



## مدل سازی زمین آماری چند نقطه‌ای رخساره‌های ناهمگون مخازن نفتی به منظور کنترل تولید ماسه

مجتبی باوندسوادکوهی\*؛ بهزاد تخم‌چی<sup>۲</sup>؛ اروان گلوآگون<sup>۳</sup>؛ علیرضا عرب‌امیری<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود و عضو قطب علمی مهندسی معدن

۳. استاد؛ مرکز آب، زمین و محیط‌زیست موسسه ملی تحقیقات علمی دانشگاه کبک، کانادا

۴. دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۲

DOI: 10.22107/jpg.2019.151505.1072

### چکیده

انتخاب موقعیت مناسب چاه‌های تولید با در نظر گرفتن مشخصات ژئومکانیکی رخساره‌های مخزن می‌تواند نقش بسیار مهمی در کاهش تولید ماسه در فرآیند تولید نفت از مخازن ماسه‌سنگی داشته باشد. گام اصلی در تعیین مشخصات ژئومکانیکی رخساره‌های مخزن، ایجاد منطقه‌بندی ژئومکانیکی است. با توجه به تغییرپذیری فضایی ذاتی و همچنین ناهمگونی شدید رخساره‌های نفتی، ایجاد چنین منطقه‌بندی بدون داشتن یک مدل ساختاری مطمئن از رخساره‌های مخزن، با عدم قطعیت نسبتاً بالایی همراه است. شبیه‌سازی‌های چند نقطه‌ای زمین‌آماری نه تنها به عنوان روشی قدرتمند در تخمین ویژگی‌های ژئومکانیکی مخزن بلکه به عنوان ابزاری برای مدل‌سازی رخساره‌های به شدت ناهمگون از چند دهه اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. اهمیت ایجاد یک مدل دقیق از رخساره‌های زیرسطحی موجب شده است تا الگوریتم‌های متنوعی به منظور بهبود دقت و راندمان محاسباتی ارائه شوند. در این مقاله یک الگوریتم جدید برای مدل‌سازی عددی رخساره‌های ناهمگون در مخازن نفتی پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته (*Discrete Wavelet Transform*) و تابع همبستگی متقابل (*Cross-Correlation*) است. به همین دلیل الگوریتم پیشنهادی *CCWSIM* نامیده شد. دقت و راندمان محاسباتی الگوریتم پیشنهادی با یکی دیگر از الگوریتم‌های شناخته شده شبیه‌سازی چند نقطه‌ای بنام *CCSIM*، در مدل‌های مصنوعی مختلف دوبعدی مخزن مقایسه می‌شوند. نتایج حاصل از مقایسه تحقق‌ها، دقت بالای الگوریتم پیشنهادی (*CCWSIM*) در بازتولید رخساره‌های ناهمگون مخزن را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین الگوریتم پیشنهادی دارای راندمان بسیار بالاتری نسبت به الگوریتم *CCSIM* است.

### واژگان کلیدی

تولید ماسه،  
ژئومکانیک مخزن،  
ناهمگونی زیرسطحی،  
مدل‌سازی زمین‌آماری،  
شبیه‌سازی چند نقطه‌ای

می‌شوند (Palmer et al., 2003; Rahmati et al., 2013).

تأثیرات منفی تولید ماسه در صنعت نفت، عامل اصلی بسیاری از مشکلات در پیشرفت این صنعت به شمار می‌رود. بسته شدن خطوط تولید، ناپایداری چاه، ریزش چاه‌های افقی در سازندهای ناپایدار، اثرات زیست‌محیطی، هزینه‌های سنگین جداسازی ماسه از نفت و فرسایش خطوط لوله و امکانات سطحی تنها بخشی از مشکلات تولید ماسه در صنعت نفت به حساب می‌آیند (Willson et al., 2002).

تولید ماسه در حین بهره‌برداری فرآیند پیچیده‌ای است که به پارامترهای مختلف ژئومکانیکی از قبیل توزیع فشار در

### ۱. پیش‌گفتار

یکی از مشکلات جدی و اجتناب ناپذیر در صنعت نفت، تولید ماسه در مخازن ماسه سنگی است. بخش قابل توجهی از ذخایر نفت جهان در مخازن ماسه سنگی غیر مستحکم که مستعد تولید ماسه هستند، قرار دارند. تخریب رخساره‌های ماسه‌ای در حین فرآیند بهره‌برداری عامل اصلی تولید ماسه محسوب می‌شود. عملیات حفاری، شرایط عملیاتی، کاهش فشار مخزن، تضعیف فشار آب، گرادیان فشار بالای سیال از عوامل مهمی هستند که به تدریج سبب تخریب رخساره‌های ماسه‌سنگی و جدا شدن ذرات ماسه از اطراف چاه‌های نفتی

اطراف چاه، خواص سنگ و سیالات مخزن بستگی دارد. درک دقیق ویژگی‌های ژئومکانیکی رخساره‌های زیرسطحی می‌تواند در انتخاب محل و راستای مناسب چاه‌های برداشت نقش مؤثری داشته باشد. از طرفی تغییرپذیری‌های فضایی ذاتی و ناهمگونی‌های شدید رخساره‌های زیرسطحی عملاً تعیین ویژگی‌های ژئومکانیکی و متعاقب آن تعیین دقیق منطبق‌بندی ژئوتکنیکی به منظور مدیریت و انتخاب محل انجام حفاری را با عدم قطعیت‌های مختلفی همراه کرده است (Pinheiro et al., 2016).

