مدل شبیه‌ساز خواهد بود. با توجه به تفاوت الگوریتم در دو روش، به طور قطع مدلی یکسان به دست نخواهد آمد. بر اساس آنچه بیان شد، هیچ ایده‌ای از تعداد سلول‌های درشت شده در روش تبدیل موجک وجود ندارد ولی در روش پنجره با پهنای متغیر، این امکان وجود دارد که با تعیین تعداد سلول، فرایند افزایش مقیاس انجام شود. در روش پنجره با پهنای متغیر، چون افزایش مقیاس بر اساس فاصله سلول‌ها انجام می‌شود، هیچ تردیدی وجود ندارد که قبل از توقف الگوریتم، تمامی سلول‌هایی که شرایط افزایش مقیاس را دارند، تغییر مقیاس داشته و بزرگ شده‌اند. بنابراین در هر لحظه از توقف الگوریتم با هر تعداد سلولی، این تضمین وجود دارد که هیچ سلولی با تغییرپذیری شدید و متمایز از همسایگی خود، افزایش مقیاس نیابد و این خود تضمینی بر حفظ اطلاعات مهم مدل اولیه است.

جدول ۵-۸ پارامترهای افزایش مقیاس ویژگی‌های تخلخل و تراوایی مدل SPE-10 با دو روش پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک را نشان می‌دهد. مدل افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک،

همان مدلی است که بر اساس حدود آستانه ثابت در مرحله قبل بدست آمده است. این مدل با ۲۸۸۱ سلول درشت شده، خطای افزایش مقیاسی معادل ۸۵ واحد دارد. برای مقایسه این مدل با نتیجه افزایش مقیاس بر اساس روش پنچره با پهنای متغیر، کافی است پهنای باند متناظر با این تعداد سلول را انتخاب و مدل افزایش مقیاس برای ویژگی مورد نظر را محاسبه نمود. الگوریتم افزایش مقیاس بر اساس پنچره با پهنای متغیر این قابلیت را دارد که با اعمال قید سلول درشت شده، فرایند افزایش مقیاس را خاتمه دهد و مدل شبیه‌ساز را ارائه نماید.

در افزایش مقیاس تخلخل و تراوایی در حالت تک‌ویژگی، خطای افزایش مقیاس در روش پنچره با پهنای متغیر نسبت به تبدیل موجک در هر دو ویژگی کاهش یافته است. واریانس داده‌ها در روش پنچره با پهنای متغیر به مراتب بیشتر از روش تبدیل موجک در تمامی حالت‌ها است، که نشان از حفظ اطلاعات بیشتر مدل اولیه مخزن است. واریانس داده‌ها در مدل افزایش مقیاس بر اساس پنچره با پهنای متغیر حدود ۳ برابر واریانس داده‌ها در مدل افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که مدل افزایش مقیاس بر اساس پنچره با پهنای متغیر شباهت بیشتری به مدل اولیه دارد و توانسته با تعداد سلول بسیار کمتر، بیشترین تغییرپذیری و واریانس داده‌ها را حفظ نماید.

جدول ۵-۸ مقایسه نتایج افزایش مقیاس دو روش

روش	مدل	تعداد سلول	SSE	واریانس
پنچره با پهنای متغیر	مدل تخلخل	۲۸۸۱	۳۰/۵۱	۰/۰۰۵۹
	مدل تراوایی	۱۲۱۸	$۱۰^{-۸} \times ۲/۶$	$۱۰^{-۶} \times ۱/۰۲$
	مدل SUTF تخلخل	۵۳۴۲	۴/۹۶	۰/۰۰۶۸
	مدل SUTF تراوایی	۵۳۴۲	$۱۰^{-۷} \times ۶/۱$	$۱۰^{-۶} \times ۱/۵۳$
تبدیل موجک	مدل تخلخل	۲۸۸۱	۸۵	۰/۰۰۰۲
	مدل تراوایی	۱۲۱۸	$۱۰^{-۱۰} \times ۱/۷۲$	$۱۰^{-۵} \times ۳/۳۹$
	مدل SUTF تخلخل	۳۰۰۵	۸۴	۰/۰۰۲۳
	مدل SUTF تراوایی	۳۰۰۵	$۱۰^{-۱۰} \times ۱/۵۹$	$۱۰^{-۵} \times ۱/۹۳$

در حالت افزایش مقیاس دو ویژگی به طور همزمان نیز می‌توان نتایج حاصل از دو روش را بر اساس خطای افزایش مقیاس مقایسه نمود. مدل SUTF برای دو ویژگی با رویکرد حداقل پهنای باند و بر اساس تبدیل موجک، شامل 30.05 سلول درشت شده است که خطای افزایش مقیاس در این مدل برای ویژگی تخلخل 84 و برای تراوایی $1/59 \times 10^{-1}$ محاسبه شده است. همچنین مدل شبیه‌ساز به دست آمده بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر دارای 5342 سلول بزرگ مقیاس است که خطای افزایش مقیاس برای ویژگی تخلخل برابر با $41/96$ واحد و برای ویژگی تراوایی برابر با $1/6 \times 10^{-7}$ واحد می‌باشد. واضح است که خطای افزایش مقیاس روش پنجره با پهنای متغیر چه در حالت تک‌ویژگی و چه در حالت دو ویژگی به طور همزمان کمتر از روش تبدیل موجک است. دلیل این تفاوت، اساس الگوریتم است که بر مبنای تغییرپذیری داده‌ها طراحی شده است.

