

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده‌ی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف نفت

**افزایش مقیاس سه بُعدی مخازن نفتی شکافدار با رویکرد ویولت**

راضیه واحدی

اساتید راهنما:

دکتر بهزاد تخم چی

دکتر محمد کنشلو

پایان نامه‌ی ارشد جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه : اکتشاف نفت

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم راضیه واحدی

تحت عنوان:

افزایش مقیاس سه بُعدی مخازن نفتی شکافدار با رویکرد ویولت

در تاریخ ۱۳۹۰/۰۶/۲۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه بسیار خوب مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر محمد کاظم زاده		دکتر بهزاد تخم‌چی
	مهندس خیری سهولی		دکتر محمد کنشلو

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر علیرضا عرب‌امیری		دکتر علیرضا الفی
			دکتر امین روشندل کاهو

تقدیم به

## پدر و مادر عزیزم

آن‌ها که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه عمر.

## و برادران و خواهران عزیزم

که دعای خیرشان همیشه بدرقه‌ی راهم بود و بی یاری آنان پیمودن این راه ممکن نبود.

تقدیم به آنان که در راه کسب علم و معرفت برای من آنچه در توان داشتند انجام دادند.

تقدیم به آنان که مشوق راه دانشم بودند.

تقدیم به آنان که دوری مرا تحمل کردند و تقدیم به آنان که در رهگذر عمر یاری‌گر و موجب دلگرمی من بودند.

خدایا عاقبت به خیری و عافیت و طول عمر را برای آنان از درگاہت مسئلت دارم.

## تشکر و قدردانی

سپاس خداوند متعال را که که توفیق نصیب من کرد تا این پایان نامه را به انجام رسانم. همچنین خداوند را شاکرم که در حین انجام این پایان نامه افراد عالم و شایسته‌ای را در سر راه بنده قرار داد تا با راهنمایی آن‌ها این پروژه در مسیر صحیح خود قرار گیرد.

به رسم ادب و احترام، در ابتدای این پایان‌نامه از زحمات بزرگوارانی که بنده را در اتمام این پژوهش یاری نمودند تشکر و قدردانی می‌نمایم. از جناب آقایان دکتر بهزاد تخم‌چی و دکتر محمد کنشلو که فراتر از یک استاد راهنما از هیچ راهنمایی دریغ ننمودند، آقای دکتر کاظم زاده، رئیس بخش اکتشاف پژوهشگاه صنعت نفت که به عنوان مشاور در بخش مهندسی مخزن بنده را یاری نمودند، آقای دکتر محمدرضا رسائی و آقای مهندس عماد مرتضی‌زاده که راهنمایی‌های ارزشمندی در زمینه افزایش مقیاس داشتند، خانم مهندس خیری سهولی و آقای مهندس سینا زارع که در زمینه استفاده از نرم‌افزار شبیه ساز مخزن اینجانب را راهنمایی فرمودند و از خانم مهندس مریم تنها جهت راهنمایی در بررسی اعتبار مدل‌های افزایش مقیاس یافته کمال تشکر و قدردانی را دارم.

با آرزوی موفقیت روزافزون

راضیه واحدی

## تعهد نامه

اینجانب **راضیه واحدی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی اکتشاف نفت دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه‌ی افزایش مقیاس سه بُعدی مخازن نفتی شکافدار با رویکرد ویولت تحت راهنمایی آقای دکتر بهزاد تخم‌چی و آقای دکتر محمد کنشلو متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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

#### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) 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 پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

در این پایان نامه از آنالیز ویولت برای افزایش مقیاس مدل اولیه ریز دانه یک مخزن فرضی استفاده است. این مدل با افزودن چند سری شکستگی به یک زمینه نسبتاً همگن به صورت عددی تولید شده است. از آنجایی که تراوایی و تخلخل سنگ مخزن مهمترین عامل مؤثر در حرکت سیال در مخزن و نحوه‌ی توزیع آن می‌باشد، این دو پارامتر مبنایی برای ارزیابی کارایی افزایش مقیاس در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از خاصیت چند تفکیکی توابع ویولت، مدل اولیه‌ی ریزدانه بطور هوشمندانه، به صورت غیریکنواخت افزایش مقیاس یافته است. به گونه‌ای که در آن مدل حاصل تا حد امکان اطلاعات مهم مدل اولیه را شامل شود. براساس مدل تولید شده، مدل دینامیکی سه بُعدی به کمک نرم افزار اکلیپس<sup>1</sup> طراحی شده است. مدل فوق با استفاده از چندین تابع ویولت افزایش مقیاس یافته است. در این پایان نامه از میان توابع ویولت مورد استفاده، ویولت مبنای بهینه برای افزایش مقیاس گزینش شده است. مشاهده گردید که، نتایج حاصل از مدل‌های افزایش مقیاس یافته توسط ویولت فوق به نتایج مدل اولیه ریز دانه نزدیک و سرعت انجام محاسبات نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، مخازن شکافدار، افزایش مقیاس، ویولت.

---

<sup>1</sup>.Eclipse

## فهرست مطالب

چکیده.....	أ
فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ محدودیت‌های افزایش مقیاس.....	۳
۳-۱ روش‌های مختلف دسته بندی فرآیند افزایش مقیاس.....	۳
۴-۱ افزایش مقیاس در جریان اشباع تک فازی.....	۵
۱-۴-۱ حل معادله فشار.....	۶
۱-۱-۴-۱ حل ساده معادله فشار.....	۶
۲-۱-۴-۱ حل پنجره ای معادله فشار:.....	۷
۲-۴-۱ نرمال سازی مجدد.....	۸
۳-۴-۱ متوسط گیری ساده.....	۸
۴-۴-۱ متوسط گیری توانی.....	۹
۵-۴-۱ افزایش مقیاس در نزدیکی چاه.....	۱۰
۵-۱ افزایش مقیاس در جریان دو فازی.....	۱۱
۱-۵-۱ تشریح روش‌های مختلف افزایش مقیاس دو فازی.....	۱۴



- ۱-۱-۵-۱ روش‌های پایا ..... ۱۴
- ۲-۱-۵-۱ سیستم دو فاز دینامیکی ..... ۱۵
- ۶-۱ انتخاب روش افزایش مقیاس ..... ۱۶
- ۱-۶-۱ ساختار نفوذپذیری و کنتراست ..... ۱۶
- ۲-۶-۱ تعادل نیروها ..... ۱۷
- ۱-۲-۶-۱ جریان با نیروی ویسکوزیته ی غالب ..... ۱۸
- ۲-۲-۶-۱ جریان با نیروی موئینگی غالب ..... ۲۰
- ۳-۲-۶-۱ جریان با نیروی گراویته غالب ..... ۲۱
- ۴-۲-۶-۱ تعادل بین نیروها ..... ۲۲
- ۵-۲-۶-۱ خلاصه‌ای از تعادل بین نیروها ..... ۲۲
- فصل دوم: تابع ویولت ..... ۲۵
- ۱-۲ مقدمه ..... ۲۵
- ۲-۲ تبدیل ویولت ..... ۲۷
- ۳-۲ مروری بر ادبیات افزایش مقیاس با رویکرد ویولت ..... ۳۴
- فصل سوم: شرایط مدل سازی ..... ۴۱
- ۱-۳ مقدمه ..... ۴۱

۴۱	..... شبیه ساز اکلیپس
۴۵	..... تولید داده‌های مصنوعی
۴۹	..... فصل چهارم: الگوریتم افزایش مقیاس
۴۹	..... ۱-۴ مقدمه
۴۹	..... ۲-۴ الگوریتم کد افزایش مقیاس غیر یکنواخت با استفاده از تبدیل ویولت
۶۲	..... فصل پنجم: نتایج افزایش مقیاس
۶۲	..... ۱-۵ مقدمه
۶۴	..... ۲-۵ نتایج حاصل از دو مرحله افزایش مقیاس
۶۹	..... ۳-۵ نتایج حاصل از سه مرتبه افزایش مقیاس
۹۰	..... ۴-۵ مقایسه نتایج حاصل از دو و سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌های مختلف
۹۶	..... فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۶	..... ۱-۶ نتیجه گیری
۹۷	..... ۲-۶ پیشنهادات

## فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه

۲-۱ محدودیت‌های افزایش مقیاس

۳-۱ روش‌های مختلف دسته بندی فرآیند افزایش مقیاس

۴-۱ افزایش مقیاس در جریان اشباع تک فازی

۱-۴-۱ حل معادله فشار

۱-۱-۴-۱ حل ساده معادله فشار

۲-۱-۴-۱ حل پنجره ای معادله فشار:

۲-۴-۱ نرمال سازی مجدد

۳-۴-۱ متوسط گیری ساده

۴-۴-۱ متوسط گیری توانی

۵-۴-۱ افزایش مقیاس در نزدیکی چاه

۵-۱ افزایش مقیاس در جریان دو فازی

۱-۵-۱ تشریح روش های مختلف افزایش مقیاس دو فازی

۱-۱-۵-۱ روش‌های پایا

۲-۱-۵-۱ سیستم دو فازی دینامیکی

۶-۱ انتخاب روش افزایش مقیاس

۱-۶-۱ ساختار نفوذپذیری و کنتراست

۲-۶-۱ تعادل نیروها

۱-۲-۶-۱ جریان با نیروی ویسکوزیته ی غالب

۲-۲-۶-۱ جریان با نیروی موئینگی غالب

۳-۲-۶-۱ جریان با نیروی گراویته غالب

۴-۲-۶-۱ تعادل بین نیروها

۵-۲-۶-۱ خلاصه‌ای از تعادل بین نیروها

## ۱-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از افزایش مقیاس برای تبدیل مدل‌های زمین‌شناسی با جزئیات بسیار بالا به شبکه‌های محاسباتی، رونق یافته است. مدل‌های زمین‌شناسی معمولاً جهت توصیفات ریز مقیاس تخلخل و تراوایی مخزن به ده‌ها میلیون سلول نیاز دارند. از آنجا که زمین‌شناسان برای تهیه مدل‌های استاتیک خصوصیات مخزن، به سرعت پردازش بالا نیاز ندارند، مدل‌هایی با تعداد بلوک‌های بسیار زیاد ایجاد می‌کنند. مهندسان مخزن با توجه به دقت مورد نیاز و تجهیزات محاسباتی خود و همچنین بر اساس یک دید مهندسی مخزن، این شبکه را افزایش مقیاس می‌دهند.

الگوریتم افزایش مقیاس باید بگونه‌ای طراحی شود که مقادیر مناسبی برای تخلخل و تراوایی و سایر خصوصیات مخزنی به دست بیاید تا شبیه‌سازی مخزن با دقت مورد قبولی صورت پذیرد. روش افزایش مقیاس مناسب برای هر شرایط، بستگی به دقت مورد نیاز و درجه درشت‌سازی دارد. به عنوان مثال برای تراوایی توصیف شده بوسیله واریوگرام‌های مبتنی بر مدل‌های زمین‌آماري دو نقطه‌ای، تنها با درجه متوسط درشت‌سازی (افزایش مقیاس)، استفاده از روش افزایش مقیاس تک‌فازی محلی<sup>۱</sup> که احتمالاً همراه با یک شبکه با ساختار غیریکنواخت است، می‌تواند مدل‌های قابل قبول درشت‌شده‌ای ارائه کند. برای موارد چالش برانگیز و پیچیده گاهی نیاز به افزایش مقیاس در درجات بالاتر و حتی توسعه روش افزایش مقیاس محلی و سراسری از حالت یک فاز به حالات دو یا چند فازی خواهد بود [۱].

---

<sup>۱</sup>.local

## ۱-۲ محدودیت‌های افزایش مقیاس

از محدودیت‌های عمده‌ی افزایش مقیاس نقش نداشتن فرضیات در پاسخ ارائه شده است. بنابراین شواهدی وجود نخواهد داشت که آیا فرضیات در رفتار مدل لحاظ شده‌اند یا خیر؟ بعلاوه برخی عوامل موجب می‌شوند نتوان در خصوص سازگاری مدل افزایش مقیاس یافته با ریز مدل اولیه اظهار نظر قطعی کرد. از جمله این عوامل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مقدار شیب بالای هر سلول و سلول‌های افزایش مقیاس یافته که اندازه‌شان به طول همبستگی یک مخزن ناهمگن نزدیک باشد.

می‌بایست اشاره کرد که داده‌های افزایش مقیاس یافته هیچگاه نمی‌توانند جایگزین مقادیر اصلی شوند، چرا که افزایش مقیاس در خوش‌بینانه‌ترین حالت سبب از دست رفتن جزئیات در مقیاس‌های پایین‌تر از بلوک نهایی می‌شود که خود عامل ایجاد خطا و تغییر شکل جریان سیال است. در ضمن افزایش مقیاس باعث افزایش خطای ناشی از بریدن سری تیلور در جبری‌سازی ترم‌های مشتق معادله دیفرانسیل می‌شود. همچنین ممکن است بلوک افزایش مقیاس یافته رفتار مشابهی در مقایسه با بلوک‌های کوچک اولیه، از خود نشان ندهد. در عمل جهت حفظ اطلاعات حیاتی در بخش افزایش مقیاس لازم است افزایش مقیاس در نواحی با ناهمگونی بیشتر با درجه کمتری صورت گیرد [۲].

## ۱-۳ روش‌های مختلف دسته بندی فرآیند افزایش مقیاس

دسته‌بندی‌های مختلفی از روش‌های افزایش مقیاس قابل ارائه است. به عنوان مثال به دسته‌بندی‌های زیر می‌توان اشاره کرد:

- نحوه توسعه روش (تحلیلی یا عددی)
- وابستگی به شرایط مرزی (موضعی یا غیر موضعی)
- نوع مدل زمین‌شناسی مربوطه (قطعی یا احتمالی)
- کدام پارامتر افزایش مقیاس پیدا می‌کند (پارامتر جریان تک فازی یا دو فازی)

به طور مثال در سال ۱۹۹۶، ون و هراندز-گومز تقسیم بندی روش موضعی، روش‌های غیر موضعی و روش‌های مستقیم را ارائه داده است و در سال ۱۹۹۷، رنارد و مارسیلی از دسته‌بندی قطعی، احتمالی و تناوبی/دوره ای استفاده کرده است [۳و۴].

در روش‌های موضعی فرض می‌شود که تنسور تراوایی هر بلوک یک مشخصه ذاتی از تراوایی زیربلوک‌های موجود در هر بلوک درشت شده می‌باشد، در حالی که در روش‌های غیر موضعی، فرض می‌شود تراوایی هر بلوک علاوه بر تراوایی زیر بلوک‌های آن، به شرایط مرزی اعمال شده در فرآیند افزایش مقیاس نیز بستگی دارد.

روش‌های مستقیم نیز سعی می‌کنند تا تراوایی بلوک‌های درشت دانه را مستقیماً توسط تعداد اندکی از مقادیر تراوایی که در مرحله اندازه‌گیری ثبت شده اند، بدست آورند بدون اینکه نیاز به ساختن مدل‌های جزئی زمین‌شناسی باشد. روش‌های قطعی فرض می‌کنند که مدل زمین‌شناسی و توزیع پارامترهای آن، کاملاً معلوم است در صورتی‌که روش‌های احتمالی، تنها یک دانش تقریبی از این مدل را در اختیار داشته و دیدگاه فرآیندهای تصادفی را اختیار می‌کنند. روش‌های تناوبی یا دوره‌ای نیز قوانینی را جهت محاسبه تراوایی معادل به صورت جمع پذیر و مرحله به مرحله ارائه می‌دهند [۵].

تکنیکی که تنها پارامترهای تک فازی را افزایش مقیاس می‌دهد (نفوذ پذیری یا قابلیت انتقال) را می‌توان به عنوان روش‌های تک فازی طبقه بندی کرد همچنین روش‌هایی که در آن توابع تراوایی نسبی افزایش مقیاس یافته محاسبه می‌شود را به عنوان روش‌های دو فازی به شمار می‌آورند. بطور کلی روش‌های افزایش مقیاس دو فازی پیچیده‌تر و زمانبرتر از روش‌های تک فازی‌اند.

روش‌های تئوری مختلفی نیز به منظور مطالعه مسئله افزایش مقیاس ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به تئوری همگن سازی برگیت در سال ۱۹۸۴ و آمازین و برگیت در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۹۱ و تئوری متوسط گیری مقیاس وسیع کواینتراد و ویتاکر در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۹۰ اشاره کرد. بررسی و ارزیابی‌های اخیر بارکر و تیبو (۱۹۹۷)، بارکر و دوپوی (۱۹۹۹)، فارمر (۲۰۰۲)، دارمن و همکاران (۲۰۰۲)، کریستی و دورلوفسکی (۲۰۰۵) و چن (۲۰۰۵) نیز، کاربرد روش‌های مختلف افزایش مقیاس را شرح می‌دهد.

## ۱-۴ افزایش مقیاس در جریان اشباع تک فازی

در مورد جریان تک فازی مهمترین پارامتری که باید افزایش مقیاس داده شود تراوایی مطلق است. لازم به توضیح است که تراوایی مطلق سنگ مخزن یکی از مهمترین عوامل موثر در نحوه توزیع و حرکت سیال در مخازن است. در ضمن این روش برای افزایش مقیاس با درجات بالای تراوایی نسبی اهمیت پیدا می‌کند. هدف افزایش مقیاس این است که مشخصات بارز و چشم‌گیر جریان در سلول‌های شبیه‌سازی حفظ شود [۶]. در ذیل برخی از روش‌های افزایش مقیاس که در صنعت نفت عمومیت بیشتری پیدا کرده اند، توضیح داده می‌شود.

## ۱-۴-۱ حل معادله فشار

در روش حل معادله فشار<sup>۱</sup> برای مثال، محاسبات جریانی تک فازی با شرایط مرزی مشخص صورت می‌گیرد و سپس تعیین می‌شود که چه مقدار تراوایی مؤثر با سرعت جریانی مشابه در محاسبات ریز مقیاس تولید می‌شود. نتایج بدست آمده به فرضیات صورت گرفته بخصوص شرایط مرزی در نظر گرفته شده وابسته است [۷]. اگر شرایط مرزی بدون جریان مورد استفاده قرار بگیرد، تنسور تراوایی مؤثر قطری می‌تواند بدست بیاید و بطور مستقیم در شبیه ساز مخزن وارد شود. همچنین اگر شرایط مرزی دوره ای<sup>۲</sup> به کار گرفته شود یک تنسور تراوایی مؤثر کامل<sup>۳</sup> می‌توان به دست آورد [۸]. در ذیل به دو نوع حل معادله فشار اشاره می‌شود.

## ۱-۴-۱-۱ حل ساده معادله فشار

در این روش، بلوک افزایش مقیاس یافته از سایر بلوک‌های مدل، جدا شده و به صورت مستقل در نظر گرفته می‌شود. سپس با برقراری یک گرادیان فشار  $\Delta p$  بین دو وجه از بلوک و با در نظر گرفتن شرایط غیر جریانی برای سایر وجوه، یک جریان جهت‌دار در بلوک به صورت عددی شبیه سازی می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی عددی، شدت جریان عبوری در هر بلوک کوچک واقع در بلوک درشت را به دست می‌آید. شدت جریان کل  $q$  که از بلوک درشت شده می‌گذرد با جمع‌بندی شدت جریان‌های

---

<sup>1</sup> . pressure solution method

<sup>2</sup> . periodic

<sup>3</sup> . full tensor



گذر کرده از هر زیر بلوک محاسبه می‌شود [۹]. با استفاده از گرادیان فشار و  $q$  کل محاسبه شده، تراوایی بلوک درشت در راستای  $d$  از رابطه (۱-۱) محاسبه می‌شود:

$$K_d = -\frac{q}{A} \frac{L}{\Delta P} \quad (1-1)$$

که در آن  $L$  فاصله دو وجهی است که اختلاف فشار  $\Delta p$  بین آن‌ها برقرار بوده و  $A$  سطح مقطع بلوکی است که جریان  $q$  از آن عبور کرده است. با چرخاندن شرایط مرزی و تکرار شبیه سازی جریان به صورت فوق، تراوایی بلوک درشت در جهات دیگر به دست می‌آید.

این روش برای اولین بار توسط وارن و پرایس (۱۹۶۱) به منظور محاسبه تراوایی مطلق به کار برده شد. نوع دیگر شرایط مرزی مورد استفاده در این روش، از تغییرات خطی فشار به جای استفاده از شرایط مرزی بدون جریان می باشد [۱۰].

#### ۱-۴-۲ حل پنجره ای معادله فشار:

در روش تخمین محلی تراوایی در صورتی که محدوده بزرگتری برای تخمین تراوایی بلوک مورد استفاده قرار گیرد می‌توان میزان دقت روش را افزایش داد. هراندز-گومز (۱۹۹۰)، هراندز-گومز و ژورنل (۱۹۹۱) و هلدن و لیا (۱۹۹۲) پیشنهاد کردند که تنها یک پوسته در اطراف بلوک درشت شونده مورد نظر قرار گیرد تا زمان محاسبات کاهش یابد. این روش سبب می‌شود تاثیر کانال‌ها با تراوایی بالا به صورت بهتری در نظر گرفته شود و منجر به تنسور کامل تراوایی برای بلوک شود. همچنین شرایط مرزی واقعی‌تری در اطراف بلوک درشت دانه برقرار می‌کند. جریان سیال بر روی بلوک درشت دانه که توسط همسایه‌های آن احاطه شده است، شبیه‌سازی شده و شرایط مرزی به صورت خطی یکنواخت تغییرکننده در نظر گرفته می‌شود [۱۱ و ۱۲].

## ۱-۴-۲ نرمال سازی مجدد

روش نرمال سازی مجدد یک روش سریع تر اما با دقت پایین تر برای محاسبات تراوایی مؤثر می باشد و نتیجه آن تراوایی مؤثر نزدیک به حل مستقیم معادله فشار می باشد. این روش محاسبات سریع تراوایی های موثر را از سیستم های بسیار گسترده ممکن می سازد. در واقع نرمال سازی مجدد یک الگوریتم تکرار شونده است. در این روش، تراوایی معادل یک شبکه ریزدانه، بوسیله ی یک سری از عملیات تناوبی محاسبه می گردد. به عنوان مثال، در یک فضای دو بُعدی، محاسبات از یک شبکه اولیه با تعداد  $(2n)^2$  بلوک ریز شروع شده و به شبکه ای با  $n^2$  از بلوک های درشت تر تبدیل می شود. این رویه سپس تکرار می شود تا این که شبکه ای با اندازه بلوک های مورد نظر و یا نهایتاً یک بلوک به دست آید. این روش بسیار سریع بوده و دارای محدودیتی از نظر اندازه اولیه محیط فیزیکی یا شدت تغییرات توزیع تراوایی در بلوک ها نیست [۱۳ و ۱۴].

سرعت محاسبات به دلیل وجود روابط تحلیلی برای تراوایی مؤثر یک شبکه بلوک  $(2 \times 2)$  می باشد که از روابط مشابه برای مقاومت معادل در یک شبکه  $(2 \times 2)$  از مقاومت های الکتریکی، الگوبرداری شده است. این روش نتایج خوبی برای توزیع تراوایی همسان گرد و توزیع لگاریتمی نرمال، نشان داد، اما برای محیط های با خاصیت ناهمسانگردی زیاد (نظیر سازندهای رسی - شنی) روش مذکور با شکست مواجه شد که به علت تفکیک ناکافی این روش افزایش مقیاس پی در پی در لبه های نواحی رسی بود. مزیت بارز نرمال سازی مجدد سرعت آن است.

## ۱-۴-۳ متوسط گیری ساده

از جمله روش‌های تحلیلی محاسبه تراوایی می باشد. این روش شامل میانگین حسابی، هارمونیک، هندسی و نیز تلفیق آن‌ها از تراوایی زیر بلوک‌های موجود در هر بلوک درشت دانه می‌باشد. در مورد سیستم‌های یک بُعدی یا لایه‌های غیر مرتبط، تراوایی مؤثر برابر متوسط حسابی برای جریان به موازات لایه بندی و برابر متوسط هارمونیک برای جریان عمود بر لایه بندی می‌باشد [۱۵].

برای جریان دو بُعدی، در حالتی که بلوک‌های بسیار بزرگ دارای تراوایی ناهمگون با رابطه مقیاس وسیع به صورت همسان‌گرد باشند مادرن (۱۹۶۷) با استفاده از تئوری پارامترهای مؤثر اثبات کرد تراوایی معادل هر بلوک درشت شده، برابر متوسط هندسی زیر بلوک‌های آن می‌باشد [۱۶].

دورلوفسکی (۱۹۹۲) و گریندهین (۱۹۹۰) روش‌های مختلف متوسط‌گیری ساده شامل حسابی، هندسی، هارمونیک، حسابی- هارمونیک و هارمونیک - حسابی را بررسی کردند و نتیجه‌گیری کردند که هیچ روش متوسط‌گیری ساده‌ای وجود ندارد که برای تمام سازندهای ناهمگن معتبر باشد [۱۷ و ۱۸].

#### ۴-۴-۱ متوسط‌گیری توانی

این روش در زمینه‌ی افزایش مقیاس تراوایی توسط دچ (۱۹۸۹) معرفی شد [۱۹]. در رابطه (۲-۱)، نحوه محاسبه متوسط‌گیری توانی ارائه شده است:

$$K^* = \left( \frac{1}{V_b} \int_{V_b} [K(y)^{\omega_d}] dV \right)^{\frac{1}{\omega_d}} \quad (2-1)$$

با تغییر توان  $\omega_d$  بین -۱ و +۱، متوسط‌گیری توانی بین میانگین‌های حسابی و هارمونیک تغییر کرده و به ازای  $\omega_d = 0$  معادل میانگین هندسی می‌شود.

در رابطه فوق  $V_b$  حجم بلوک درشت،  $K(y)$  تراوایی مطلق بلوک‌های کوچک و  $k^*$  تراوایی بلوک افزایش مقیاس داده شده می‌باشد. مقادیر  $\omega_d$  می‌توانند با جهت تغییر کنند. این روش برای بلوک‌های درشت شده با هر شکلی قابل استفاده است بنابراین از این لحاظ مناسب شبکه بندی غیریکنواخت می‌باشد. در رابطه متوسط‌گیری توانی، توان  $\omega_d$  می‌تواند مقادیر بین  $-1$  تا  $+1$  را اختیار کند. برای جریان به موازات لایه‌ها  $\omega_d = 1$  و برای جریان عمود بر لایه‌ها  $\omega_d = -1$  می‌باشد. میانگین هندسی از جایگزینی  $\omega_d$  برابر صفر حاصل می‌شود.

در یک شبکه،  $\omega_d$  می‌تواند مقادیر مختلفی را انتخاب کند و در واقع میزان تراوایی بلوک‌های درشت شده به طور یک اصل با تغییر  $\omega_d$  بین  $-1$  تا  $+1$  بدست می‌آید [۱۷، ۲۰ و ۲۱]. این که  $\omega_d$  برای جهات مختلف می‌تواند مقادیر مختلفی را اختیار کند این امر را می‌رساند که شبکه افزایش مقیاس یافته می‌تواند، با وجود ایزوتروپ بودن در مقیاس‌های پایین، در مقیاس بالا به صورت غیر ایزوتروپ باشد.

در روش‌های متوسط‌گیری ذکر شده مقادیر تراوایی مطلق افزایش مقیاس یافته مانند مقادیر اولیه خود به صورت تنسور قطری می‌باشند. روش تنسور کامل میانگین‌گیری توسط کاساپ و لیک (۱۹۹۰) به کار برده شد [۲۲].

#### ۱-۴-۵ افزایش مقیاس در نزدیکی چاه

تقریباً تمام روش‌های افزایش مقیاس از جمله مواردی که به آن‌ها اشاره شد، فرض می‌کنند که فشارهای موضعی به نوعی دارای تغییرات آهسته هستند. این امر به این معناست که در محاسبه‌ی

تنسور تراوایی بلوک، سیال عبوری از بلوک‌های ریز دانه متناظر معمولاً بوسیله‌ی نوعی میدان فشار خطی (شرایط مرزی فشار خطی، فشار دوره‌ای یا شرایط مرزی غیر جریانی) جریان میابد.

در نواحی نزدیک چاه میدان فشار به صورت خطی تغییر نکرده و دارای تغییرات آهسته نیست. از طرفی عملکرد چاه رابطه مستقیم با نتایج افزایش مقیاس دارد. بنابراین بسیاری از روش‌های افزایش مقیاس برای نواحی نزدیک به چاه مناسب نبوده و روش‌های ویژه‌ای برای این منظور مورد نیاز است.

اولین روش افزایش مقیاس در نزدیک چاه توسط دینگ (۱۹۹۵) ارائه شد که بر مبنای حل جریان تک فازی در ناحیه اطراف چاه بود. موفقیت این روش آن است که الگوی جریان در نزدیکی چاه به خوبی مشخص بوده و شرایط مرزی انتخابی برای شبیه‌سازی‌های ریز دانه در صورت حضور چاه اثر کمتری بر روی الگوی جریان دارند [۲۳].

کریستی و همکاران (۲۰۰۰) پیشنهاد دادند که ابتدا یک جریان پایا با حضور چاه در ناحیه مورد نظر، شبیه‌سازی شود. سپس نفوذپذیری معادل و اندیس چاه در بلوک درشت شده براساس نتایج شبیه‌سازی ریز دانه در اطراف چاه، محاسبه می‌شود [۲۴].

دینگ در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ یک روش افزایش مقیاس بر اساس بلوک‌های نامنظم (بلوک سازی بر اساس نقاط رأس) و برای هندسه‌های مختلفی از چاه‌های افقی و عمودی ارائه نمود. وی همچنین اثرات تخریب سازند اطراف چاه را در محاسبات افزایش مقیاس وارد کرد [۲۵ و ۲۶].

## ۵-۱ افزایش مقیاس در جریان دو فازی

برای جریان دو فاز به طور معمول عقیده بر این است که افزایش مقیاس تراوایی مطلق به تنهایی کافی نیست تا اثرات هتروژنتی بر روی شبیه‌سازی سیال دو فاز بدست بیاید [۲۷]، مخصوصاً زمانی که همبستگی طولی<sup>۱</sup> هتروژنتی مطرح نشده در سلول شبیه‌ساز جریان بسیار با اهمیت تر باشد در مقایسه با فاصله بندی چاه‌ها<sup>۲</sup>، یک تکنیک افزایش مقیاس چند فاز باید مورد استفاده قرار بگیرد.

یک تکنیک بسیار مشهود و واضح استفاده‌ی شبه تراوایی نسبی<sup>۳</sup> و یا عبارت دیگر شبه‌توابع<sup>۴</sup> می باشد [۲۸]. نقش شبه تراوایی نسبی این است که سرعت جریان هر فاز سیال خارج از یک سلول را مشخص می‌کند. آن‌ها بین سرعت جریان به گرادیان فشار هر سلول با سلول‌های مجاور آن و اشباع متوسط مشخص در هر سلول ارتباط برقرار می‌کنند. هر دوی سرعت جریان و گرادیان فشار وابسته به جزئیات توزیع اشباع سلول‌ها می‌باشد. از آن پس، برای بدست آوردن نمودارهای شبه تراوایی نسبی لازم و ضروری است که توزیع اشباع داخل سلول را برای هر اشباع متوسط مشخص کنیم [۲۹].

در مقایسه با افزایش مقیاس تک فاز، افزایش مقیاس چند فاز بسیار کمتر توسعه یافته است. همانطور که می‌دانیم مخازن اغلب از انواع مختلفی از سنگ‌ها تشکیل شده‌اند و ناهمگنی در نفوذپذیری، در شرایطی که مقیاس‌های طولی متفاوت باشد، افزایش می‌یابد. برای تخمین و پیش‌بینی جریان سیال در کل میدان، لازم است از این ناهمگنی‌ها اطلاعاتی حاصل شود و همچنین تشخیص داده شود که کدام نوع ناهمگنی بیش‌ترین تاثیر را بر جریان سیال دارد. در حقیقت ما نیاز داریم که طی چند مرحله افزایش مقیاس از یک مقیاس کوچک (در حد سانتی‌متر یا میلی‌متر) به یک مدل برای کل میدان برسیم. هنگامی که دو یا چند فاز وجود دارد بایستی از تاثیر ناهمگنی‌ها بر نیروهای سیال ( موئینه ، ویسکوزیته و گراویتی) نیز اطلاعاتی کسب کرد [۳۰].