با توجه به اهمیت پیش‌بینی تولید ماسه در صنعت نفت، تلاش‌های زیادی در توسعه روش‌های مختلف برای مدل‌سازی تولید ماسه صورت گرفته است (Veeken et al., 1991; Larter et al., 2006; Boutt et al., 2011). تعداد زیادی از روش‌های پیش‌بینی تولید ماسه با استفاده از مدل‌های فیزیکی ساده و پیچیده در آزمایشگاه (Papamichos et al., 2010; Xiao & Vaziri, 2011) و تجربی (Morita et al., 1989) و مدل‌های عددی توسعه یافته‌اند (Vardoulakis et al., 1996; Papamichos & Stavropoulou, 1998). معمولاً روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی علاوه بر زمان و هزینه‌بر بودن، به دلیل ابعاد کوچک تجهیزات آزمایشگاهی نسبت به مدل‌های صنعتی، محدودیت‌هایی ناشی از شرایط مرزی را دارند. در این میان مدل‌های عددی به مراتب روش‌های مناسب‌تری برای پیش‌بینی تولید ماسه هستند. با این حال، ناهمگونی رخساره‌های زیرسطحی و تغییرپذیری‌های فضایی آن‌ها، مدل‌سازی‌های عددی ساختارهای زیرسطحی را با عدم قطعیت‌های جدی مواجه می‌کند (da Cruz et al., 1999; Feyen & Caers, 2006).

هدف این مقاله تمرکز بر روی تکنیک‌های مختلف مدل‌سازی فرآیند تولید ماسه نیست؛ بلکه تنها ارائه چارچوبی بر اساس شبیه‌سازی چندنقطه‌ای زمین‌آماری است که می‌تواند مبنای مؤثری برای ایجاد یک مدل مطمئن ژئومکانیکی و سپس شبیه‌سازی ویژگی‌های ژئومکانیکی بر اساس آن در رخساره‌های ناهمگون مخزن باشد. روشن است که ایجاد یک مدل ژئومکانیکی دقیق از رخساره‌های ناهمگون زیرسطحی می‌تواند راهنمای مناسبی برای انتخاب محل بهینه حفر چاه و متعاقب آن کاهش تولید ماسه باشد (Deutsch, 2006).

از نظر تکنیکی، مدل‌سازی‌های زمین‌آماری را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد: (۱) مدل‌سازی مبتنی بر واریوگرام یا دونقطه‌ای (۲) مدل‌سازی مبتنی بر شی و (۳) مدل‌سازی مبتنی بر تصویر آموزشی یا چندنقطه‌ای. به دلیل ساده‌سازی‌هایی که روش‌های مبتنی بر واریوگرام انجام می‌دهند، این گروه از روش‌ها محدودیت‌های جدی در بازتولید رخساره‌های پیچیده و ناهمگون مخزن دارند. روش‌های مبتنی بر واریوگرام صرفاً می‌توانند پیوستگی فضایی بین دو نقطه از فضا را در یک زمان در نظر بگیرند (Isaaks & Srivastava, 1989). بنابراین در مدل‌سازی رخساره‌های ناهمگون و با هندسه منحنی شکل مخزن ضعیف عمل می‌کند (Guardiano & Srivastava, 1993; Caers, 2001). مدل‌سازی‌های مبتنی بر شی امکان مدل‌سازی رخساره‌های با هندسه پیچیده را فراهم می‌کند ولی شرطی‌سازی این مدل‌ها به داده‌های چاه‌های اکتشافی نیاز به الگوریتم‌های زمان‌بر و تکرارشونده سعی و خطا دارد که عملاً راندمان بسیار پایینی دارند (Deutsch & Wang, 1996). گروه سوم روش‌های

الگوریتم‌های الگو-مبنا بود که تا حدود زیادی راندمان شبیه-سازی چندنقطه‌ای را با استفاده از کلاسه‌بندی و کاهش ابعاد الگوهای ذخیره شده بهبود بخشید (Zhang et al., 2006). هنرخواه و کرز الگوریتمی مشابه با فیلترسیم بنام دیسپت پیشنهاد دادند که کلاسه‌بندی و کاهش ابعاد الگوها را با استفاده از تابع فاصله در فضای کرنل انجام می‌داد. کلاسه-بندی الگوهای کاهش ابعاد یافته با استفاده از الگوریتم  $k$ -means انجام می‌شد. الگوریتم دیسپت نیز مانند الگوریتم‌های شبیه‌سازی قبلی نیاز به یک پردازنده قوی برای ذخیره‌سازی و ایجاد بانک داده‌ای الگوها در حوزه‌های نفتی بزرگ داشت (Honarkhah & Caers, 2010). محدودیت‌های حافظه در ذخیره‌سازی و بازخوانی الگوهای تصویر آموزشی، انگیزه‌ای برای ماریتوز و همکاران شد تا الگوریتمی مبتنی بر نمونه-برداری مستقیم الگوها از تصویر آموزشی ارائه دهند (Mariethoz et al., 2010).