۵-۵ جمع‌بندی

در این فصل، افزایش مقیاس دوبعدی ویژگی‌های مخزن به صورت جداگانه و همچنین همزمان بر اساس دو روش پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک بررسی شد. نتایج روش پنجره با پهنای متغیر، به تعیین بهینه پهنای باند و نتایج تبدیل موجک به تعیین حد آستانه مناسب برای ضرایب تقریب و جزئیات وابسته است. تفاوت دو روش، در نحوه بزرگ کردن سلول‌ها است. الگوریتم افزایش مقیاس در روش پنجره با پهنای متغیر، بر اساس ماتریس فاصله سلول‌ها طراحی شده است. به این ترتیب که فرایند افزایش مقیاس از کوچکترین درایه ماتریس فاصله شروع و به درایه کوچک بعدی منتقل می‌شود. با این رویکرد، نقطه شروع و جهت حرکت الگوریتم کاملاً روشن خواهد بود. کوچکترین درایه ماتریس فاصله، فاصله بین دو سلول با بیشترین میزان تشابه است. هدف از افزایش مقیاس نیز شناسایی همین سلول‌ها و ادغام آنهاست. در این شرایط دو سلول با همدیگر ادغام شده و یک سلول بزرگ را ایجاد می‌کنند. سپس ماتریس فاصله مجدد محاسبه شده و کوچکترین درایه ماتریس تعیین خواهد شد. عملیات تکرارشدنی است. شرط توقف الگوریتم، پهنای باند است. پهنای باند نیز دقیقاً بر

اساس تغییرپذیری سلول‌ها محاسبه شده است. با این روش، افزایش مقیاس از نواحی همگن شروع خواهد شد و به تدریج و با افزایش مقیاس سلول‌های مشابه، به نواحی با تغییرپذیری شدید خواهد رسید. مدل افزایش مقیاس هر کدام از ویژگی‌های مورد بررسی بطور جداگانه بر اساس پهنای باند بهینه محاسبه شده است، لذا مدل نیز بهینه خواهد بود. منظور از مدل بهینه، مدلی است که بیشترین شباهت را با مدل اولیه داشته باشد و تغییرپذیری آن را مدیریت کند.

در افزایش مقیاس دو ویژگی به طور هم‌زمان، تعیین مدل SUTF بر اساس مدل‌های افزایش مقیاس هر کدام از ویژگی‌ها است. برای تعیین مدل SUTF از دو رویکرد حداقل و حداکثر پهنای باند که منجر به ساخت حداقل و حداکثر پهنای پنجره می‌شود، استفاده شده است. در رویکرد حداقل پهنای باند، اشتراک دو مدل افزایش مقیاس برای ویژگی‌های تداخل و تراوایی، مدل SUTF خواهد بود. طبیعی است که تعداد سلول در این مدل بیشتر از سلول‌های افزایش مقیاس ویژگی‌ها بطور جداگانه است. در رویکرد حداکثر پهنای باند اجتماع دو مدل افزایش مقیاس ویژگی‌ها به عنوان مدل SUTF معرفی شده است. افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند و فقط تابع تغییرپذیری سلول است ولی در روش تبدیل موجک، افزایش مقیاس به صوت دودویی انجام می‌شود هرچند فرایند افزایش مقیاس به صورت هوشمند و غیریکنواخت است. در این روش پس از محاسبه ضرایب تقریب و جزئیات و همچنین حدود آستانه، چنانچه ضرایب مقیاس و جزئیات سلول‌ها کمتر از حدود آستانه تعریف شده باشد، سلول‌ها با همدیگر ادغام خواهند شد ولی بر اساس یک الگوی منظم. در دو بعد، ۴ سلول بر اساس حد آستانه معین، یا ترکیب می‌شوند و یا به صورت ریز باقی می‌مانند.

