

## مروری بر انواع شبکه‌های محاسباتی جهت شبیه‌سازی عددی جریان اطراف چاه در مخازن هیدروکربنی

نیلوفر سلمانی<sup>۱</sup>، روح‌اله فاتحی<sup>۱</sup>، رضا آذین<sup>۲</sup>، دانشگاه خلیج فارس

### چکیده

جهت شبیه‌سازی عددی جریان اطراف چاه در مخازن هیدروکربنی معمولاً از یک مدل چاه استفاده می‌شود. در بعضی حالت‌ها مانند مخازن گاز-میعانی یا پدیده‌ی مخروطی شدن آب، مدل چاه برای شبکه‌ی نسبتاً درشت دقت کافی ندارد. از این‌رو تخمینی صحیح از نتایج حاصل از مدل چاه رایج نیازمند استفاده از شبکه‌ای ریز است. از طرفی استفاده از شبکه‌ی بسیار ریز یکنواخت نیاز به زمان اجرای بیشتری دارد. در مقابل، مدل شعاعی با ایجاد یک شبکه‌بندی با توزیع شعاع لگاریتمی، نتایجی حاصل از شبیه‌سازی جریان اطراف چاه را با کیفیت بهتر و زمان محاسباتی کمتر فراهم می‌کند. جهت بهبود نتایج و حل مشکل، روش‌هایی تلفیقی مثل ریز کردن موضعی و روش پنجره‌ای توسط محققان معرفی شده است. در این مقاله ابتدا انواع روش‌های شبکه‌بندی مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان اطراف چاه مرور شده و در انتها نیز یک مسأله‌ی عددی نمونه برای مقایسه‌ی روش‌های گفته شده حل گردیده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۱۲/۱۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۲/۰۸

### واژگان کلیدی:

جریان اطراف چاه، شبیه‌سازی مخزن، شبکه‌بندی، مدل چاه

### مقدمه

که با استفاده از شبکه‌های انعطاف‌پذیر بیان شد برای انواع هندسه‌های چاه‌های افقی، عمودی و مایل کاربرد دارد. مدل‌های رایج چاه تنها مقدار شاخص بهره‌دهی را برای بلوک چاه پیشنهاد می‌کنند. بنابراین مدل‌های مذکور برای مدل‌سازی چاه‌ها در شرایط پیچیده مناسب نیستند. در روش پیشنهادی دینگ علاوه بر محاسبه‌ی عددی شاخص بهره‌دهی، یک مقدار معادل عددی برای انتقال‌پذیری بین سلول چاه و سلول‌های همسایه ارائه شد که دقت و صحت نتایج افزایش یافت.

با وجود اصلاحیه‌هایی که روی مدل رایج پیسمن برای انواع حالت‌های چاه ارائه شد همچنان در مواردی مانند جریان اطراف چاه در مخازن گاز-میعانی یا پدیده‌ی مخروطی شدن<sup>۱</sup>، به دلیل تغییرات شدید اشباع در ناحیه‌ی اطراف چاه، این مدل ناکارآمد است. روش ریز کردن شبکه توسط وان روزنبرگ<sup>۲</sup>، هاینمن<sup>۳</sup> و همکاران و کناندال<sup>۴</sup> و بست<sup>۵</sup> برای بهبود وضوح پدیده‌های ناحیه‌ی اطراف چاه معرفی شد. انواع روش‌های ریز کردن شبکه که تا کنون معرفی شده شامل ریز کردن وصله‌ای<sup>۱</sup>، ریز کردن واقعی<sup>۲</sup> و روش‌های چند شبکه‌ای<sup>۳</sup> است [۱].

در این مقاله انواع روش‌های شبکه‌بندی و همچنین روش‌های ریز کردن شبکه بررسی می‌شود. یک مشکل رایج در شبیه‌سازی مسائل پیچیده‌ی جریان سیال اینست که هر هندسه‌ای نمی‌تواند به‌خوبی به‌صورت مستقل استفاده شود؛ خواه سیستم شبکه‌بندی با سازمان<sup>۴</sup> باشد یا بی‌سازمان<sup>۵</sup>. از این‌رو یکی از این روش‌ها برای حل مشکل رفتار سیال در اطراف چاه، استفاده از دو نوع شبکه‌ی شعاعی و دکارتی در کنار هم است [۵]. در ادامه روش‌های ریز کردن شبکه‌ی دکارتی، بدون تغییر در نوع بلوک‌های مورد استفاده و پس از آن روش‌های شبکه‌ی تلفیقی که در آنها بیش از یک نوع بلوک به کار می‌رود معرفی می‌شوند. در پایان