الگوریتم نمونه‌برداری مستقیم اولین الگوریتم شبیه-سازی نقطه‌ای است که نیازی به ذخیره‌سازی الگوهای استخراج شده از تصویر آموزشی ندارد. این الگوریتم در هر مرحله از شبیه‌سازی، الگوی مورد نظر را با توجه به پیشامد داده‌ای در شبکه شبیه‌سازی و بر اساس یک حد آستانه‌ای از پیش تعریف شده از تصویر آموزشی مستقیماً انتخاب می‌کند. رضایی و همکاران نسخه‌ای الگو-مبنا را برای الگوریتم نمونه-برداری مستقیم پیشنهاد دادند که راندمان محاسباتی این الگوریتم را تا حدودی بهبود بخشید (Rezaee et al., 2013). طهماسبی و همکاران الگوریتم الگو-مبنایی برای مدل‌سازی رخساره‌های مخزن ارائه دادند که فاصله شباهت بین الگوها را با استفاده از تابع همبستگی متقابل ( $Cross-Correlation$ ) محاسبه می‌کند (Tahmasebi et al., 2012). الگوریتم مبتنی بر همبستگی متقابل ( $CCSIM$ ) تا حدود زیادی پیوستگی ساختاری رخساره‌ها در مخزن را بهبود داد ولی همچنان برای مدل‌سازی حوزه‌های نفتی بزرگ نیاز به زمان زیادی دارد. برای بهبود راندمان محاسباتی و شرطی-سازی داده‌های چاه، طهماسبی و همکاران نسخه‌ای سریع از  $CCSIM$  بنام  $MS-CCSIM$  با امکان جستجوی چند-مقیاسی ارائه داده‌اند (Tahmasebi et al., 2014). تقریباً در تمامی الگوریتم‌های مدل‌سازی رخساره‌های مخزن دو هدف کلی مشترک مشاهده می‌شوند: (۱) افزایش دقت مدل‌سازی

مبتنی بر تصویر آموزشی یا روش‌های چندنقطه‌ای هستند. این گروه از روش‌ها در عین حال که قابلیت بالایی در بازتولید رخساره‌های ناهمگون و منحنی شکل مخزن دارند، از توانایی بالایی در شرطی‌سازی مدل‌های عددی به داده‌های چاه و یا انواع دیگر داده‌های شرطی (داده‌های ژئوفیزیکی) برخوردارند (Xu et al., 1992). در این روش‌ها، ساختارهای ناهمگون و پیچیده مخزن با استفاده از آماره‌های چندنقطه‌ای مشخص می‌شوند. از آنجا که چنین آماره‌های چندنقطه‌ای نمی‌توانند از داده‌های پراکنده و محدود چاه‌های اکتشافی استنباط شوند، از یک تصویر مفهومی بنام تصویر آموزشی برای استخراج آماره‌های مراتب بالاتر استفاده می‌شود (Mariethoz & Caers, 2014). در واقع تصویر آموزشی یک مدل مفهومی از رخساره‌های قابل انتظار مخزن است. این تصویر شامل هندسه، نسبت و آماره‌های مراتب بالاتر رخساره‌های مخزن است. یک روش مرسوم برای تولید تصاویر آموزشی استفاده از الگوریتم-های مبتنی بر شی و انجام شبیه‌سازی‌های غیرشرطی است (Caers & Zhang, 2004; Mariethoz, 2018).

الگوریتم اولیه شبیه‌سازی چندنقطه‌ای توسط گوآردیو و سربواستاوا با تکیه بر معادلات نرمال پیشنهاد شد (Guardiano & Srivastava, 1993). به دلیل محدودیت-های محاسباتی این الگوریتم نتوانست به صورت عملی مورد استفاده قرار بگیرد. اولین الگوریتم مؤثر در شبیه‌سازی چند-نقطه‌ای الگوریتم اسنسیم بود (Strebelle, 2002). این الگوریتم مبتنی بر معادلات نرمال واحد، تابع توزیع شرطی و یک درخت جستجو به منظور بازخوانی سریع الگوهای ذخیره شده از تصویر آموزشی بود. الگوریتم اسنسیم یک الگوریتم پیکسل-مبناست که به طور وسیعی در مدل‌سازی متغیرهای گسسته مانند رخساره‌ها به کار گرفته شد (Strebelle & Journel, 2001; Liu, 2006). آرپات و کرز الگوریتم سیمپت که اولین الگوریتم الگو-مبنا بود را با الهام از الگوریتم-های سنتز بافت از شاخه گرافیک‌های کامپیوتری پیشنهاد دادند (Arpat & Caers, 2007). در الگوریتم سیمپت در هر مرحله از شبیه‌سازی به جای یک پیکسل، مجموعه‌ای از پیکسل‌ها با توجه به ابعاد پنجره جستجو شبیه‌سازی می‌شد. الگوریتم سیمپت تا حدود زیادی مشکلات مربوط به ناپیوستگی الگوها را بهبود بخشید ولی از راندمان محاسباتی بسیار پایینی برخوردار بود. الگوریتم فیلترسیم از دیگر

الگوهای تصویر آموزشی و پیشامد داده‌ای در شبکه شبیه‌سازی استفاده می‌شود. نکته قوت و آنچه که الگوریتم پیشنهادی در این مقاله را متمایز از الگوریتم *MS-CCSIM* کرده است، محاسبه تابع همبستگی متقابل بر اساس ضرایب تقریبی تبدیل موجک گسسته است. در ادامه برای درک بیشتر مفاهیم پایه‌ای الگوریتم پیشنهادی، ابتدا مفاهیم ریاضی تبدیل موجک گسسته و سپس جنبه کاربردی تبدیل موجک گسسته در الگوریتم *CCWSIM* شرح داده می‌شود.