<sup>1</sup> . correlation length

<sup>2</sup> . well spacing

<sup>3</sup> . pseudorelative permeabilities

<sup>4</sup> . pseudofunctions

نتایج نشان داده که اهمیت ناهمگنی‌های کوچک مقیاس به پراکندگی ناهمگنی‌های بزرگ مقیاس در انواع سنگ‌ها بستگی دارد، البته بایستی توجه داشت که پراکندگی در توزیع واحدهای سنگی بر صحت نتایج افزایش مقیاس تأثیر گذار است و اهمیت آن بیش تر در واحد های سنگی غالب مشهود است بویژه اگر ارتباطی بین این واحدها و چاه‌های تزریقی (یا سفره ی آب زیرزمینی) و همچنین چاه‌های تولیدی وجود داشته باشد.

ناهمگنی در سنگ‌های نفوذ پذیر در یک مقیاس گسترده‌ای از اندازه‌های میلی‌متری تا اندازه های خیلی بزرگتر وجود دارد [۳۰].

اگر جریان چند فازی باشد علاوه بر اثر ساختارهای نفوذپذیر بایستی به اثری که ناهمگنی‌های کوچک مقیاس بر نیروی موئینه می‌گذارد توجه شود. نتایج آزمایشگاهی هانگ و همکاران (۱۹۹۵) و شبیه سازی عددی رینگروز و همکاران (۱۹۹۳) مربوط به فرآیندهای سیلاب‌زنی در مخازن نفتی بیانگر این است که به دام افتادگی موئینه ممکن است در لامینارها رخ دهد و منجر به کاهش ضریب بازیافت نفت باقیمانده شود [۳۱ و ۳۲].

روش شبه‌توابع یک روش افزایش مقیاس چند مرحله‌ای است که برای محاسبه‌ی ساختارهای کوچک مقیاس در مدل‌های مخزنی بکار گرفته می‌شود. پیکاپ و همکاران (۲۰۰۰) و گُربت و همکاران (۱۹۹۲) در این روش مراحل افزایش مقیاس برای مقیاس‌های طولی‌ای که در مخزن به صورت غالب وجود دارند به کار رفته است. انجام افزایش مقیاس برای مدل‌های کوچک مقیاس مخزنی کاری بسیار وقت گیر است و تنها در مواردی بکار گرفته می‌شود که ساختارهای کوچک مقیاس مهمی در مخزن موجود باشند. رینگروز و همکارانش در سال ۱۹۹۹ اقدام به تعریف یک سری حد‌آستانه‌ها کرده‌اند که براساس پارامترهایی از قبیل کنتراست نفوذپذیری وضخامت لایه‌ها کار می‌کند و تخمین می‌زند که چه هنگامی ساختارهای کوچک مقیاس مهم محسوب می‌شوند [۳۳، ۳۴ و ۳۵].

جونز و همکارانش در سال ۱۹۹۳ و جانسویک و همکارانش در سال ۱۹۹۴ اثرات ناهمگنی را در مدل‌های سلسله‌مراتبی<sup>۱</sup> بررسی کردند. آن‌ها فهمیدند که ساختارهای بزرگ مقیاس یک اثر غالب دارند اما ساختارهای ریز مقیاس نیز مهم هستند [۳۶ و ۳۷].

## ۱-۵-۱ تشریح روش‌های مختلف افزایش مقیاس دو فازی

### ۱-۱-۵-۱ روش‌های پایا

وقتی دو فاز وجود داشته باشد (آب و نفت) بایستی علاوه بر نفوذپذیری مطلق، نفوذپذیری نسبی افزایش مقیاس یابد. ساده‌ترین روش برای افزایش مقیاس جریان دو فازی این است که فرض شود سیالات رفتار پایا<sup>۲</sup> دارند، یعنی:

$$S_w / \partial_t = 0 \quad (۳-۱)$$

در اینجا  $S_w$  میزان اشباع آب می‌باشد.

این فرض باعث می‌شود مسئله‌ی دو فازی به دو مسئله‌ی تک فازی تبدیل شود (البته در اینجا گراویتی در نظر گرفته نمی‌شود).

$$\nabla \cdot (k_{ro} k_{abs} \nabla p_o) = 0 \text{ و } \nabla \cdot (k_{rw} k_{abs} \nabla p_w) = 0 \quad (۴-۱)$$

$K_{abs}$  = نفوذپذیری مطلق،  $k_r$  = نفوذپذیری نسبی،  $P$  = فشار، اندیس‌های ۰ و  $w$  نیز بیانگر نفت و آب اند.

1. hierarchical  
2. steady – state



این روش‌ها، جزء روش‌های سریع‌اند و همچنین این مزیت را دارند که رفتارهای چاه را به صورت تابعی از نفوذ پذیری نسبی مدل کنند [۳۰].

اگر فشار ویسکوزیته و سرعت تزریق نادیده گرفته شود شرایطی حاصل می‌شود که طی آن سیلابزنی در فشار موئینه متعادل انجام می‌گیرد. تحت این شرایط روش پایا به آسانی قابل اجرا خواهد بود. به علاوه زمانی که از فشار موئینه صرف نظر شود و شرایط ویسکوزیته غالب در نظر گرفته شود، این روش نیز به آسانی قابل اجرا است و بایستی توجه شود که هنگامی که سیلابزنی در شرایط نیروی گراویتی غالب انجام می‌شود سیالات به یک تعادل عمودی می‌رسند که این همان شرایط پایا است.

این روش را چندین محقق بررسی کرده‌اند از جمله جرال و کامار در سال ۱۹۹۶ واستفن و پیکاپ در سال ۲۰۰۰ [۳۳ و ۳۸]، در فرض سیلابزنی با شرایط ویسکوزیته‌ی غالب، حالت پایا مطابق رابطه (۵-۱) حاصل می‌شود:

$$u_t \cdot \nabla f_w = 0 \quad (5-1)$$

که در آن  $U_t =$  جریان کل (آب یا نفت) و  $f_w =$  کسر جریان آب<sup>۱</sup> می‌باشد.

در این پروژه نیز فرض بر ثابت بودن کسر جریان است. در سیستمی که نفوذپذیری نسبی ایزوتروپیک دارد این فرض بدین معناست که در کل مدل این پارامتر ثابت خواهد بود [۳۹].

## ۱-۵-۲ سیستم دو فازی دینامیکی

<sup>۱</sup> . fractional flow

روش دینامیکی از سخت‌ترین روش‌های افزایش مقیاس است. این روش زمان‌بر بوده و نیازمند به افزایش مقیاس جریان دو فاز است. به علاوه نتایج حاصل از آن واقعی نخواهند بود. البته این روش چندین مزیت نیز دارد:

الف. چون از یک شبیه ساز جریان دوفازی ریز شبکه برای مدل کردن توزیع اشباع آب در شرایط تعادل نیرویی صحیح استفاده می‌کند، شرایط مرزی مناسبی استفاده می‌شود.

ب. پراکندگی در توزیع ناهمگنی‌های نفوذپذیری و همچنین نیروهای موئینگی و گراویتی قابل محاسبه است.

در اینجا به مطالعه‌ی روش کیت و بری (۱۹۷۵) پرداخته می‌شود. در این روش جریان کلی برای هر سیال در بلوک‌های بزرگ محاسبه می‌شود. برای این کار جریان‌های ریز مقیاس باهم جمع می‌شوند سپس با استفاده از مقادیر هر ستون به محاسبه‌ی میانگین فشار برای هر بلوک بزرگ پرداخته می‌شود. دو محقق فوق با استفاده از بلوک‌های کوچک، نفوذپذیری و نفوذپذیری نسبی را بعنوان یک فاکتور وزنی محاسبه کردند و همچنین برای محاسبه نفوذپذیری نسبی از قانون داریسی استفاده کردند [۴۰].

## ۱-۶ انتخاب روش افزایش مقیاس

در زیر فاکتورهایی که برای انتخاب روش بهتر بایستی در نظر گرفته شود آورده شده است.

### ۱-۶-۱ ساختار نفوذپذیری و کنتراست

در جریان تک فازی، اگر در طول مقیاس‌ها پراکندگی وجود داشته باشد به سختی افزایش مقیاس انجام می‌گیرد. البته در اغلب موارد این حالت رخ نمی‌دهد. دورلوفسکی و همکارانش در سال ۱۹۹۷، اعلام کردند که می‌توان خطای ایجاد شده در این حالت را با انجام افزایش مقیاس غیر یکنواخت کاهش داد [۲۹].

اگر ساختارها ساده باشند می‌توان از میانگین نفوذپذیری برای افزایش مقیاس استفاده کرد، مثلاً در شرایطی که لایه‌ها ادامه دار و موازی باشند و یا همبستگی رندومی در میدان ایجاد شده باشد (یعنی فرض بر این باشد که طول همبستگی‌ها کوچک تر از اندازه ی بلوک‌ها در شبکه باشد) [۴۱].

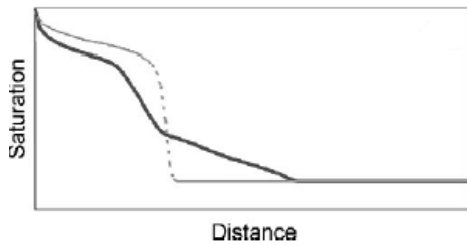
برای موارد پیچیده‌تر از میانگین‌گیری و یا تلفیقی از روش‌های میانگین‌گیری (حسابی- هارمونیک و یا هارمونیک - حسابی) استفاده می‌شود. هنگامی که نفوذپذیری کم باشد (کنتراست نفوذپذیری ۱:۵ یا کمتر باشد) می‌توان از خطای پیش آمده چشم پوشی کرد (هرن و پیکاپ در سال ۲۰۰۲) البته در مخازن نفتی با کنتراست نفوذپذیری بالایی روبرو هستیم و ساختارها نیز پیچیده اند (مثلاً ساختارهای متقاطع) که در این شرایط از روش حل معادله فشار می‌توان استفاده کرد و نتایج بهتری را بدست آورد [۴۲].

### ۱-۶-۲ تعادل نیروها

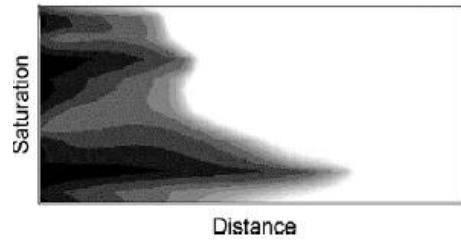
در این قسمت یک شرایط دو فازی در نظر گرفته شده است بنابراین نیازمند به محاسبه‌ی تعادل نیروهای ویسکوزیته، موئینگی و گراویتی هستیم چون این پارامترها مسیر جریان در مخزن را مشخص می‌کنند. در این جا فرض شده است که نفت (که فاز غیر تر کننده است) بواسطه‌ی نیروی آب جابجا می‌شود (آب فاز تر کننده است). در شرایطی که تنها یک نیرو غالب در نظر گرفته شود افزایش مقیاس به آسانی انجام می‌شود در این شرایط حالت پایا ایجاد می‌شود [۳۰].

### ۱-۲-۶-۱ جریان با نیروی ویسکوزیته‌ی غالب

در سیلابزنی تحت شرایطی که نیروی ویسکوزیته غالب بر سایر نیروهاست، سیال تزریق شده تنها در نواحی‌ای که نفوذپذیری بالاتری دارد سریع‌تر حرکت می‌کند و منجر به پراکندگی در فرآیند سیلابزنی می‌شود. شکل ۱-۱، این پدیده را شرح داده است.



ب



الف

شکل ۱-۱ الف. نمونه‌ای از توزیع اشباع در یک ساختار ناهمگن (رنگ تیره). آب از سمت چپ مدل تزریق می‌شود، ب. پروفیل میانگین اشباع (خط توپر) در مقایسه با شوک از جلوی یک ساختار همگن [۲۶]

آرتوز و همکارانش در سال ۲۰۰۴ ونثوتینگر و همکارانش در سال ۲۰۰۴ ویسکوز جریان عبوری در نواحی با نفوذپذیری بالا و نفوذپذیری پایین، در مدل‌های لایه‌ای و ایزوتروپیک محاسبه و مطالعه کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که مقدار این پراکندگی به نسبت حرکت پذیری بستگی دارد:

$$m_f = \frac{\lambda(s_f)}{\lambda(s_{we})} \quad (۶-۱)$$

$$\lambda = \lambda_o + \lambda_w = \frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} \quad (۷-۱)$$

که در آن،  $\lambda =$  حرکت پذیری کلی<sup>۱</sup>

$m_f =$  ویسکوزیته

$S_f =$  اشباع (Buckly-Leverete(1942)

$S_{we} =$  آب غیر قابل برداشت<sup>۲</sup>

آرتوز و همکارانش نشان دادند که اگر  $m_f < 1$  باشد (یعنی سیلابزنی پایدار باشد) نوسانات موجود در جبهه‌ی جلویی جریان که ناشی از ناهمگنی است به سمت پایداری پیش می‌رود و اگر  $m_f > 1$  (سیلابزنی ناپایدار) بهم ریختگی در جبهه‌ی جلویی جریان افزایش می‌یابد. نتوتینگر و همکارانش در سال ۲۰۰۴ نشان دادند که نتایج فوق برای محیط‌های ایزوتروپیک نیز صحت دارد [۴۳ و ۴۴]. زانک و چلیپ در سال ۲۰۰۴ نشان دادند که میزان پراکندگی در مدل‌های همبستگی رندومی با افزایش انحراف معیار و همچنین افزایش طول همبستگی میدان نفوذپذیر، افزایش می‌یابد. بسیاری از مهندسان، افزایش مقیاس تک فازی را چون مشکلات مربوط به جبهه‌ی جلویی را ندارند بر افزایش مقیاس دو فازی ترجیح می‌دهند [۴۵]. به عبارت دیگر در یک شبیه‌سازی جریان اختلاف محدود به علت کوچک بودن اندازه‌ی سلول‌های شبکه، پراکندگی در جبهه‌ی جلویی ایجاد می‌شود و در نتیجه پراکندگی عددی را افزایش می‌دهد [۴۶].

در مواردی که جریان امتزاج ناپذیر است این پراکندگی ایجاد نخواهد شد و پهنای جبهه‌ی جلویی با فاکتور  $\sqrt{t}$  افزایش نخواهد یافت و تمایل به ایجاد یک ناحیه‌ی مشخص و بدون پراکندگی را خواهد داشت [۴۸]. بنابراین اگر تنها افزایش مقیاس تک فازی انجام شود پراکندگی عددی به علت کاهش یافتن پراکندگی در سیال پایدار، کاهش خواهد یافت.

<sup>1</sup> total mobility

<sup>2</sup> connate water saturation

این اثر را در سال ۲۰۰۰، حاجی زاده و همکارانش در سیالات امتزاج پذیر به اثبات رساندند. اکران و آسن در سال ۲۰۰۰ نتیجه گرفتند که روش پایا برای تزریق در حالت غالب بودن نیروی ویسکوزیته، برای جابجایی سیال پایدار در محیط‌های ناهمگن کوچک مقیاس روشی بسیار مناسب است. البته روش فوق چون نمی‌تواند پراکندگی در جبهه‌ی جلویی را محاسبه کند در افزایش مقیاس تک فازی دچار خطاهایی می‌شود [۴۶ و ۴۹].

### ۱-۶-۲-۲ جریان با نیروی موئینگی غالب

در این قسمت، فرض بر این است که سنگ آب‌دوست است. فشار موئینگی در مناطقی که اشباع آب پایین دارد بالاست بنابراین آب به داخل مناطق دارای نفت نفوذ می‌کند و در مناطق همگن باعث پراکندگی جبهه‌ی جلویی می‌شود. در مناطق ناهمگن فشار موئینگی به عنوان تابعی از  $\sqrt{\phi/k}$  تغییر می‌کند، بنابراین آب از مناطق با نفوذپذیری بالا به داخل مناطق با نفوذپذیری کم، نفوذ می‌کند [۳۰]. اگر جریان به صورتی باشد که نیروی موئینگی نیروی غالب باشد پدیده‌ی آشام غالب می‌شود و سبب می‌شود در نواحی بانفوذ پذیری کم آب جریان یابد و در نهایت منجر به آزادسازی نفت به دام افتاده در مناطق نفوذپذیر شود [۵۰]. در همه‌ی مناطق کوچک مقیاس می‌توان از این روش استفاده کرد. در مدل‌های همگن این روش نتایج قابل قبولی به همراه دارد. اگر بین نیروهای مختلف مخزن تعادل برقرار باشد نیز می‌توان از این روش برای مدل سازی استفاده کرد [۵۱ و ۵۲] و برای آن می‌توان یک عدد موئینگی تعریف کرد.

یورتساس و فوکاس در سال ۱۹۸۳ این عدد را طبق رابطه (۸-۱) تعریف کردند:

$$B = \frac{K(d_{pc}/d_s)_{char}}{VL} \quad (8-1)$$

که در آن  $V$  = سرعت جریان،  $(d_{pc}/d_s)_{char}$  = شاخص گرادیان فشار و  $L$  = طول سیستم است. اکران و همکارانش در سال ۱۹۹۶ از این فرمول به خوبی برای محاسبه‌ی عدد موئینگی استفاده کردند. پیکاپ و استفن در سال ۲۰۰۰ از آن برای مدل‌سازی لایه‌های ماسه‌ای در آزمایش و تحت روش تعادل - موئینگی استفاده کردند. این روش در افزایش مقیاس دو فازی دینامیکی به درستی عمل نمی‌کند.

صحت این روش به ساختار نفوذپذیری بستگی دارد. در مدل‌هایی که مناطق با نفوذپذیری بالا بسیار نزدیک به نواحی با نفوذپذیری پایین‌اند همواره به دام افتادن نفت اتفاق می‌افتد و اشباع آب باقیمانده کاملاً در ارتباط با عدد موئینگی است، استفاده از روش تعادل موئینگی در این موارد کاربردی نیست چون سبب می‌شود مقدار نفت به دام افتاده را بیشتر از مقدار واقعی تخمین بزند. این روش برای نواحی‌ای که مساحت بیشتری دارند قابل استفاده است اما در مواردی که طول سلول‌های شبکه‌ی بکاربرده شده برای شبیه‌سازی مخزن ۱۰۰ متر باشد نیز کاربرد خود را از دست می‌دهد [۴۶و۴۲].

### ۱-۶-۲-۳ جریان با نیروی گراویته‌ی غالب

اگر سیلابزنی در شرایطی صورت گیرد که نیروی گراویته، نیروی غالب باشد، جدایش سیالات با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد بدین شکل که سیال با دانسیته‌ی کم بالاتر از سیال با دانسیته‌ی بیشتر قرار می‌گیرد. در این مورد، فرض تعادل عمودی فرض درستی خواهد بود و ممکن است شبیه‌سازی سه بُعدی محدود به شبیه‌سازی دو بُعدی شود. از آنجایی که نیروی گراویته وابسته به اختلاف دانسیته‌ی دو سیال است، در سیلابزنی گاز نیروی گراویته غالب‌تر از سیلابزنی آب خواهد بود. در اینجا به شرح این روش پرداخته نمی‌شود و تنها بر روی سیستم‌های آب-نفت تمرکز می‌شود. در این

سیستم‌ها افت آب در فرآیندهای سیلابزنی آب صورت می‌گیرد، میزان این افت به توزیع نفوذپذیری قائم بستگی دارد. اگر افزایش نفوذپذیری از بالا به پایین باشد این افت بیشتر از زمانی خواهد بود که افزایش نفوذپذیری از پایین به بالا است [۳۱].

#### ۱-۶-۲-۴ تعادل بین نیروها

در اغلب موارد سیلابزنی تنها با غالب بودن یک نیرو انجام نمی‌گیرد بنابراین بایستی تلفیقی از نیروهای مختلف را در نظر گرفت، روش‌های پایا به طور کاربردی روش‌های سختی هستند. به عنوان مثال دیل و همکارانش در سال ۱۹۹۷ این روش را برای مدل سازی یک بُعدی محیط ناهمگن بکار برده‌اند و از گستره‌ای از نیروهای ویسکوزیته و گراویتی استفاده کردند. در سال ۲۰۰۰ نیز پیکاپ و استفن از روش پایا و ویسکوزیته - گراویتی استفاده کرده‌اند و توانستند به محاسبه‌ی دقیق‌تر نیروی موئینگی بپردازند (البته در این روش فرض بر تعادل بین نیروهای گراویتی و ویسکوزیته بود) در کل فرض بر این است که مجموعه‌ای از این نیروها وجود داشته باشد، بنابراین نیازمند به افزایش مقیاس دو فازی دینامیکی برای شبکه‌های بزرگ هستیم [۴۲ و ۵۳].

#### ۱-۶-۲-۵ خلاصه‌ای از تعادل بین نیروها

به طور خلاصه، ناهمگنی در نفوذپذیری اثرات مختلفی در فرآیند سیلابزنی دارد که این اثرات به تعادل بین نیروها بستگی دارد. اگر نیروی ویسکوزیته و موئینه در نظر گرفته شوند در نواحی با نفوذپذیری بالاتر جبهه‌ی جلویی با سرعت بیشتری حرکت می‌کند (البته اگر سیلابزنی با فرض غالب بودن نیروی ویسکوزیته باشد) اما در مناطقی که نیروی موئینگی غالب است جبهه‌ی جلویی در



مناطق با نفوذپذیری کم سریع‌تر حرکت می‌کنند. اگر نسبت متوسطی از این دو نیرو در نظر گرفته شود جبهه‌ی جلویی در هر دو ناحیه با نفوذپذیری بالا و پایین با سرعت یکسانی حرکت می‌کند. توزیع سیال همچنین به کنتراست و ساختار نفوذپذیری نیز بستگی دارد. در مقیاس‌های کوچک سیلابزنی با آب تمایل به غالب شدن نیروی موئینگی را دارد و روش موئینگی متعادل روشی مفید برای روند افزایش مقیاس چند مرحله‌ای محسوب می‌شود [۳۱].

## فصل دوم: تابع ویولت

فصل دوم: تابع ویولت

۱-۲- مقدمه

۲-۲- تبدیل ویولت

۳-۲- مروری بر ادبیات افزایش مقیاس با رویکرد ویولت

## ۲-۱ مقدمه

برای سال های متمادی پردازش سیگنال رقومی به طور کامل زیر سیطره ی نظریه تبدیل فوریه و روش عددی پیاده سازی آن یعنی تبدیل فوریه سریع بود.

عیب اصلی نظریه ی فوریه این است که سیگنال ها یا تصاویر مورد پردازش باید دارای ویژگی های آماری پایا در حیطه زمان یا مکان باشند. در بسیاری از کاربردها انحراف از رفتار ایستایی به طور دقیق همان اطلاعاتی است که باید از سیگنال استخراج شوند. چنین رفتارهایی به عنوان مثال در سیگنال های انعکاس لرزه ای رخ می دهند. اما در بسیاری از کاربردهای جدید هدف تعیین نایستایی سیگنال یا تصویر است. با گذشت زمان، نظریه ویولت به عنوان یک ایده ی تکمیلی جهت رفع مشکل نظریه ی فوریه مطرح شد [۵۴].

ویولت در ابتدا توسط یک ریاضی دان مجارستانی به نام آلفرد هار در سال ۱۹۱۰ معرفی شد. تابعی که وی معرفی کرد امروزه به عنوان ویولت هار شناخته می شود. گرچه ویولت هار به علت سادگی آن برای آموزش تئوری ویولت هار عالی می باشد، اما برای بیشتر کاربردهای عملی ناکافی بوده و منجر به منحنی های دنداندار به جای منحنی های صاف می شوند. بنابراین روش ویولت هار برای مدت زمان طولانی به دست فراموشی سپرده شد [۵۵].

در سال ۱۹۴۶، دنیس گابر، یک فیزیک دان انگلیسی، تبدیل گابر را در تشابه با تبدیل فوریه توسعه داد که می توانست یک موج را به بسته های زمان- فرکانس تفکیک نموده و بیشترین تمرکز در میدان های زمان و فرکانس را به دست دهد.

تا اواسط سال ۱۹۸۰، توسعه‌ی توابع ویولت بسیار کند صورت گرفت. اما در سال ۱۹۸۴، روش هار مجدداً مورد استفاده قرار گرفت. جین مارلت در سال ۱۹۸۴، تلاش کرد تا ابزار بهتری را برای جستجوی نفت در اختیار زمین شناسان قرار دهد.

مارلت، یک مهندس شرکت Elf-Aquitaine روش شخصی خود را برای آنالیز سیگنال‌های لرزه‌ای به کار برد تا بتواند اجزاء مربوطه را که در فضا متمرکز بودند و او آن‌ها را ویولت نامید، ایجاد کند. بعدتر این توابع، ویولت مارلت نامیده شدند. در صورتی که این اجزا تغییر مقیاس یافته و یا متراکم شوند و یا اینکه در طول زمان جابجا شوند، شکل خود را حفظ می‌کنند.

روش مارلت بنظر می‌رسید که کارآمد باشد. مارلت بر روی کامپیوتر شخصی خود می‌توانست یک موج را به موج‌هایی که تشکیل دهنده‌ی آن موج بودند تفکیک کرده و سپس با تلفیق آن‌ها، موج اولیه را ایجاد کند. وی به دنبال توجیه ریاضی و تئوری مسئله می‌گشت تا سرانجام پاسخی را که می‌خواست از آلکس گروسمن، یک فیزیکدان فرانسوی دریافت کرد. گروسمن به مدت یک سال با مارلت همکاری نمود تا توانست اثبات کند موج‌ها از روی اجزاء موج‌های تشکیل دهنده‌ی آن قابل ساختن می‌باشد. در واقع مشخص گردید که تبدیل ویولت بهتر از تبدیل فوریه عمل می‌کند زیرا نسبت به خطاهای محاسباتی کوچک، حساسیت کمتری دارند.

مقاله گروسمن و مارلت در سال ۱۹۸۴، نخستین مقاله‌ایست که واژه‌ی ویولت در آن استفاده شده است.

مایر و یکی از دانشجویان سابق او به نام استفان مالات، در سال ۱۹۹۳، به کشف نوع جدیدی از ویولت‌ها پرداخت که دارای خاصیت تعامد بودند و باعث شد تا بتوان با تبدیل ویولت، به سادگی تبدیل فوریه کار کرد. مالات ارتباط بین فیلترهای بالاگذر و پایین گذر را با ویولت‌های اورتونرمال را کشف کرد [۵۶].

آخرین تحول بزرگ در انقلاب ویولت در سال ۱۹۸۷ اتفاق افتاد. زمانی که اینگرید دابشیز، بر اساس تلاش‌های مالات، گروه جدیدی از ویولت‌ها را کشف کرد که نه تنها خاصیت تعامد داشتند بلکه با اصول فیلتر کردن دیجیتالی ساده نیز قابل اجرا بودند. استفاده از ویولت‌های جدید تقریباً به سادگی ویولت‌ها بود با این تفاوت که این ویولت‌ها نرم و یکنواخت بوده و جهش‌های ویولت‌ها را نداشتند. ویولت‌های دابشیز دارای این خاصیت هستند که اولاً ارتباط نزدیکی با تئوری فرکتال‌ها دارند، ثانیاً مشخصه‌های دندان‌داری را در شکل نموداری آن‌ها، هر درجه از بزرگنمایی می‌توان مشاهده کرد. این پیچیدگی عجیب از جزئیات به این معنی است که هیچ فرمول ساده‌ای برای این ویولت‌ها وجود ندارد اما به طور مؤثری کارآمد می‌باشند [۵۷].

## ۲-۲ تبدیل ویولت

تبدیل ویولت به منظور نمایش یک تابع با یک سری توابع اورتونرمال به عنوان توابع ویولت به کار می‌رود. مشابه تبدیل فوریه این تبدیل به منظور بررسی امواج تشکیل دهنده‌ی موج اصلی به کار می‌رود، با این تفاوت که بر خلاف روش تبدیل فوریه که توابع اورتونرمال آن به صورت توابع مثلثاتی با دامنه‌ی نامحدود می‌باشد، روش تبدیل ویولت از توابع با دامنه‌ی محدود بهره می‌جوید و حسن استفاده از این روش مکان‌یابی محل وقوع یک موج علاوه بر وجود موج می‌باشد. بسط تابع  $f(x)$  با استفاده از این روش به صورت رابطه (۲-۱) می‌باشد [۵۸].

$$f(x) = \sum_{j,k=-\infty}^{+\infty} D_j(k) \Psi_{jk}(x) \quad (1-2)$$

در این بسط  $D_{jk}$  ضرایب ویولت می‌باشند. در واقع این رابطه این واقعیت را بیان می‌کند که تبدیل ویولت وسیله‌ای است برای شکستن یک سیگنال یا تابع به مؤلفه‌های تشکیل دهنده آن، با این تفاوت که در این تبدیل به جای استفاده از توابع مثلثاتی به عنوان تابع پایه، از توابع ویولت استفاده می‌شود.

شکل انتگرالی تبدیل ویولت برای توابع پیوسته به صورت رابطه (۲-۲) می‌باشد.

$$W_{\Psi}f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx \quad (2-2)$$

که در آن  $f(x)$  تابع اولیه و  $\Psi$  تابع ویولت<sup>۱</sup> می‌باشد.  $a$  و  $b$  به ترتیب مقادیر تغییر مقیاس و جابجایی می‌باشند. در مورد توابع گسسته این مقادیر با ضرایب ۲ تغییر می‌کنند. مقادیر ضرایب ویولت در بسط ویولت از رابطه محاسبه (۳-۲) می‌شوند.

$$D_j(k) = W_{\Psi}f(2^{-j}, k2^{-j}) \quad (3-2)$$

از آنجا که میانگین توابع ویولت صفر می‌باشند، ضریب جزئیات نشانگر تغییرات تابع  $f(x)$  در یک پنجره به همسایگی  $b$  و به اندازه  $a$  است. تغییرات شدید و ناگهانی در تابع  $f(x)$  منجر به محاسبه ضریب جزئیات بزرگ می‌شود.

با استفاده از ضرایب  $a$  و  $b$  می‌توان مقیاس و مکان اعمال تابع ویولت بر تابع اصلی را تعیین کرد. با تغییر منفی بینهایت تا مثبت بینهایت این مقادیر می‌توان کلیه‌ی جزئیات تابع را در تمامی مکان‌ها و تمامی مقیاس‌ها استخراج نمود. در واقع یک تابع نیز چیزی به جز مجموع جزئیات آن در تمام مکان‌ها و مقیاس‌ها نمی‌باشد.

با توجه به مطالب فوق می‌توان از تبدیل ویولت به عنوان ابزاری جهت تفکیک تابع به تابع تقریب و توابع جزئیات استفاده کرد. توابع جزئیات ویولت، تنها شامل اطلاعات مربوط به اختلاف بین دو تقریب از یک تابع یکسان در دو مقیاس متوالی می‌باشد و به عبارتی بیانگر میزان اطلاعات از دست رفته در هر درجه افزایش مقیاس است. تابع تقریب با استفاده از توابع دیگری به نام توابع

---

<sup>۱</sup>. wavelet function

مقیاس‌بندی<sup>۱</sup>  $\varphi$  که گاهی اوقات نیز تابع ویولت پدر خوانده می‌شود، بدست می‌آید. توابع مقیاس بندی بر ویولت مادر متعامد بوده و دارای میانگین واحد می‌باشند. انتقال و تغییر مقیاس توابع مقیاس‌بندی نیز به صورت رابطه‌ی (۴-۲) می‌باشد.

$$\varphi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{\varphi-b}{a} \quad (۴-۲)$$

با استفاده از تابع مقیاس‌بندی تابع تقریب یک تابع در مکان و مقیاس مورد نظر از رابطه (۵-۲) قابل محاسبه است.

$$S_b(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \varphi_{a,b} dx \quad (۵-۲)$$

توابع مقیاس و توابع جزییات توسط ضرایبشان قابل محاسبه هستند. رابطه‌ی بدست آوردن توابع مقیاس و جزییات از ضرایب به صورت روابط (۶-۲) و (۷-۲) است.

$$\varphi(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_k \varphi(2x - k) \quad (۶-۲)$$

$$\Psi(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g_k \Psi(2x - k) \quad (۷-۲)$$

در روابط فوق مجموعه ضرایب  $h_k$  صافی مقیاس‌بندی و یا صافی پایین‌گذر<sup>۲</sup> و مجموعه ضرایب  $g_k$  صافی جزییات و یا صافی بالاگذر<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند که طبق رابطه‌ی (۸-۲) به هم وابسته هستند.

$$g_k = (-1)^k h_{L-1-k} \quad (۸-۲)$$

<sup>۱</sup> scaling function

<sup>۲</sup> low-Pass Filter

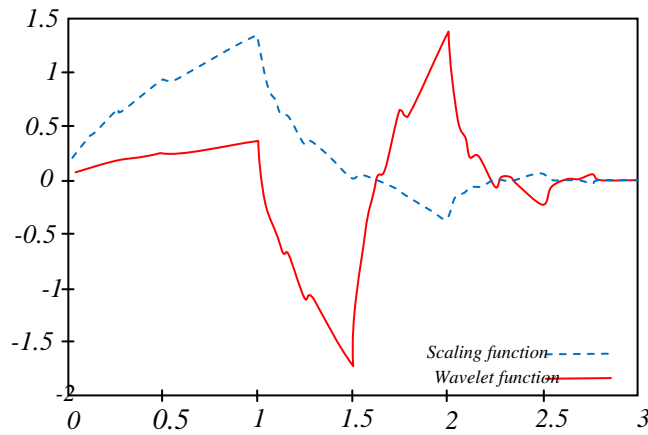
<sup>۳</sup> high-Pass Filter

در فرمول فوق مقدار  $L$  به نوع تابع ویولت بستگی دارد [۵۹].