در این فصل افزایش مقیاس یک ویژگی در دو بعد و سپس دو ویژگی به طور هم‌زمان در دو بعد انجام شده و نتایج حاصل از دو روش مقایسه شده‌اند. در هر دو حالت و برای هر کدام از ویژگی‌ها، خطای افزایش مقیاس و واریانس مدل‌ها با همدیگر مقایسه شده‌اند. واریانس داده‌ها در مدل‌های

افزایش مقیاس بر اساس تبدیل موجک به طور مشهودی کمتر از روش پنجره با پهنای متغیر است. در واقع مدل‌های افزایش مقیاس به دست آمده بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر، تغییرپذیری بیشتری از داده‌های مدل اولیه را حفظ نموده و شباهت بیشتری با مدل اولیه دارد. خطای افزایش مقیاس و همچنان تغییر واریانس داده‌ها نشان از قدرت روش پنجره با پهنای متغیر نسبت به تبدیل موجک دارد.

فصل ششم:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتایج

در این رساله به منظور افزایش مقیاس مدل‌های زمین‌شناسی به مدل‌های شبیه‌ساز مراحل مختلفی انجام شده که در ادامه به آنها اشاره شده و نتایج هر مرحله نیز بیان شده است.

۱- معرفی روش پنجره با پهنای متغیر به عنوان یک روش افزایش مقیاس، که اساس این روش تغییرپذیری سلول‌ها است.

۲- برای بهینه‌سازی مدل شبیه‌ساز، الگوریتم افزایش مقیاس باید بهینه شود که در این تحقیق به این منظور، میزان افزایش مقیاس تابعی از تغییرپذیری در نظر گرفته شده است. مادامی که تغییرپذیری داده‌ها اجازه دهد، افزایش مقیاس انجام می‌شود. در روش پیشنهادی این رساله، افزایش مقیاس تابعی از تغییرپذیری است که این تغییرپذیری بر اساس پهنای باند معرفی می‌شود که این پهنای باند، کنترل‌کننده پهنای پنجره است.

۳- الگوریتم افزایش مقیاس یک‌بعدی داده‌ها با یک ویژگی مخزن بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر توسعه داده شده است. به ازای هر پهنای باند، مدل افزایش مقیاس منحصر به آن پهنای باند به دست خواهد آمد. هر چه پهنای باند کوچکتر باشد، تعداد سلول‌های نهایی مدل افزایش مقیاس بیشتر خواهد بود و طبیعی است که خطای افزایش مقیاس آن کمتر می‌شود. در این صورت مدل افزایش مقیاس به مدل اولیه مخزن نزدیکتر خواهد بود. در پهنای باند بزرگ که منجر به ایجاد پنجره با پهنای بزرگ می‌شود، تعداد سلول‌های مدل افزایش مقیاس کمتر و خطای ناشی از افزایش مقیاس بیشتر خواهد شد. در این صورت، برخی ناهمگنی‌ها از سیستم حذف خواهد و مدل افزایش مقیاس از مدل اولیه دورتر خواهد بود. افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر این قابلیت را دارد که با تعیین پارامترهای افزایش مقیاس قبل از انجام فرایند، بتوان به مدل شبیه‌ساز بهینه با مقیاس بزرگ رسید.

۴- برای تعیین پهنای باند بهینه، از رویکردهای مختلفی استفاده شده است. ساده‌ترین آنها تعداد سلول‌های مد نظر برای مدل افزایش مقیاس است. همچنین می‌توان از تغییرات خطای افزایش مقیاس در مقابل پهنای باند، پهنای باند بهینه را تعیین نمود.

۵- الگوریتم افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر در یک بعد و با دو ویژگی مخزن توسعه داده شده است. هدف از افزایش مقیاس هم‌زمان ویژگی‌ها، تعیین یک الگوی مشترک برای هر دو ویژگی بر اساس پهنای باند و در واقع تغییرپذیری هر کدام از دو ویژگی است. پهنای باند بهینه هر کدام از ویژگی‌ها تعیین و سپس با استفاده از دو رویکرد حداکثر و حداقل پهنای باند و با ساخت پنجره‌ها با پهنای متغیر، افزایش مقیاس هم‌زمان ویژگی‌ها انجام شده است. در مدل SUTF، ساختار نهایی سلول‌های افزایش مقیاس برای ویژگی‌ها یکسان و تنها تفاوت آنها در کمیت سلول‌ها است.

۶- تعداد سلول‌های مدل شبیه‌ساز SUTF، همواره از مجموع تعداد سلول‌های مدل افزایش مقیاس دو ویژگی کمتر و از تفاضل آنها بیشتر است. زمان محاسبات مدل SUTF بر اساس رویکرد حداقل پهنای پنجره بیشتر از رویکرد حداکثر پهنای پنجره است.

۷- با الگوی مشابه روش پنجره با پهنای متغیر، مدل‌های افزایش مقیاس هم‌زمان بر اساس تبدیل موجک نیز محاسبه شده و سپس نتایج حاصل از دو روش مقایسه شده‌اند. با مقایسه خطای افزایش مقیاس مدل‌ها، مشاهده شد که در شرایط یکسان، خطای افزایش مقیاس روش پنجره با پهنای متغیر بسیار کمتر از خطای افزایش مقیاس روش تبدیل موجک است.