عملیات مهندسی مخزن نشان داده که در بیشتر موارد نتایج شبیه‌سازی مخازن با شبکه‌بندی مختصات دکارتی مورد قبول است. اما در بعضی موارد این نوع شبکه‌بندی با مشکلاتی مواجه است که از انعطاف‌ناپذیری شبکه در مختصات دکارتی در نواحی خاصی از مخزن نشأت می‌گیرد و بیشتر مرتبط به چاه‌ها و ناهمگونی‌هاست. مسأله‌ی جریان اطراف چاه در مخزن یکی از مثال‌ها و مسائلی است که در عمل، شامل مقیاس‌های مختلفی است. در این حالت مشاهده می‌شود که با وجود اینکه چاه در قیاس با مخزن بسیار کوچک است اما تغییرات فشار در اطراف چاه زیاد است. این در حالی است که تغییرات فشار در فاصله‌ی یک متری از چاه ممکن است برابر با تغییرات فشار در بقیه‌ی مخزن باشد. در مخازن گاز-میعانی، به‌علت ایجاد و تجمع میعانانات بعد از افت فشار مخزن به زیر فشار شبنم، مسأله‌ی جریان اطراف چاه مهم‌تر است. از این‌رو صرفه‌ی اقتصادی در حفظ بلوک‌های مختصات دکارتی تا حد امکان و تغییر شبکه فقط در نواحی خاصی از مخزن است [۱].

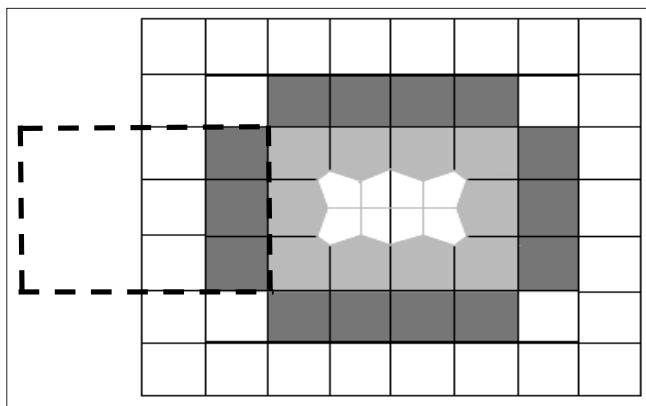
پیسمن<sup>۴</sup> [۲] با استفاده از توزیع فشار حالت پایا در حالتی که تراکم‌پذیری سنگ و سیال مقدار ثابتی باشد، مفهوم شعاع معادل بلوک را معرفی کرد. بر اساس این مفهوم، محاسبات فشار جریانی بلوک چاه برای هندسه‌های مختلف با ابعاد یکسان (مربعی) یا ابعاد غیریکسان (مستطیلی) [۳]، با در نظر گرفتن شعاع معادل برای توزیع فشار انجام شد. این روش اغلب به دلیل الزاماتی نظیر شبکه‌ی دکارتی و محدود شدن روش برای حالت‌های مربعی یا مستطیلی مورد بحث است [۴]. همچنین نتایج حاصل از این مدل چاه برای نواحی اطراف چاه با نرخ تغییرات شدید اشباع سیالات نامعتبر است [۵]. دینگ<sup>۵</sup> [۶] با ارائه‌ی یک مدل چاه عددی، اصلاحی روی مدل رایج چاه پیسمن انجام داد. این روش

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (niloofarsalmani@mehr.pgu.ac)

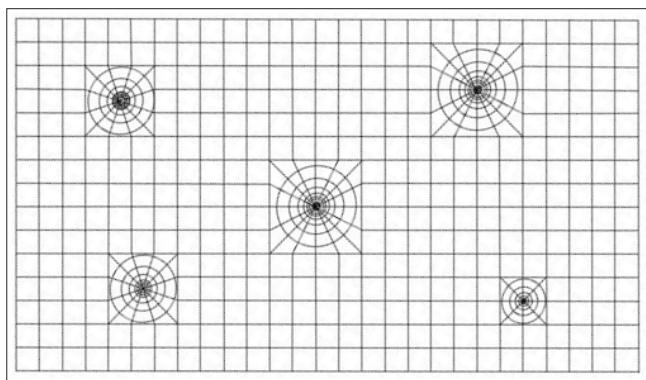
مدل جریانی دارسی دوفازی ایجاد شده در نزدیکی دیواره‌ی چاه از الگوریتم جداسازی دامنه<sup>۲۴</sup> استفاده کردند. این الگوریتم بر اساس روش بهینه‌سازی شوارتز<sup>۲۵</sup> عمل می‌کند. از مزایای اصلی این روش گسسته‌سازی تمام‌ضمنی برای مدل‌های جریانی چندفازی و بهینه‌سازی ساده‌ی شرایط سطح داخلی بر اساس معادله‌ی جریانی تک‌فاز است.