مقادیر ضرایب  $h_k$  برای چند نوع تابع ویولت از خانواده دابشیز، در جدول ۱-۲ آورده شده است. همچنین شکل ۱-۲ نمودارهای تابع ویولت db4 و تابع مقیاس معادل آن، که در این نیز از این توابع استفاده شده است را نشان می‌دهد [۶۰].

جدول ۱-۲ ضرایب $h_k$ برای چند نوع تابع ویولت				
$N=2$	$N=4$	$N=6$	$N=8$	$N=10$
۰/۷۰۷۱۰۶۷	۰/۴۸۲۹۶۳	۰/۳۳۲۶۷۱	۰/۲۳۰۳۷۸	۰/۱۶۰۱۰۲
۰/۷۰۷۱۰۶۷	۰/۸۳۶۵۱۶	۰/۸۰۶۸۹۲	۰/۷۱۴۸۴۷	۰/۶۰۳۸۲۹
	۰/۲۲۴۱۴۴	۰/۴۵۸۷۷۵	۰/۶۳۰۸۸۱	۰/۷۲۴۳۰۹
	-۰/۱۲۹۴۱	-۰/۱۳۵۰۱	-۰/۰۲۷۹۸	۰/۱۳۸۴۲۸
		-۰/۰۸۵۴۴	-۰/۲۴۲۲۹	-۰/۲۴۲۲۹
		۰/۰۳۵۲۲۶	-۰/۰۳۲۲۴	-۰/۰۳۲۲۴
			-۰/۰۳۲۸۸۳	۰/۰۷۷۵۷۱
			-۰/۰۱۰۶	-۰/۰۰۶۲۴
				-۰/۰۱۲۵۸
				۰/۰۰۳۳۳۶





شکل ۲-۱ تابع ویولت db4 و تابع مقیاس معادل آن [۳۹]

در محاسبات عددی از روش تبدیل ویولت گسسته<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در این روش داده‌های اولیه توسط دو رابطه زیر (Mallat 1989) به داده‌های تقریب و داده‌های جزئیات تبدیل می‌شوند [۶۱].

$$S_j(K) = \sum_L h_L A_{j-1}(L + 2K) \quad (۹-۲)$$

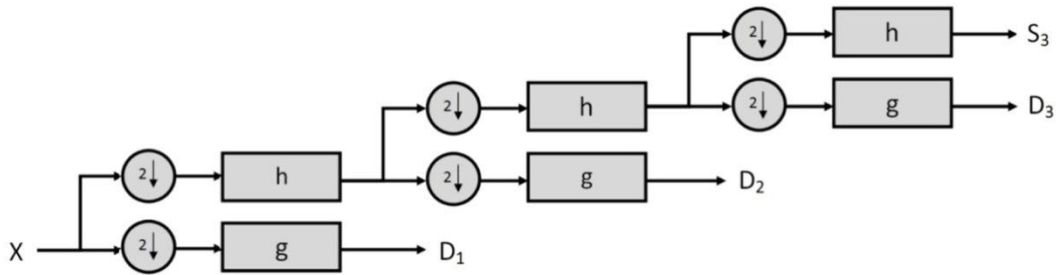
$$D_j(K) = \sum_L g_L A_{j-1}(L + 2K) \quad (۱۰-۲)$$

ماتریس تبدیل دو رابطه فوق برای تعداد اولیه هشت داده و تابع ویولت db4 به صورت شکل (۲-۲) می‌باشد. به منظور دستیابی به تقریب داده‌ها در مقیاس‌های بالاتر می‌توان ماتریس صافی مقیاس‌بندی و جزئیات را به صورت پی در پی به داده‌های افزایش مقیاس یافته‌ی مرحله‌ی قبل اعمال کرد (شکل ۲-۳).

<sup>۱</sup>. Discrete Wavelet Transform

$$\begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 \end{pmatrix}$$

شکل ۲-۲ نمونه‌ای از ماتریس تبدیل برای تابع ویولت db4 و برای هشت داده [۶۰]



شکل ۲-۳ اعمال تبدیل ویولت به صورت پی در پی به منظور دستیابی به مقیاس بالاتر تقریب داده‌ها

به منظور استفاده از تبدیل ویولت گسسته بر روی داده‌های دو بُعدی ضرایب مقیاس‌بندی و جزئیات

طبق رابطه (Mallat 1989) به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۶۱].

$$\varphi_{j,K_1,K_2}(x, y) = \varphi_j^{k_1}(x) \varphi_j^{k_2}(y) \quad (۱۱-۲)$$

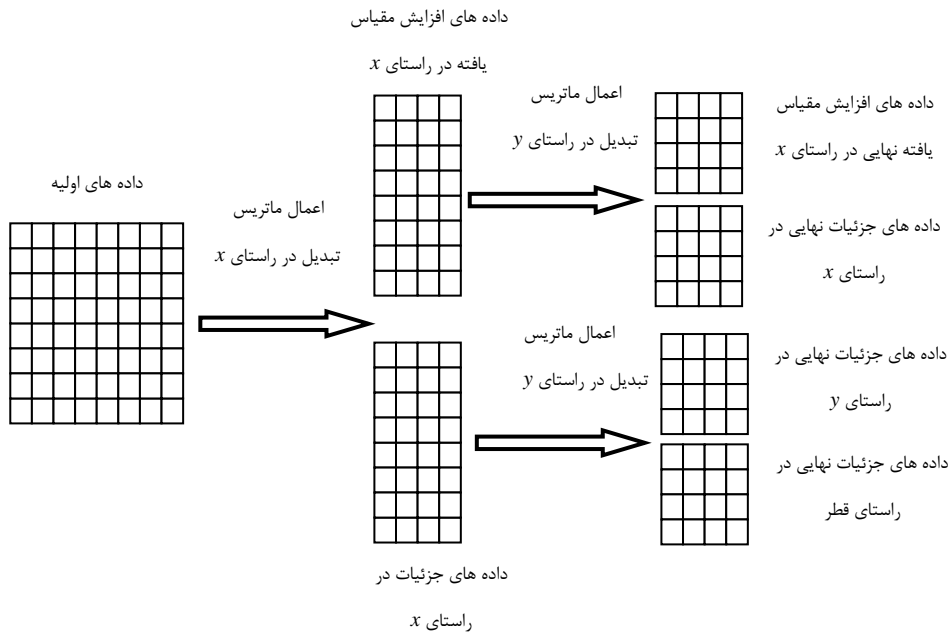
$$\Psi_{j,K_1,K_2}^1(x, y) = \varphi_j^{k_1}(x) \varphi_j^{k_2}(y) \quad (۱۲-۲)$$

$$\Psi_{j,k_1,k_2}^2(x, y) = \varphi_j^{k_1}(x) \Psi_j^{k_2}(y) \quad (۱۳-۲)$$

$$\Psi_{j,k_1,k_2}^3(x,y) = \Psi_j^{k_1}(x)\Psi_j^{k_2}(y) \quad (۲-۱۴)$$

همانطور که دیده می‌شود سه تابع ویولت متفاوت، متناسب با سه جهت  $x$  و  $y$  و قطری وجود دارد.

در محاسبات عددی به منظور محاسبه‌ی داده‌های افزایش مقیاس یافته و داده‌های جزئیات از داده‌های اولیه، ابتدا ماتریس تبدیل بر روی داده‌های اولیه در یک جهت اعمال می‌شود، تا داده‌های افزایش مقیاس یافته و داده‌های جزئیات در آن جهت محاسبه شود سپس با اعمال دوباره‌ی ماتریس تبدیل بر روی داده‌های جزئیات و افزایش مقیاس یافته‌ی مرحله‌ی قبل داده‌های افزایش مقیاس یافته‌ی نهایی و داده‌های جزئیات در سه جهت محاسبه می‌شوند (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴ شکل اعمال ماتریس تبدیل ویولت به داده های دو بُعدی

## ۳-۲ مروری بر ادبیات افزایش مقیاس با رویکرد ویولت

جانسن در سال ۱۹۹۸، تکنیکی برای افزایش مقیاس مدل ریزدانه توسط تبدیل ویولت، برای مدل‌های دو و سه بُعدی ارائه کرد. وی علاوه بر روش ویولت برای افزایش مقیاس مدل‌های ریزدانه زمین-شناسی، روش‌های نرمال‌سازی مجدد و تنسوری را نیز برای مقایسه با مدل حاصله از تبدیل ویولت، بکار برد. جانسن برای تبدیل ویولت از الگوریتم مالات، برای افزایش مقیاس تراوایی مطلق استفاده کرد. روش‌های نرمال‌سازی مجدد و تنسوری نتایج مشابهی نشان دادند اما مدل حاصله از روش ویولت برای پارامتر سرعت تولید نفت، مقادیر بیشتری نشان داد و در عوض سرعت تولید آب، توزیع فشار و اشباع شدگی در مدل افزایش مقیاس یافته توسط تبدیل ویولت، به مقادیر واقعی مخزن نزدیکتر بود. جانسن بیان کرد که انحراف سرعت تولید نفت در مدل حاصل از روش ویولت، از مقادیر واقعی به طور مؤثری تاثیر گرفته از محاسبات تولید و تزریق می‌باشد، که با تغییر در مقادیر فاکتور پوسته<sup>۱</sup> و شعاع معادل چاه بگونه‌ای که فشار چاه تولیدی و فشار چاه تزریق به مقادیر واقعی نزدیک شود، تصحیح می‌شود و در نهایت این روش، روش بسیار کارآمدی خواهد بود. در نهایت جانسن روش ویولت را به عنوان روش کارآمد و مؤثری برای افزایش مقیاس تراوایی در مدل‌های دو و سه بُعدی معرفی کرد و اظهار کرد، اگرچه تکنیک ویولت بر اساس خصوصیات جریانی نیست اما نتایج حاصل از آن به‌خوبی و یا حتی بهتر از روش‌های بر اساس جریان است [۶۲].

لیفو چو و چاترینگر نیز در سال ۱۹۹۸، رفتار جریان دو فازی در میدان ریز مقیاس را به طور دقیق بواسطه‌ی تراوایی مطلق افزایش مقیاس یافته توسط الگوریتم مالات را مورد بررسی قرار دادند. ایشان به نتایج قابل قبولی در مقایسه با مدل ریز دانه رسیدند. آن‌ها همچنین خصوصیات میدان

<sup>۱</sup>. Skin factor

ریزمقیاس را با استفاده از اطلاعات درشت مقیاس، به طور مناسبی به منظور بررسی میزان دقت پروسه افزایش مقیاس بازسازی کردند. آنها این روند را بر روی سازند آلموند<sup>۱</sup> انجام دادند و به نتایج قابل قبولی دست یافتند [۶۳].

سهیمی در سال ۲۰۰۰، برای توصیف ساختارهای متخلخل در مقیاس زمین، رویکرد جدیدی را ارائه کرد. او در روش خود از سه ابزار آنالیز فرکتالی، تبدیل ویولت و شبکه عصبی فرکتالی استفاده کرد بگونه‌ای که از رویکرد فرکتال برای آنالیز لاگ تخلخل و توزیع تراوایی و سایر خصوصیات ساختارهای متخلخ استفاده کرد. او نشان داد که آنالیز دقیق داده‌ها بواسطه‌ی تبدیل ویولت صورت می‌گیرد، بگونه‌ای که تبدیل ویولت روش مؤثر و کارآمدی برای کشف مشخصات فرکتالی می‌باشد در حالی که یک شبکه عصبی فرکتالی می‌تواند در تشخیص خصوصیات مهم مخزن بر اساس داده‌های موجود تأثیر بسزایی داشته باشد.

او همچنین ثابت کرد که برای آنالیز شبکه‌های شکست در ساختارهای متخلخل، تبدیل ویولت ابزار بسیار مناسبی می‌باشد.

او اظهار کرد که افزایش مقیاس بر اساس تبدیل ویولت برای توصیف جریان در مخازن شکسته ابزار بسیار مناسبی می‌باشد زیرا با داشتن یک مبنای تئوریکال برای انتشار امواج لرزه‌ای بر اساس مقیاس، پردازش داده‌های لرزه‌ای و آنالیز آن‌ها بر اساس استفاده از تبدیل ویولت منجر به کالیبراسیون مناسب داده‌های مغزه، لاگ و داده‌های لرزه می‌شود. به عبارت دیگر مقیاس گذاری<sup>۲</sup> می‌تواند به عنوان یک پارامتر اصلی در محاسبه خواص لرزه‌ای ظاهر شود بگونه‌ای که منجر به ارتباط بهتر داده‌ها با داده‌های چاه شود. او در نهایت نتایج مدل شبکه عصبی- ویولت فرکتال را با شبیه سازی‌های تصادفی

---

<sup>۱</sup> . Almond

<sup>۲</sup> .scaling

مشروط ترکیب ساخت تا مدل زمین شناسی ریز مقیاس دقیقی تولید کند که شامل شبکه شکستگی باشد [۶۴].

سهیمی و رسایی در سال ۲۰۰۵، برای مدل سازی مخازن هتروژن از تبدیل ویولت هار استفاده کردند. آن‌ها برای نشان دادن دقت و راندمان روش کارشان، سه مسئله مهم را در مخازن هتروژن مورد بررسی قرار دادند: آنالیز فشار گذرا، جابجایی امتزاج پذیر و جریان دو فازی.

در هر کدام از موارد با در نظر گرفتن مقادیر مناسبی برای حد آستانه جزئیات و تقریب، به نتایج مشابهی در مقایسه با مدل‌های اولیه ریز مقیاس دست یافتند. آنها مهمترین عامل در ارزشمند بودن افزایش مقیاس مدل‌های زمین شناسی را ضرایب حد آستانه، معرفی کردند [۶۵]. آنها در سال ۲۰۰۷، از تبدیل هار برای افزایش مقیاس و شبیه سازی جابجایی امتزاج ناپذیر در مخازن سه بُعدی هتروژن، با جریان سیال دو فازی، استفاده کردند و به نتایج مطلوبی دست یافتند [۶۶]. در سال ۲۰۰۸، با استفاده از db4، ثابت کردند که در بسیاری از موارد افزایش مقیاس با رویکرد ویولت، برای بسیاری از مدل‌های مخزنی با هتروژنتی بالا، در صورتی که جریان تک فازی باشد بسیار دقیق و ثمربخش می‌باشد [۶۷].

ورا پانکالدی و پیتر ینگ در سال ۲۰۰۵، از روش‌های نرمال سازی مجدد و ویولت و نرمال سازی مجدد بر اساس تبدیل ویولت، برای افزایش مقیاس مدل‌های زمین شناسی در سیستم‌های یک، دو سه بُعدی استفاده کردند. ایشان از ویولت هار استفاده کردند و با ساختن یک فرمول خاص و بکاربردن آن برای موارد ساده چگونگی استفاده از تابع ویولت و اصول و اساس استفاده از آن را در مراحل ضروری برای برخورد با مسائلی که کمتر بدیهی هستند را فراهم کردند. آن‌ها مهمترین مزیت استفاده از روش‌های اشاره شده را سرعت بیان کردند و به این نتیجه رسیدند که مهمترین مشکل در روش‌های فوق زمانی رخ می‌دهد که کنتراست بالای نفوذ پذیری داشته باشیم مانند شیل‌ها که منجر

به تغییرات شدید فشار می‌شود. ایشان همچنین به این نتیجه رسیدند که با بکاربردن ماتریس‌های متفاوتی از ویولت به نتایج متفاوتی می‌توان رسید [۶۸].

ایشان در سال ۲۰۰۸، از روش نرمال‌سازی مجدد بر اساس تبدیل ویولت هار، برای افزایش مقیاس تراوایی مطلق در معادله انتقال، برای شبیه‌سازی جریان در مخزن را مورد بررسی، استفاده کردند. آن‌ها اظهار کردند که این روند را برای هر معادله سهموی، همانند معادله حرارت و سایر معادله‌های انتقال پذیری مولکولی برای سیستم‌های یک و دو بُعدی، می‌تواند بکار رود. از مزایای این رویکرد سرعت بسیار بالای انجام محاسبات آن بود [۶۹].

بابایی و کینگ در سال ۲۰۱۰، کاربرد رویکرد ویولت را در محاسبه تراوایی مؤثر مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان از ویولت هار برای افزایش مقیاس معادله‌ی فشار برای جریان دو فازی در دو بُعد، برای مخزنی با ۶۰ هزار سلول، استفاده کردند و به نتایج بسیار مطلوبی و نزدیکی با مدل زمین‌شناسی ریز مقیاس، دست یافتند [۷۰]. آن‌ها در سال ۲۰۱۱، اظهار کردند که افزایش مقیاس پارامترهایی همچون تراوایی مطلق در جریان تک فازی بدلیل حذف پیچیدگی‌های زیر بلوکی، مشکلاتی ایجاد می‌کند. برای مقابله با این مسائل تکنیک‌های بازسازی<sup>۱</sup> را برای کاهش مقیاس مناطق دینامیکی محلی مخزن، توسعه دادند. آن‌ها از طیف وسیعی از روش‌های افزایش مقیاس همچون حل معادله فشار، نرمال‌سازی مجدد، نرمال‌سازی مجدد تعدیل یافته و تبدیل ویولت استفاده کردند و سیلابزنی تراکم‌ناپذیر در دو و سه بُعد را شبیه‌سازی کردند. نتایج را با روش افزایش مقیاس محلی - سراسری و با روش کاهش مقیاس گریدبندی‌ها مقایسه شد [۷۱].

---

<sup>۱</sup>.reconstruction

## فصل سوم: شرایط مدل سازی

۱-۳ مقدمه

۲-۳ شبیه ساز اکلیپس

۳-۳ تولید داده‌های مصنوعی



### ۳-۱ مقدمه

در این پایان نامه، برای مدل سازی مخزن از شبیه ساز تجاری اکلیپس استفاده شده است. لذا برای آگاهی از تمامی روابط و معادلات حاکم بر مخزن نیاز به معرفی این شبیه ساز و نحوه عملکرد آن می باشد که در این فصل به توضیح آن خواهیم پرداخت. شایان ذکر است که در این پایان نامه از داده های مصنوعی برای شبیه سازی مخزن استفاده شده است که به طور مختصر توضیحاتی راجع به نحوه تولید و مشخصات آنها نیز آورده شده است.

### ۳-۲ شبیه ساز اکلیپس

مجموعه شبیه ساز اکلیپس شامل دو شبیه ساز جداگانه می باشد:

الف. اکلیپس ۱۰۰ که مختص مدل سازی نفت سیاه است.

ب. اکلیپس ۳۰۰ که مختص مدل سازی ترکیبی است.

در اکلیپس ۱۰۰، هدف عمومی شبیه سازی نفت سیاه با گازهای متراکم<sup>۱</sup> در سیستم های یک، دو و سه بُعدی با جریان سیال یک، دو و سه فازی می باشد. در این شبیه ساز برای حل معادلات مربوط به جریان سیال در مخزن، از روش های تفاضل محدود<sup>۲</sup>، صریح<sup>۳</sup>، ضمنی<sup>۴</sup> و کاملاً ضمنی<sup>۵</sup> استفاده می شود.

---

<sup>۱</sup>. condensate gas

<sup>۲</sup>. finite difference

<sup>۳</sup>. explicit

<sup>۴</sup>. implicit

<sup>۵</sup>. Fully implicit

اکلیپس ۳۰۰، یک شبیه ساز ترکیبی است به این معنا که نوع هیدروکربن تولیدی را شبیه سازی می کند. به عبارت دیگر اکلیپس ۳۰۰ با استفاده از معادله حالت، رفتار سیال نفت سیاه و فشار آن که وابسته به تراوایی است، رفتار مخزن را با پیش بینی نوع و ترکیب سیال تولیدی مدل سازی می کند.

از آنجایی که در این پایان نامه، برای مدل سازی مخزن از اکلیپس ۱۰۰ یا اکلیپس نفت سیاه استفاده شده است به بررسی بیشتر آن می پردازیم.

همانطور که پیشتر گفته شد، از اکلیپس نفت سیاه برای شبیه سازی رفتار سیالات یک، دو و سه فاز با فرض ثابت بودن ترکیب سیالات با تغییرات فشار و زمان استفاده می شود [۷۲]. به طور کلی، شبیه ساز اکلیپس ۱۰۰، برای شبیه سازی، اطلاعاتی از مخزن را که شامل خصوصیات سنگ، سیال مخزن و هندسه مخزن می باشد را به عنوان ورودی با فرمت خاصی می پذیرد تا بتواند مدل اولیه و استاتیکی از مخزن بسازد. در نهایت با داشتن اطلاعات تولیدی از چاهها، خروجی این شبیه ساز ما قادر به بررسی خصوصیات دینامیک مخزن مانند فشار و اشباع شدگی می سازد. این شبیه ساز از روابط و معادلاتی استفاده می کند که اساسی ترین رابطه مورد استفاده در این نرم افزار، قانون داریسی<sup>۱</sup> است. به عبارت دیگر برای شبیه سازی جریان در مخزن، از حل عددی معادله جریان<sup>۲</sup> استفاده می کند که این معادله از ترکیب قانون داریسی و معادله تعادل جرمی<sup>۳</sup> به دست می آید. معادلات ذکر شده بر روی شبکه های ثابت اعمال می شود. مخزن تحت شبیه سازی، به چندین سلول تقسیم بندی می شود و اطلاعاتی نظیر تراوایی و تخلخل و ... به هر سلول جداگانه نسبت داده می شود. از طرفی چاههایی در این مخزن به عنوان چاه های تزریق و تولید در سلول های خاصی در نظر گرفته می شود. آنچه که در امر شبیه سازی برای ما در درجه اهمیت قرار دارد، میزان تولید و سرعت تولید از چاههای

---

<sup>1</sup>.Darcy's low

<sup>2</sup>.flow equation

<sup>3</sup>.Material balance equation

تولیدی و همچنین تغییرات فشار و اشباع شدگی مخزن به ازای تولید هر فاز از سیال از هر چاه، با استفاده از حل معادلات حاکم می‌باشد.

در این شبیه ساز، جریان سیال از یک سلول به سلول کناری، از یک سلول به چاه تکمیلی و همچنین جریان بین چاه‌ها، همگی در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر جریان سیال را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\text{جریان}^1 = \text{انتقال پذیری}^2 + \text{قابلیت حرکت}^3 + \text{اختلاف پتانسیل}^4$$

از این رابطه می‌توان به نوع داده های ورودی برای شبیه سازی نفت سیاه پی برد. همانطور که مشاهده می‌شود برای محاسبه ی جریان نیاز به اطلاعات انتقال پذیری، قابلیت حرکت و اختلاف پتانسیل می‌باشد. برای محاسبه ی انتقال پذیری، اطلاعات مربوط به هندسه ی مخزن مانند ابعاد مخزن، تعداد سلول های مخزن و شکل سلول ها و.... و اطلاعات مربوط به مشخصات سنگ که شامل تراکم پذیری سنگ، تخلخل و تراوایی مطلق مورد نیاز می‌باشد. برای محاسبه ی قابلیت حرکت سیال اطلاعات مربوط به نوع جریان سیال از جمله جدایش ناشی از نیروی گرانی، ناپیوستگی جریانی و رخداد فرآیندهای تخلیه و یا آشام و برای محاسبه ی اختلاف پتانسیل، مشخصات چاه مانند موقعیت مکانی چاه، مرتبط بودن یا نبودن آن‌ها، نقاط تکمیلی و تعمیر چاه و مسائل اقتصادی مربوط با آن مورد نیاز است. با تغییر هر یک از پارامترهای اشاره شده، مدل های مختلفی از مخزن ساخته می‌شود که منجر به حصول نتایج متفاوت در پارامترهای مورد بررسی می‌شود.

در نهایت با اطلاعات ورودی مشخصی، شبیه ساز هدف روشن و مشخصی را در نظر می‌گیرد. تمامی داده‌ها فراخوانی می‌شود. مدل اولیه و ساده‌ای ساخته می‌شود، چاه‌ها در آن مدل قرار می‌گیرند

---

<sup>1</sup>. flow

<sup>2</sup>. transmissibility

<sup>3</sup>. mobility

<sup>4</sup>. potential difference

و تاریخچه<sup>۱</sup> نرخ تولید مشخص می شود. در مورد پارامترهای فشار و تولید در هر مرحله انطباق تاریخچه<sup>۱</sup> صورت می گیرد و پارامترهای مورد نیاز تحت استراتژی های مختلف تولید، پیش بینی می شود. در جدول ۱-۳، قسمت های مختلف فایل ورودی اکلیپس نشان داده شده است.

جدول ۱-۳ قسمت های مختلف فایل ورودی اکلیپس که به صورت فایل *DAT* می باشد.

مشخصات عمومی مدل	<i>RUNSPEC</i>
مشخصات عمومی سلول ها و مشخصات اولیه و ابتدایی سنگ مخزن	<i>GRID</i>
اصلاح داده های هر سلول	<i>EDIT</i>
خصوصیات <i>PVT</i> و <i>SCAL</i>	<i>PROPS</i>
تقسیم بندی های مخزن به چندین ناحیه تعادلی	<i>REGIONS</i>
نقاط تماس سیالات در مخزن و نوع پارامتر خروجی	<i>SOLUTION</i>
مشخصات پارامترهای مورد نظر به عنوان خروجی در هر چاه	<i>SUMMARY</i>
مشخصات مکانی چاه، نقاط تکمیلی چاه، نقاط تزریق و تولید هر چاه و مراحل تولید	<i>SCHEDULE</i>

شکل ۱-۳، قسمتی از یک *DAT* فایل را نشان می دهد.

<sup>۱</sup>.history matching

```

-----RUNSPEC SECTION-----
RUNSPEC
TITLE
E100 COURSE EXAMPLE
--THIS FILE IS MADE TO INTRODUCE DATA FILE

DIMENS      20      5      10 /

OIL
WATER
WELLDIMS
      4      20      1      4 /

AQUIDIMS
      4*      1      250 /

REGDIMS
-- NTFIP
      10 /

START
      1 'JAN' 1994 /

-----GRID SECTION-----
GRID

INCLUDE
BC, GRDECL /

EQUALS
'PORO' 0.250 /
'PERMX' 10      1      20      1      5      1      1 / UPPER LAYER
'PERMX' 5       1      20      1      5      2      2 /
'PERMX' 100     1      20      1      5      3      3 /
'PERMX' 200     1      20      1      5      5      5 / HIGH PERM ZONE
'PERMX' 50      1      20      1      5      10     10 /
/
    
```

شکل ۳-۱ قسمتی از یک *DAT* فایل به عنوان ورودی نرم افزار اکلیپس

### ۳-۳ تولید داده‌های مصنوعی

همانطور که پیشتر مطرح شد، داده‌های مربوط به هندسه مخزن، سنگ، سیال و اطلاعات مربوط به چاه برای شبیه سازی به عنوان داده‌های ورودی به شبیه ساز مورد نیاز است. بخشی از داده‌های مربوط به سنگ و سیال از یکی از مخازن نفتی کشور برگرفته شده و مابقی داده‌های مورد نیاز از جمله مشخصات هندسی مخزن و داده‌های مورد نیاز هر سلول مانند تراوایی و تخلخل به صورت مصنوعی تولید شده است. برای تولید داده‌های مربوط به هر سلول از نرم افزار زمین آماری اس. جی. ام. اس<sup>۱</sup> استفاده شده است.

<sup>۱</sup>.SGeMS

مدل مخزنی مورد نظر در این پایان نامه، یک مدل شکافدار با زمینه هموزن است که در یک سیستم سه بُعدی که جریان سیال در آن تک فاز (نفث) است بررسی می‌شود. مدل مورد نظر شامل ۶۴ سلول در راستای هر یک از محورهای مختصات یعنی ۶۴×۶۴×۶۴ سلول می‌باشد که طول اضلاع هر یک از سلول‌ها، چهار متر است.

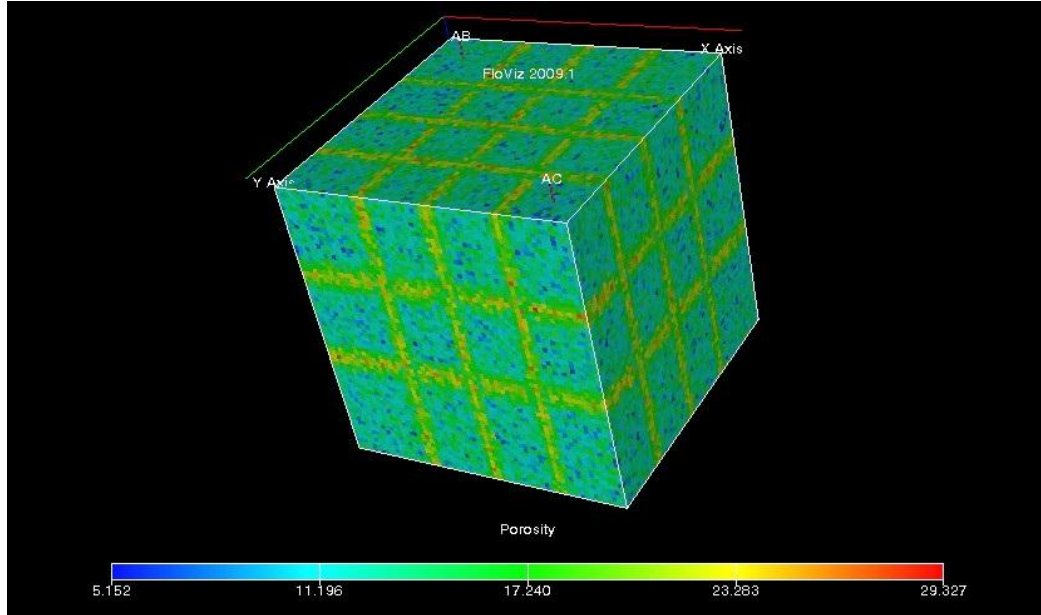
برای تولید مقادیر تراوایی معادل با هر سلول از مجموعه دو مؤلفه استفاده شده است که مؤلفه‌ی اوّل آن با استفاده از شبیه‌سازی گوسی پی در پی (غیر شرطی)<sup>۱</sup> تولید شده است. این مؤلفه معرف تغییرات ذاتی تراوایی در سنگ بدون شکستگی است. این مدل هموزن که شامل ۲۰٪ نویز می‌باشد (یعنی مدل واریوگرام شبیه‌سازی شامل ۲۰٪ اثر قطعه‌ای و ۸۰٪ مدل واریوگرام گوسی است). به این ترتیب به هر یک از سلول‌ها مقادیری از تراوایی به عنوان زمینه نسبت داده شد. در مرحله بعد مدل ثانویه‌ای که در برگیرنده‌ی اعدادی با اختلاف بالا در مقادیر بود ساخته شد که این مقادیر بالا نماینده‌ی شکاف‌های مخزن می‌باشد.

ساختار ثانویه به ساختار اولیه اضافه می‌شود و یک مدل شکافدار با زمینه هموزن ساخته می‌شود.