۸- به منظور افزایش مقیاس داده‌ها در دو بعد، ابتدا نیاز است که پهنای باند هر ویژگی تعیین شود. در حالت دوبعدی، پهنای باند به صورت یک بردار تعیین می‌شود که در جهات مختلف پهنای باند بنا به تغییرپذیری داده‌ها متفاوت خواهد بود. این بردار پهنای باند، پهنای متغیر پنجره در دو بعد را کنترل می‌کند. پهنای پنجره در دو جهت متفاوت و همچنین در نواحی مختلف، متغیر خواهد بود.

۹- الگوریتم افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر با دو الگوی متفاوت بررسی شده است: الگوی جستجو و الگوی ماتریس فاصله. الگوی جستجو، ترکیبی از دو الگوریتم ریاضی جستجوی A^* و الگوریتم جستجوی اولین عمق است. در این الگوریتم، نقطه شروع افزایش مقیاس مشخص نیست و در نتیجه بسته به اینکه آغاز الگوریتم از چه نقطه‌ای باشد، نتایج افزایش مقیاس متفاوت خواهد بود. الگوریتم جستجو سرعت مناسبی دارد ولی از دقت کافی برخوردار نیست. در مقابل الگوریتم ماتریس فاصله، دقیق‌تر است ولی زمان محاسبات آن بیشتر از الگوریتم جستجو است. برای رفع مشکل نقطه شروع الگوریتم افزایش مقیاس، از ماتریس فاصله داده‌ها استفاده شده است. با توجه به اینکه، هدف از افزایش مقیاس، شناسایی سلول‌های با مقادیر نزدیک به هم و سپس بزرگ نمودن این سلول‌ها است، بنابراین با تعیین ماتریس فاصله سلول‌ها، نقطه شروع الگوریتم کمترین درایه ماتریس فاصله است. در این الگوریتم پس از تعیین پهنای باند بهینه، دو سلول در صورتی که فاصله آنها کمتر از پهنای باند باشد، با همدیگر ادغام خواهند شد. شرط توقف این الگوریتم، پهنای باند است.

۱۰- پس از توسعه الگوریتم، افزایش مقیاس داده‌های تخلخل و تراوایی انجام و مدل‌های افزایش مقیاس در دو بعد به دست آمده است. همچنین فرایند افزایش مقیاس داده‌ها با روش تبدیل موجک در دوبعد نیز انجام و نتایج مقایسه شده است. با مقایسه نتایج افزایش مقیاس حاصل از دو روش با مدل اولیه ویژگی‌ها مشخص شده است که مدل‌های شبیه‌ساز به دست آمده از روش پنجره با پهنای متغیر بر اساس ماتریس فاصله، شباهت بیشتری به مدل‌های زمین‌شناسی اولیه داشته است. خطای افزایش مقیاس و همچنین مشاهده واریانس داده‌های دو مدل می‌تواند دلیلی بر برتری روش پهنای باند نسبت به روش تبدیل موجک باشد.

۱۱- واریانس مدل‌های شبیه‌ساز به دست آمده از روش پنجره با پهنای متغیر، حدود سه برابر واریانس مدل‌های افزایش مقیاس بر مبنای تبدیل موجک است.

۱۲- برای افزایش مقیاس همزمان ویژگی‌های تخلخل و تراوایی در دو بعد، از رویکردی مشابه حالت یک‌بعدی استفاده شده است: حداقل و حداکثر پهنای باند. الگوی افزایش مقیاس همزمان، یک مدل یکسان برای هر دو ویژگی تخلخل و تراوایی است، به گونه‌ای که یک سطح مشترک با توزیع یکسان سلول‌های با مقیاس بزرگ و ریز به دست آمده است. تنها تفاوت این الگو برای ویژگی‌های تخلخل و تراوایی، در مقدار کمیت سلول‌هاست.

۱۳- در رویکرد حداقل پهنای باند، ملاک انتخاب مدل SUTF، پهنای باند و یا پهنای پنجره کوچکتر است. در واقع، مدل SUTF ویژگی‌ها، اشتراک دو مدل افزایش مقیاس ویژگی‌های تخلخل و تراوایی است. در رویکرد حداکثر پهنای باند، ملاک انتخاب مدل SUTF، پهنای باند و یا پهنای بزرگتر پنجره است. در واقع، مدل SUTF ویژگی‌ها، اجتماع دو مدل افزایش مقیاس ویژگی‌های تخلخل و تراوایی است.