## ۲- شبکه‌بندی‌های تلفیقی

شبکه‌ی محلی نامنظم اولین بار توسط پدروسا<sup>۲۶</sup> و عزیز<sup>۲۷</sup> [۵] تحت عنوان شبکه‌ی تلفیقی<sup>۲۸</sup> در سیستم شبکه‌ی دکارتی معرفی شد. این روش جهت غلبه بر ناکارآمدی‌های روش پیسمن بیان شد. این نوع شبکه‌بندی، خاصیت ذاتی جریان شعاعی پیرامون چاه را مدل‌سازی می‌کند و به دلیل نرخ‌های تولیدی زیاد اندازه‌ی کوچک بلوک‌ها به مدل‌سازی تغییرات شدید اشباع سیالات کمک می‌کند. آنها یک شبکه‌ی استوانه‌ای برای ناحیه‌ی اطراف چاه و یک شبکه در مختصات دکارتی برای بقیه‌ی نواحی مخزن در نظر گرفتند. حل این دو قسمت در شبکه به صورت جداگانه انجام شد. آنها همچنین روش مذکور را برای



شکل ۱ | بلوک‌های شبکه‌ی اصلی پیرامون پنجره (خاکستری تیره) / خارجی‌ترین بلوک‌های پنجره (خاکستری روشن). شبکه‌ی پنجره یک ریزکردن ۲×۲ را در مرکز خود نشان می‌دهد



شکل ۲ | یک مدل شبکه‌ی تلفیقی

نیز روش‌های معرفی شده در یک مسأله‌ی نمونه استفاده شده و نتایج آنها مقایسه می‌گردد.

## ۱- ریزکردن شبکه‌ی دکارتی

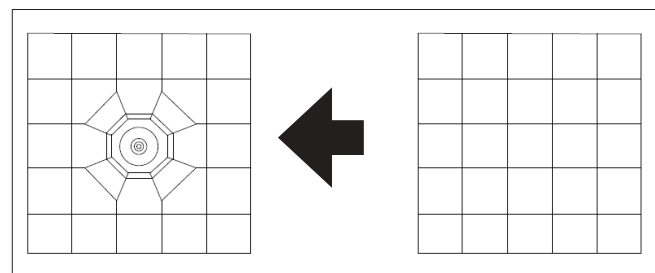
از روش‌های اولیه‌ای که برای بهبود کیفیت نتایج پیشنهاد شد ریزکردن شبکه‌ی دکارتی مورد استفاده در شبیه‌سازی بود. بدین ترتیب که تمام شبکه‌ی دکارتی اولیه به صورت یکپارچه ریز می‌شود. مشکل این روش هزینه‌ی زیاد محاسباتی و در نتیجه افزایش زمان اجرای برنامه است. در واقع ریزکردن تمامی شبکه نیاز نیست. بلکه تنها نواحی خاصی (از جمله اطراف چاه) نیاز به ریزکردن شبکه دارند.

شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی‌ها معمولاً با استفاده از شبکه‌بندی استاتیکی انجام می‌شود. دیماخر<sup>۱۶</sup> و همکارانش [۱] قابلیت شبیه‌سازی دینامیک را مطرح کردند. آنها از مفهوم پنجره<sup>۱۷</sup> برای معرفی مدل خود استفاده کردند. هندسه‌ی هر کدام از زیردامنه<sup>۱۸</sup>‌های محلی (که پنجره نامیده می‌شوند) می‌تواند منظم<sup>۱۹</sup> یا نامنظم<sup>۲۰</sup> باشد [۱]. در این روش برای هر نوع چاه از یک طرح شبکه‌بندی مناسب استفاده می‌شود. چنین روشی استفاده از مدل رایج چاه پیسمن را غیر ضروری می‌کند [۷]. شکل ۱- نحوه‌ی شبکه‌بندی با این روش را نشان می‌دهد.