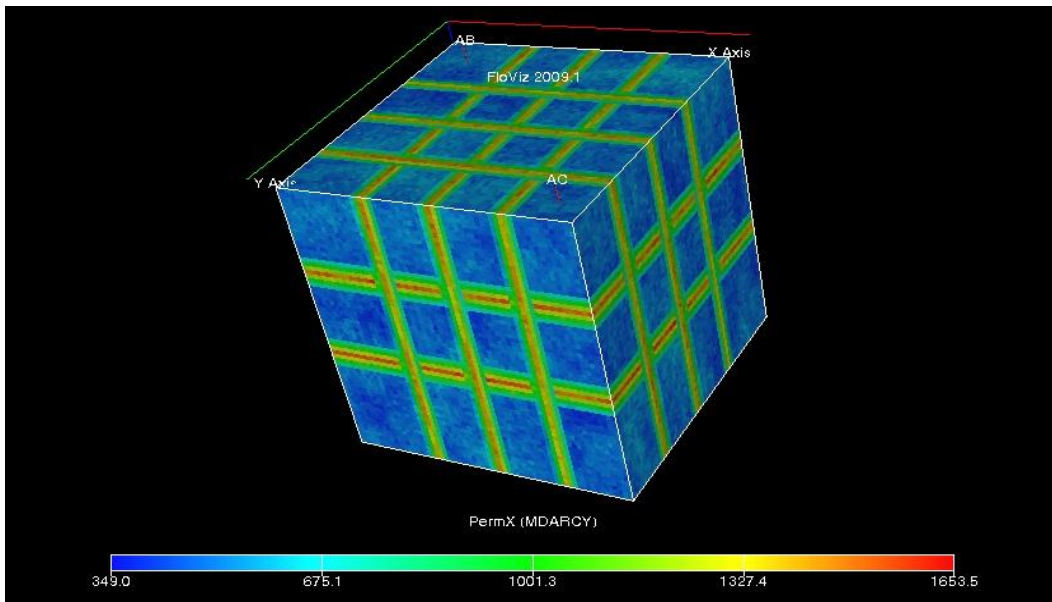
مقادیر تخلخل با استفاده از مقادیر تراوایی طبق یک رابطه‌ی ریاضی که به‌طور دلخواه انتخاب شده است ساخته شده است که بتوان مقادیری برای تخلخل تولید نمود که در محدوده‌ی معقولی از تغییرات و با همبستگی مشخصی با تراوایی باشد  $(Q=k*0.01+RAND( )*15)$ .

در شکل‌های ۱-۳ و ۲-۳، به ترتیب توزیع مقادیر تخلخل و تراوایی و بازه تغییرات آن در یک سیستم سه بُعدی شکافدار، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، این مدل شامل چندین شبکه شکستگی، سه شکستگی عمود بر محور  $x$ ، سه شکستگی عمود بر محور  $y$  و دو شکستگی عمود بر محور  $z$  می‌باشد.

<sup>۱</sup>.Sequential gaussian simulation (non- conditional)



شکل ۳-۱ توزیع تخلخل



شکل ۳-۲ توزیع تراوایی





## فصل چهارم: الگوریتم افزایش مقیاس

۱-۴ مقدمه

۲-۴ الگوریتم کد افزایش مقیاس غیر یکنواخت با استفاده از تبدیل ویولت

## ۴-۱ مقدمه

در این فصل الگوریتم و ساختار کد نوشته شده به منظور اجرای روش افزایش مقیاس با رویکرد ویولت توضیح داده می‌شود. با توجه به قابلیت شی‌گرایی<sup>۱</sup> زبان C++ و همچنین قدرت بالای آن در مدیریت حافظه<sup>۲</sup> از این زبان برای زبان برنامه‌نویسی استفاده شد. برنامه نویسی شی‌گرائی وسیله‌ای برای مدل کردن صحیح دنیای واقعی است که در آن با استفاده از تعریف اشیاء در برنامه و استفاده مجدد از کد به منظور بازساخت اشیاء مدل‌سازی انجام می‌شود. یک شیء در برنامه دقیقاً همان طور تعریف می‌شود که در دنیای واقعی وجود دارد، خواص معینی دارد که آن را توصیف می‌کند و متدهایی که می‌توان برای انجام کار معینی از شیء استفاده کرد [۷۳].

## ۴-۲ الگوریتم کد افزایش مقیاس غیر یکنواخت با استفاده از تبدیل ویولت

هدف از افزایش مقیاس ایجاد بلوک‌هایی با خواص مشخص برای شبیه‌سازی انتقال جریان می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، تراوایی معادل بلوک‌های ناهمگن بدون توجه بیش از حد به حفظ ساختار و شکل هندسی خاص برای بلوک‌های درشت شده، باید محاسبه شود. اما برای بهینه کردن تخمین‌های افزایش مقیاس می‌بایست بلوک‌ها را در شکل و ساختار بهینه ایجاد کرد [۷۴، ۷۵ و ۷۶].

هر روش افزایش مقیاس صرف نظر از نحوه و دقت عملکرد آن، همواره شامل متوسط‌گیری و حذف بخشی از جزئیات جریان در بلوک‌های درشت شده می‌باشد. اما می‌توان با تنظیم ساختار و

---

<sup>۱</sup> . Object-oriented

<sup>۲</sup> . Memory management

چیدمان بلوک‌های افزایش مقیاس یافته، متوسط‌گیری‌های ذاتی مذکور را به حداقل رساند. این همان ایده کلی است که در افزایش مقیاس توسط ویولت دنبال شده و در ادامه توضیح داده می‌شود.

فرض کنید که یک مدل زمین‌شناسی با تمام جزئیات آن نظیر تعداد، ابعاد و ارتفاع بلوک‌ها، موقعیت، نوع و نحوه‌ی تکمیل چاه‌ها و نیز توزیع کلیه‌ی خواص پتروفیزیکی در مدل نظیر تخلخل، تراوایی، اشباع اولیه‌ی فازها و ... مشخص و در اختیار می‌باشند. به منظور انجام افزایش مقیاس با استفاده از تبدیل ویولت، همانطور که پیشتر بیان شد، این توابع می‌بایست بر روی توزیع یکسری از داده‌ها مثلاً توزیع تراوایی عمل کنند.

لازم به ذکر است که نقشه توزیع تخلخل، تراوایی و نیز موقعیت و محل قرارگیری چاه‌ها در مخزن عوامل اصلی در الگوی حرکتی سیالات در مخزن می‌باشند. در این پایان‌نامه دو پارامتر تخلخل و تراوایی مبنای افزایش مقیاس قرار گرفتند، این امر عامل محدود کننده نمی‌باشد و هر متغیری از خواص پتروفیزیکی را نیز می‌توان اساس افزایش مقیاس قرار داد.

هر بلوک از این مدل زمین‌شناسی (ریزدانه)، دارای یک تراوایی مشخص (تخمین زده شده) می‌باشد. می‌توان این ریزترین توصیف را که مترادف با بالاترین توان تفکیک است به عنوان تقریب صفرم  $K(x,y,z)$  در تبدیل آن با هر خانواده‌ی دلخواه ویولت یعنی  $S_0$  دانست. اکنون می‌خواهیم شبکه را با یک عامل ۲ در هر سه جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  درشت‌تر کنیم، یعنی به جای هر هشت بلوک در مدل زمین‌شناسی، یک بلوک در شبکه‌ی جدید قرار دهیم. نکته‌ی قابل توجه این است که در روش تبدیل ویولت، عمل افزایش مقیاس بر خلاف سایر روش‌های متداول، به صورت یکنواخت نبوده و شبکه به صورت هوشمندانه و غیر یکنواخت درشت می‌شود.

اساس انجام درشت سازی استفاده از روابط (۱-۴) و (۲-۴) یا همان تحلیل چند تفکیکی<sup>۱</sup> توزیع تراوایی است.

$$D_j(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\Psi_{j,k}(x)dx \quad (۱-۴)$$

$$S_j(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\varphi_{j,k}(x)dx \quad (۲-۴)$$

در اولین مرحله‌ی افزایش مقیاس با این روابط،  $S_1$  تقریب تابع  $K(x,y,z)$  در مرحله‌ی اول تبدیل ویولت است و  $D_1$  بیانگر تفاوت  $S_1$  با  $k$  است بنابراین:

$$K = S_1 + D_1$$

اگر  $D_1$  جزئیات تابع در هر ناحیه‌ی مفروض قابل صرف نظر کردن باشد، می‌توان گفت که تقریب تابع با  $S_1$  و یا اصولاً درشت سازی شبکه به اندازه‌ی دو برابر در این ناحیه نباید خطای زیادی را در محاسبات وارد کند، در غیر این صورت، درشت سازی شبکه مجاز نبوده و می‌بایست ساختار ریز شبکه در ناحیه مذکور حفظ گردد. در صورت اول، از هر هشت بلوک شبکه‌ی ریز، یک بلوک در طرح جدید درشت شده باقی مانده و ابعاد بلوک‌ها دو برابر می‌شوند. این به این معناست که تراکم بلوک‌ها در این ناحیه،  $۸۷/۵\%$  نسبت به قبل کاهش می‌یابد. این عمل را باز هم می‌توان تکرار کرد: در گام دوم، بر اساس الگوریتم ملات، یکبار دیگر تبدیل ویولت برای مقیاس درشت بُعدی اعمال می‌گردد تا  $S_2$  و  $D_2$  به دست آیند:

$$K=S_2+D_2+D_1$$

---

<sup>۱</sup> .multiresolution

همانطور که پیشتر گفته شد، برای محاسبه ضرایب تقریب و جزئیات، تنها به ضرایب تقریب مرحله‌ی قبل یعنی  $S_1$  نیاز می‌باشد ( $S_1=S_2+D_2$ ). مجدداً از آزمون حذف نقاط در نواحی‌ای که جزئیات قابل صرف نظر کردن باشند، استفاده می‌شود. واضح است مناطقی که در مراحل قبل به صورت ریز باقی مانده‌اند، در مراحل بعدی افزایش مقیاس نیز به صورت ریزدانه باقی می‌مانند و مجاز به درشت شدن نمی‌باشند، بنابراین در هر مرحله از افزایش مقیاس، فقط بخشهایی برای درشت سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند که در مرحله‌ی قبل از این درشت سازی شده‌اند.

در مرحله دوم درشت سازی، تراکم نقاط در نواحی واجد شرایط  $\frac{1}{64}$  شبکه ریز اولیه خواهد شد. این روش تا جایی ادامه می‌یابد که درجه‌ی مورد نظر از افزایش مقیاس حاصل شود و یا اینکه تعداد کل نقاط حذف شده در مرحله‌ی جاری، از یک مقدار آستانه که معمولاً کسری از تعداد کل بلوک‌هاست، کمتر باشد. معمولاً بسته به ابعاد شبکه ریز اولیه و ناهمگنی محیط پس از چهار یا پنج مرحله افزایش مقیاس، تعداد نقاطی که در اثر عمل درشت سازی حذف می‌شوند، بسیار کم بوده و ادامه‌ی روش از نظر محاسباتی کارائی ندارد.

نکته‌ی کلیدی که در این قسمت وجود دارد معیاری است که با آن مشخص می‌شود کدام بخش از جزئیات قابل صرف نظر کردن بوده و کدام بخش را باید حفظ کرد. روش مرسوم برای این کار، قرار دادن یک مقدار آستانه‌ی  $\epsilon_d$  برای جزئیات و یک مقدار آستانه‌ی  $\epsilon_s$  برای ضرایب تقریب است که خود به صورت کسری از بزرگترین ضرایب جزئیات و یا تقریب می‌باشند که در هر مرحله می‌توانند انتخاب شوند.

به عبارت دیگر در این الگوریتم با استفاده از قابلیت چند تفکیکی تبدیل ویولت مقادیر ضرایب جزئیات و ضرایب تقریب در هر سطح محاسبه و طبق روابط (۴-۳) و (۴-۴)، شرایط هر بلوک با استفاده از دو حد آستانه‌ی جزئیات ( $\epsilon_d$ ) و آستانه‌ی تقریب ( $\epsilon_s$ ) سنجیده می‌شود.

$$D_i > \varepsilon d \times \max(D) \quad (3-4)$$

$$S_i > \varepsilon s \times \max(S) \quad (4-4)$$

که در آن‌ها  $D_i$  و  $S_i$  به ترتیب ضریب جزئیات و ضریب تقریب بلوک  $i$  می‌باشند. مقادیر  $\max(D)$  و  $\max(S)$  بیشترین مقدار این کمیت‌ها را در سطح مورد نظر نشان می‌دهد. در صورتی که یکی از دو شرط فوق برقرار باشد، آن بلوک از آن سطح به بعد افزایش مقیاس نمی‌یابد.

به عنوان مثال، قرار دادن  $\varepsilon_d = 60\%$  و  $\varepsilon_s = 80\%$  به این معناست که در هر مرحله از تبدیل ویولت، مناطقی که ضرایب جزئیات آن‌ها کوچکتر از  $60\%$  ضریب جزئیات پیشینه بوده و در عین حال، ضریب تقریب آن‌ها کمتر از  $80\%$  ضریب تقریب پیشینه است، درشت سازی شده‌اند. بنابراین هر چه مقادیر آستانه کوچکتر باشند، جزئیات به میزان بیشتری حفظ شده و درشت سازی از مناطق دورتر از ناهمگنی‌ها شروع می‌شود. مقادیر آستانه صفر منجر به حفظ کل بلوک‌ها به صورت ریزدانه شده و اجازه درشت سازی را به آن‌ها نمی‌دهد و مقادیر آستانه  $100\%$  درشت سازی یکنواخت کل بلوک‌ها را در پی خواهد داشت.

انتخاب آستانه برای ضرایب تقریب ممکن است در وهله‌ی اول کمی عجیب به نظر برسد، اما باید در نظر داشت که مسیرهای با تراوایی بالا نقش مهمی در حرکت و توزیع سیال در مخزن ایفا کرده و به همین دلیل، ساختار ریز شبکه در این مناطق باید حفظ شود.

در اینجا ذکر دو نکته ضروری است. نخست قابلیت انتخاب آستانه‌های متفاوت در مراحل و درجات مختلف درشت سازی است که در این پایان نامه از آن استفاده شده است. دیگر اینکه در مرحله‌ی اول افزایش مقیاس، بلوک‌ها در صورتی درشت می‌شوند که اولاً ضرایب جزئیات و مقیاس آن‌ها کوچکتر از مقادیر آستانه‌های مربوطه بوده و ثانیاً از یک مقدار مشخص به چاه‌ها نزدیک‌تر نباشند.

از آنجا که مناطقی که در مرحله‌ی اول افزایش مقیاس، ریز باقی مانده‌اند، مراحل درشت‌سازی بعدی نیز ریز باقی می‌مانند، و بیشترین ضرایب جزئیات و مقیاس مربوط به این مناطق می‌باشند. بنابراین برای اینکه اثر تغییرات توزیع تراوایی در سایر نواحی مخزن بهتر در مراحل بعدی درشت‌سازی منعکس شود و شبکه افزایش مقیاس یافته دارای روند تغییرات نرم‌تر و یکنواخت‌تری در ابعاد بلوک‌ها باشد، می‌توان مقادیر آستانه‌ها را به صورت نزولی در مراحل بعدی درشت‌سازی انتخاب نمود. به این ترتیب با کاهش مقادیر آستانه در مراحل بعدی درشت‌سازی، افزایش مقیاس ناگهانی بلوک‌ها کنترل شده و از قرار گیری بلوک‌های بسیار کوچک در مجاورت بلوک‌های بسیار بزرگ که یک امر نامطلوب در تولید شبکه‌های محاسباتی می‌باشد، جلوگیری می‌گردد.

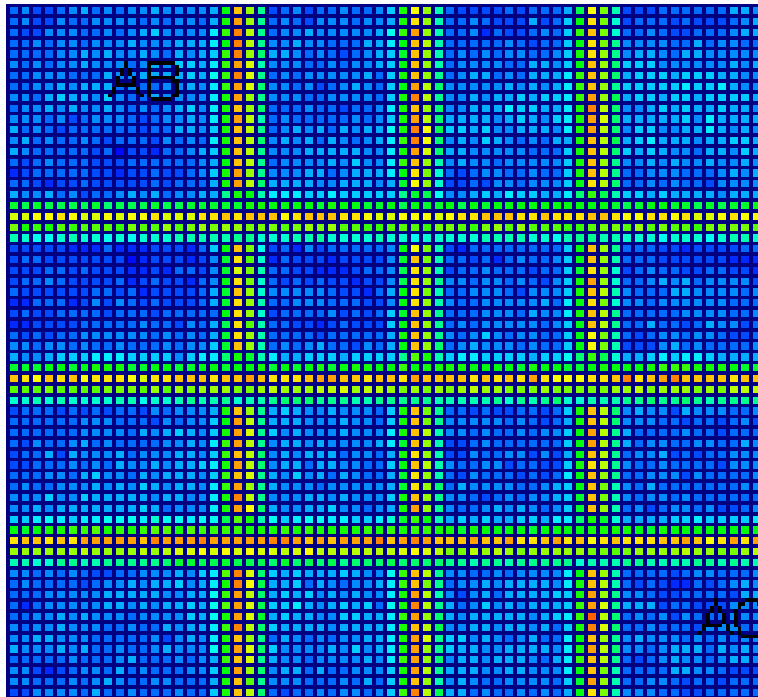
یادآوری می‌گردد که هدف افزایش مقیاس با استفاده از تبدیل ویولت، حفظ ساختار ریز شبکه در نواحی از مخزن می‌باشد که تغییرات شدیدتری را در طول دوره‌ی شبیه‌سازی مخزن تجربه می‌کنند. از آنجا که نواحی نزدیک چاه‌ها نیز شاهد تغییرات شدید فشار و اشباع سیالات می‌باشند، بنابراین بسیار مطلوب خواهد بود که ساختار ریز شبکه در این نواحی حفظ شود. از این رو، شرط دیگری نیز علاوه بر محک آستانه‌ها برای درشت‌سازی بلوک‌ها به صورت زیر در نظر گرفته شد: در مرحله‌ی اول افزایش مقیاس، بلوک‌ها در صورتی درشت می‌شوند که اولاً ضرایب جزئیات و مقیاس آن‌ها کوچکتر از مقادیر آستانه‌های مربوطه بوده و ثانیاً از یک مقدار مشخص به چاه‌ها نزدیک‌تر نباشند. ناحیه همسایگی چاه‌ها در این پایان نامه، یک پنجره  $6 \times 6$  از بلوک‌های اطراف هر بلوک چاه، در نظر گرفته شده است. در نواحی دورتر از چاه‌ها، بلوک‌ها به صورت معمول و بر اساس شرط آستانه-ها، به درجات مختلف افزایش مقیاس می‌یابند. شکل (۴-۱) نتیجه اجرای این الگوریتم افزایش مقیاس می‌باشد.

نهایتاً می‌بایست متذکر شد که قرار گرفتن بلوک‌های بسیار بزرگ در مجاورت بلوک‌های بسیار کوچک امر نامطلوبی بوده و در حین افزایش مقیاس و ایجاد شبکه درشت دانه باید از آن جلوگیری

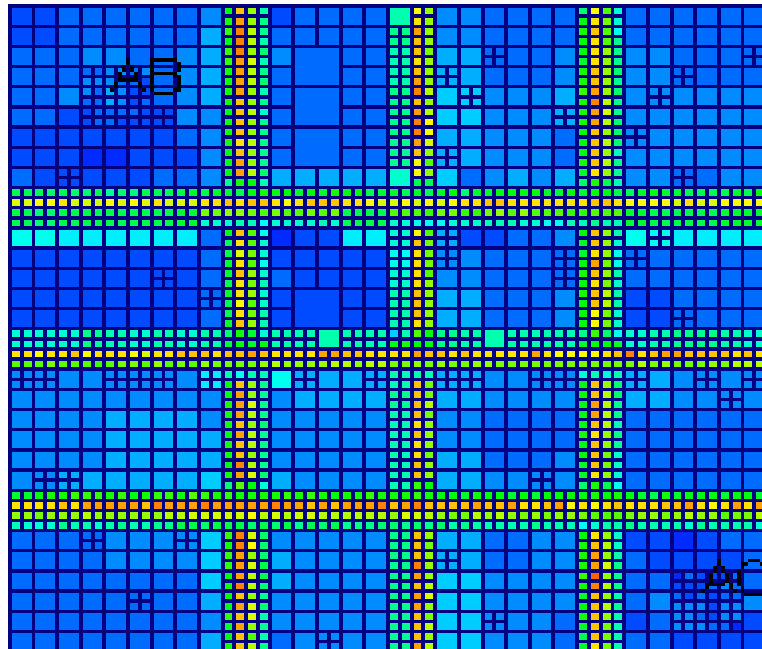
کرد. قرارگیری بلوک‌هایی با اندازه‌های بسیار متفاوت در مجاورت یکدیگر سبب می‌شود که بلوک‌های بزرگ مشابه شرایط مرزی موضعی برای بلوک‌های کوچک عمل کرده و دقت انجام محاسبات کاهش یابد. به این منظور، شرط کنترلی دیگری نیز علاوه بر محک آستانه‌ها و داشتن فاصله مجاز از چاه‌ها، به الگوریتم افزایش مقیاس افزوده شده که به صورت زیر می‌باشد:

در هر مرحله افزایش مقیاس، بلوک‌ها در صورتی درشت می‌شوند که اولاً ضرایب جزئیات و مقیاس آن‌ها کوچکتر از مقادیر آستانه‌های مربوط بوده و ثانیاً از یک مقدار مشخص به چاه‌ها نزدیک‌تر نباشند و ثالثاً اندازه‌ی آن در مقایسه با هر یک از بلوک‌های مجاور آن، از یک مقدار مشخص بیشتر نباشد. بررسی‌های انجام گرفته نشان دادند که همسایگی بلوک‌های با دو مرحله اختلاف در درجه افزایش مقیاس آن‌ها، اثر چندانی بر دقت محاسبات ندارد. این امر با آن معناست که قرار گرفتن بلوک‌های کوچک در مجاورت بلوک‌هایی که تا دو مرحله بیشتر درشت شده‌اند (طول ضلع آن‌ها ۴ برابر بلوک کوچکتر است) مجاز می‌باشد. در شکل (۴-۱) ساختار شبکه در اثر اعمال این شرط را می‌توان مشاهده کرد.





الف



ب

شکل ۴- الف: مدل ریزدانه، ب: مدل افزایش مقیاس یافته  
(اطراف چاه به دلیل تغییرات شدید فشار ریز مقیاس باقی می ماند)

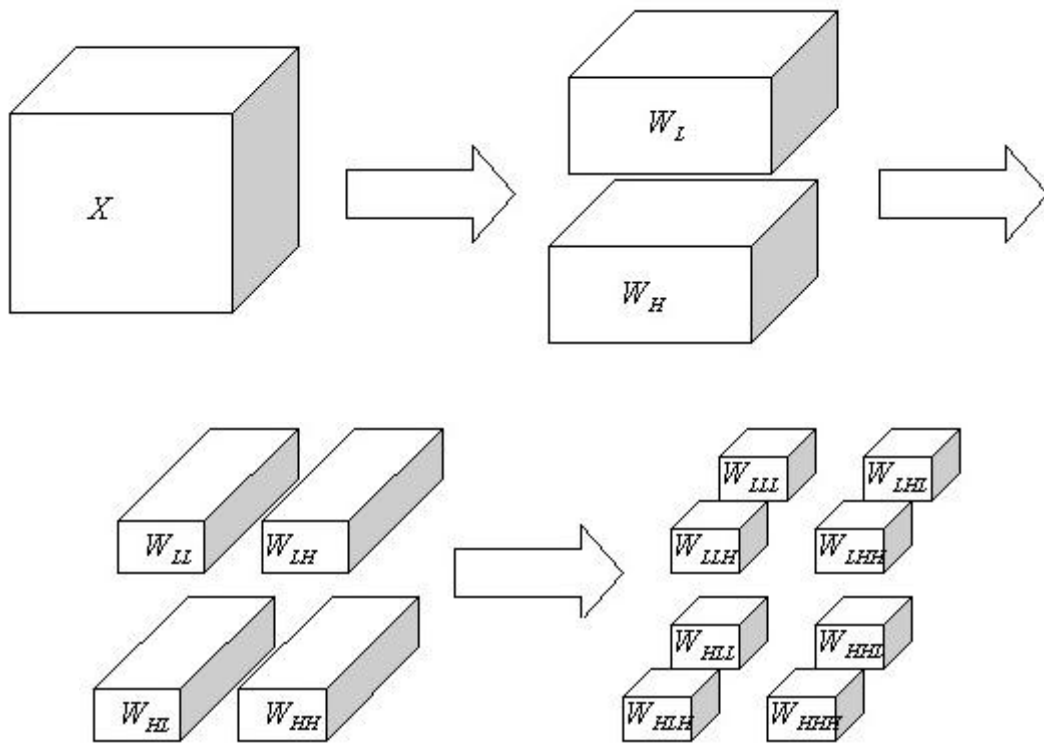
از آنجا که در این پایان نامه هدف نهایی از افزایش مقیاس مدل زمین شناسی، یافتن ویولت بهینه در امر افزایش مقیاس می‌باشد، از چندین تابع ویولت که از خانواده‌های متفاوت ویولت انتخاب شده‌اند، استفاده شده است.

توابع ویولت استفاده شده در این پایان نامه عبارتند از ویولت‌های: هار، دایشیز چهار، کوایفلت یک و بایور اس. پی لاین ۱.۳ و ۵.۵ می‌باشد.

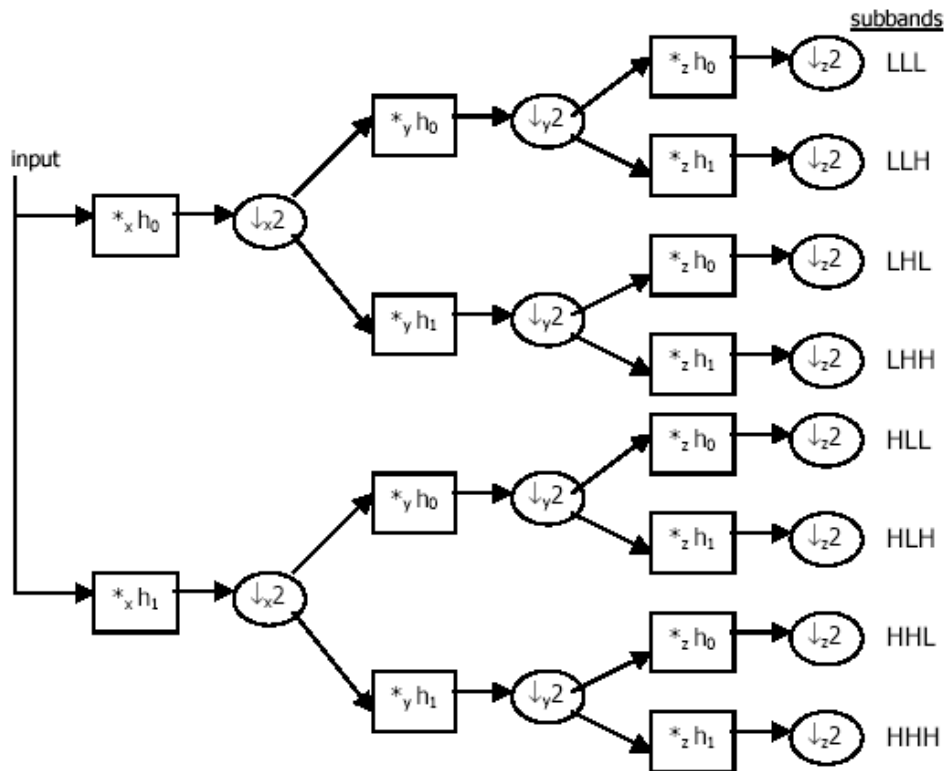
با توجه به مطالب ذکر شده، به طور خلاصه، بلوک‌ها با شرایط زیر به صورت مرحله‌ای افزایش مقیاس می‌یابند:

- بلوک‌های اطراف چاه به صورت ریز شبکه باقی می‌مانند، چرا که به دلیل بالا بودن نرخ جریان در این بلوک‌ها تأثیر زیادی بر توزیع فشار و اشباع و شرایط چاه دارند.
- هر بلوک به منظور کاهش خطای بین مرزی حداکثر چهار بلوک همسایه در هر طرف خود دارد.
- مکان‌هایی از شبکه که تغییرات زیاد تراوایی دارد به منظور جلوگیری از دست رفتن جزئیات، همگن شدن شبکه و از بین رفتن کانال‌ها و موانع، به صورت ریز شبکه باقی می‌ماند. این تغییرات در مقیاس‌های مختلف بر اساس درجه افزایش مقیاس لحاظ می‌شود.
- مکان‌ها با مقادیر بالای تراوایی به صورت ریز شبکه باقی می‌مانند. این مکان‌ها تعیین کننده مسیرهای اصلی جریان می‌باشند.

در شکل (۲-۴) و (۳-۴) مراحل انجام عمل افزایش مقیاس در سه بُعد بوسیله تابع ویولت را نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ مراحل انجام عمل افزایش مقیاس در سه بُعد بوسیله تابع ویولت [۷۷]



شکل ۴-۳ اعمال تبدیل ویولت به صورت پی در پی به منظور دستیابی به مقیاس بالاتر تقریب داده‌ها [۷۷]

در مطالب پیشین اشاره شد که مخزن مورد مطالعه شامل  $64 \times 64 \times 64$  سلول می‌باشد که آن را می‌توان معادل ماتریسی با ابعاد فوق در نظر گرفت. برای افزایش مقیاس مدل مخزن فوق همانند شکل-های (۲-۴) و (۳-۴) عمل می‌کنیم. به این صورت که ماتریس اولیه را بصورت  $64$  صفحه در امتداد محور  $Z$  در نظر می‌گیریم. هر صفحه یک ماتریس با ابعاد  $64 \times 64$  در صفحه  $X$  و  $Y$  می‌باشد. در گام اول تابع تبدیل انتخاب شده در راستای محور  $X$  به ماتریس اولیه اعمال می‌شود و آنرا به دو ماتریس مقیاس و جزئیات با ابعاد  $32 \times 64 \times 64$  تبدیل می‌کند. در مرحله بعد تابع تبدیل بر داده‌های مرحله‌ی قبل و در راستای محور  $Y$  اعمال می‌شود. نتیجه حاصل چهار ماتریس با ابعاد  $32 \times 32 \times 64$  می‌باشد که سه تای آن‌ها ماتریس جزئیات در راستای محور  $X$ ، در راستای محور  $Y$  و در راستای قطری ( $XY$ ) می‌باشد و یکی ماتریس مقیاس می‌باشد. با اعمال دوباره‌ی تابع تبدیل در راستای محور  $Z$  هفت ماتریس جزئیات به ترتیب در جهات  $X$ ،  $Y$ ،  $Z$ ،  $XY$ ،  $XZ$ ،  $ZY$  و  $XYZ$  و ماتریس تقریب نهایی همگی با ابعاد  $32 \times 32 \times 32$  به دست می‌آید. همانطور که پیشتر عنوان شد تابع تبدیل در هر مرحله از افزایش مقیاس بر ماتریس تقریب مرحله قبل اعمال می‌شود. ابعاد ماتریس تقریب و جزئیات در مرحله‌ی دوم افزایش مقیاس  $16 \times 16 \times 16$  و در مرحله‌ی سوم افزایش مقیاس  $8 \times 8 \times 8$  می‌باشد. در کد نوشته شده خروجی نهایی محاسبات شامل ماتریسی به ابعاد ماتریس اولیه می‌باشد، که در نقاطی از آن که از اهمیت بالایی برخوردار است و به عبارت دیگر حاوی اطلاعات مهمی از مخزن می‌باشد، از اطلاعات ماتریس اولیه استفاده شده و در سایر نقاط که اهمیت کمتری در مدل مخزن دارند، از مقادیر ماتریس مقیاس در همان مرحله از افزایش مقیاس استفاده شده است به این صورت که اعداد یکسانی به بلوک‌های  $8$  تایی در مرحله‌ی اول افزایش مقیاس نسبت داده شده است، اعداد یکسانی به بلوک‌های  $64$  تایی در مرحله‌ی دوم افزایش مقیاس و به بلوک‌های  $512$  تایی در مرحله‌ی سوم افزایش مقیاس نسبت داده شده است. خروجی دیگر این محاسبات مربوط به دستور *Coarsen* می‌-

باشد که وظیفه معرفی نقاط افزایش مقیاس یافته، به شبیه ساز اکلیپس را دارد. در این خروجی آدرس نقاط به شکل بلوک‌های ۸، ۶۴ و ۵۱۲ تایی در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس آورده شده است.