۱۴- مقایسه نتایج حاصل از دو روش در داده‌های دوبعدی، نشان می‌دهد که مدل‌های دوبعدی افزایش مقیاس بر اساس پنجره با پهنای متغیر، چه به صورت جداگانه و چه به صورت همزمان، اطلاعات بیشتری از مدل‌های ریز اولیه حفظ نموده است. نتایج حاکی از این است که واریانس داده‌ها در خروجی نتایج تبدیل موجک، حدود یک‌سوم واریانس داده‌های مدل‌های افزایش مقیاس روش پنجره با پهنای متغیر است.

۱۵- زمان محاسبات مدل SUTF بر اساس تبدیل موجک کمتر از روش پنجره با پهنای متغیر است.

۱۶- با کاهش همبستگی فضایی ویژگی‌ها، تعداد سلول‌های مدل شبیه‌ساز SUTF افزایش می‌یابد.

۱۷- با توجه به نتایج بررسی شده در زمینه افزایش مقیاس داده‌ها در یک و دو بعد، با دو روش پنجره با پهنای متغیر و تبدیل موجک، نتایج نشان می‌دهد که روش پنجره با پهنای متغیر، روشی بسیار قوی در زمینه افزایش مقیاس داده‌های مخزن است.

۶-۲ پیشنهادات

۱- در این رساله، افزایش مقیاس هم‌زمان دو ویژگی مخزن بررسی شده است. با توجه به اینکه پارامترهای مخزن بیشتر از این تعداد هستند، افزایش مقیاس همه پارامترهای مخزن می‌تواند به عنوان یک پیشنهاد جذاب مطرح شود. همچنین تعمیم فضای بررسی به سه بعد می‌تواند به عنوان یک موضوع جدید مطرح شود.

۲- در مخازن ناهمگن، به منظور حفظ اطلاعات بیشتر مخزن هیدروکربوری می‌توان منطقه‌بندی مخزن را انجام داد و پهنای باند و به طبع آن پهنای پنجره را بصورت محلی محاسبه نمود.

۳- واریانس بین بلوکی در سلول‌های با مقیاس بزرگ و مقایسه آن با واریانس بین بلوکی سلول‌های ریز می‌تواند به عنوان یک شرط توقف الگوریتم در نظر گرفته شود.

۴- تعیین میزان همبستگی فضایی ویژگی‌ها و همچنین ارتباط این پارامتر با تعداد سلول‌ها و خطای افزایش مقیاس مدل شبیه‌ساز SUTF می‌تواند بررسی شود. چنانچه همبستگی بین ویژگی‌ها حداقل باشد، افزایش مقیاس هم‌زمان معتبر نخواهد بود، چرا که تعداد سلول‌های مدل شبیه‌ساز SUTF افزایش یافته و به تعداد سلول‌های مدل ریز نزدیک خواهد شد.

۵- اصولاً مخازن کربناته با تخلخل و تراوایی بسیار ناهمگن مشخص می‌شوند و این ناهمگونی‌ها ناشی از طیف وسیعی از محیط‌هایی است که کربنات‌ها در آن نهشته شده‌اند. بنابراین روش پیشنهادی رساله، نمود خوبی در اینگونه ذخایر نداشته و افزایش مقیاس قابل توجهی در این مخازن بر اساس روش پنجره با پهنای متغیر اتفاق نخواهد افتاد و لذا در نتایج شبیه‌سازی جریان سیال، اثر مثبتی نخواهد داشت.

۶- در این رساله، پهنای باند در دو جهت x و y تعیین و بررسی شد، در حالیکه برای تولید سلول‌های غیرمربعی می‌توان پهنای باند را در آزمون‌های مختلف محاسبه نمود.

۷- بررسی پایداری روش در مقابل نوفه و مقایسه آن با نتایج یکی از قوی‌ترین روش‌های نوفه‌زدایی در

یک بعد

۸- شبیه‌سازی جریان سیال بر اساس نتایج افزایش مقیاس بر مبنای روش پنجره با پهنای متغیر در

ابعاد مختلف می‌تواند به عنوان یک موضوع مهم مطرح شود. اعتبارسنجی نتایج روش افزایش مقیاس

پیشنهادی با شبیه‌سازی جریان سیال و همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی با روش‌های معمول قابل

توسعه است.