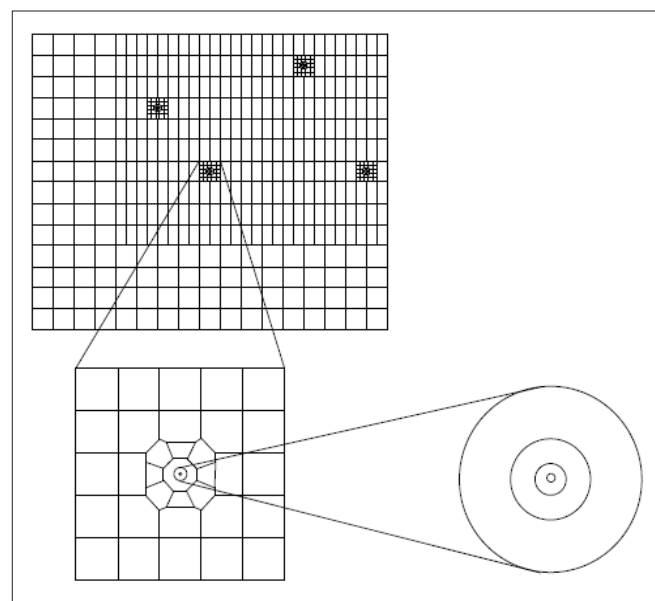
در این روش، همسایه‌هایی که ارتباطی با شبکه‌ی پنجره ندارند استفاده نمی‌شوند. همچنین برای داخل و خارج از شبکه از یک سیستم با گام‌های زمانی مختلف استفاده می‌شود [۱]. به دلیل ریز بودن بلوک‌های اطراف چاه، پایداری حل نیازمند انتخاب گام زمانی کوتاه و تعداد سعی و خطاهای بیشتری است. چون امکان حل هم‌زمان معادلات ناحیه‌ی پنجره‌ی چاه و کل مدل مخزن وجود ندارد در مرحله‌ی اول، یک حل تمام‌ضمنی برای کل مخزن انجام می‌شود. بلوک‌های داخلی پنجره تنها برای فشار و بدون به‌روزرسانی اشباع سیالات و درصد اجزاء مولی حل می‌شوند. این مرحله از روند حل، مقادیر ورودی برای مرز پنجره را فراهم می‌کند. در مرحله‌ی دوم، محاسبات پنجره‌ها برای یک گام زمانی مقیاس اصلی (مثلاً معادل هزار مرحله‌ی محلی مقیاس کوچک) انجام می‌شود. روش پیشنهادی مذکور مزایای اعمال شبکه‌های محلی و انعطاف‌پذیری شبکه‌های نامنظم با امکان تغییر در زمان را ارائه می‌دهد. جدیدترین کارهای انجام شده با استفاده از دو نوع شبکه‌بندی در مقیاس مکان و گام زمانی متفاوت در شبکه‌ی دکارتی توسط خریجی<sup>۲۱</sup> و همکاران [۸] انجام شده است. با توجه به اینکه با کوچک شدن سلول‌های اطراف چاه و افزایش سرعت در این ناحیه، نیاز به کاهش گام‌های زمانی است، آنها شبیه‌سازی یک مخزن گاز-میعانی را با استفاده از مدل ریزکردن محلی شبکه<sup>۲۲</sup> یا به اختصار LGR و گام زمان محلی<sup>۲۳</sup> انجام داده و آنرا با روش‌های دیگر مقایسه کردند. LGR مورد استفاده تلفیقی از شبکه‌ی شعاعی در اطراف چاه و شبکه‌ی دکارتی در سایر نقاط است که در بخش بعد معرفی خواهد شد. آنها برای حل

مدل‌سازی چاه‌های افقی نیز استفاده کردند [۱۹]. شکل ۲- یک نمونه از شبکه در این روش را نشان می‌دهد. البته قابل ذکر است که این روش نیز محدودیت‌هایی به شرح زیر دارد:

- شبکه در ناحیه‌ی انتقالی بین شبکه‌های استوانه‌ای و دکارتی متعامد نیست
- استفاده از شبکه‌ی استوانه‌ای تنها در داخل فضاها‌ی مربعی امکان‌پذیر است
- نواحی با شبکه‌های متفاوت نمی‌توانند هم‌زمان با هم حل شوند. به عبارت دیگر معادلات آنها به صورت جداگانه حل می‌شوند.
- در همین راستا ملاجنیک<sup>۲۹</sup> و هایمن [۷] کلیات و کاربرد عملی روش پنجره‌ای<sup>۳۰</sup> را بیان کردند. در روش پیشنهادی آنها، پنجره‌ها توسط روش شبکه‌بندی PEBI<sup>۳۱</sup> ایجاد شده و به صورت خودکار برای تمامی چاه‌ها تعریف می‌شوند. شبکه‌بندی با روش PEBI در شکل ۳- نشان داده شده است.
- در مطالعه‌ی ملاجنیک و هایمن [۷] نشان داده شده که کیفیت نتایج



شکل ۳ | مدل شبکه‌بندی شعاعی با استفاده از روش PEBI



شکل ۴ | یک شبکه در روش پنجره‌ای الف) مدل مخزن در مقیاس کلی ب) بزرگ‌نمایی شبکه‌ی پنجره ج) بزرگ‌نمایی شبکه‌ی شعاعی

حاصل برای مدل محاسبه شده با شبکه‌بندی شعاعی یکپارچه‌ی اطراف چاه و گام‌های زمانی یکسان، برابر با مدل مورد استفاده با روش پنجره‌سازی با در نظر گرفتن گام زمانی محلی است. به علاوه نشان داده شد که حل مدل با روش پنجره‌سازی، با گام زمانی بزرگ برای مرحله‌ی اول و گام زمانی کوچک برای مرحله‌ی دوم حل، زمان اجرای برنامه برابر (یا کمتر) و تعداد سعی و خطاهای کمتر نسبت به مدل‌های معمول و رایج دارد. شکل ۴- ساختار مطالعه‌ی ملاجنیک و همکارانش را نشان می‌دهد.