در شکل (۴-۴) فلوجارت مراحل افزایش مقیاس به کمک تابع ویولت در سه بُعد، (فلوجارت کد نوشته شده) نشان داده شده است.









## فصل پنجم: نتایج افزایش مقیاس

۱-۵ مقدمه

۲-۵ نتایج حاصل از یک مرحله افزایش مقیاس

۳-۵ نتایج حاصل از دو مرحله افزایش مقیاس

۴-۵ مقایسه نتایج حاصل از دو و سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌های مختلف

## ۵-۱ مقدمه

در این پایان نامه، به منظور بررسی نحوه‌ی عملکرد روش افزایش مقیاس بر پایه توابع ویولت در مدل-های سه بُعدی، از چندین تابع ویولت مبنا استفاده شده است. توابع ویولت مبنا مورد استفاده در این پایان نامه عبارتند از ویولت‌های: هار، دابشیزچهار، کوايفلت یک و بایور اس پی لاین ۱.۳ و ۵.۵.

در نهایت در این فصل نتایج شبیه سازی بر روی مدل ریز دانه و مدل‌های مختلف درشت دانه با یکدیگر مقایسه شده و اثر افزایش مقیاس بر روی پارامترهای مختلف تولید نظیر سرعت تولید نفت در مخزن، تولید کل از مخزن، فشار متوسط مخزن و همچنین صرفه جویی زمانی به دست آمده در هر مدل بررسی گردیده است.

همانطور که پیشتر عنوان شد مخزن مطالعه شده همه بر اساس اساس داده‌های مصنوعی ساخته شده و توزیع پارامترهای زمین شناسی و پتروفیزیکی و شرایط چاه‌ها صرفاً جهت مطالعات و ارزیابی‌های تئوری انتخاب شده‌اند، اما این امر به هیچ عنوان عامل محدود کننده نمی‌باشد، سعی شده است تا مقادیر ورودی به مدل در محدوده‌ی داده‌های واقعی مخزن باشند.

مدل ریزدانه‌ی اولیه‌ی مخزن به صورت منظم در مختصات کارتیزین معرفی شده و دارای گستردگی  $64 \times 64 \times 64$  متر در هر یک از جهات  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  می‌باشد. توزیع تخلخل و تراوایی در شکل-های (۱-۳) و (۲-۳) نشان داده شده است. تخلخل در محدوده‌ی وسیعی از ۵٪ تا ۳۰٪ متغیر می‌باشد. نسبت تراوایی عمودی به افقی برابر با ۱ قرار داده شده است. توزیع مقادیر تراوایی افقی و عمودی در مخزن در محدوده‌ی وسیع ۳۵۰ تا ۱۶۶۰ میلی‌داریسی متغیر می‌باشد. جدول‌های ۵-۱ و ۵-۲ مشخصات سیالات موجود در مخزن را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱: مشخصات آب مخزن		
پارامتر	علامت	مقدار فرض شده
ضریب انبساط	$B_w$	۱/۰۱
تراکم‌پذیری	$C_w$	$۲/۰۱ \times ۱۰^{-۶} psi^{-1}$
ویسکوزیته	$\mu_w$	۰/۹cp

جدول ۵-۲: داده‌های فشار، حجم و دما (PVT) نفت مرده		
پارامتر	علامت	مقدار فرض شده
ضریب انبساط	$B_o$	۱
فشار	$P_o$	۷۰۰ psi
ویسکوزیته	$\mu_o$	۰/۵ cp
تراکم‌پذیری	$C_o$	$۵ \times ۱۰^{-۵} psi^{-1}$

تمامی چاه‌ها به صورت عمودی در تمام عمق سازند تکمیل شده‌اند. چاه تزریق با فشار ته چاهی ثابت ۳۷۰۰ bar عملیات تزریق آب را انجام می‌دهد.

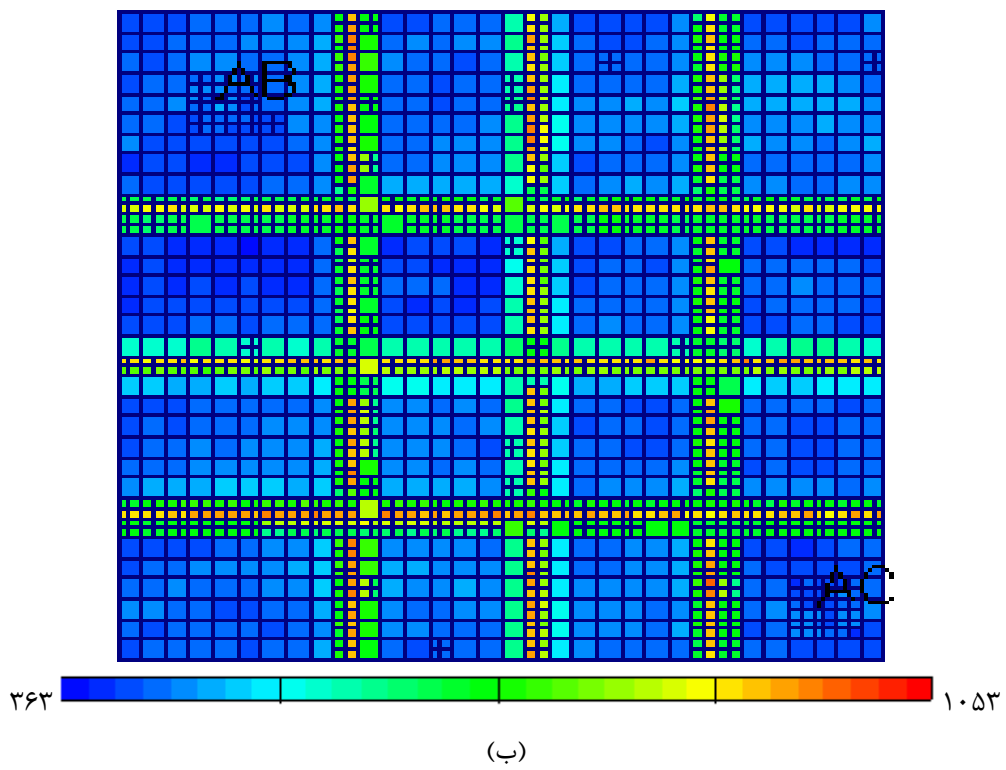
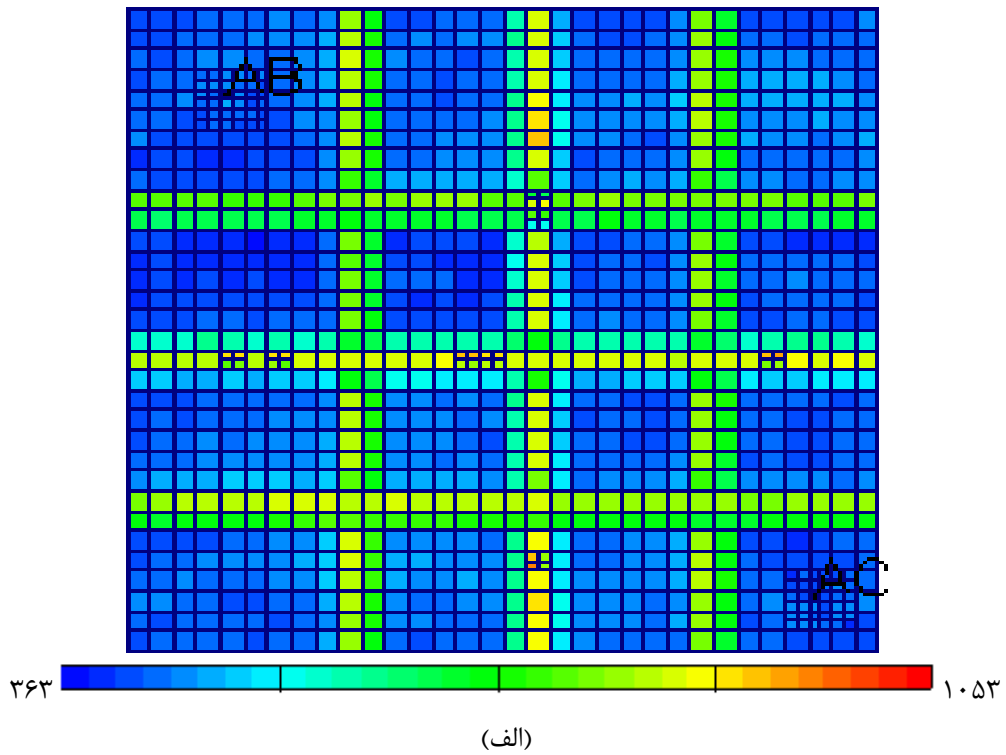
فشار اولیه‌ی مخزن در شروع عملیات شبیه‌سازی ۳۴۸۰bar بوده و شبیه‌سازی به مدت ۶۰۰ روز انجام گرفته است.

در زمان صفر چاه تزریق در بلوک شماره‌ی (۵۹و۵۹) با فشار ته چاه ثابت برابر ۳۷۰۰ bar آب تزریق کرده و چاه تولید نیز از بلوک شماره‌ی (۹و۹) با فشار ته چاه ثابت ۳۲۰۰ bar شروع به تولید نفت می‌کند. کلیه‌ی مدل‌سازی‌ها با در نظر گرفتن نیروی ویسکوزیته انجام شده‌اند. مدل‌های افزایش

مقیاس متفاوتی با انتخاب مقادیر مختلف آستانه برای ضرائب جزئیات و مقیاس ( $\epsilon_s$  و  $\epsilon_d$ ) بررسی گردید تا اثر درجه‌ی افزایش مقیاس بر دقت و سرعت محاسبات ارزیابی شود. نتایج مدل‌های مختلف تقریباً به مدل ریزدانه‌ی اولیه نزدیک بوده از نظر زمان محاسبات تفاوت‌هایی بین مدل‌های مختلف مشاهده گردید. در ادامه نتایج این بررسی و مقایسه بین مدل‌های مختلف و مدل ریزدانه مینا ارائه شده است.

## ۵-۲ نتایج حاصل از دو مرحله افزایش مقیاس

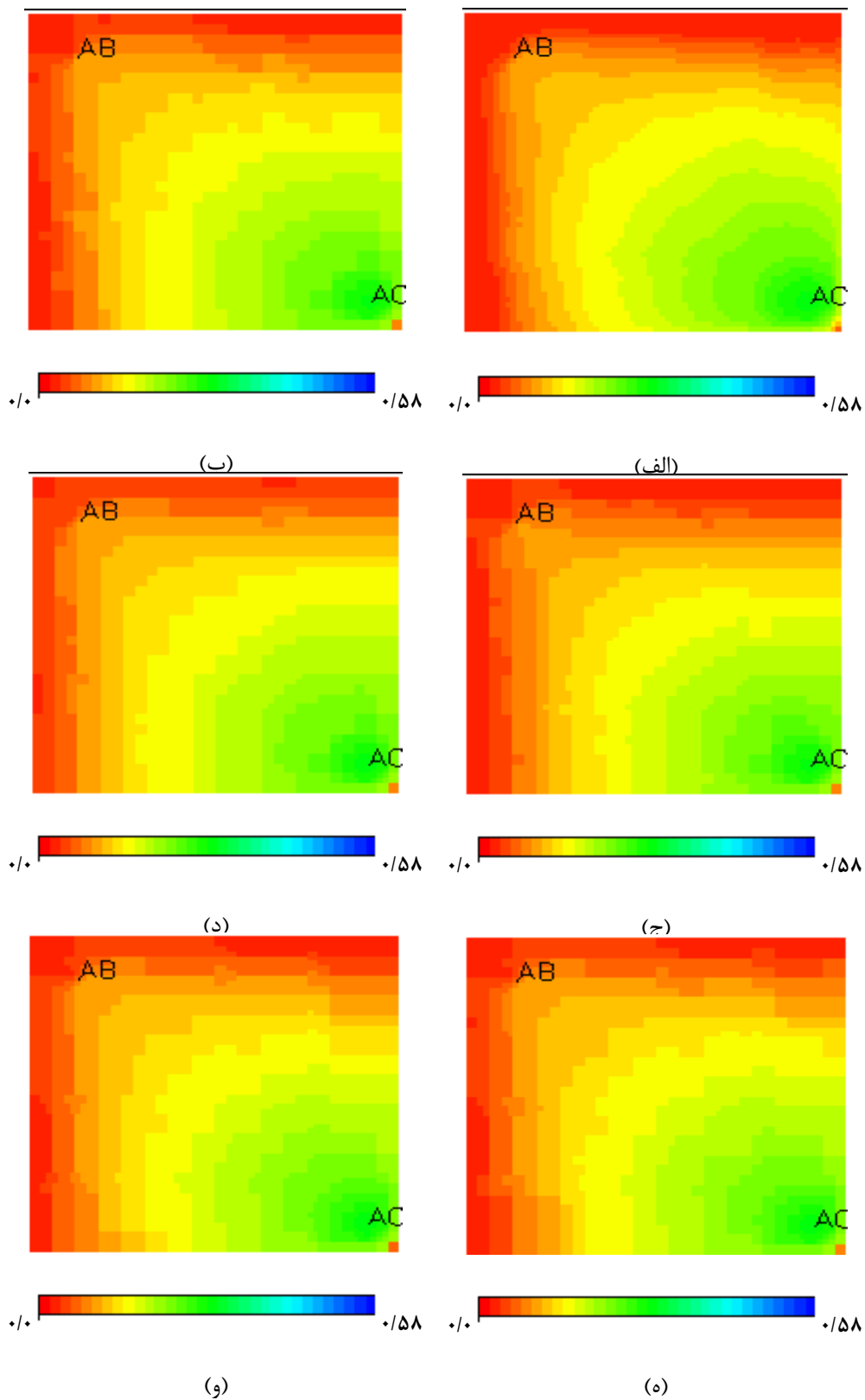
شکل ۵-۱ شبکه بندی توزیع تراوایی با دو درجه‌ی مختلف افزایش مقیاس توسط تابع تبدیل هار را نشان می‌دهد. در شکل‌های فوق، مقادیر آستانه ضرایب ویولت در اولین مرحله‌ی افزایش مقیاس، به ترتیب ۰/۹ و ۰/۷ بوده است. مقادیر آستانه‌ی زیاد (شکل الف) منجر به افزایش یکنواخت تر و بیشتر مدل شده است (از دست رفتن اطلاعات بیشتر به علت متوسط‌گیری‌های زیاد در اکثر مناطق مخزن). مقادیر آستانه کم (شکل ب) باعث حفظ بیشتر اطلاعات خصوصاً در نواحی پر تراوای مخزن و کوچک نگه‌داشتن بلوک‌ها در این مناطق شده است. توجه شود که افزایش مقیاس در نزدیک چاه‌ها انجام نشده است و اطلاعات اصلی مخزن در این نواحی کاملاً حفظ شده است.



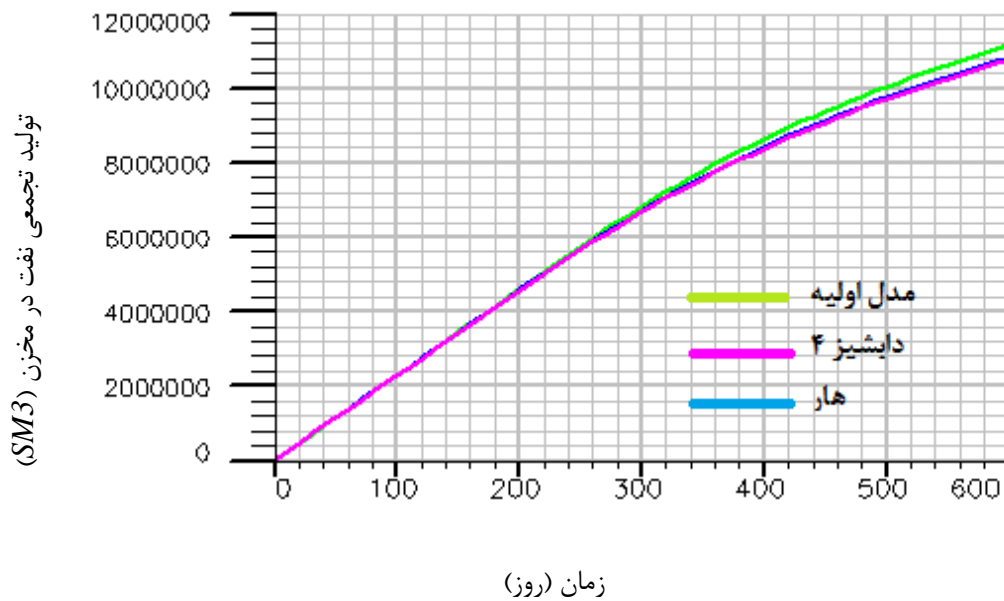
شکل ۵-۱ افزایش مقیاس مدل ریز دانه‌ی اولیه با حد‌آستانه‌های مختلف. الف:  $\epsilon_s = \epsilon_d = 0.09$  و ب:  $\epsilon_s = \epsilon_d = 0.07$

در مدل مورد بررسی عملیات تزریق آب به مدت ۶۰۰ روز شبیه سازی شده است. شکل ۲-۵ توزیع اشاره شده نشان می‌دهد. مقادیر آستانه به ترتیب در مراحل اول و دوم افزایش مقیاس برابر با ۰/۹ و ۰/۸ بوده‌اند.

همانطور که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود، مشخصات اصلی الگوی جریان مدل ریزدانه اولیه در مدل‌های افزایش مقیاس یافته توسط توابع ویولت هار و دابشیز چهار به خوبی تکرار شده است. در درجه‌ی دوم بایور اس.پی لاین ۱.۳ و ۵.۵ نتایج نزدیکی به مدل ریزدانه دارند و در نهایت تابع کوایفلت یک، بدترین نتایج در مقایسه با مدل ریزدانه را ارائه کرده است. نتایج فوق در شکل‌های ۳-۵ تا ۵-۵ نیز قابل مشاهده است.

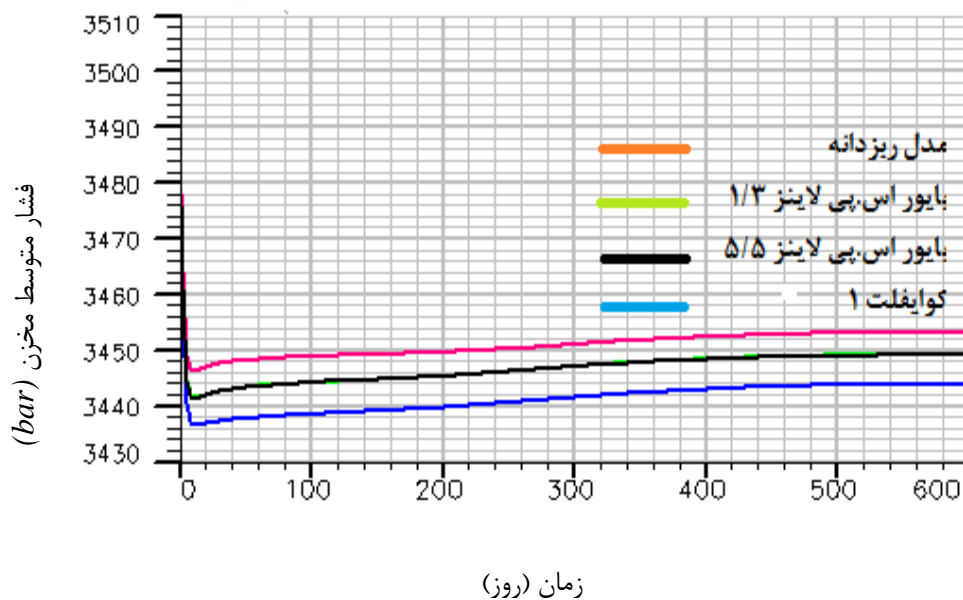


شکل ۵-۲ توزیع اشباع آب پس از ۴۰۰ روز تزریق، الف: مدل ریزدانه اولیه، ب تا ح مدل‌های افزایش مقیاس یافته‌ی حاصل از دو مرتبه افزایش مقیاس با ضرایب مقیاس ۰/۹ و ۰/۸، ب: بایور ۱،۳، ج: بایور ۵،۵، د: کوایفلت یک، ه: دابشیز چهار و و: هار



شکل ۳-۵ تولید نفت تجمعی در مخزن پس از دو مرحله افزایش مقیاس

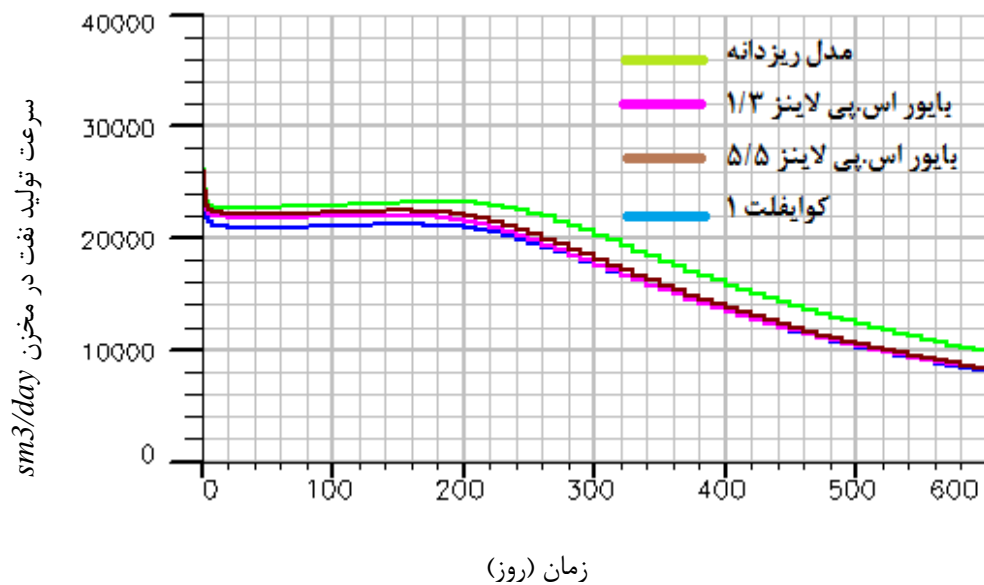
با ضرایب آستانه‌های ۰/۹ و ۰/۸ در مرحله‌ی اول و دوم افزایش مقیاس



شکل ۴-۵ فشار متوسط مخزن پس از دو مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۹ و ۰/۸ در مراحل اول و دوم افزایش مقیاس



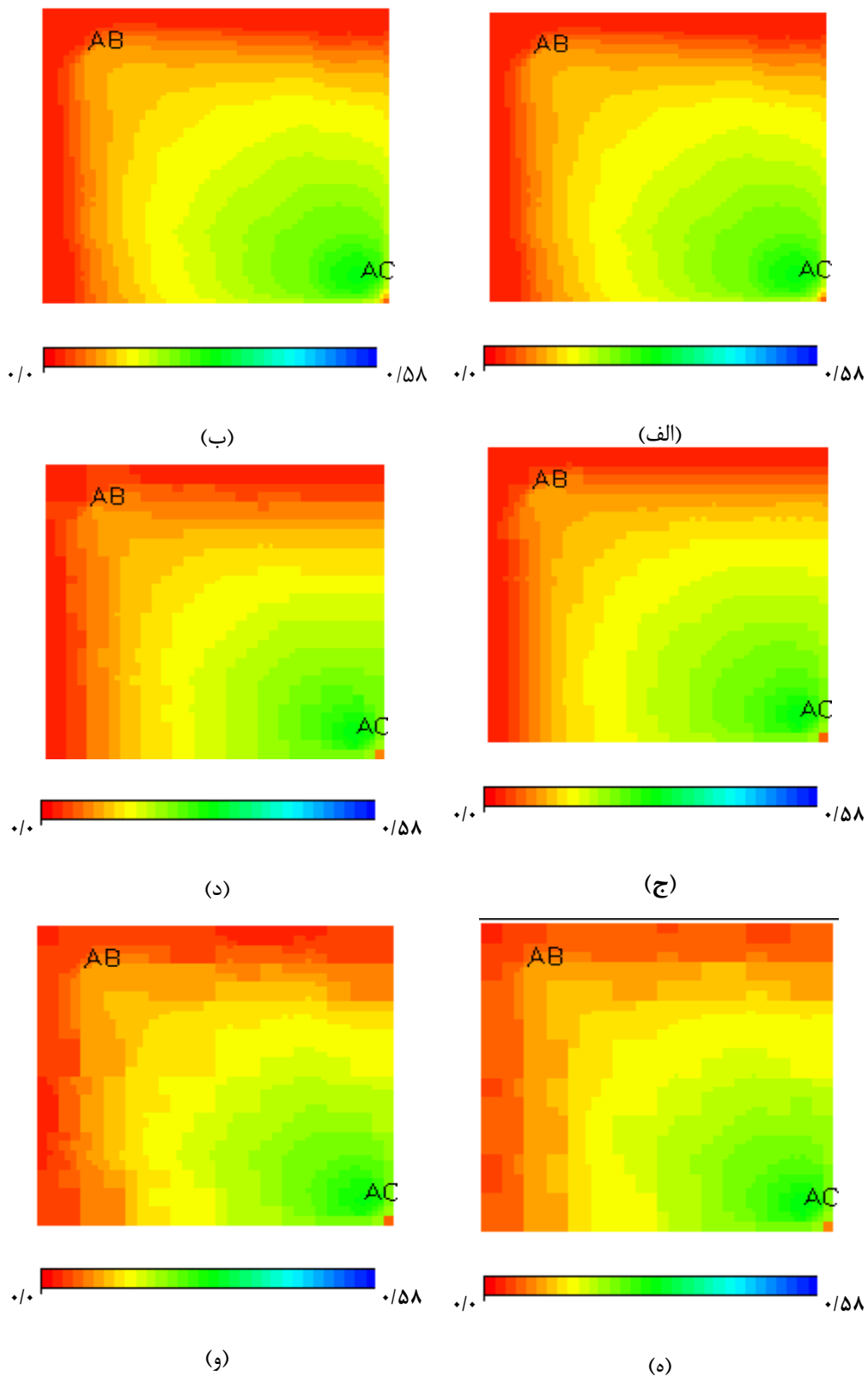


شکل ۵-۵ سرعت تولید نفت در مخزن پس از دومرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌های ۰/۹ و ۰/۸ در مراحل اول و دوم افزایش مقیاس

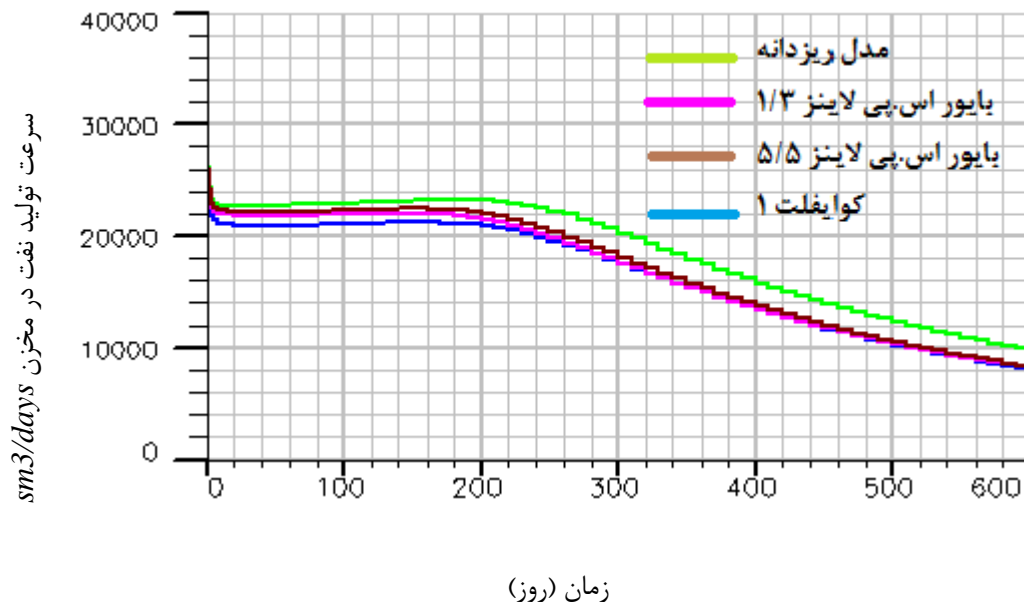
### ۳-۵ نتایج حاصل از سه مرتبه افزایش مقیاس

شکل ۵-۶ توزیع اشباع آب در مدل ریزدانه‌ی اصلی و مدل‌های افزایش مقیاس یافته پس از سه مرحله افزایش مقیاس نشان می‌دهد. ضرایب آستانه در مراحل اول تا سوم برای تمامی توابع ویولت ۰/۹، ۰/۸ و ۰/۷ در نظر گرفته شده است.

در شکل ۵-۶ نیز، مدل‌های افزایش مقیاس یافته توسط توابع هار و دابشیز چهار نتایج بسیار نزدیکی به مدل اولیه نشان می‌دهند. توابع بایوراس.پی لاین ۱.۳ و کوايفلت یک، نتایج بهتری نسبت به تابع بایوراس.پی لاین ۵.۵ نشان می‌دهند. این نتایج در شکل‌های ۵-۷ تا ۵-۱۵ نیز قابل مشاهده است.