منابع و مآخذ

۱. رسایی م، (۱۳۸۴)، رساله دکتری: "افزایش مقیاس مدل های زمین شناسی به مدل های شبیه سازی با استفاده از توابع موجک"، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران.
۲. عبادی ف، (۱۳۹۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "کاربرد روش برآورد هسته با پهنای باند متغیر در افزایش مقیاس سلول در مخزن های نفتی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۳. قریشی ف، (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بهبود روش افزایش مقیاس نگارهای پتروفیزیکی در نرم افزار همپسون- راسل مبتنی بر موجک، مطالعه موردی: یکی از میادین نفتی جنوب ایران"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
4. Azizmohammadi S. and Matthäi K.S. (2011) "Multiresolution Wavelet Based Upscaling of Structured Grids" Peer-reviewed IAMG.
5. Babaei M. and King P.R. (2011) "Comparison between Wavelet and Renormalization Upscaling Methods and Iterative Upscaling-Downscaling Scheme" SPE Reservoir Simulation Symposium, pp 11.
6. Cardwell J. W. and Parsons R. (1945) "Average permeabilities of heterogeneous oil sands, Transactions of the AIME" **Society of Petroleum Engineers**, 160, 1, pp 8.
7. Chen Y. Durlofsky L.J., Gerritsen M. and Wen X.H. (2003) "A coupled local-global upscaling approach for simulating flow in highly heterogeneous formations" **Journal of Advances in Water Resources**, 26, 10, pp 19.
8. Chen T., Clauser C., Marquart G., Willbrand K. and Mottaghy D. (2015) "A new upscaling method for fractured porous media" **Journal of Advances in Water Resources**, 80, 2, pp9.
9. Christie M. A. (1996) "Upscaling for reservoir simulation" **Journal of Petroleum Technology**, 48, 11, pp 4.
10. Christie M.A. and Blunt M.J. (2001) "Tenth SPE comparative solution project: a comparison of upscaling techniques" **Society of Petroleum Engineers**, 4, 4, pp 9.
11. Chu L., Schatzinger R. A. and Tham M. K. (1998) "Application of Wavelet Analysis to Upscaling of Rock Properties" **Society of Petroleum Engineers**, 4, 2, pp 6.
12. de Marsily G. F. Delay J., Goncalves, P. Renard V., and Violette S. (2005) "Dealing with spatial heterogeneity" **Hydrogeological Journal**, 13, 1, pp 22.
13. Dickson N. E. M., Comte J. C., McKinly J. and Ofterdinger U. (2013) "Coupling ground and airborne geophysical data with upscaling techniques for regional groundwater modeling of heterogeneous aquifers: Case study of a sedimentary aquifer intruded by volcanic dykes in Northern Ireland" **Journal of Advances in Water Resources**, 50, 10, pp 25.
14. Donoho D.L. and Johnstone I.M. (1995) "Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage" **Journal of the American Statistical Association**, 90, pp 24.
15. Durlofsky L.J. (1997) "Use of higher moment for the description of upscaled, process independent relative permeabilities" **SPE Journal**, 2, 4, pp 11.

16. Durlofsky. L.J. (1992) "Representation of grid block permeability in coarse scale models of randomly heterogeneous porous media" **Journal of Water Resources Research**, 28, 7, pp 9.
17. Durlofsky L.J. (2003) "Upscaling of Geocellular models for reservoir flow simulation: A Review of Recent Progress, 7th International Forum on Reservoir Simulation, P 5,
18. Durlofsky L.J. (2003) "Upscaling and gridding of fine scale geological models for flow simulation" 8th International forum on reservoir simulation, P10, Stresa, Italy.
19. Durlofsky L. J., Milliken W. J. and Bernath A. (2000) "Scale Up in the Near-Well Region" **SPE Journal**, 5, 1, pp 18.
20. Ebrahimi F., and Sahimi M. (2002) "Multiresolution Wavelet Coarsening and Analysis of Transport in Heterogeneous Media" **Journal of Statistical Mechanics and its Applications**, 316, 4, pp 28.
21. Fleckenstein J. H. and Fogg G. E. (2008) "Efficient upscaling of hydraulic conductivity in heterogeneous alluvial aquifers" **Hydrogeology Journal**, 16, 3, pp 11.
22. Ganzalo P. and Jesus M. (2004) "A waveletbased image fusion tutorial" **Pattern Recogn.** 37, 3, pp 14.
23. Ganjeh-Ghazvini M., Masihi M. and Baghalha M. (2015a) "Effect of connectivity misrepresentation on accuracy of upscaled models in oil recovery by CO₂ injection." **Greenhouse Gases: Sci. Technol.** 6, 3, pp 12.
24. Ganjeh-Ghazvini M. (2019) "The impact of viscosity contrast on the error of heterogeneity loss in upscaling of geological models" **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 173, 5, pp 8.
25. Ganjeh-Ghazvini M., Masihi M. and Baghalha M. (2015b) "Study of heterogeneity loss in upscaling of geological maps by introducing a cluster-based heterogeneity number" **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 436, pp 13.
26. Graps A. (1995) "**An introduction to wavelets**" Presented at IEEE Computational Science and Engineering, USA, pp 423.
27. Green D.W., Willhite G.P. (2003) "**Enhanced Oil Recovery**" Society of Petroleum Engineers, second Edition, Texas, P 896.
28. Haldorsen H., and Lake L. (1984) "A new approach to shale management in field-scale models" **Old SPE Journal**, 24, 4, pp 10.
29. Imperial college London, D.o.E.S.
<https://www.imperial.ac.uk/engineering/departments/earth-science/research/researchgroups/perm/standard-models/eclipse-dataset/>.
30. Jain P.K. and Tiwari A. K. (2017) "An adaptive thresholding method for the wavelet based denoising of phonocardiogram signal" **Biomedical Signal Processing and Control**. 38, 8, pp 11.
31. Journal A.G., Deutsch C. and Desbarats A. J. (1986) "Power averaging for block effective permeability" **Society of Petroleum Engineers**, pp 6.
32. Jonoud S., Wennberg O.P., Larsen A., Casini G. (2013) "Capturing the effect of fracture heterogeneity on multiphase flow during fluid injection" **SPE Reservoir Eval. Eng.**, 16, 3, 14.
33. King P.R. (1989) "The use of renormalization for calculating effective permeability" **Journal of Transport in porous media**, 4, 1, pp 21.
34. Krogstad S., Raynaud X. and Nilsen H.M. (2015) "Reservoir management optimization using well-specific upscaling and control switching" **Computational Geosciences**, 20, 3, pp 11.
35. Koltermann C. E. and Gorelick S. M. (1996) "Heterogeneity in sedimentary deposits: A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches" **Water Resource Research**, 32, 9, pp 41.
36. Lohne A., Virnovsky G. and Durlofsky L. (2006) "Two-stage upscaling of two-phase flow: From core to simulation scale" **Society of Petroleum Engineers**, 11, 3, pp 12.