امروزه مدل چاه پیسمن هنوز برای شبیه‌سازی مخازن استفاده می‌شود. در حالی که شبکه‌بندی ناحیه‌ی اطراف چاه تنها برای مسائلی با یک چاه و در مثال‌هایی مانند رفتار مخروطی گسترش یافته است. ملاجنیک و همکارانش [۷] ایده‌ی روش پنجره‌ای را گسترش داده و با استفاده از روش پنجره‌ای و گام زمانی محلی در مقیاس میدان برای شبیه‌سازی مخزن روندی را برای مدل‌سازی تمام چاه‌های تولیدی و تزریقی، افقی و عمودی بیان کردند. آنان برای صحت‌سنجی نتایج مدل خود از مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی یک مسأله مخروطی شدن جریان در شبکه‌ی ریز و داده‌های واقعی میدان استفاده کردند.

### ۳- مسأله‌ی عددی نمونه

در این بخش برای روشن شدن اهمیت شبکه‌ی اطراف چاه در شبیه‌سازی مخزن، یک مسأله‌ی نمونه با چند شبکه‌ی متفاوت حل شده و نتایج مقایسه می‌شوند. یکی از مثال‌های مناسب برای مقایسه‌ی عملکرد شبکه‌های مختلف در مهندسی مخزن، شبیه‌سازی جریان اطراف چاه در حالت اشباع (افت فشار ته‌چاهی به زیر فشار نقطه‌ی شبنم) برای مخازن گاز-میعانی است. برای حل این نوع مسائل از دو نوع شبکه‌ی مختلف استفاده می‌شود. یک روش همان LGR (مطرح شده در بخش ۲-) است که شامل شبکه‌ی شعاعی با توزیع شعاع لگاریتمی برای شبیه‌سازی ناحیه‌ی اطراف چاه و شبکه‌ی دکارتی درشتی برای سایر نقاط مخزن است. ترن<sup>۳۲</sup> و همکاران [۱۰] با استفاده از روش ریز کردن محلی برای ساخت شبکه، جریان اطراف چاه در مخازن گاز-میعانی را شبیه‌سازی کردند. همچنین از مفهوم شبه‌فشار تعمیم‌یافته<sup>۳۳</sup> (GPP) برای سیال گاز-میعانی استفاده کردند. این مفهوم برای مدل‌سازی این نوع سیال توسط ویسن<sup>۳۴</sup> و فونگ<sup>۳۵</sup> معرفی شد و در شبیه‌سازی تجاری اکلیپس<sup>۳۶</sup> ۱۰۰ به صورت یک کلیدواژه‌ی اختیاری برای اصلاح و افزایش دقت در مخازن گاز-میعانی موجود است [۱۱ و ۱۲]. خریجی و همکاران [۸] نیز با استفاده از ریز کردن محلی و استفاده از یک نوع شرط مرزی جدید نتایج حاصل از شبیه‌سازی این نوع مخازن را بهبود و تسریع بخشیدند. لازم به ذکر است که اکلیپس<sup>۳۶</sup> ۱۰۰ با استفاده از مدل نفت سیاه اصلاح شده شبیه‌سازی مخازن گاز-میعانی را نیز انجام می‌دهد.

### ۳-۱- فرضیات

مسأله‌ی مورد مطالعه، یک مخزن مکعب مستطیلی با مشخصات کلی بیان شده در جدول ۱- است. این مدل با توجه به نوع انتخاب ویژگی‌های

ریز کردن محلی و روش شبه‌فشار تعمیم یافته نیز استفاده می‌شود. برای ایجاد شبکه‌ی شعاعی در روش ریز کردن محلی، اندازه‌ی سلول‌ها در ناحیه‌ی شعاعی به صورت دستی وارد شده و از حالت خودکار موجود در اکلیپس ۱۰۰ استفاده نشده است. تعداد ۱۵ سلول در ناحیه‌ی ریز شده به صورت لگاریتمی در راستای شعاع استفاده شده است. مشخصات انواع شبکه‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی در جدول ۲- ارائه شده است.

در جدول ۳- ویژگی‌های چاه تولیدی ارائه شده است. در این مسأله فشار ته‌چاهی از ابتدای شبیه‌سازی به زیر فشار نقطه‌ی شبنم افت می‌کند. چاه در مرکز میدان واقع شده و تحت کنترل نرخ تولیدی ثابت گاز است.

سیال آن، نماینده‌ی یک مخزن گاز-میعانی است. یک چاه در مرکز این مخزن قرار گرفته و شبیه‌سازی به صورتی انجام می‌شود که فشار اولیه‌ی مخزن برابر با فشار نقطه‌ی شبنم است و در طول مدت شبیه‌سازی فشار ته‌چاهی به زیر فشار نقطه‌ی شبنم افت می‌کند. بنابراین تشکیل میعان‌ات در محدوده‌ی اطراف چاه مشاهده می‌شود.