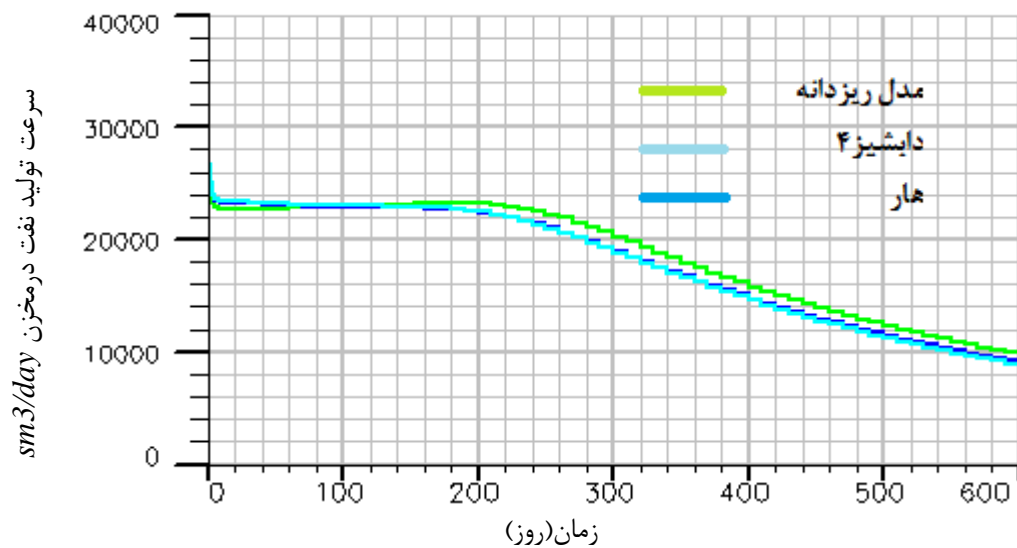


شکل ۵-۶ توزیع اشباع آب پس از ۴۰۰ روز تزریق، الف: مدل ریزدانه‌ی اولیه، ب تا ح مدل‌های افزایش مقیاس یافته‌ی حاصل از سه مرتبه افزایش مقیاس با ضرایب مقیاس ۰/۹، ۰/۸ و ۰/۷ ب: بایور ۱.۳، ج: بایور ۵.۵، د: کواپفلت یک، ه: دابشیز چهار و و: هار



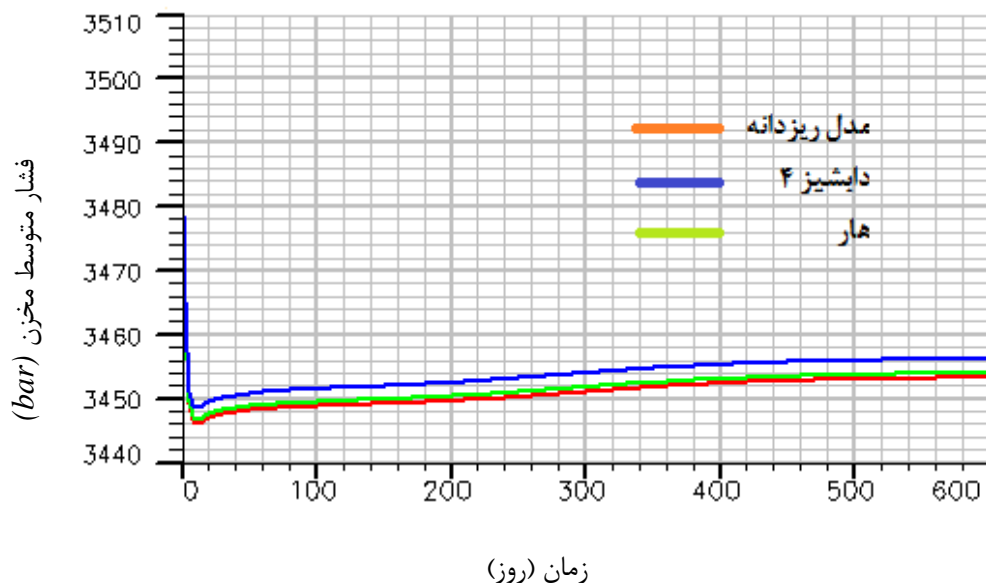
شکل ۵-۷ سرعت تولید نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۹، ۰/۸ و ۰/۷ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



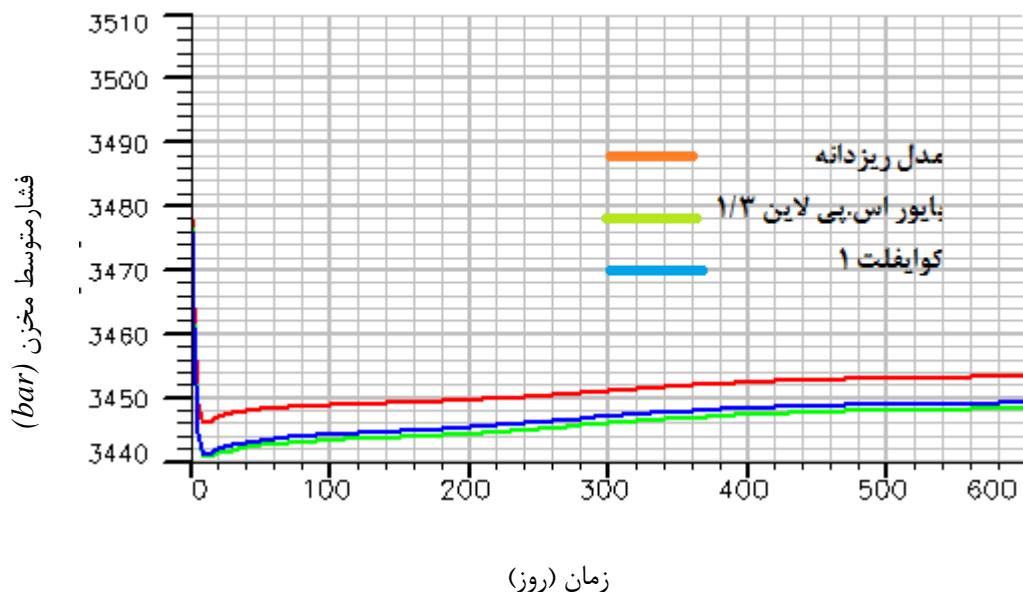
شکل ۵-۸ سرعت تولید نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۹، ۰/۸ و ۰/۷ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



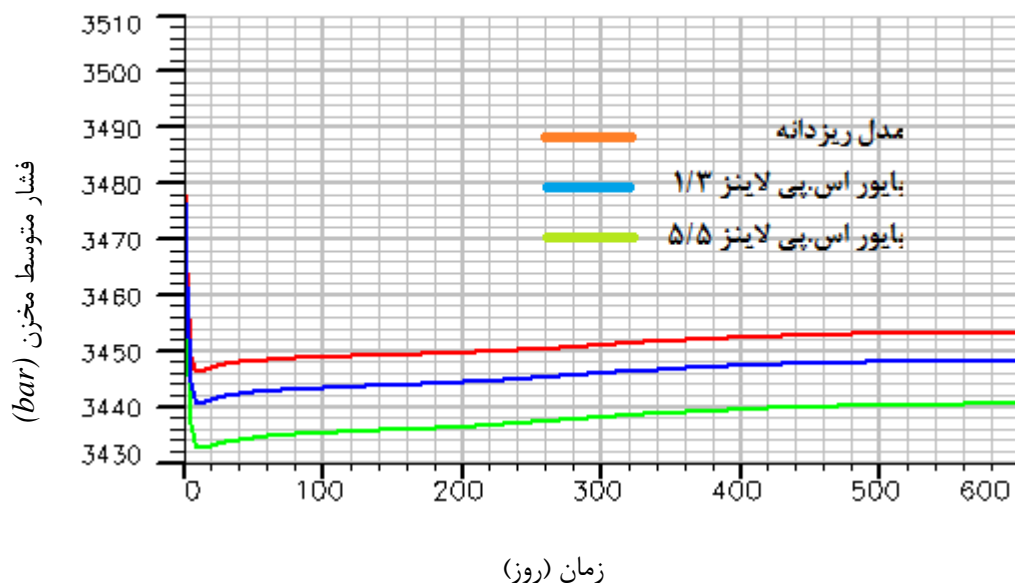
شکل ۵- ۹ فشار متوسط مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۹، ۰/۸ و ۰/۷ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



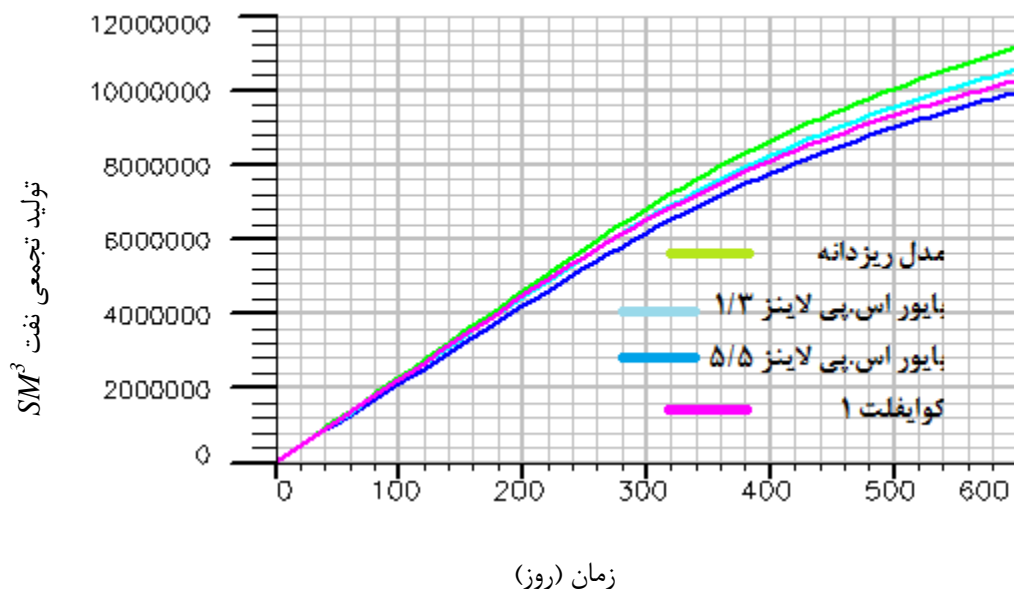
شکل ۵- ۱۰ فشار متوسط مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۹، ۰/۸ و ۰/۷ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



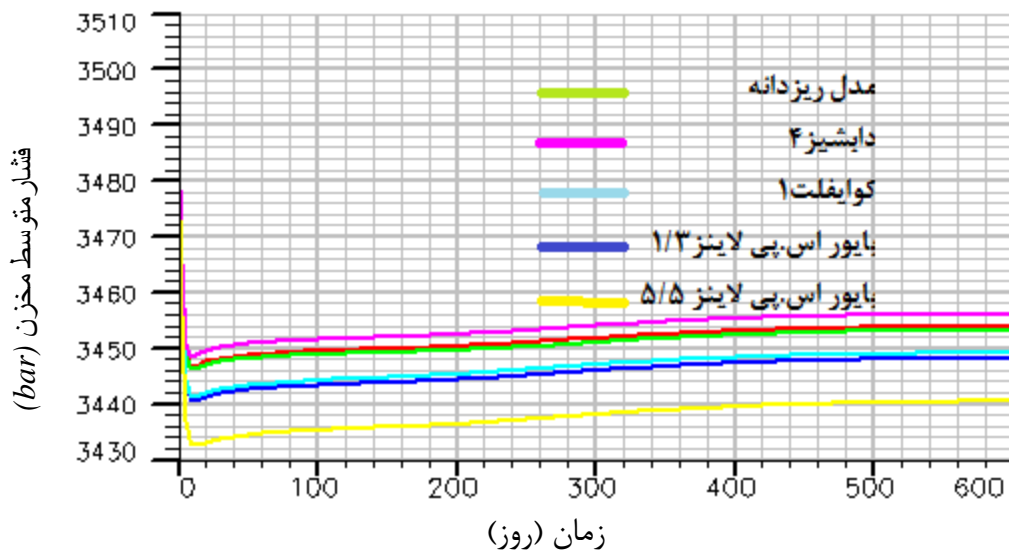
شکل ۵-۱۱ فشار متوسط مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۹، ۰/۸ و ۰/۷ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



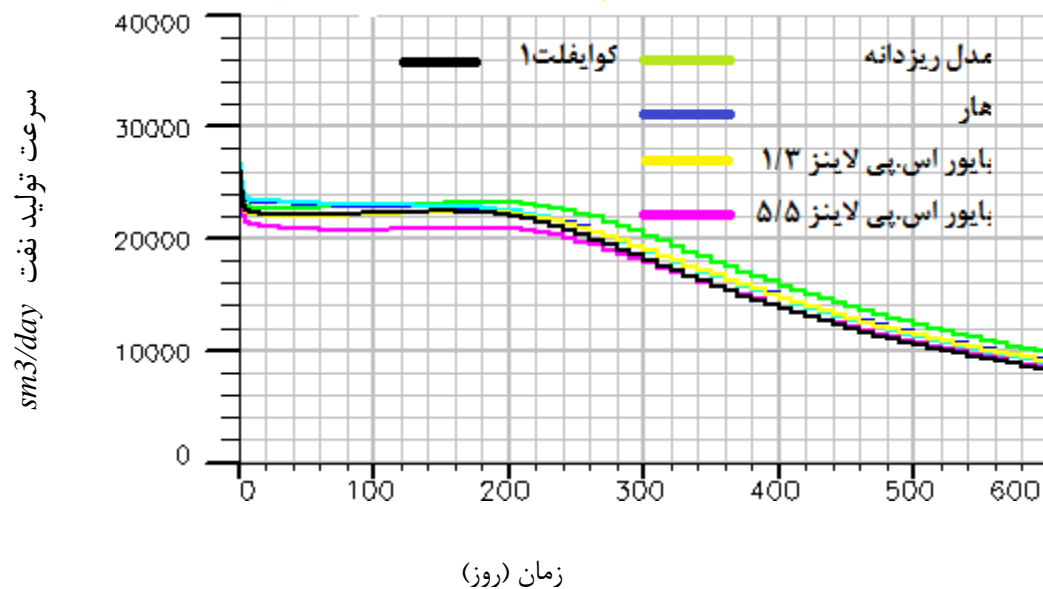
شکل ۵-۱۲ تولید تجمعی نفت پس از سه مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۹، ۰/۸ و ۰/۷ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



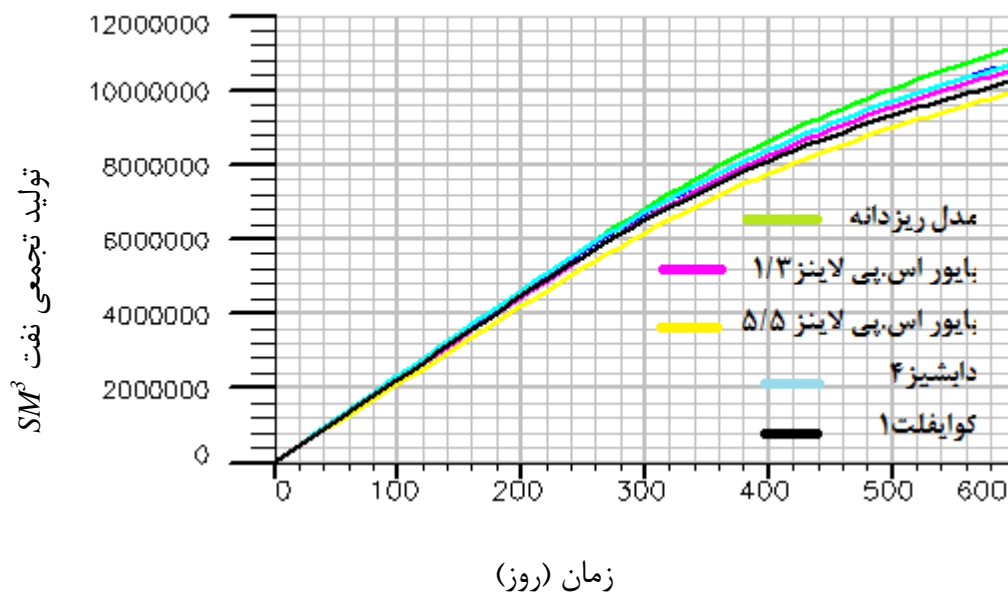
شکل ۵-۱۳ فشار متوسط مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۹ ، ۰/۸ و ۰/۷ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



شکل ۵-۱۴ سرعت تولید نفت پس از سه مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۹ ، ۰/۸ و ۰/۷ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



شکل ۵-۱۵ تولید تجمعی نفت پس از سه مرحله افزایش مقیاس

با ضرایب آستانه‌های ۰/۸، ۰/۹ و ۰/۷ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس

عنوان گردید که روش‌های افزایش مقیاس می‌بایست ضمن حفظ دقت محاسبات، افزایش قابل ملاحظه‌ای در سرعت انجام محاسبات نیز ایجاد کنند. منحنی‌ها و شکل‌های فوق، دقت روش افزایش مقیاس را به خوبی نشان داده‌اند و اکنون افزایش سرعت به دست آمده و صرفه جویی زمانی حاصل نیز بررسی می‌گردد. هر دو پارامتر دقت محاسبات و سرعت انجام محاسبات، به شدت به میزان ضرایب آستانه بستگی دارد.

قرار دادن مقدار آستانه‌ی ۰/۹ در اولین مرحله‌ی افزایش مقیاس و مقدار آستانه‌ی ۰/۸ برای مرحله‌ی دوم سبب گردید که برای شبیه‌سازی مدل درشت دانه توسط توابع هار، دابشیز ۴، بایوراس پی لاینز ۱/۳، بایوراس پی لاینز ۵/۵ و کوايفلت یک، به ترتیب ۴۱۱، ۳۳۱، ۲۹۲، ۲۴۵ و ۲۳۴ ثانیه

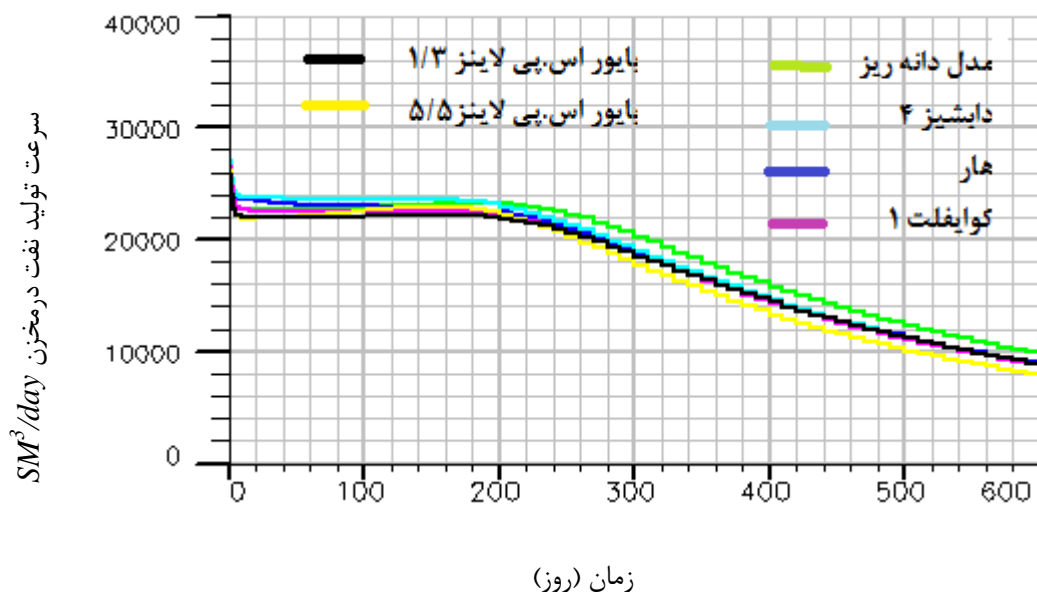
زمان سپری گردد که به این ترتیب افزایش سرعتی به ترتیب معادل  $۲/۶$ ،  $۳/۳$ ،  $۴/۳$ ،  $۵/۸$  و  $۴/۸$  برابر را در پی داشته است. زمان سپری شده برای شبیه‌سازی مدل ریزدانه  $۱۱۰۰$  ثانیه می‌باشد.

با انتخاب مقادیر آستانه‌ی بزرگتر و انجام درجات بیشتر افزایش مقیاس، حتی می‌توان به ضریب افزایش سرعت بیشتری دست یافت، اما به هر حال از دست دادن بخشی از دقت به علت متوسط گیری‌های پی در پی اجتنای ناپذیر خواهد بود. در هر صورت، بر اساس دقت مورد نظر و میزان خطای قابل قبول می‌توان مقادیر آستانه‌ی ضرایب ویولت و حداکثر درجه افزایش مقیاس را به میزان مورد نظر انتخاب نمود.

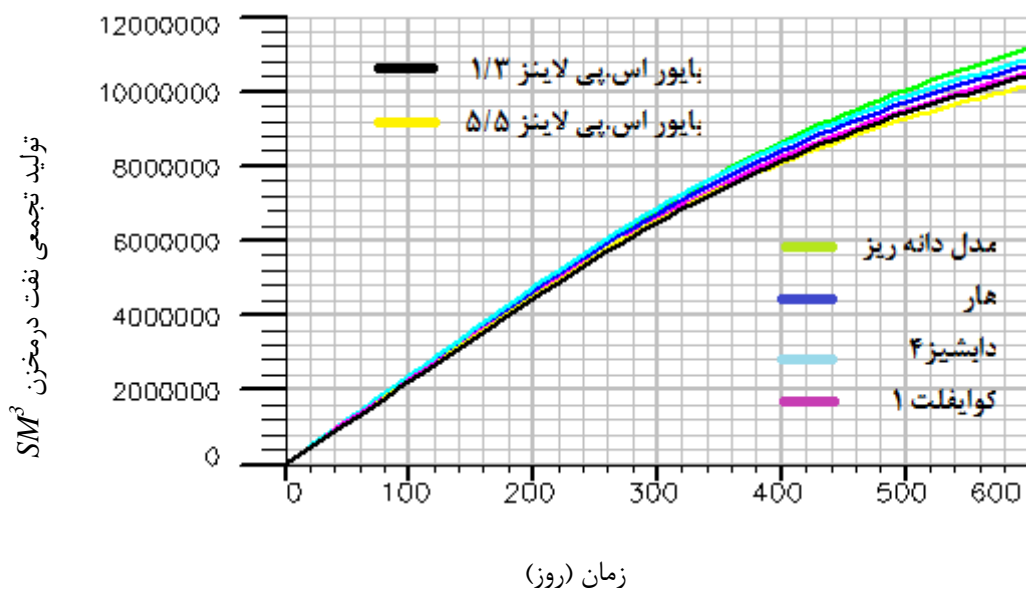
مدل‌های افزایش مقیاس یافته‌ی متفاوتی با انتخاب مقادیر مختلف آستانه برای ضرائب جزئیات و مقیاس بررسی گردید. در ادامه، نتایج این بررسی‌ها برای چندین مدل افزایش مقیاس یافته‌ی متفاوت ارائه شده و با نتایج به دست آمده از مدل ریزدانه‌ی مبنا مقایسه شده است تا حساسیت نتایج به نحوه‌ی افزایش مقیاس و درجه درشت سازی ارزیابی شود.

در گروهی از مدل‌های افزایش مقیاس یافته ضرایب آستانه‌ی ثابت در طی انجام عمل افزایش مقیاس، اعمال شده است. در گروه دیگر از مدل‌های افزایش مقیاس یافته، ضرایب جزئیات و مقیاس در اولین مرحله‌ی درشت سازی برابر مقدار ماگزیمم دلخواه قرار داده شده و سپس به صورت نزولی کاهش یافته است. برای گروه اول ضرایب آستانه‌ی  $۰/۸$ ،  $۰/۷$  و  $۰/۶$  به طور ثابت در هر سه مرحله‌ی افزایش مقیاس اعمال شده است. برای گروه دوم، سه حالت ضریب آستانه به صورت  $(۰/۹)$ ،  $(۰/۸)$ ،  $(۰/۷)$ ،  $(۰/۸)$ ،  $(۰/۷)$  و  $(۰/۶)$  برای تمامی توابع ویولت با سه مرحله افزایش مقیاس در نظر گرفته شد. مدل‌های افزایش مقیاس یافته متعلق به هر دو حالت فوق در زیر آورده شده است.

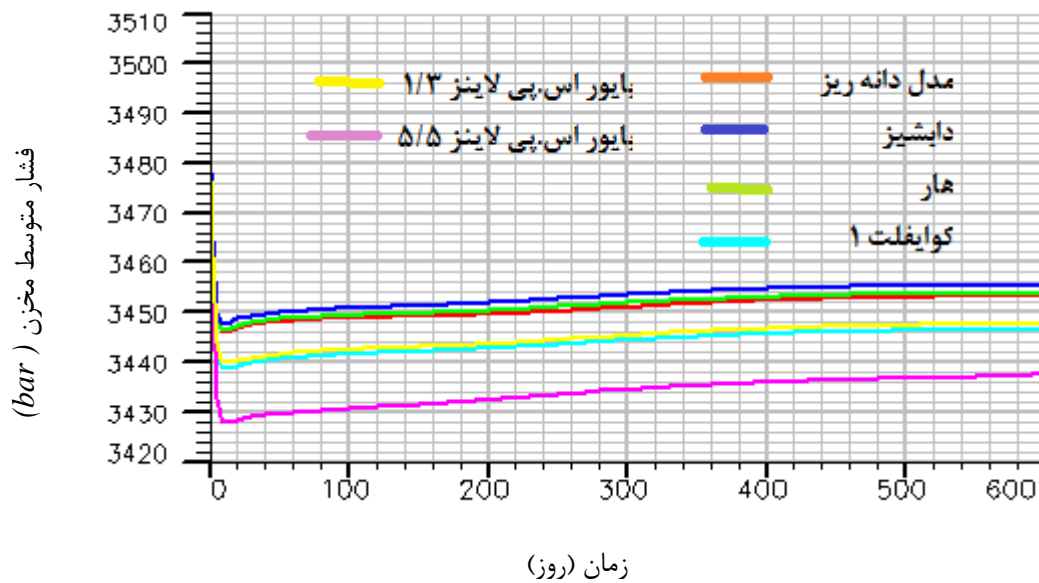




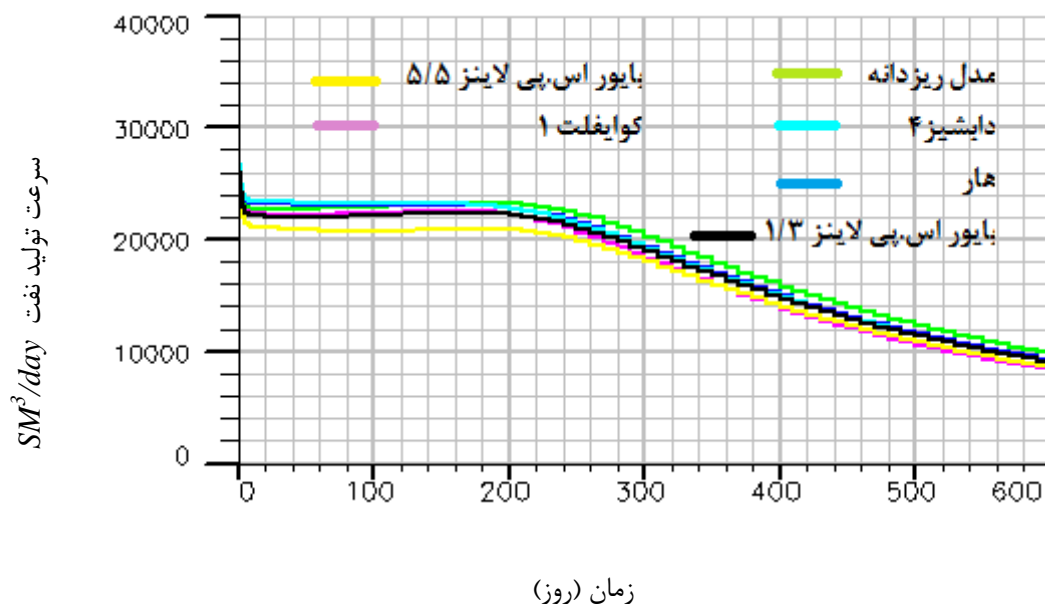
شکل ۵-۱۶ سرعت تولید نفت در مخزن مقیاس با ضرایب مقیاس ۰/۸



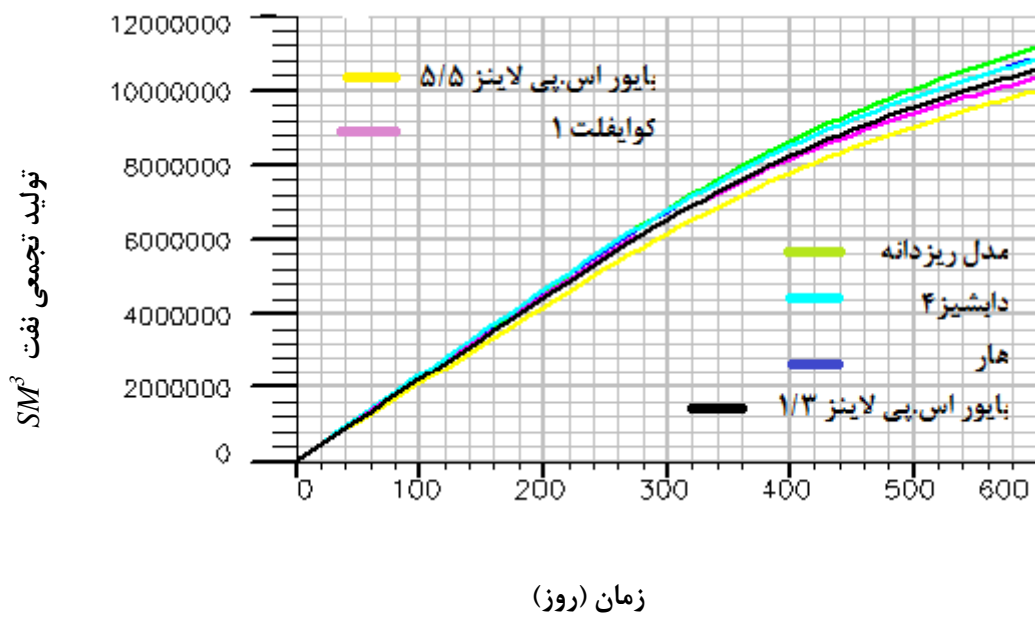
شکل ۵-۱۷ تولید تجمعی نفت در مخزن مقیاس با ضرایب مقیاس ۰/۸



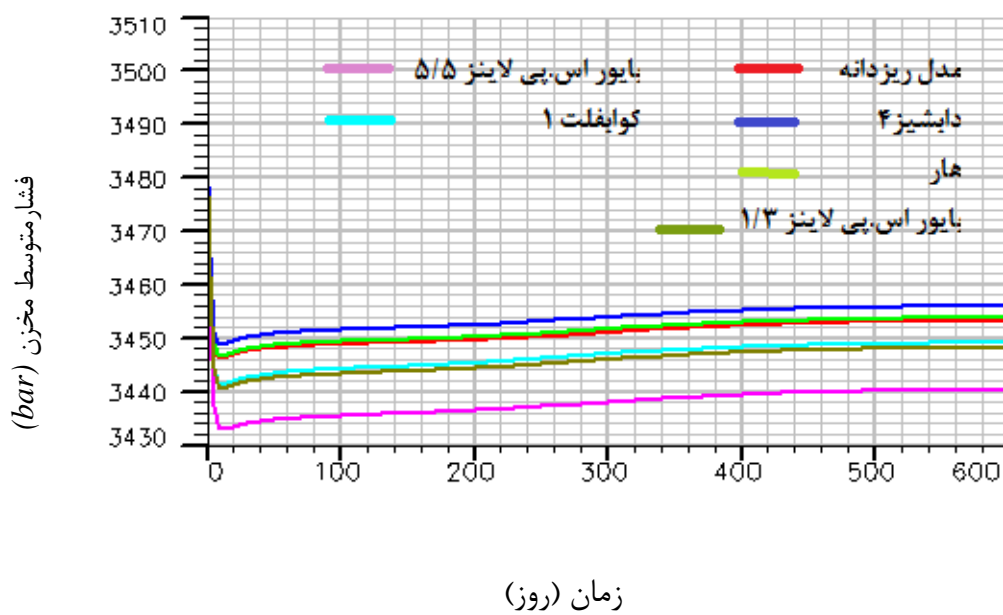
شکل ۵-۱۸ فشار متوسط مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌های ۰/۸



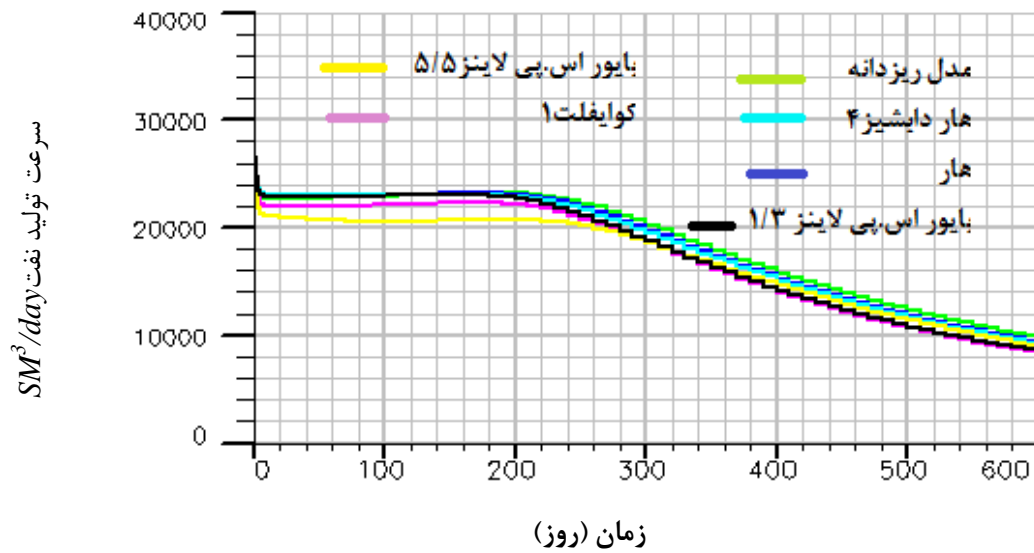
شکل ۵-۱۹ سرعت تولید نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌های ۰/۷



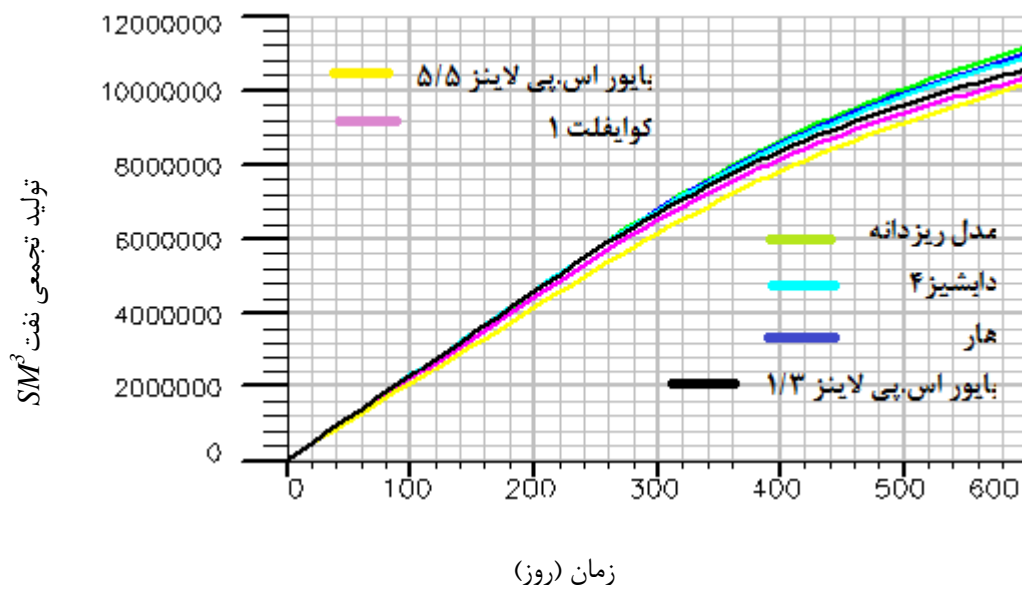
شکل ۵-۲۰ تولید تجمعی نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۷



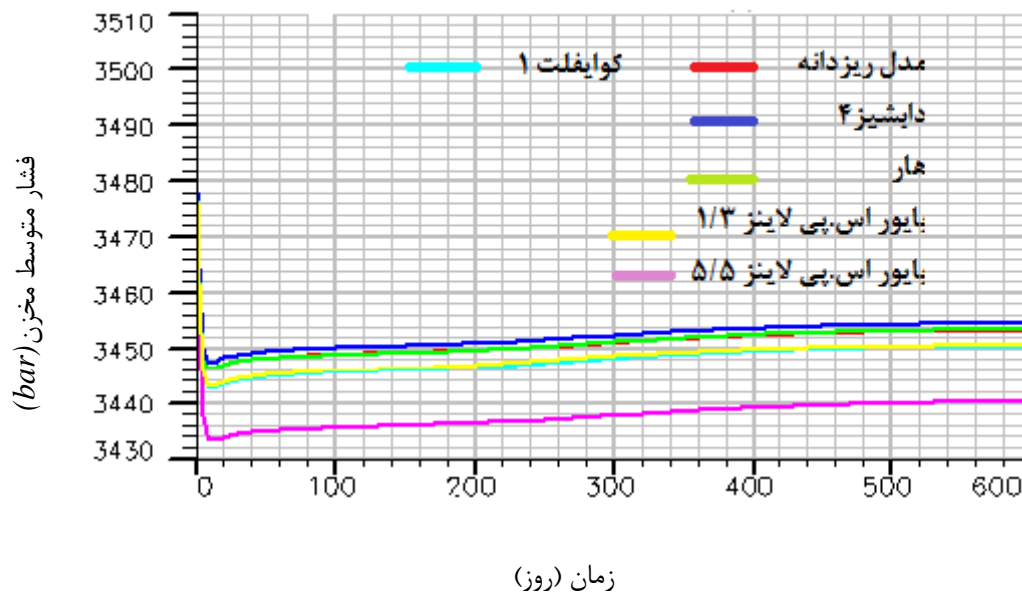
شکل ۵-۲۱ فشار متوسط مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۷



شکل ۵-۲۲ سرعت تولید نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۶

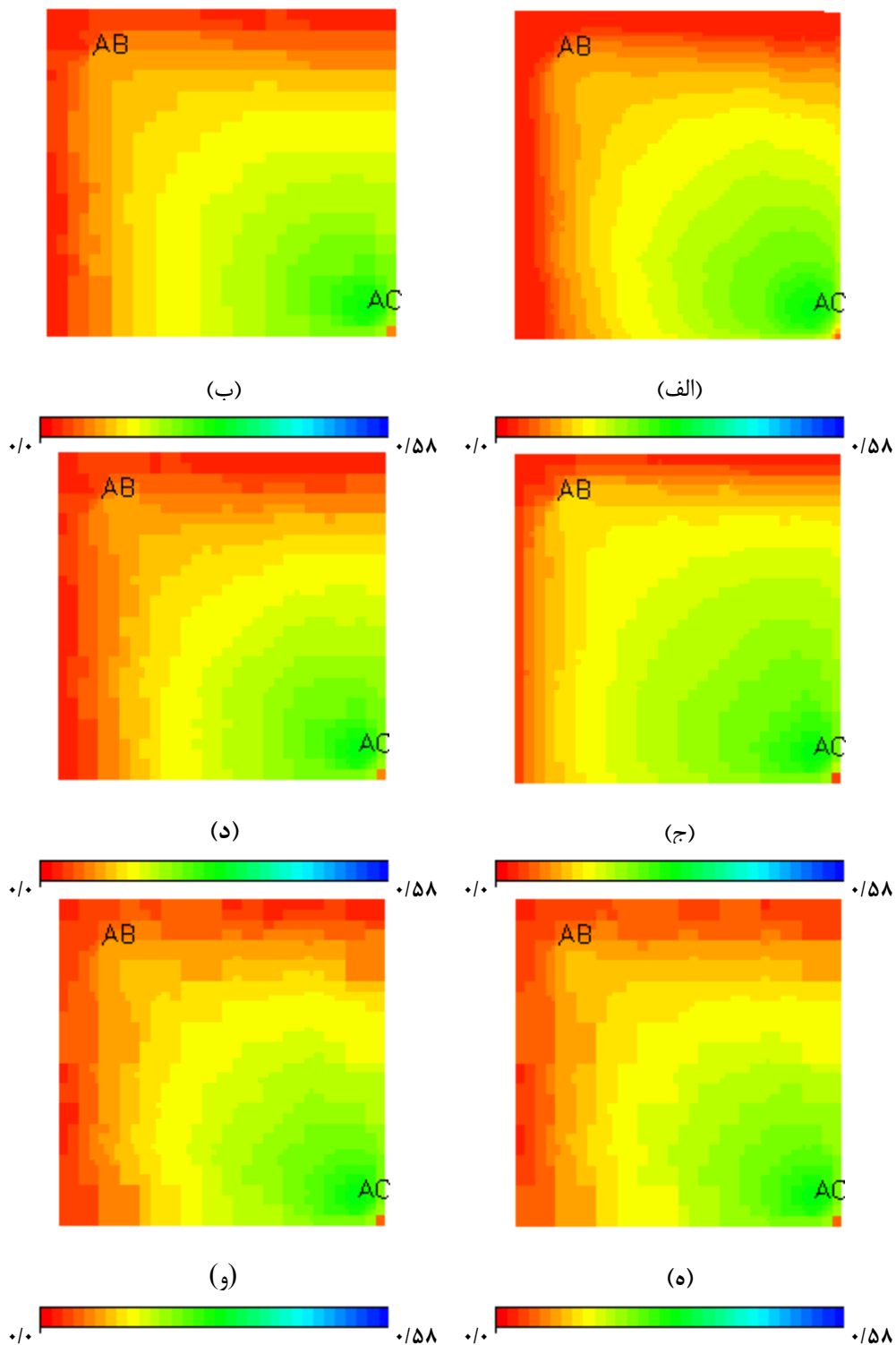


شکل ۵-۲۳ تولید تجمعی نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۶

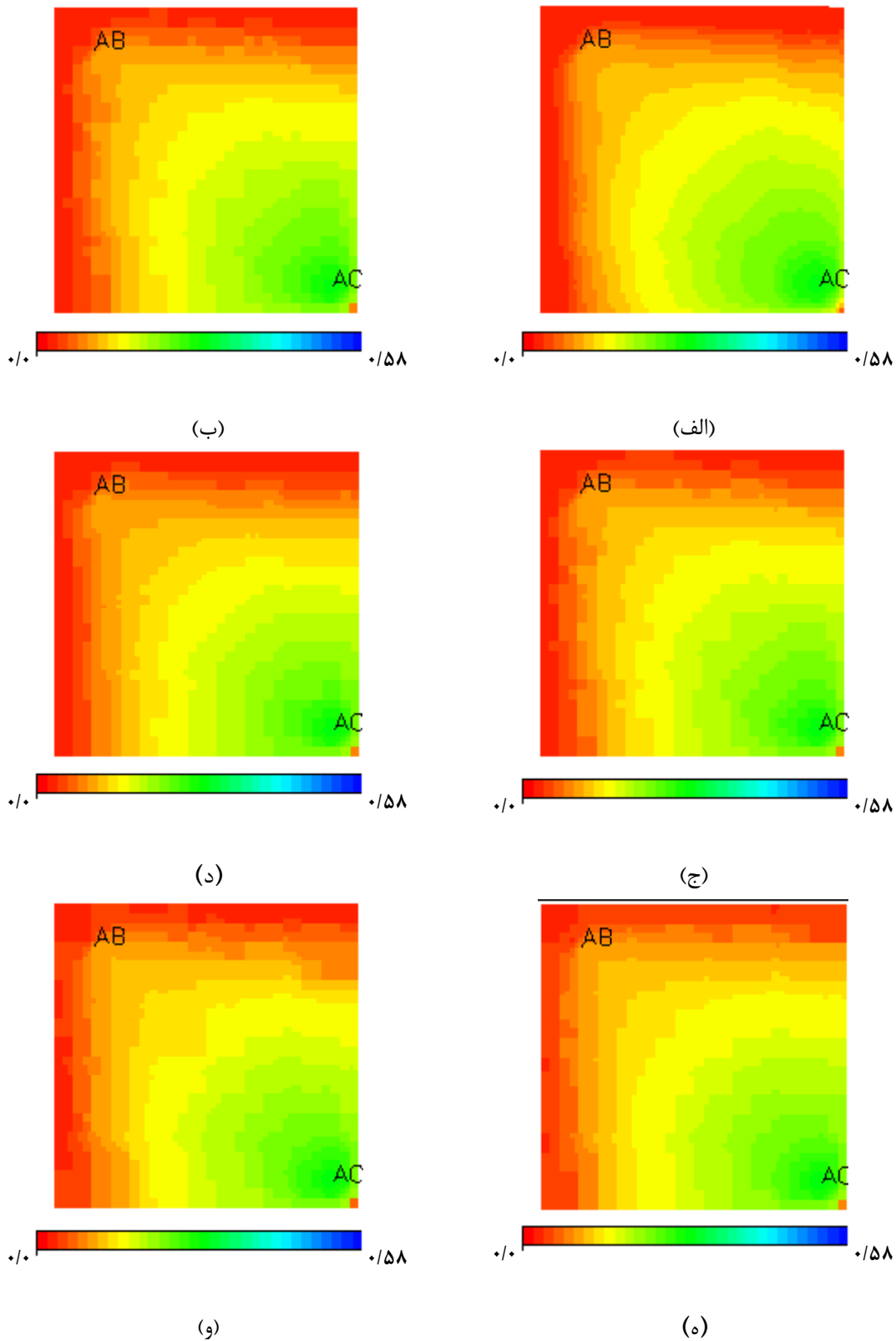


شکل ۵-۲۴ فشار متوسط مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۶

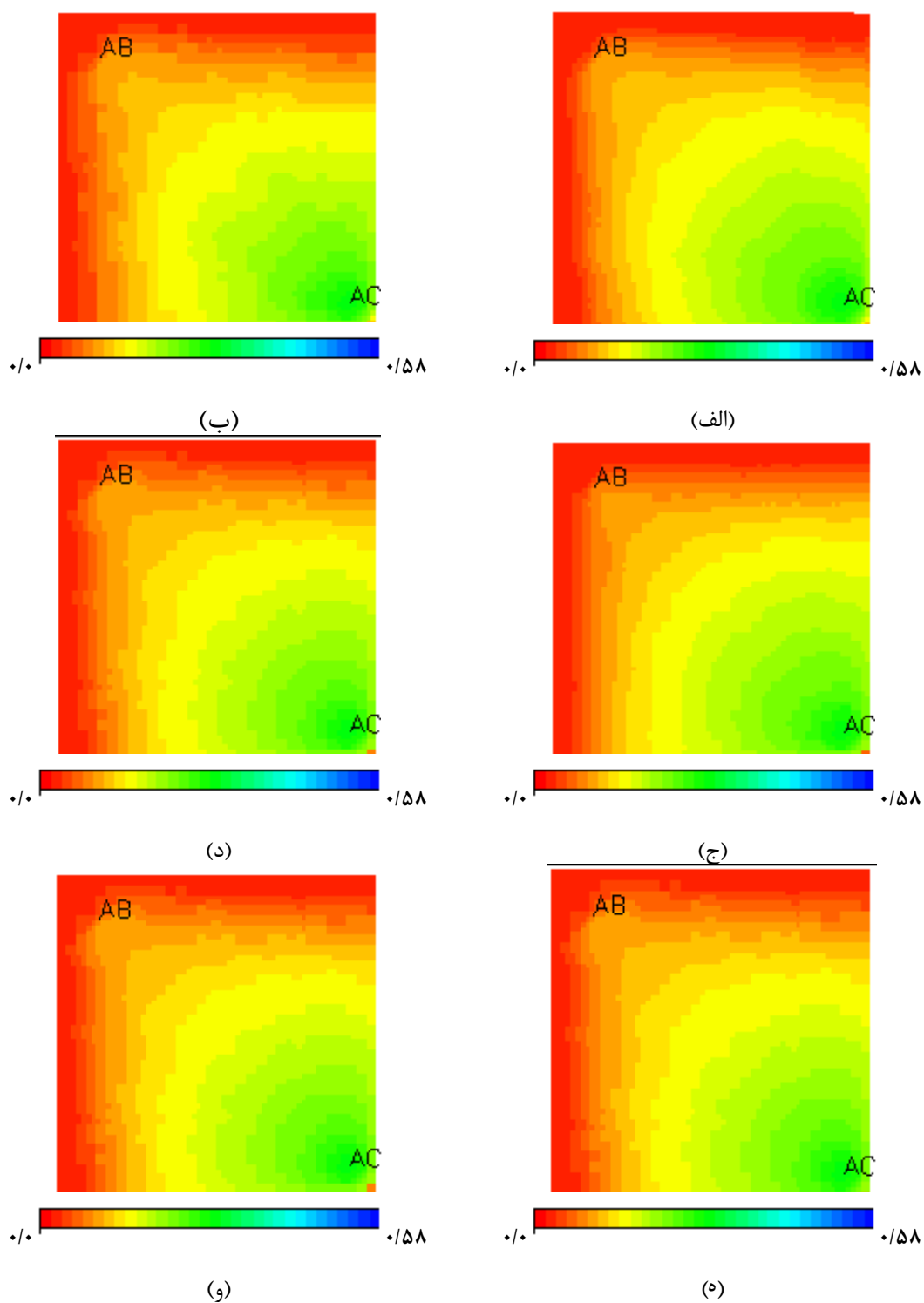
از شکل‌های ۵-۱۶ تا ۵-۲۷ می‌توان نتیجه گرفت با کاهش میزان مقادیر ضرایب آستانه، مدل افزایش مقیاس یافته از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود. اما همانطور که پیشتر مطرح شد با کاهش ضرایب آستانه تعداد بلوک‌های مدل افزایش مقیاس یافته در مقایسه با حالتی که به ضرایب آستانه مقادیر بزرگ‌تری اختصاص دهیم، بیشتر خواهد بود. بنابراین سرعت انجام محاسبات کمتر خواهد بود. بنابراین برای صرفه‌جویی در زمان محاسبات و بطور همزمان داشتن مدلی با دقت و اعتبار بالا، مقادیر دیگری از ضرایب آستانه که بطور نزولی اعمال می‌شود، در نظر گرفته شده است که در ادامه نتایج حاصل از آن آورده شده است.



شکل ۵- ۲۵ توزیع اشباع آب در الف: مدل ریزدانه اولیه، ب تا ح مدل‌های افزایش مقیاس یافته‌ی حاصل از سه مرتبه افزایش مقیاس با ضرایب آستانه ۰/۸ (ب: بایور ۱.۳، ج: بایور ۵.۵، د: کوايفلت یک، ه: دابشيز چهار و و: هار)

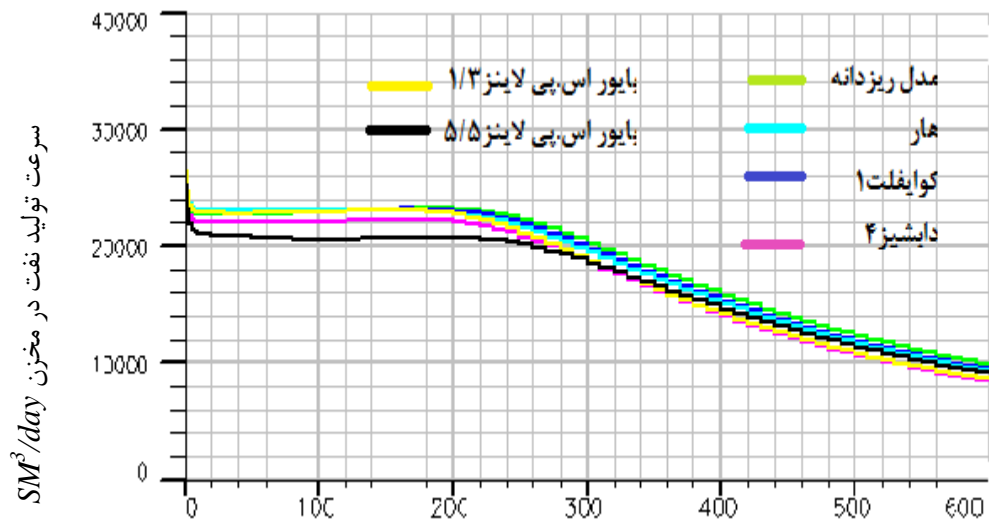


شکل ۵-۲۶ توزیع اشباع آب در الف: مدل ریزدانه اولیه، ب تا ح مدل‌های افزایش مقیاس یافته‌ی حاصل از سه مرتبه افزایش مقیاس با ضرایب آستانه ۰/۷ (ب: بایور ۱.۳، ج: بایور ۵.۵، د: کوایفلت یک، ه: دابشیز چهار و و: هار)



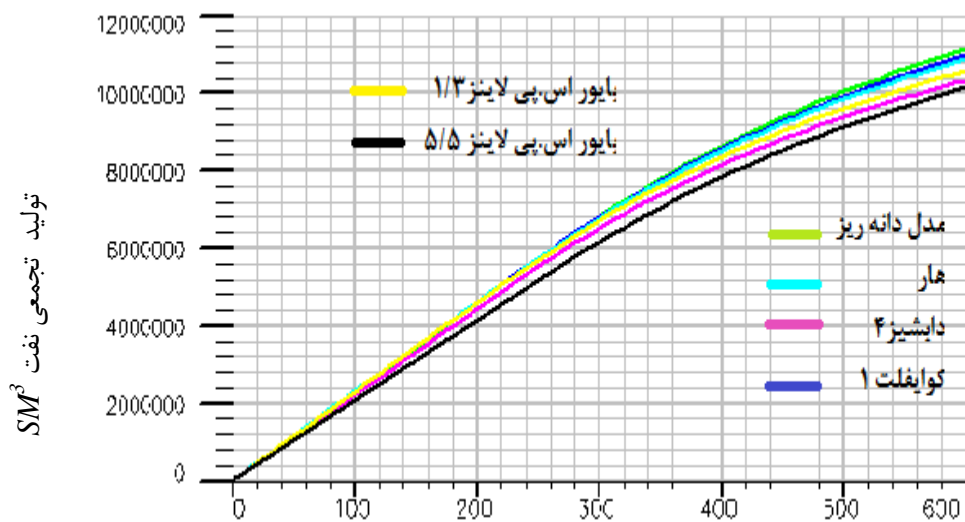
شکل ۵-۲۷ توزیع اشباع اب در الف: مدل ریزدانه اولیه، ب تا ح مدل‌های افزایش مقیاس یافته‌ی حاصل از سه مرتبه افزایش مقیاس با ضرایب آستانه ۰/۶ (ب: بایور ۱.۳، ج: بایور ۵.۵، د: کواپلنت یک، ه: دابشیز چهار و و: هار)





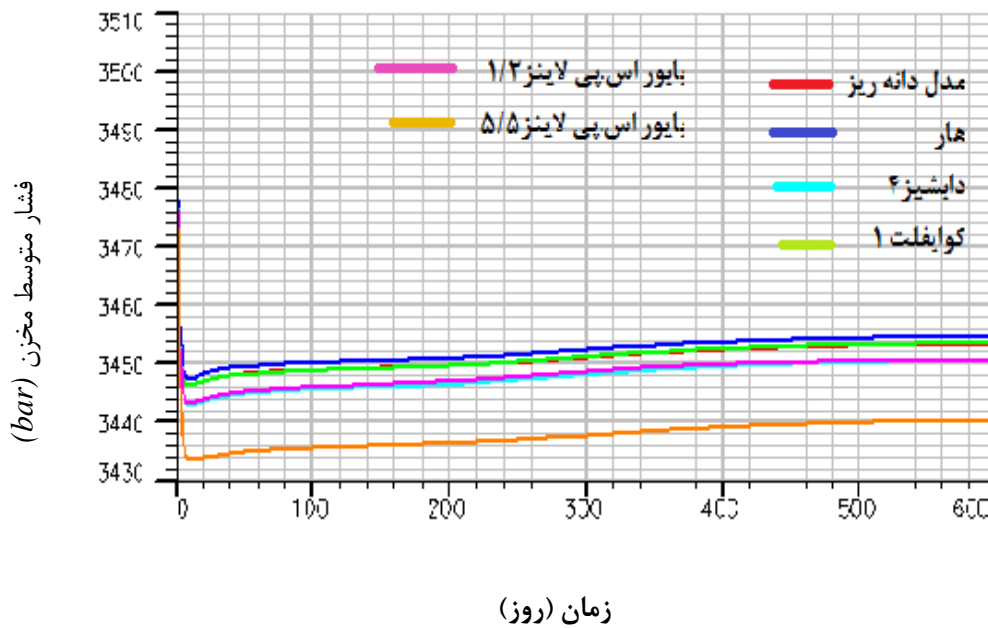
زمان (روز)

شکل ۲۸-۵ سرعت تولید نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس

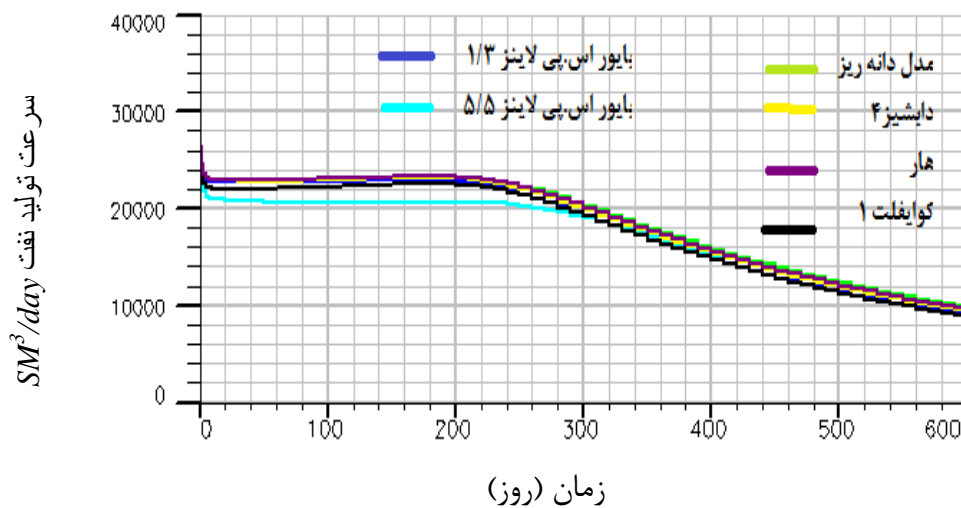


زمان (روز)

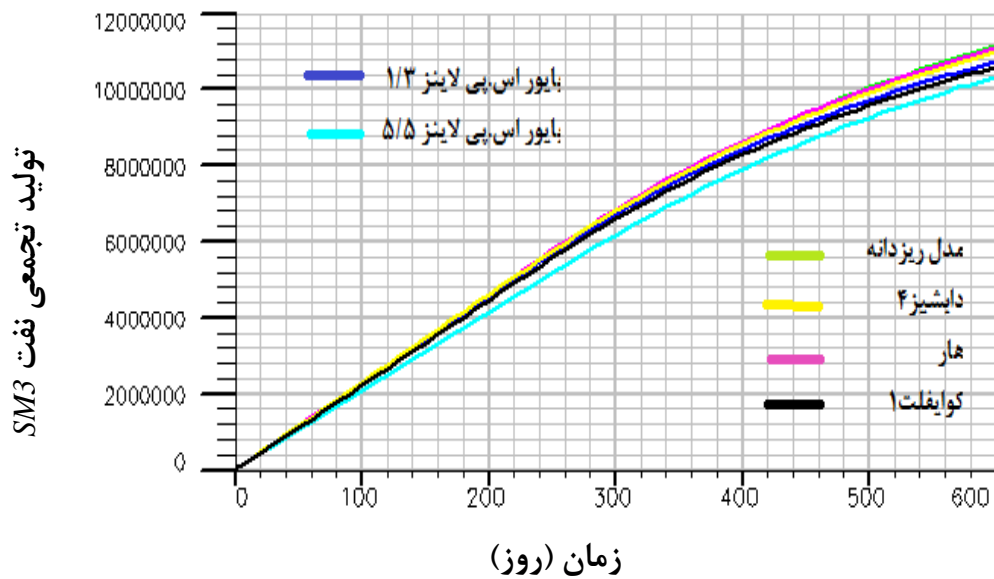
شکل ۲۹-۵ تولید تجمعی نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



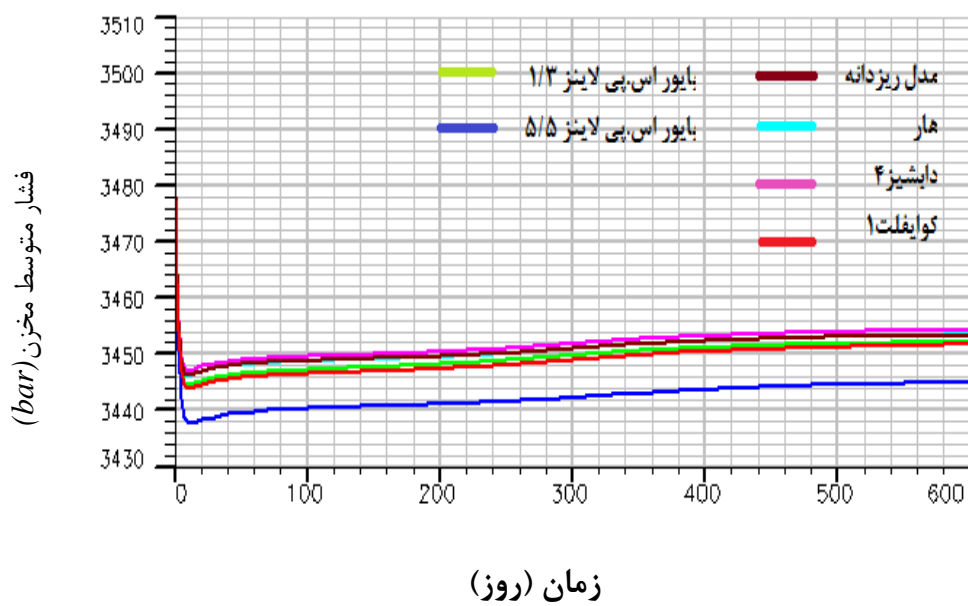
شکل ۳۰-۵ فشار متوسط مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب ضرایب آستانه‌ی ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



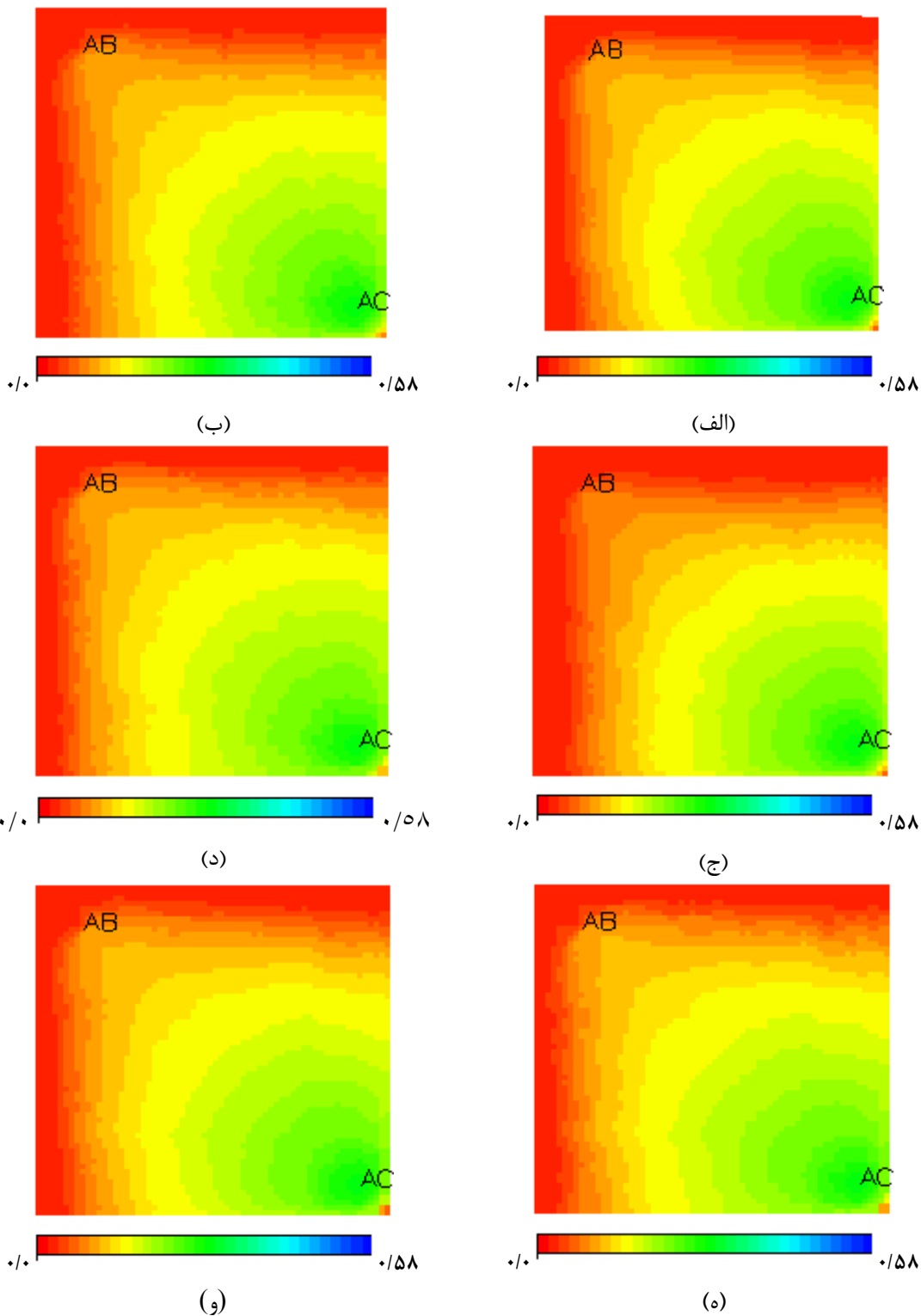
شکل ۳۱-۵ سرعت تولید نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۷، ۰/۶ و ۰/۵ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