## ۱.۲ تبدیل موجک گسسته (*DWT*)

تبدیل موجک گسسته هر سیگنال را به مجموعه‌ای از توابع پایه‌ای متعامد تجزیه می‌کند. اگر یک تصویر به عنوان یک سیگنال دوبعدی در نظر گرفته شود، به دلیل ویژگی چند-وضوحی تجزیه موجک، مجموعه‌ای از توابع پایه‌ای تبدیل (شیفت) و مقیاس یافته که به ترتیب تابع موجک مادر  $\psi^B$  (به طوری که  $B = \{H, V, D\}$ ) و تابع مقیاس  $\phi^{LL}$  نامیده می‌شوند، ایجاد می‌شوند. اگر  $pat(x, y)$  به عنوان یک تصویر دوبعدی با ابعاد  $N \times N$  در نظر گرفته شود، تبدیل موجک گسسته تصویر به صورت رابطه زیر بیان می‌شود (Fan & Xia, 2003).

$$Pat(x, y) = \sum_{k,i=0}^{N_j-1} a_{j,k,i}^k \phi_{j,k,i}^{LL}(x, y) + \sum_{B=\{H,V,D\}} \sum_{j=1}^{N_j-1} \sum_{k,i=0}^{N_j-1} Z_{j,k,i}^B \psi_{j,k,i}^B(x, y) \quad (1)$$

به طوری که در رابطه فوق،  $\psi^B$  و  $\phi^{LL}$  به ترتیب موجک مادر و تابع مقیاس،  $N_j = N/2^j$  و  $a_{j,k,i}$  ضرایب تقریبی تبدیل موجک گسسته و  $Z_{j,k,i}^B$  ضرایب جزئیات در سطح تجزیه  $j$  در راستای افقی ( $H$ )، عمودی ( $V$ ) و قطری ( $D$ ) هستند.

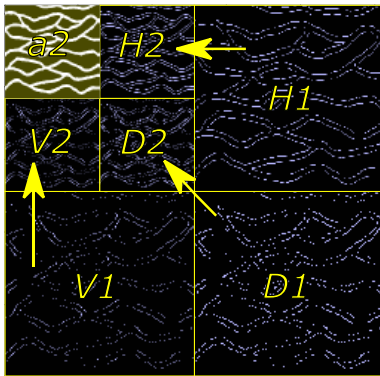
تبدیل موجک گسسته بر روی هر سیگنال دوبعدی دارای دو مرحله اصلی است. در مرحله اول، سیگنال توسط برخی فیلترهای پایین و بالاگذر تجزیه می‌شود. سپس از سطرها و ستون‌های زیرباند‌های فرکانسی تولید شده نمونه برداری می‌شود. به طور دقیق‌تر، پس از هر مرحله تبدیل موجک گسسته، یک زیرباند غیرجهتی فرکانس پایین و سه زیرباند جهتی فرکانس بالا در جهات افقی، عمودی و قطری حاصل می‌شود. به ضرایب زیرباند فرکانس پایین غیرجهتی،

رخساره‌ها و (۲) بهبود راندمان محاسباتی (Straubhaar et al., 2011; Cordua et al., 2015). در این مقاله الگوریتم مبتنی بر تبدیل موجک گسسته پیشنهاد شده است که بر تابع همبستگی متقابل تکیه می‌کند. در واقع الگوریتم شبیه‌سازی پیشنهادی از ضرایب تقریبی تبدیل موجک گسسته برای محاسبه تابع همبستگی متقابل استفاده می‌کند. محاسبه فاصله شباهت بین الگوها با استفاده از ضرایب تقریبی موجک به طور چشم‌گیری راندمان محاسباتی را نسبت به الگوریتم *CCSIM* که صرفاً از ضرایب تابع همبستگی متقابل استفاده می‌کند، بهبود بخشیده است. همچنین بازتولید پیوستگی رخساره‌های ناهمگون در تحقق‌های الگوریتم پیشنهادی به دلیل استفاده از ضرایب تقریبی موجک که حاوی اطلاعات و تغییرپذیری‌های مهم هستند؛ نسبت به الگوریتم *MS-CCSIM* با دقت بالاتری انجام می‌شود. الگوریتم پیشنهادی قادر به مدل‌سازی رخساره‌های گسسته مخزن است. دقت و راندمان محاسباتی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم *MS-CCSIM* با استفاده از تصاویر آموزشی مصنوعی مختلف مقایسه می‌شود. نتایج مقایسه به خوبی پیوستگی رخساره‌های شبیه‌سازی شده در الگوریتم مبتنی بر موجک گسسته را نسبت به الگوریتم مبتنی بر همبستگی متقابل را نشان می‌دهند. همچنین زمان اجرای شبیه‌سازی‌ها در الگوریتم پیشنهادی، به طور میانگین، ۱۰ بار سریع‌تر از الگوریتم مبتنی بر همبستگی متقابل است.

تحقق‌های حاصل از الگوریتم *MS-CCSIM* با استفاده از کدهای مقاله مرجع این الگوریتم و از تارنمای [https://github.com/SCRFpublic/MS\\_CCSIM](https://github.com/SCRFpublic/MS_CCSIM) تهیه شده است. همچنین تحقق‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی *CCWSIM* با استفاده از کدهای توسعه‌داده شده در نرم افزار *MATLAB* تولید شده‌اند.