جهت بررسی عملکرد و دقت روش، سه حالت شبکه‌بندی در مختصات دکارتی و یک حالت شعاعی با هزار سلول و توزیع شعاع لگاریتمی جهت صحت‌سنجی در نظر گرفته شده است. تعداد سلول‌ها در جهت X و Y یکسان و ابعاد آنها نیز برابر است. همچنین از روش

ویژگی	مقدار	واحد
تعداد چاه	۱	-
مکان چاه	مرکز مخزن	-
شعاع چاه	۵/۰	فوت
حالت کنترلی چاه	نرخ تولیدی گاز	-
نرخ تولیدی گاز	۳۰۵۱/۲	هزار فوت مکعب استاندارد در روز
فشار اولیه‌ی مخزن	۴۳۴۹/۸۶	پام
اندازه‌ی گام زمانی	۱	روز
مدت شبیه‌سازی	۷۲۰	روز

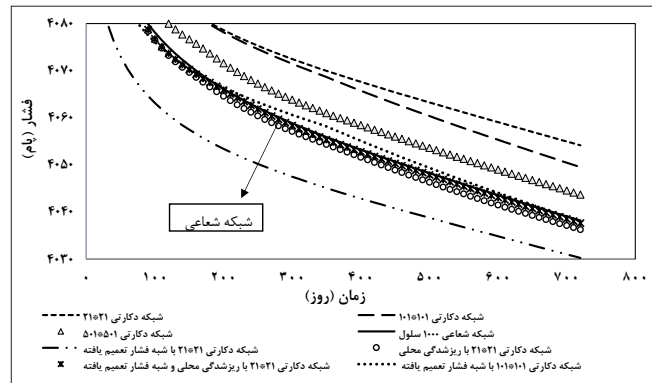
ویژگی	مقدار	واحد
طول مخزن در جهت X	۱۶۴۰۴/۲	فوت
طول مخزن در جهت Y	۱۶۴۰۴/۲	فوت
تخلخل	۲۰٪	-
تراوایی در جهت X	۱۰	میلی‌داریسی
تراوایی در جهت Y	۱۰	میلی‌داریسی
ضخامت مخزن	۳۲/۸۱	فوت
تراکم‌پذیری سنگ	۶/۸X-۷۱۰	یک بر پام
اشباع آب همزاد	صفر	-
اشباع اولیه‌ی فاز مایع	صفر	-
فشار نقطه‌ی شبنم	۴۳۴۹/۸۶	پام

ردیف	شبکه	زمان اجرا (ثانیه)
۱	۲۱×۲۱	۶۵
۲	۱۰۱×۱۰۱	۹۴
۳	۵۰۱×۵۰۱	۱۱۱۱
۴	۲۱×۲۱ با ریزکردن محلی	۸۴
۵	۲۱×۲۱ با شبه‌فشار تعمیم‌یافته	۶۹
۶	۲۱×۲۱ با ریزکردن محلی و شبه‌فشار تعمیم‌یافته	۱۰۲
۷	۱۰۱×۱۰۱ با شبه‌فشار تعمیم‌یافته	۹۴
۸	شعاعی (۱۰۰۰ سلول)	۷۰

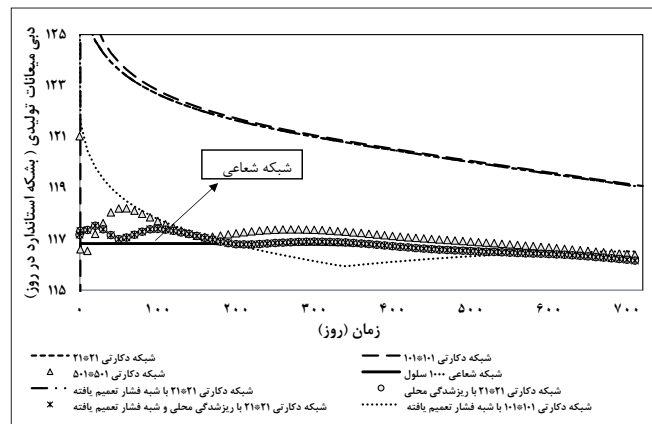
ردیف	شبکه	شبه‌فشار تعمیم‌یافته	ریزکردن محلی
۱	۲۱×۲۱	-	-
۲	۱۰۱×۱۰۱	-	-
۳	۵۰۱×۵۰۱	-	-
۴	۲۱×۲۱	-	*
۵	۲۱×۲۱	*	-
۶	۲۱×۲۱	*	*
۷	۱۰۱×۱۰۱	*	-
۸	شعاعی (۱۰۰۰ سلول)	-	-

۳-۱- بحث و نتایج

شیه‌سازی با استفاده از شیه‌ساز تجاری اکلیپس ۱۰۰ انجام شده است. این شیه‌ساز قابلیت حل دستگاه معادلات جریانی به صورت کاملاً ضمنی را دارد. در جدول ۴- زمان اجرای برنامه‌ها با شبکه‌بندی‌های مختلف ارائه شده است.