37. Liu H., Wang W., Xiang C., Han L. and Nie H. (2017) "A de-noising method using the improved wavelet threshold function based on noise variance estimation" **Mechanical Systems and Signal Processing**, 99, 11, pp16.
38. Marquez R. and Araujo M. (2006) "Wavelet analysis for upscaling of two dimensional permeability fields" **REVISTA MEXICANA DE FÍSICAS**, 52, 3, pp 4.
39. Malick M.A. (1996) Ph.D. thesis: "Geostatistical reservoir characterization and scale-up of permeability and relative permeability" University of Texas at Austin, pp 135.
40. Malick K. M. and Hewett T. A. (1994) "Boundary Effects in the Successive Renormalisation of Absolute Permeability, Stanford Center for Reservoir Forecasting (SCRF), Annual Report, pp 34.
41. Mallat S. (1999) **"A wavelet tour of signal processing"**. Academic Press, San Diego, Third Edition, pp 423.
42. Matheron G. (1967) **"Elements pour une theorie des milieux poreux"** Masson, Paris, P 168.
43. Mehrabi A.R., and Sahimi M., (1999) "Coarsening of Heterogeneous Media: Application of Wavelets, Bulletin of the American Physical Society" **Physical Review Letters**, 79, 22, pp 4.
44. Mikes, D., Barzandji O. H. M., Bruining j. and Geel C. R. (2006) "Upscaling of smallscale heterogeneities to flow units for reservoir modelling" **Marine and Petroleum Geology**, 23, 9, pp 11.
45. Moslehi M., Barros F.P.J., Ebrahimi F. and Sahimi M. (2016) "Upscaling of solute transport in disordered porous media by wavelet transformations" **journal of Advances in Water Resources**, 96, 9, pp 9.
46. Oda M. (1985) "Permeability tensor for discontinuous rock masses" **Geotechnique**, 35, 4, pp 12.
47. Oz B. and Deutsch C.V. (2000) "Challenges in Size Scaling and Multiscale Data Integration" pp 35.
48. Panda M.N., Mosher C.C. and Chopra A. (2000) "Application of wavelet transforms to reservoir-data analysis and scaling" **SPE journal**, 5, 1, pp 9.
49. Preux C. (2016) "About use of quality indicators to reduce information loss when performing upscaling" **Oil & Gas Science and Technology**, 71, 7, pp 21.
50. Rasaei M.R. and Sahimi M. (2008) "Upscaling and Simulation of Waterflooding in Heterogeneous Reservoirs Using WTations: Application to the SPE-10 Model, **Transportation Porous Media**, 72, 4, pp 27.
51. Rasaei M.R., Sahimi M. (2009a) "Upscaling of the Geological Models of Large-Scale Porous Media Using Multiresolution Wavelet Transformations" **Journal of Heat Transfer**, 131, 10, pp 12.
52. Rasaei M.R. and Sahimi M. (2009b) "Upscaling of the Permeability by Multiscale Wavelet Transformations and Simulation of Multiphase Flows in Heterogeneous Porous Media" **Computational Geosciences**, 13, 3, pp 27.
53. Renard P.h. and De Marsily G., (1997) "Calculating equivalent permeability: a review" **Advances in Water Resources**, 20, 5, pp 25.
54. Sahimi M. (2000) "Fractal-Wavelet-Neural Network Approach to Characterization and Upscaling of Fractured Reservoirs" **Computers & Geosciences**, 26, 8, pp 28.
55. Sahimi M. and Rasaei M. R., Ebrahimi F. and Haghighi M. (2005) Upscaling of Unstable Miscible Displacements and Multiphase Flows Using Multiresolution Wavelet Transformation" **SPE Reservoir Simulation Symposium**, Houston, Texas, pp 15.
56. Sahimi M. and Rasaei M.R. (2007) "Upscaling of the permeability by multiscale wavelet transformations and simulation of multiphase flows in heterogeneous porous media" **Computational Geosciences**, 13, 2, pp 27.