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

در الگوریتم شبیه‌سازی چندنقطه‌ای پیشنهادی در این مقاله به منظور بهبود دقت و راندمان محاسباتی الگوریتم *MS-CCSIM* رویکردی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته به کار گرفته شده است. در الگوریتم *MS-CCSIM* از تابع همبستگی متقابل (*CC*) برای محاسبه فاصله شباهت بین



شکل ۱. دو سطح تبدیل موجک گسسته بر روی تصویر دوبعدی و ضرایب تقریبی و جزئیات در جهات مشخص.

در این پژوهش از موجک هار<sup>۲</sup> به عنوان تابع مادر برای انجام شبیه سازی ها استفاده شده است. موجک مادر هار در عین سادگی، مناسب ترین موجک مادر برای تجزیه سیگنال های باینری با تغییرات ناگهانی است. تابع موجک هار و تابع مقیاس مربوط به آن در رابطه زیر ارائه شده است (Tran et al., 2002).

$$\psi^B(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi^{LL}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

## ۲.۲ الگوریتم CCWSIM

الگوریتم CCWSIM یک الگوریتم مبتنی بر همبستگی متقابل و تبدیل موجک گسسته است. این الگوریتم قادر به شبیه سازی شرطی و غیرشرطی مبتنی بر الگو<sup>۵</sup> رخساره های گسسته زیرسطحی است. مشابه بسیاری از الگوریتم های

ضرایب تقریبی<sup>۱</sup> و به ضرایب جهتی فرکانس بالا، ضرایب جزئیات<sup>۲</sup> گفته می شود (Mallat, 1989). تبدیل موجک گسسته به عنوان یک تبدیل کارآمد در حوزه پردازش تصویر، دارای قابلیت های ارزشمندی است. به عنوان نمونه، برای دستیابی به یک سطح تجزیه خاص به منظور استخراج ویژگی های یک تصویر، سطوح تجزیه می تواند با توجه به ابعاد و مقیاس ویژگی های تصویر تا سطح تجزیه مورد نظر افزایش یابد. همچنین با توجه به تنوع ساختارها و ویژگی های خاص هر تصویر، توابع موجک مادر زیادی به منظور استخراج مطلوب ویژگی های مورد نظر وجود دارد. به عنوان یک ویژگی بسیار کلیدی و با اهمیت دیگر تبدیل موجک گسسته قادر است در هر سطح از تجزیه، تصویر تجزیه شده را با استفاده از ضرایب تقریبی و جزئیات و توسط تبدیل معکوس موجک گسسته<sup>۳</sup> به طور کامل بازسازی کند.

مطابق با سطح تجزیه مورد نظر، فرآیند تجزیه موجک گسسته برای سطح بعدی تجزیه، با استفاده از ضرایب تقریبی تولید شده در هر مرحله از تجزیه موجک انجام می شود. نکته بسیار مهمی که در اینجا باید به آن اشاره شود این است که بعد از هر مرحله تبدیل موجک گسسته ۷۵٪ از جزئیات (اطلاعات فرکانس بالا) هر سیگنال از بین خواهند رفت، اما با توجه به توانایی ذاتی تبدیل موجک گسسته، الگوها و تغییرپذیری های مهم سیگنال به خوبی در قالب ضرایب تقریبی موجک حفظ می شوند. به بیان دیگر، ضرایب تقریبی مهم ترین تغییرپذیری های محلی و کلی را از سیگنال استخراج می کنند (Crouse et al., 1998). دو مرحله تبدیل موجک گسسته برای یک تصویر دوبعدی و ضرایب تقریبی و جزئیات در شکل ۱ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Approximate coefficients

<sup>2</sup> Detail coefficients

<sup>3</sup> Inverse-DWT

<sup>4</sup> Haar

<sup>5</sup> pattern-based

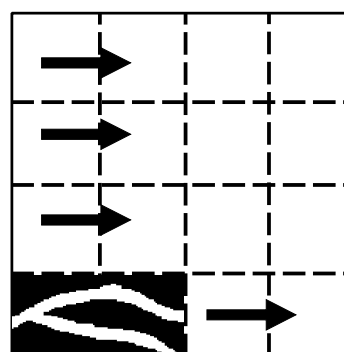
واقع، الگوریتم *CCWSIM* از تبدیل موجک گسسته به منظور استخراج ویژگی‌ها و تغییرپذیری‌های مهم از ناحیه هم‌پوشانی و تصویر آموزشی استفاده می‌کند. سپس با استفاده از ضرایب تقریبی حاصل از تجزیه موجک گسسته ناحیه هم‌پوشانی و تصویر آموزشی به محاسبه تابع همبستگی متقابل در فضای ویژگی می‌پردازد. همان‌طور که اشاره شد، ضرایب تقریبی موجک گسسته دارای ابعاد کاهش‌یافته و حاوی تغییرپذیری-های مهم الگوهای اولیه هستند.