شکل ۵ | نمودار فشار ته‌چاهی بر حسب زمان



شکل ۶ | نمودار نرخ میعانات تولیدی بر حسب زمان

از نتایج جدول ۴- مشاهده می‌شود که با ریزتر شدن شبکه در مختصات دکارتی زمان اجرا افزایش می‌یابد. این افزایش زمان مقرون به صرفه نیست. بهترین روش برای شیه‌سازی یک مخزن ساده با یک چاه تولیدی یا تزریقی در مرکز آن، استفاده از شبکه‌ی شعاعی است که در این جدول هم بهترین دقت را با کمترین زمان ارائه کرده است. اما در مسائل پیچیده‌تر شیه‌سازی مخزن با چند چاه تولید و تزریق امکان استفاده از شبکه‌ی شعاعی نیست. این مقایسه‌ی ساده تنها جهت بررسی عملکرد شبکه‌های مختلف نسبت به حالت شعاعی و انتخاب بهترین شبکه در مقایسه با شبکه‌ی شعاعی است. شکل ۵- نمودار بزرگ‌نمایی شده‌ی فشار ته‌چاهی بر حسب زمان را نشان می‌دهد.

علاوه بر فشار ته‌چاهی، نرخ تولید میعانات از دیگر متغیرهای مورد بررسی است. نمودار بزرگ‌نمایی شده‌ی نتایج مربوط به این متغیر در شکل ۶- ارائه شده است.

مشاهده می‌شود که با ریزتر کردن کل شبکه‌ی دکارتی یا ریز کردن محلی، نتایج دقیق‌تر می‌شوند. استفاده از مفهوم شبه‌فشار تعمیم یافته نیز تأثیر چشم‌گیری در بهبود نتایج دارد. اما استفاده از روش ریز کردن محلی به همراه شبه‌فشار تعمیم یافته برای شبکه‌ی درشت و همچنین استفاده از روش ریز کردن محلی نتایج را به پاسخ مرجع نزدیک‌تر می‌کند. دلیل اختلاف بین نمودارها در شکل ۶-، نوع و اندازه‌ی سلول‌های شبکه‌ی مورد استفاده برای هر کدام است. هر مقدار اندازه‌ی سلول‌های شبکه در اطراف چاه بزرگ‌تر باشد، مقدار میعانات تشکیل شده و افت فشار ته‌چاهی کمتر است. بنابراین نرخ میعانات تولیدی بیشتر است. حال با ریزتر کردن اندازه‌ی سلول در اطراف چاه افت فشار تصحیح شده و نرخ میعانات نیز به پاسخ مرجع (شبکه‌ی شعاعی با ۱۰۰۰ سلول) نزدیک می‌شود. در جدول ۵- مقادیر نرم خطای نسبی بین شبکه‌های مختلف با شبکه‌ی شعاعی بعد از گذشت ۷۲۰ روز ارائه شده است. معیار محاسبه‌ی خطا، نتایج مربوط به شبکه‌ی شعاعی هزار سلول است.

جدول ۵ | مقادیر خطای فشار ته‌چاه و نرخ تولید میعانات محاسبه شده بین نتایج شیه‌سازی‌ها نسبت به مدل شعاعی

ردیف	شبکه	مقدار خطا (بر حسب درصد)	
		فشار ته‌چاهی	نرخ تولیدی میعانات
۱	۲۱×۲۱	۱۰/۷	۳/۹
۲	۱۰۱×۱۰۱	۹/۲	۰/۷
۳	۵۰۱×۵۰۱	۴/۱	۰/۴
۴	۲۱×۲۱ با شبه‌فشار تعمیم یافته	۹/۳	۳/۹
۵	۲۱×۲۱ با ریز کردن محلی	۱/۵	۰/۱
۶	۲۱×۲۱ با ریز کردن محلی و شبه‌فشار تعمیم یافته	۰/۵	۰/۱
۷	۱۰۱×۱۰۱ با شبه‌فشار تعمیم یافته	۱/۳	۰/۷



از چندین گام زمانی وجود ندارد و بنابراین هزینه‌ی استفاده از روش ریز کردن محلی با گام زمانی کوچک برای تمامی مخزن، مقرون به صرفه نیست.

با استفاده از شبیه‌سازی عددی یک مسأله‌ی نمونه، تفاوت دقت و سرعت اجرای شبکه‌بندی‌های مختلف ارزیابی شد. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که در حالت اشباع برای مخازن گاز-میعانی وابستگی شدیدی بین نتایج فشار ته‌چاهی اندازه‌ی سلول‌ها وجود دارد. حتی در ریزترین حالت شبکه‌ی دکارتی نیز خطا بین نتایج مشاهده می‌شود. جهت بهبود نتایج شبیه‌سازی استفاده از روش ریز کردن محلی به‌همراه مفهوم شبه‌فشار تعمیم‌یافته در درشت‌ترین شبکه‌ی دکارتی مطرح شده است. زمان اجرای برنامه نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به مطالعات انجام شده در این مقاله و نتایج مربوط به مثال حل شده، بهترین روش برای شبیه‌سازی جریان سیال در اطراف چاه مخازن گاز-میعانی با استفاده از شبیه‌ساز تجاری اکلپس ۱۰۰، استفاده‌ی توأم از شبکه‌ی دکارتی درشت با روش ریز کردن محلی شبکه در سلول چاه و مفهوم شبه‌فشار تعمیم‌یافته است. ■