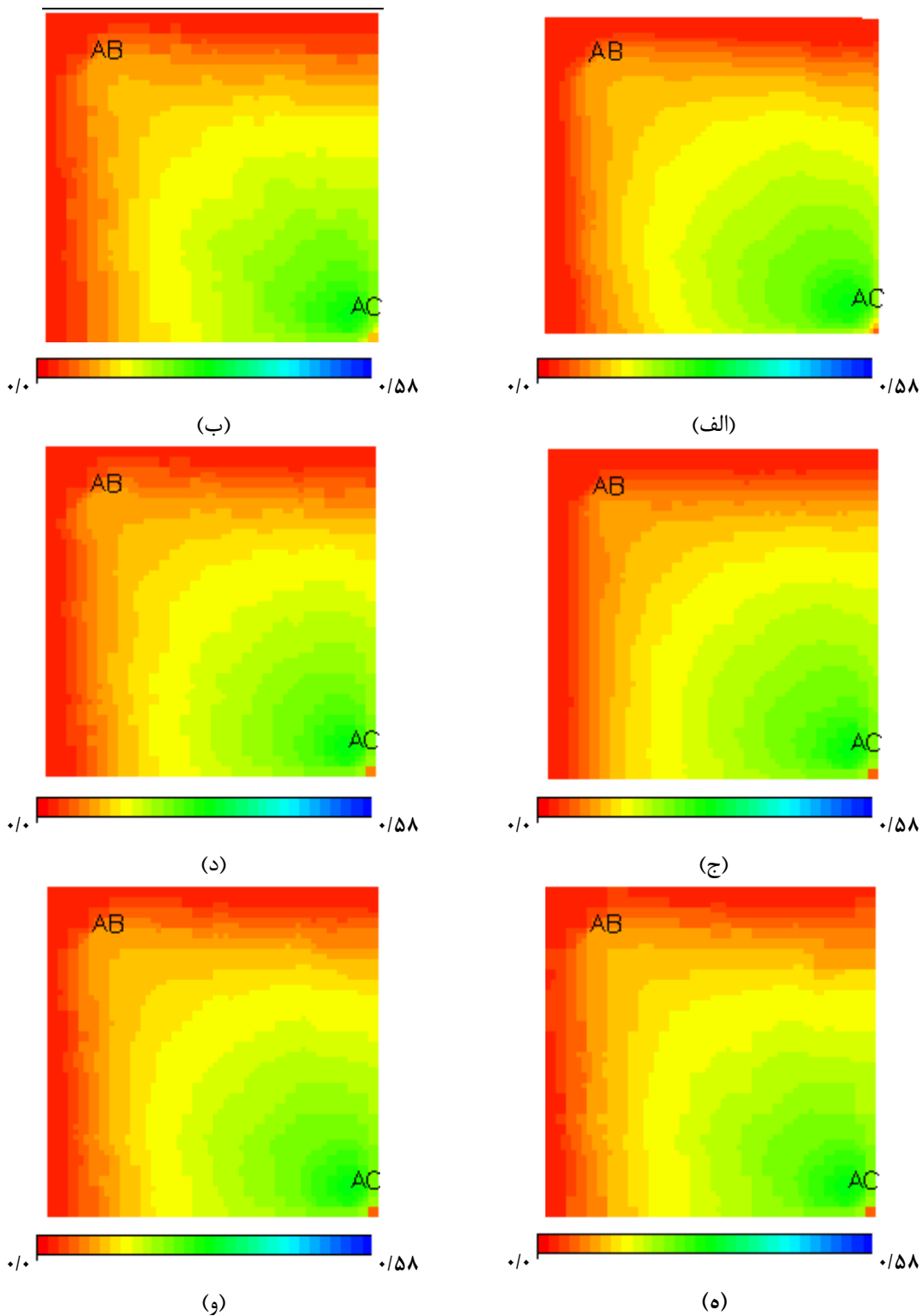
شکل ۵-۳۲ تولید تجمعی نفت در مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۷، ۰/۶ و ۰/۵ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



شکل ۵-۳۳ فشار متوسط مخزن پس از سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۷، ۰/۶ و ۰/۵ در مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس



شکل ۵-۳۴ توزیع اشباع آب در الف: مدل ریزدانه اولیه، ب تا ح مدل‌های افزایش مقیاس یافته‌ی حاصل از سه مرتبه افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۷، ۰/۶ و ۰/۵ (ب: بایور ۱.۳، ج: بایور ۵.۵، د: کواپفلت یک، ه: دابشیز چهار و و: هار)



شکل ۵-۳۵ توزیع اشباع آب در الف: مدل ریزدانه اولیه، ب تا ح مدل‌های افزایش مقیاس یافته‌ی حاصل از سه مرتبه افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ (ب: بایور ۱.۳، ج: بایور ۵.۵، د: کوایفلت یک، ه: دابشیز چهار و و: هار)

## ۴-۵ مقایسه نتایج حاصل از دو و سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب

### آستانه‌های مختلف

همانطور که مشاهده می‌شود، مدل‌های افزایش مقیاس یافته‌ی متفاوتی با ضرایب آستانه‌های متفاوت و تعداد دفعات متفاوت افزایش مقیاس ساخته شده است. زمان لازم برای پردازش اطلاعات و ساختن مدل مخزن، در مدل‌های فوق متفاوت است. تقریباً در تمامی مدل‌های افزایش مقیاس یافته، با ضریب آستانه‌ی ثابت یا متغیر در روند افزایش مقیاس، بیشترین زمان لازم و یا به عبارت دیگر کمترین سرعت برای انجام محاسبات برای شبیه‌سازی مخزن، مربوط به ویولت هار می‌باشد. همچنین کمترین زمان مورد نیاز مربوط به ویولت بایور ای.پی لاین ۱.۳ می‌باشد. بعد از ویولت هار بیشترین زمان لازم برای انجام محاسبات شبیه‌سازی، به ترتیب مربوط به ویولت‌های دابشیز چهار، کواپفلت یک و بایور اس.پی لاین ۵.۵ می‌باشد. از طرفی مدل افزایش مقیاس یافته توسط ویولت هار بیشترین شباهت را به مدل ریزدانه دارد و در درجه‌ی دوم مدل‌های افزایش مقیاس یافته توسط ویولت‌های دابشیز چهار و بایور اس.پی لاین ۱.۳ از دقت بالایی برخوردارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مجموعه‌ی عوامل میزان ضریب آستانه، تعداد دفعات افزایش مقیاس و همچنین نوع ویولت به کار رفته برای عمل افزایش مقیاس در میزان اعتبار مدل افزایش مقیاس یافته مخزن، مؤثر می‌باشد.

جدول ۳-۵ زمان صرف شده در فرآیند افزایش مقیاس، برای توابع ویولت متفاوت، با ضرایب آستانه‌های متفاوت و تعداد دفعات متفاوت افزایش مقیاس را نشان می‌دهد. مدل مورد بررسی در این پایان نامه تا سه مرحله افزایش مقیاس یافته است. مدل افزایش مقیاس یافته تا چهار مرحله از دقت کافی برخوردار نبوده است.

تعداد عناصر فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر برای ویولت هار، دو عدد، برای دابشیز چهار، چهار

عدد، برای بایور اس.پی لاین ۱.۳، شش عدد، برای بایور اس.پی لابنز ۵.۵، ۱۲ عدد و برای کوایفلت یک، هشت عدد می‌باشد. همانطور که در از جدول ۳-۵ مشاهده می‌شود با متفاوت بودن طول فیلترهای صافی، زمان لازم برای شبیه‌سازی مخزن نیز متفاوت می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که با کاهش طول فیلترهای صافی، شباهت مدل افزایش مقیاس یافته به مدل ریزدانه، به دلیل موضعی عمل کردن این فیلترها، بیشتر می‌شود. اما به همان نسبت سرعت انجام محاسبات شبیه‌سازی کاهش می‌یابد. همانطور که در جدول ۳-۵ مشاهده می‌شود تابع ویولت هر با داشتن فیلترهایی به طول ۲، بیشترین زمان لازم برای شبیه‌سازی مخزن را به خود اختصاص داده است.

جدول ۳-۵ زمان صرف شده جهت انجام محاسبات شبیه‌سازی بر حسب ثانیه، برای مدل‌های افزایش مقیاس یافته

روش ویولت	استانده	طول فیلتر							
		مرحله اول	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۹
		مرحله دوم	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۸
	مرحله سوم	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	*	
	bior 1.3	۵۷۲	۳۰۴	۱۸۵	۲۰۰	۲۷۳	۴۲۰	۲۹۲	
	bior 5.5	۷۰۰	۳۹۶	۲۵۰	۲۲۳	۳۵۳	۵۸۹	۲۴۵	
	coif 1	۶۱۴	۴۲۲	۲۱۱	۲۱۸	۴۰۲	۵۸۱	۲۳۴	
	db4	۶۱۴	۴۵۶	۳۱۳	۲۵۴	۴۳۱	۵۹۲	۳۳۱	
	haar	۷۷۰	۵۷۰	۴۱۶	۲۹۳	۵۵۲	۷۶۲	۴۱۱	

از طرفی با افزایش طول فیلترهای صافی به دلیل سراسری عمل کردن این فیلترها، اعتبار مدل افزایش مقیاس یافته کاهش می‌یابد ولی از طرفی به دلیل میانگین‌گیری تعداد بیشتری از بلوک‌ها و افزایش مقیاس آن‌ها، و در نهایت کاهش تعداد بلوک‌های مدل افزایش مقیاس یافته، سرعت شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. البته ذکر این نکته ضروری است که در صورتی که طول فیلتر از یک مقدار مشخص بیشتر شود، دقت و همچنین سرعت شبیه‌سازی کاهش می‌یابد.

بنابراین یافتن یک تابع ویولت بهینه جهت شبیه سازی مخزن با روش افزایش مقیاس به کمک تابع ویولت، به صورتی که مدل ساخته شده معتبر باشد و همچنین زمان و هزینه‌های مصرفی پایین باشد ضروری است.

همانطور که اشاره شد در مدل‌های افزایش مقیاس یافته با ضرایب ثابت، با افزایش مقادیر ضرایب آستانه از ۰/۶ تا ۰/۸، سرعت انجام محاسبات افزایش و به همان نسبت تا حدودی دقت مدل ساخته شده برای مخزن کاهش یافته است. از میان مدل‌های افزایش مقیاس یافته با ضرایب آستانه‌ی ثابت ۰/۶ تا ۰/۸، ضریب آستانه‌ی بهینه مقدار ۰/۷ می‌باشد.

در مدل‌های افزایش مقیاس یافته با مقادیر متغیر ضرایب آستانه در هر مرحله از افزایش مقیاس، مدل‌های افزایش مقیاس یافته با ضرایب آستانه‌ی ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶، برای هر یک از مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس، مدل‌های معتبری می‌باشند.

مدل‌های افزایش مقیاس یافته با ضرایب آستانه‌ی متغیر ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ در هر یک از مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس، مدل‌های بهتری نسبت به مدل‌های افزایش مقیاس یافته با ضرایب آستانه‌ی ثابت ۰/۷ در سه مرحله افزایش مقیاس می‌باشند. این مدل‌ها هم از دقت کافی برخوردارند و هم زمان انجام محاسبات در آن‌ها پایین است.

میزان خطای نسبی سه پارامتر سرعت تولید نفت، تولید نفت تجمعی و فشار متوسط مخزن برای هر کدام از مدل‌های افزایش مقیاس یافته با ضرایب مقیاس ۰/۷ برای هر سه مرحله‌ی افزایش مقیاس و همچنین برای مدل‌های افزایش مقیاس یافته با ضرایب آستانه‌ی ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶، برای هر یک از مراحل اول تا سوم افزایش مقیاس، محاسبه شده است. نتایج در جدول‌های ۴-۵، ۵-۵ و ۶-۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل افزایش مقیاس یافته توسط ویولت هار



کمترین خطای نسبی را دارد. مدل‌های افزایش مقیاس یافته توسط دابشیز چهار و بایور اس.پی لاین ۱.۳ به ترتیب بعد از هار کمترین خطای نسبی را دارند.

با در نظر گرفتن عوامل سرعت انجام شبیه سازی، دقت مدل افزایش مقیاس یافته، از میان توابع ویولت به کار رفته در این پایان نامه، تابع ویولت ۱.۳ به عنوان تابع ویولت بهینه گزینش شد که به کمک آن می‌توان مدلی از مخزن شبیه‌سازی کرد که نه تنها به مدل ریزدانه اولیه شباهت زیادی دارد بلکه توأمأ زمان صرف شده برای انجام محاسبات نیز پایین می‌باشد.

جدول ۴-۵ مقایسه‌ی میانگین میزان خطای نسبی برای پارامتر سرعت تولید نفت

نوع ویولت	bior 1.3	bior 5.5	Coif 1	Db4	Haar
سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۷ برای هر مرحله افزایش مقیاس	۵/۲۹	۱۰/۰۵	۷/۷۷	۴/۲۵	۳/۵۴
سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ برای مراحل ۱ تا ۳ افزایش مقیاس	۵/۹۷	۸/۳۹	۷/۷۷	۳/۰۶	۲/۰۷

جدول ۵-۵ مقایسه‌ی میانگین میزان خطای نسبی برای پارامتر تولید تجمعی نفت

نوع ویولت	bior 1.3	bior 5.5	Coif 1	Db4	haar
سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۷ برای هر مرحله افزایش مقیاس	۳/۶۸	۸/۶۰	۳/۹۲	۱/۶۹	۱/۴۷
سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ برای مراحل ۱ تا ۳ افزایش مقیاس	۱/۹۸	۸/۵۴	۴/۴۹	۱/۱۶	۰/۷۳

جدول ۵-۶ مقایسه‌ی میانگین میزان خطای نسبی برای پارامتر فشار متوسط مخزن

نوع ویولت	bior 1.3	bior 5.5	Coif 1	Db4	haar
سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۷ برای هر مرحله افزایش مقیاس	۰/۱۵	۰/۳۷	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۲
سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ برای مراحل ۱ تا ۳ افزایش مقیاس	۰/۰۸	۰/۳۸	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۱

ذکر این نکته ضروری است که برای افزایش مقیاس مدل‌های ریزدانه‌ی مخازن با هتروژنیته‌های متفاوت، توابع ویولت بهینه جهت افزایش مقیاس متفاوت می‌باشد.

## فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۶ نتیجه گیری

۲-۶ پیشنهادات

## ۶-۱ نتیجه گیری

۱. افزایش مقیاس مدل‌های ریزدانه‌ی زمین شناسی به کمک تابع ویولت، با حفظ ساختار شبکه و حفظ اندازه بلوک‌ها در مکان‌های با اهمیت، زمان شبیه سازی را با حفظ دقت کاهش می‌دهد.
۲. تبدیل ویولت می‌تواند به عنوان ابزاری جهت کاهش هوشمندانه‌ی تعداد بلوک‌های شبکه و در نتیجه افزایش سرعت شبیه سازی به کار رود. تبدیل ویولت قادر به شناسایی مکان‌ها با تراوایی بالا و همچنین مکان‌ها با ناهمگنی بالا در هر دامنه می‌باشد.
۳. میزان افزایش سرعت در انجام محاسبات مدل‌های افزایش مقیاس یافته، به تعداد بلوک‌های شبکه، میزان هتروژنیتهی مخزن، نوع ویولت مورد استفاده و میزان مقادیر ضرایب آستانه و تعداد دفعات افزایش مقیاس بستگی دارد. در این پایان نامه اثر نوع تابع ویولت، میزان مقادیر آستانه و تعداد دفعات افزایش مقیاس بررسی شده است.
۴. توابع ویولت متفاوت به دلیل داشتن فیلترهای متفاوت با طول‌های متفاوت، بر سرعت و دقت انجام محاسبات شبیه سازی تأثیر متفاوت دارند.
۵. علاوه بر نوع تابع ویولت، میزان مقادیر ضرایب آستانه در دقت و سرعت انجام محاسبات مؤثرند. در این پایان نامه سه مرحله افزایش مقیاس با ضرایب آستانه‌ی  $0/8$ ،  $0/7$  و  $0/6$  بهترین نتایج را به همراه داشته است.
۶. تابع ویولت بایور اس.پی لاین ۱.۳ به عنوان تابع ویولت بهینه گزینش شد. مدل مخزنی افزایش مقیاس یافته به کمک این تابع از نظر دقت و سرعت شبیه‌سازی نسبت به سایر مدل‌ها

برتری دارد. مراحل طی شده در این پایان نامه برای مخازن با ابعاد بزرگتر و هتروژنیتهی متفاوت قابل اجرا می باشد.

## ۶-۲- پیشنهادات

۱. در این پایان نامه از توابع ویولت هار، دابشیز چهار، کوايفلت یک، بایور اس.پی لاین ۱.۳ و بایور اس.پی لاین ۵.۵ برای افزایش مقیاس مدل های ریزدانه و شناسایی مکان های با اهمیت استفاده شده است. می توان عملکرد توابع دیگر ویولت را نیز مورد بررسی قرار داد.
۲. در این پایان نامه پارامترهای تخلخل و تراوایی مبنای افزایش مقیاس قرار گرفته اند. از آنجا که مدل سازی پارامتر اشباع نیز مهم است و همین عملیات را می توان برای افزایش مقیاس اشباع نیز انجام داد می توان پارامتر اشباع را ملاک ایجاد شبکه ی غیر یکنواخت قرار داد.
۳. می توان از مخازن با هتروژنیتهی بیشتر و متفاوت و همچنین از مخازن با ابعاد بزرگتری استفاده و اثر ویولت بر آن ها بررسی شود.
۴. مدل به کار رفته در این پایان نامه مربوط به مخازن تک فازی می باشد. فرآیند طی شده در این پایان نامه را می توان برای مخازن چند فازی، با دارا بودن چندین ناحیه ی تعادلی به کار برد. در مخازن چند فازی سه نیروی مهم گراویتی، ویسکوزیته و فشار مؤئینه جزء نیروهای حاکم بر جریان سیال می باشد که در صورت غالب بودن هر یک از نیروها مدل های متفاوت مخزنی ایجاد می شود. با داشتن چندین ناحیه ی تعادلی، عملیات افزایش مقیاس برای هر ناحیه به طور جداگانه انجام می شود.

۵. فرآیند طی شده در این پایان نامه را می توان برای مخازنی که دارای بلوک‌هایی با شکل‌های غیر هندسی و نامنظم و همچنین دارای بلوک‌هایی با اختلاف ارتفاع زیاد از بلوک‌های همسایه و شیب زیاد می‌باشند به کار برد.
۶. اطراف چاه‌ها اگر به صورت استوانه‌ای ریز باقی بمانند نتایج بهتری حاصل می‌شود.
۷. در هر مرحله از افزایش مقیاس می توان از تابع ویولت متفاوتی استفاده کرد.
۸. برای افزایش مقیاس در هر بعد می توان از تابع ویولت متفاوتی استفاده کرد.
۹. برای شبیه‌سازی مخازن شکافدار توسط شبیه ساز اکلپس، میتوان مخزن را به صورت تخلخل دوگانه و یا تراوایی دوگانه شبیه‌سازی کرد و با مدل افزایش مقیاس یافته توسط ویولت مقایسه کرد و میزان اعتبار هر یک را بررسی کرد.

- [1] Chen Y. and Durlofsky L.J. (2008) “ Ensemble-Level Upscaling for Efficient Estimation of Fine-Scale Production Statistics” SPE 13 , pp.400-411.
- [2] Guanran H. Chen Y.M.Z. (2006) “ Computational methods for multiphase flows in porous media” society for industrial and applied mathematics, Texas , pp. 192-215.
- [3] Wen X.H. and Gomez-Hernandez J.J.(1996) “Selective upscaling of hydraulic conductivities” Geostatistics Wollongong, 2, pp.1112-1123.
- [4] Renard P. and Marsily G. (1997) “Calculating equivalent permeability: a review” Adv.Water Resour, 20, pp.253-278.
- [5] Gholami V. and Mohaghegh S.D. (2009) “ Intelligent upscaling of static and dynamic reservoir properties”, SPE, West Virginia University.
- [6] Durlofsky L.J. (2003) “ Upscaling of Geocellular models for reservoir flow simulation: A Review of Recent Progress” 7 th International Forum on Reservoir Simulation B . uhl/ Baden- Baden, Germany.
- [7] Begg S.H. and Carter R.(1989)“Assigning effective values to simulator gridblock parameters of heterogeneous reservoirs” SPE, pp. 455-464.
- [8] White C.D. and Horn R.N.(1987) “ Computing absolute transmissibility in the presence of fine-scale heterogeneity”, SPE Symposium on Reservoir Simulation, 1San Antonio, Texas.
- [9] Gomez-Hernandez and Journel, (1991), PhD thesis ,“ A stochastic approach to the simulation of block conductivity fields conditioned upon data measured at a smaller scale”,standford university .
- [10] Warren J. E. and Price H.S. (1961) “ flow in heterogeneous porous media” SPE .
- [11] Gomez-Hernandez J.(1990)“ Simulation of block permeability conditioned upon data measured at a different scale Calibration and reliability in groundwater modeling” IAHS, 195, pp.407-416.
- [12] Holden L. and Lia O.(1992) “A tensor estimator for the homogenization of absolute permeability” Transport in porous media, 8, pp.37-46.
- [13] King M.J. (1995) “ Effective properties for flow calculations Trans. Porous Media” 20,pp.169-196.

- [14] MacCarthy J.F.(1995) “Comparison of fast algorithms for estimating large-scale permeabilities of heterogeneous media” *Trans. Porous Media*, 19, 2, pp.123-127.
- [15] Muskat M. (1973 ) “Flow of homogeneous fluid through porous media” ,McGraw-Hill Book Co,New York City.
- [16] Matheron G.(1967) “Elements pour une theorie des milieu poreux”, Masson et Cie, Paris.
- [17] Durlafsky . L.J. (1992) “ Representation of grid block permeability in coarse scale models of randomly heterogeneous porous media” *Water Resour Res*, 28,pp. 1791-1800.
- [18] Grind H., (1990), Master thesis ,“An evaluation of homogenization techniques for estimating effective absolute permeability by use of a stochastic reservoir description simulator”, Norwegian Institute of Technology.
- [19] Deutsch C. (1989)“ Calculating effective absolute permeability in sandston shale sequences” *SPE* ,4, pp.343-348.
- [20] Cardwell W.T. and Parsons R.L. (1945) “Average permeabilities of heterogeneous oil sands, *Transactions American Institute of Mining and Metallurgical*.
- [21] Dagan G .(1995) “ flow and transport in porous formation”, Springer-Verlag, New York .
- [22] Kassap E. and Lake L.W. (1990) “Calculating the effective permeability tensor of a gridblock” *SPE Formation Evaluation*, 5,pp.192-200.
- [23] Ding Y. (1995)“ Scaling up in the vicinity of well in heterogeneous field” ,*SPE Reservoir Simulation Symposium*, San Antonio, Texas
- [24] Christie M.A., Wallstom T.C., Durlafsky L.J., Sharp D.H. and Zou Q. (2000) “Effective medium boundary conditions in upscaling” ,*proceeding of 7th Euro. Conf. on math. oil Rec*, Italy.
- [25] Ding Y. (2003) “Permeability upscaling on corner-point geometry in near-well”, *Middle East Oil Show*, Bahrain.
- [26] Ding Y. (2004)“ Upscaling on distorted gridblock for simulation of advanced wells” *J.Pet.Sci.and Eng*,43, pp. 87-97.
- [27] barker J.W.and thibeau. (1996) “A Critical review on the use of pseudorelative permeabilities for upscaling” *SPE* ,12,pp.138-143.
- [28] Muggerridge A.(1991) “Generation of effective relative permeabilities from detailed simulation of flow in heterogeneous porous media” *reservoir Characterization II*, Academic press, 197-225.



- [29] Durlofsky L.J. (1997) "Use of higher moment for the description of upscaled, process independent relative permeabilities" SPE 37989.
- [30] Das D.B. and Hasanizadeh S.M. (2005) "Multi-Stage Upscaling: Selection of Suitable Methods up scaling" , *Multiphase Flow in Porous Media*, Springer, pp 192-220.
- [31] Huang Y., Ringrose P.S. and Sorbie K.S. (1995) "Capillary trapping mechanisms in water-wet laminated rocks" *SPE reservoir Eng.* 10(4), pp.287-292.
- [32] Ringrose P.S., Sorbie K.S., Corbett P.W.M. and Jensen J.L. (1993) "Immiscible flow behavior in laminated and cross-bedded sandstones" *J.Pet. Sci.Eng.*9,pp.103-124.
- [33] Pickup G. and Stephen K.D. (2000) "As assessment of steady-state scale-up for small-scale geological models, *petroleum Geosci.*6, pp.203-210.
- [34] Corbett P.W.M., Ringrose P.S., Jensen J.L. and Sorbie K.S. (1992)"Laminated clastic reservoirs the interplay of capillary pressure and sedimentary architecture", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, D.C.*
- [35] Ringrose P.S., Pickup G.E., Jensen J.L. and Forrester M.M. (1999) "The ardress reservoir gridblock analog: sedimentology, statistical representivity, and flow upscaling" *Reservoir Characterization- Recent Advances, AAPG memoir 71*, pp.265-276.
- [36] Jones A., Doyle J., Jacobsen T. and Kjonsvik D. (1993) "Which sub-seismic heterogeneities influence waterflood performance? Acase study of a low net- to-gross fluvial reservoir", presented at the 7th European IOR Symposium, Mascow, Russia
- [37] Kjonsvik D., Doyle J., Jacoobsen T. and Jones A. (1994) "The effecs of sedimentary heterogeneities on production from a shallow marine reservoir- what really matters?" ,*SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana.*
- [38] Kumar A. and Jerauld G.R. (1996) "Impact of Scale-up on fluid flow, from plug to gridblock scale in reservoir rock" *SPE 35452*,pp.21-24.
- [39] Christie M.A. and Blunt M.J. (2001) "Thenth SPE Comparative Solution Project: A Camparison of upscaling techniques", *Imperial college, texas.*
- [40] Kyte J.R. and Berry D.W. (1975)"New pseudo functions to control numerical dispersion" *SPE J*,pp.269-275.

- [41] Durlofsky L.J., Jones R.C. and Milliken W.J. (1997)“A non-uniform coarsening approach for the scale up of displacement processes in heterogeneous porous media”*Adv.water resour*,20, pp.335-347.
- [42] Pickup G.E. and Hern C.Y. (2002) “The development of appropriate upscaling procedures ” *Transport porous Media*, 46, pp.119-136.
- [43] Artus V., Noetinger B.and Ricard L. (2004)“Dyanamic of the water-oil front for two-phase immiscible flows in heteogeneous porous media”*Transport porous media* ,56, pp.283-303.
- [44] Noetinger B., Artus V. and Ricard L. (2004) “Dynamics of the water-oil front for two-phase immiscible flow in heterogeneous porous media” *Transport porous media*,56,pp.305-328.
- [45] Zhang D. and Tchelepi H. (1999)“Stochastic analysis of immiscible two-phase flow in heterogeneous media”*SPE J*,4,pp.380-388.
- [46] Ekrann S. and Aasen J.o. (2000) “Steady-state upscaling”, *Transport in Porous Media* 41, pp.245-262.
- [47] Christie M. and Blunt M.J. (2001) “Tenth SPE comparative solution project: a comparision of upsacling techniques”, *SPE Reservoir simulation symposium held in houston,Texas*.
- [48] Lantz R.B. (1971) “Quantitative evaluation of numerical diffusion (truncation error)” *SPE*, pp. 315-320.
- [49] Haajizade M. Fayer F. and Cockin A.P. (2000) “Effects of phase behavior, dispersion and gridding on sweep patterns for nearly miscible gas displacement”, *SPE annual technical conference, Dallas TX*
- [51] Hewett T.A. and Behrens R.A. (1991) “Scaling laws in reservoir simulation and their use in a hybrid finit difference/streamtube approach to simulation the effects of permeability heterogeneity” *Academic press, San Diego, California*, pp. 402-441.
- [52] Huang Y., Ringrose P.S., Sorbie K. S.(1995) “Capillary trapageing mechanisms in water wet laminated rock” *SPE*, pp.287-292
- [53] Dale M., Ekrann S., Mykkeltveit J. and Virnovsky G. (1997)“Effective relative permeabilities and capillary pressure for one-dimensional heterogeneous porous media”*Transport porous media*,26, pp. 229-260.
- [54] Grafarend, P., Grossmann A., Morlet J. (1984-1985) “Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis” *Geoexploration* 23, Elsevier Science Publ., PP.85-102.
- [55] Haar A.(1910) “Zur theorie der orthogonalen funktionensystem” *Mat. Ann*, 63, pp.331-371.

- [56] Guan L., Y. Du., Li L. (2004) "Wavelets in Petroleum Industry: Past, Present and Future" SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas.
- [57] Daubechies I. (1988) "Orthonormal bases of compactly supported wavelets" communications of pure applied mathematics, XLI, pp.910-996.
- [58] Pengbo L.U. (2001) "Reservoir parameter estimation using wavelet analysis" page.23-70.
- [59] Sweldens W. and Peter S. (1996) "Building your own wavelet at home" pp.23-27.
- [60] William P., Saul T., William V. and Brian F. (2002) "Numerical Recipes C. The art of scientific computing" page. 591-606.
- [61] Mallat S. (1989) "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation" IEEE Transaction: Pattern Analysis and Machine Intelligence, 31, pp. 697-693.
- [62] Jansen F.E. and Kelkar M. (1998) "Upscaling of Reservoir Properties Using Wavelets", SPE India Oil and Gas Conference, New Delhi, India.
- [63] Lifu C., Schatzinger R.A. and Tham M.K. (1998) "Application of wavelet Analysis to upscaling of Rock Properties" SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1, pp.75-81.
- [64] Sahimi M. (2000) "Fractal-wavelet neural-network approach to characterization and upscaling of fractured reservoirs" Department of Chemical Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-1211, USA.
- [65] Sahimi M., Rasaei M.R., Ebrahimi.F. and Haghghi M. (2005) "Upscaling of unstable Displacements and Multiphase Flow Using Multiresolution wavelet Transformation", SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas.
- [66] Sahimi M. and Rasaei M.R. (2007) "Upscaling of the permeability by multiscale wavelet transformations and simulation of multiphase flows in heterogeneous porous media", Springer. 13,2, pp.187-214.
- [67] Sahimi M. and Rasaei M.R. (2008) "Upscaling and simulation of waterflooding in heterogeneous reservoirs using wavelet transformations: application to the SPE-10 model. Transp. Porous Media 72, 311.
- [68] Pancaldi V., Christensen K. and Peter R.K. (2005) Permeability up scaling using Haar wavelet, Transp Porous Med, 67, pp. 395-412.
- [69] Pancaldi V., Peter R.K. and Christensen K. (2008) "Wavelet based-upscaling of advection equations" Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 387, pp. 4760-4770.

[70] Babaei M. and Peter. R.K. (2010) “Upscaling reservoir simulation using multilevel operator coarsening ”, Internatinal conference on water resources,Imperial College London, Barcelona .

[71] Babaei M. and Peter R. K.. (2011) “A Comparison Between Wavelet and Renormalization Upscaling Methods and Iterative Upscaling-Downscaling Scheme”, SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas, USA

[72] Eclipse Software, User Manual, pp23.

[73] <http://www.hpklclasses.ir/Courses/cpage/cpage1100.html>

[74] Durlosky L.J., Jones R.C. and Milliken W.J. (1994a) “A new method for the scale up of displacement processes in heterogeneous reservoirs” Proc. Of 4th Euro. Conf. Math. Oil Rec.

[75] Durlofsky L.K.(1994b) “Accuracy of mixed and control volume finit element approximations to Darcy velocity and related quantities” water Resour Res, 30, 4.

[76] Durlofsky L.J., Milliken W.J., Dehghani k. and Jones R. C. (1994b) “Application of a new scale up methodology to the simulation of displacement processes in heterogeneous reservoirs”,International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico, 10-13, Veracruz, Mexico

[77] Matlab Implementation of Wavelet Transforms,([http://www. Wavelet Software at Brooklyn Poly.htm](http://www.WaveletSoftwareatBrooklynPoly.htm))

## **Abstract**

In this study, wavelet analysis has been used for up scaling of a 3D hypothetical fine grid reservoir model. To generate the initial model, some set of fractures have been added numerically to a relatively homogenous simulated matrix. The permeability and porosity of reservoir are the most important factors controlling the distribution and movement of fluid inside of reservoir. Therefore, these parameters have been chosen for up scaling of reservoir model grids. The property of multiresolution of wavelet functions was the basis of upscaling the initial fine grid model in a non-uniform way, which means upscaling takes place intelligently to keep the maximum of the initial model details. The synthesised 3D initial model has been imported to eclips software to generate a dynamic model of the reservoir behaviour. This model was upscaled by using several wavelet functions. A comparison among them has led to select the best mother-wavelet function. This research shows the close result of dynamic parameters drawn from the upscaled model and the fine initial model. In addition, the consumed time to simulate the dynamic behavior of upscaled models has been improved considerably.

Key word: Simulation, Fractured reservoirs, Up Scaling, Wavelet



**Shahrood University of Technology**

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

## 3D Up-Scaling of Fractured Reservoir: Using Wavelet Approach

Razieh Vahedi

Supervisors:

Dr. Behzad Tokhmechi

Dr. Mohammad Koneshloo

September 2011