اگر ( $T_i$ ) به عنوان یک تصویر آموزشی و  $OL$  یک ناحیه هم‌پوشانی با ابعاد  $M \times N$  در نظر گرفته شود، نسخه بهبودیافته و مبتنی بر موجک تابع همبستگی متقابل که *CCW* نامیده می‌شود، در هر پیکسل ( $s, t$ ) تصویر آموزشی به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود (*Bavand Savadkoochi et al., 2018*):

$$CCW(x, y) = \sum_{t=0}^{N_j-1} \sum_{s=0}^{M_j-1} cA_j^{Ti}(x) + s, y + t) . cA_j^{OR}(s, t) \quad (4)$$

به طوری که در رابطه فوق،  $M_j = \frac{M}{2^j}$ ،  $N_j = \frac{N}{2^j}$ ،  $cA_j^{Ti}$  ضرایب تقریبی موجک گسسته و  $cA_j^{OL}$  ضرایب تقریبی ناحیه هم‌پوشانی در سطح تجزیه  $j$  ام است. نکته مهمی که باید در اینجا بیان شود اینکه تعداد پیکسل‌های  $OL$  بعد از  $j$  امین سطح تجزیه برابر با  $M_j \times N_j$  خواهد شد. بنابراین، بر اساس سطح تجزیه مورد نظر، ابعاد الگوی اولیه به طور چشم‌گیری می‌تواند کاهش یابد. برای مثال، اگر یک تصویر آموزشی دوبعدی، ابعادی معادل  $2000 \times 2000$  داشته باشد، تعداد پیکسل‌های آن معادل ۴۰۰۰۰۰ خواهد شد. اگر فرض شود ۳ سطح تجزیه موجک گسسته بر روی این تصویر آموزشی انجام شود، تعداد پیکسل‌های آن برابر ۶۵۵۳۶ خواهد شد که به صورت قابل ملاحظه‌ای کمتر از تعداد پیکسل‌های اولیه است. مراحل محاسبه ضرایب *CCW* در الگوریتم *CCWSIM* به صورت شماتیکی در شکل ۳ نشان داده شده است.

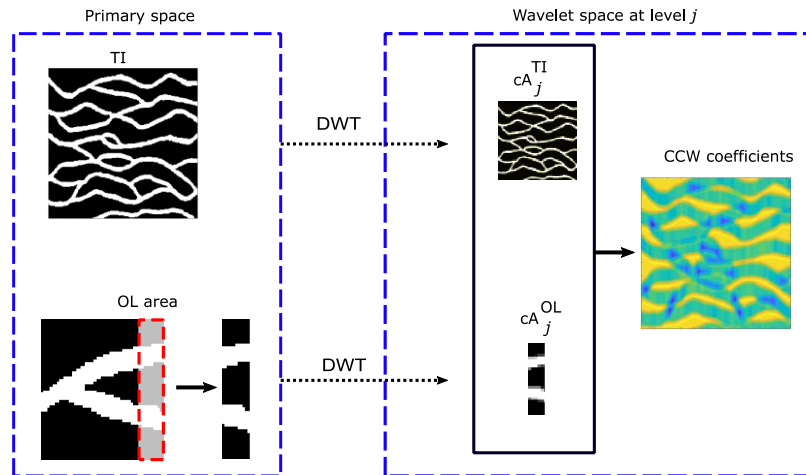
مبتنی بر الگو، الگوریتم *CCWSIM* از یک مسیر یک‌طرفه<sup>۶</sup> برای انجام شبیه‌سازی در شبکه استفاده می‌کند (*Parra & Ortiz, 2011*). به طور دقیق‌تر، فرآیند شبیه‌سازی در شبکه شبیه‌سازی از گوشه پایین و چپ شبکه بر روی یک مسیر از پیش تعیین شده شروع می‌شود و تا انتهای مسیر مستقیم ادامه پیدا می‌کند. در شکل ۲ یک شبکه شبیه‌سازی با مسیر شبیه‌سازی یک‌طرفه نشان داده شده است.



شکل ۲. شبکه شبیه‌سازی و مسیر از پیش تعیین‌شده یک-طرفه در شبیه‌سازی مبتنی بر الگو.

الگوریتم *CCWSIM* برای محاسبه فاصله شباهت بین الگوها در تصویر آموزشی و پیشامد داده‌ای در شبکه شبیه‌سازی، از مفهومی بنام ناحیه هم‌پوشانی ( $OL$ ) استفاده می‌کند. این تکنیک در الگوریتم‌های مبتنی بر *Image quilting* استفاده می‌شود (*Efros & Freeman, 2001*). در واقع به جای استفاده از تمام پیکسل‌های پیشامد داده‌ای برای محاسبه فاصله شباهت، تنها از یک بخش مشخص از آن به منظور کاهش بار محاسباتی و افزایش راندمان استفاده می‌شود. نکته بسیار کلیدی در الگوریتم *CCWSIM*، و آنچه که این الگوریتم را از الگوریتم *MS-CCSIM* و *CCSIM* متمایز می‌کند نحوه محاسبه فاصله شباهت بین ناحیه هم‌پوشانی و الگوهای تصویر آموزشی است. به طور دقیق‌تر، در الگوریتم *CCWSIM* به جای اینکه مستقیماً از ضرایب تابع همبستگی متقابل ( $CC$ ) استفاده شود، از ضرایب تقریبی موجک ( $cA$ ) برای محاسبه تابع همبستگی متقابل استفاده می‌شود. در

<sup>6</sup> Unilateral



شکل ۳. محاسبه ضرایب  $CCW$  در فضای ویژگی موجک تصویر آموزشی و ناحیه هم‌پوشانی در الگوریتم  $CCWSIM$ .