57. Vahedi R., Tokhmechi B., and Koneshloo M., (2016) "Permeability upscaling in fractured reservoirs using different optimized mother wavelets at each level" **Journal of Mining & Environmental**, 7, 2, pp 11.
58. Warren J.E. and Price H.S. (1961) "Flow in Heterogeneous Porous Media" **Old SPE Journal**, 1, 3, pp16.
59. Webb E. K. and Anderson M. P. (1996) "Simulation of preferential flow in three-dimensional, heterogeneous conductivity fields with realistic internal architecture" **Water Resource Research**, 32, 3, pp 12.
60. Wen X. H. and Gómez-Hernández J. J. (1996) "Upscaling hydraulic conductivities in heterogeneous media: An overview" **Journal of Hydrology**, 183, 2, pp 12.
61. Wen X.H., Durlofsky L. J., and Edwards M.G., 2003, Use of border regions for improved permeability upscaling, *Mathematics Geology*, 35(5), pp.47-53. .
62. Williams J.K. (1989) "Simple renormalization schemes for calculating effective properties of heterogeneous reservoirs" 1st European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, EAGE, pp 11.
63. Xiao F. and Zhang Y. (2011) "A Comparative Study on Thresholding Methods in Waveletbased Image Denoising" **Advanced in Control Engineering and Information Science**, 15, 11. Pp 5.
64. Zhang H.W. and Fu Z.D. (2010) "coupling upscaling finite element method for consolidation analysis of heterogeneous saturated porous media" **Journal of Advances in Water Resources**, 3, 3, pp 13.
65. Zhou H, Li L, Jaime Gmez-Hernndez J. (2010) "Three-dimensional hydraulic conductivity upscaling in groundwater modeling" **Journal of Computer Geoscience**, 36, 10, pp 11.

Abstract

Reservoir's properties models that used to fluid flow simulation in porous media include millions of cells, which are not reasonably computational to solve such models with this cell volume. Upscaling methods are used to reduce the number of cells in the original model. The main idea of upscaling is to replace a coarse-scale homogeneous cell rather than multiple heterogeneous fine-scale cells. Several methods have been developed to scale up, which are based on averaging. In this thesis, a robust method called a variable-width window, the main idea of is the bandwidth, is proposed as a scale-up method. The aim of this research is to simultaneous upscaling of the two features of the reservoir in two dimensions. Given the fact that in order to determine the number of cells in the simulator model, an appropriate division must be made according to the variability model, this approach can be used to determine the appropriate bandwidth. Since the distribution of the reservoir is different in various regions, the coarse-graining process should be done based on the feature variability. By this method, regions with severe variability will remain fine and areas with variable variability will increase scales. The upscaling process has been investigated in four modes: upscaling of data in one dimension with one and two features of the reservoir, and then generalizing the process to two dimensions with one and two reservoir features simultaneously. The main challenge in the variable-width window procedure is determining the bandwidth or width of the window. In this method, the width of the window is due to the variable variability of the reservoir property, which is controlled by the bandwidth. In one-dimensional state, the bandwidth is scalar and in two dimensions, it is defined as a vector. To simultaneous upscaling of hydrocarbon reservoir features, two maximum and minimum bandwidth approaches have been used. The STUF models are completely identical in terms of structure, and their only difference is in the quantity of cells. In addition to the proposed method, the process of upscaling is also carried out based on the wavelet transform. The result of upscaling of the two methods suggests that the simulator models obtained from the proposed method of thesis are more similar to the original model compared to the wavelet transform. This is evident in the comparison of the upscaling error of the upscaled models and the variance of the data. Upscaling based on the variable-width window is a completely intelligent process and only based on the cell's variability, while wavelet-based upscaling is on the binary system. In a variable-bandwidth window approach, it will be possible to scale up the process by specifying the expected error and the cell numbers of simulator model.

Keywords: Upscaling, bandwidth, variable-width window method, wavelet transformation, simultaneous upscaling of two features, upscaling error.



Shahrood University
of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

PhD Dissertation in Mining Exploration

**Multiresolution Upscaling of Tow Features of
Hydrocarbon Reservoir Using by Variable-Width
Window in Tow Dimension**

By: **Mohammad Reza Azad**

Supervisors:

Dr. Abolghasem Kamkar Rouhani
Dr. Behzad Tokhmechi

Advisor:

Dr. Mohammad Arashi

June 2019