کمترین خطا بین نتایج شبکه‌ی دکارتی ۲۱×۲۱ با اعمال شبه‌فشار تعمیم‌یافته و ریز کردن محلی به‌دست می‌آید. از آنجا که شبه‌فشار تعمیم‌یافته برای بهبود نتایج مربوط به سیال گاز-میعانی تعریف شده، این نتیجه قابل انتظار بود. همچنین افزایش صحت و دقت نتایج با ریز کردن شبکه مشخص است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع روش‌های شبکه‌بندی مخزن با تأکید بر ناحیه‌ی اطراف چاه بررسی شد. همچنین انواع شبکه‌های ریز شده‌ی محلی بررسی و تفاوت‌ها و تاریخچه‌ی کوتاهی از آنها بیان گردید. با توجه به تغییرات شدید فشاری در ناحیه‌ی اطراف چاه، نیاز به شبکه‌ای ریز است. جهت تسریع در شبیه‌سازی استفاده از هر دو نوع شبکه در مختصات دکارتی و شعاعی پیشنهاد شده است. امروزه در اغلب شبیه‌سازهای تجاری از مدل چاه رایج و در برخی نیز از قابلیت ریز کردن محلی زمانی و مکانی استفاده می‌شود. برای ناحیه‌ی اطراف چاه از شبکه‌ی ریز استفاده شده و برای جلوگیری از ناپایداری در حل، از گام زمانی کوچک استفاده می‌شود. در اکثر شبیه‌سازهای تجاری امکان استفاده

### پانویس‌ها

- |                        |                  |                                 |                                 |
|------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. fatehi@pgu.ac.ir    | 10. Besset       | 19. Regular                     | 28. Hybrid                      |
| 2. reza.azin@pgu.ac.ir | 11. Patch        | 20. Irregular                   | 29. Mlacnik                     |
| 3. Heterogeneity       | 12. True         | 21. Kheriji                     | 30. Windowing                   |
| 4. Peaceman            | 13. Multigrid    | 22. Local Grid Refinement (LGR) | 31. Perpendicular Bisection     |
| 5. Ding                | 14. Structured   | 23. Local Time-Stepping (LTS)   | 32. Tran                        |
| 6. Coning              | 15. Unstructured | 24. Domain Decomposition (DD)   | 33. Generalized Pseudo Pressure |
| 7. von Rosenberg       | 16. Deimbacher   | 25. Optimized Schwarz method    | 34. Whitson                     |
| 8. Heinemann           | 17. Window       | 26. Pedrosa                     | 35. Fevang                      |
| 9. Qnandalle           | 18. Subdomain    | 27. Aziz                        | 36. Eclipse 100                 |

### منابع

- [1]. Deimbacher, F. and Z. Heinemann. Time-dependent incorporation of locally irregular grids in large reservoir simulation models. in SPE Symposium on Reservoir Simulation. 1993. Society of Petroleum Engineers.
- [2]. Peaceman, D.W., Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation (includes associated paper 6988). Society of Petroleum Engineers Journal, 1978. 18(03): p. 183194-.
- [3]. Peaceman, D.W., Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation with nonsquare grid blocks and anisotropic permeability. Society of Petroleum Engineers Journal, 1983. 23(03): p. 531543-.
- [4]. Abou-Kassem, J.H. and K. Aziz, Analytical well models for reservoir simulation. Society of Petroleum Engineers Journal, 1985. 25(04): p. 573579-.
- [5]. Pedrosa Jr, O.A. and K. Aziz, Use of a hybrid grid in reservoir simulation. SPE Reservoir Engineering, 1986. 1(06): p. 611621-.
- [6]. Ding, Y. Well Modelling in Reservoir Simulation. in ECMOR V-5th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. 1996.
- [7]. Mlacnik, M.J. and Z. Heinemann. Using well windows in full field reservoir simulation. in SPE Reservoir Simulation Symposium. 2001. Society of Petroleum Engineers.
- [8]. Kheriji, W., R. Masson, and A. Moncorgé, Nearwell local space and time refinement in reservoir simulation. Mathematics and Computers in Simulation, 2015. 118: p. 273292-.
- [9]. Norris, S.O. and L. Piper. Modeling fluid flow around horizontal wellbores. in SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 1990. Society of Petroleum Engineers.
- [10]. Tran, T., et al. Production Performance of Gas Condensate Reservoirs: Compositional Numerical Model-A Case Study of Hai Thach-Moc Tinh Fields. in Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. 2015. Society of Petroleum Engineers.
- [11]. EclipseTechnicalDescription.
- [12]. Whitson, C.H. and Ø. Fevang. Generalized pseudopressure well treatment in reservoir simulation. in Proc. IBC Conference on Optimisation of Gas Condensate Fields. 1997.