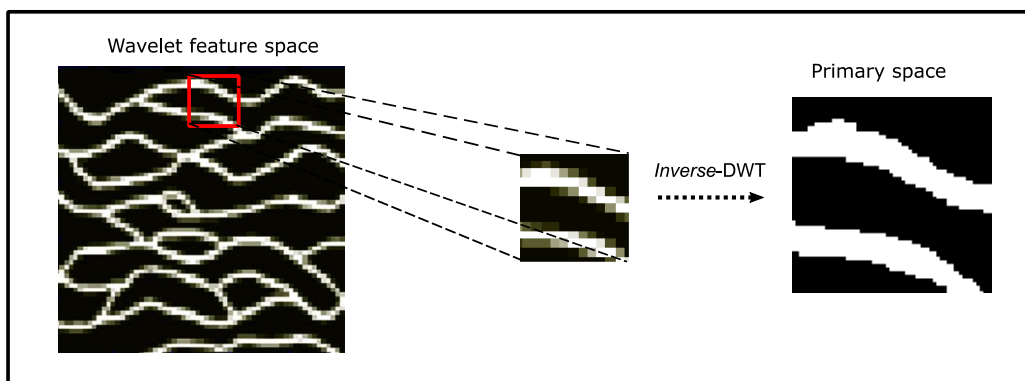
تبدیل معکوس موجک گسسته به فضای اولیه رفت. فرآیند انتقال از فضای ویژگی تبدیل موجک به فضای اولیه در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین مراحل کلیدی الگوریتم پیشنهادی  $CCWSIM$  به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

#### جدول ۱. مراحل کلیدی الگوریتم پیشنهادی $CCWSIM$

- ۱: پارامترهای ورودی: (تصویر آموزشی، اندازه تصویر آموزشی، اندازه ناحیه هم‌پوشانی، تعداد تحقق‌ها، شبکه شبیه‌سازی، اندازه شبکه شبیه‌سازی، تعداد سطوح تجزیه موجک گسسته)
- ۲: ایجاد یک مسیر یک-طرفه با توجه به ابعاد الگوی شبیه‌سازی و ابعاد شبکه شبیه‌سازی
- ۳: قرار دادن یک الگوی تصادفی از تصویر آموزشی در شبکه شبیه‌سازی
- ۴: استخراج ناحیه هم‌پوشانی از شبکه شبیه‌سازی
- ۵: محاسبه تبدیل موجک گسسته تصویر آموزشی و ناحیه هم‌پوشانی
- ۶: محاسبه ضرایب  $CCW$
- ۷: مرتب کردن ضرایب  $CCW$  و پیدا کردن الگوی مورد نظر
- ۸: محاسبه تبدیل معکوس موجک گسسته الگوی یافت شده
- ۹: قرار دادن الگو در شبکه شبیه‌سازی
- ۱۰: رفتن به مرحله ۴ و ادامه روند شبیه‌سازی

پس از محاسبه ضرایب  $CCW$ ، بسته به اینکه شبیه‌سازی شرطی است و یا غیرشرطی، دو سناریوی مختلف برای ادامه روند شبیه‌سازی وجود خواهند داشت. در شبیه‌سازی غیرشرطی، ابتدا ضرایب  $CCW$  بر اساس کم‌ترین فاصله شباهت مرتب خواهند شد و سپس تعداد مشخصی از کاندیدها که کمترین فاصله شباهت را دارند انتخاب می‌شوند. در نهایت یکی از کاندیدها، به صورت تصادفی انتخاب شده و الگوی متناظر با آن در شبکه شبیه‌سازی قرار داده می‌شود. برای شبیه‌سازی شرطی، رویکردی مشابه با روش طهماسبی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده است (Tahmasebi et al., 2014). در این مرحله، از میان الگوهای مرتب شده، الگویی انتخاب خواهد شد که دارای دو شرط اساسی هم‌زمان باشد: اول اینکه فاصله شباهت بین این الگو و ناحیه هم‌پوشانی در شبکه شبیه‌سازی باید کمینه باشد و دوم اینکه الگوی مورد نظر نه تنها باید تطابق قابل قبولی در نقاط شرطی در درون الگوی شبیه‌سازی داشته باشد بلکه باید سازگاری مناسبی در نقاط شرطی در یک ناحیه پیش‌رو در خارج از الگوی شبیه‌سازی داشته باشد.

پس از انتخاب الگوی مورد نظر از میان کاندیدهای مختلف، قبل از اینکه الگو در شبکه شبیه‌سازی قرار داده شود، این الگو باید از فضای ویژگی تبدیل موجک گسسته به فضای اولیه برگردانده شود. همان‌طور که ذکر شد، تبدیل موجک گسسته یک تبدیل دوسویه است و در هر مرحله از تجزیه موجک، با استفاده از ضرایب تقریبی و جزئیات می‌توان توسط

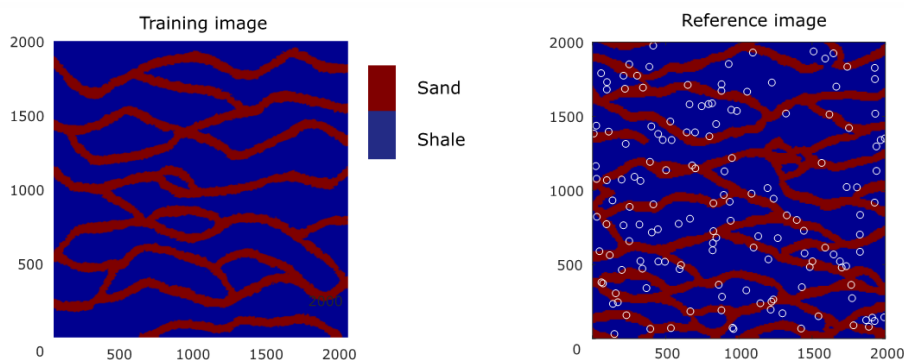


شکل ۴. تبدیل معکوس موجک گسسته برای انتقال از فضای ویژگی به فضای اولیه

از آنجاکه بازتولید *images-labrary.html* تهیه شده است. ساختارهای تصویر آموزشی با استفاده از داده‌های شرطی برداشت شده از خود تصویر آموزشی نمی‌تواند روش مطمئنی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی چندنقطه‌ای باشد (Mariethoz et al., 2010)، با استفاده از شبیه‌سازی چندنقطه‌ای تصویر آموزشی توسط الگوریتم شناخته شده /سنسیم یک تحقق غیرشرطی تولید شده است. این تحقق به عنوان تصویر مرجع<sup>۷</sup> به منظور استخراج داده‌های شرطی استفاده می‌شود. تصویر آموزشی کانال‌ها، تصویر مرجع حاصل از شبیه‌سازی غیرشرطی و تعداد ۱۵۰ داده شرطی استخراج شده از آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

### ۳. مدل‌سازی عددی

منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی از نظر دقت و راندمان محاسباتی در شبیه‌سازی، از یک تصویر آموزشی استاندارد دوبعدی از یک مخزن نفتی بنام *کانال‌ها* استفاده شده است. تصویر آموزشی کانال‌ها به عنوان یک تصویر آموزشی مرجع در مقایسه عملکرد الگوریتم‌های شبیه‌سازی چندنقطه‌ای به طور وسیعی مورد استفاده می‌گردد (Strebelle, 2002). در این تصویر آموزشی دو رخساره‌ی، کانال‌های ماسه‌ای سینوسی شکل در یک زمینه شیلی قرار گرفته‌اند. داده‌های این تصویر آموزشی از این تصویر آموزشی از <http://trainingimages.org/training->



شکل ۵. تصویر آموزشی کانال شامل دو رخساره ماسه و شیل (سمت چپ)، شبیه‌سازی غیرشرطی تولید شده توسط الگوریتم اسنسیم و ۱۵۰ داده شرطی استخراج شده از آن (راست).

<sup>7</sup> Reference image

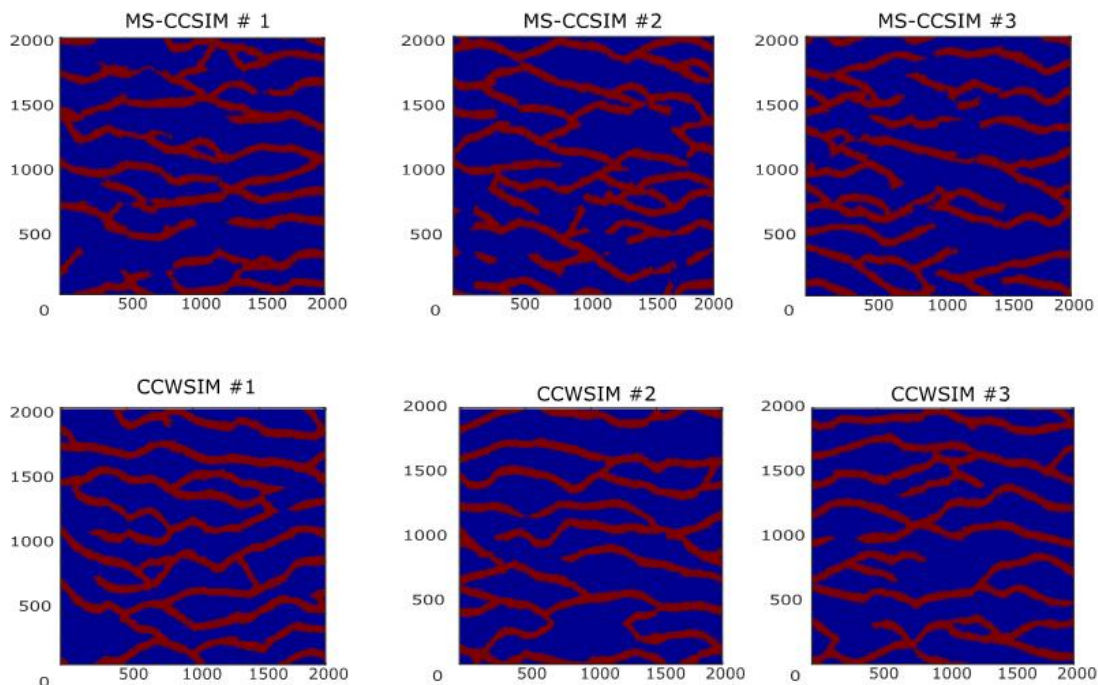


به منظور ایجاد یک مقایسه منطقی و دقیق بین دقت و راندمان محاسباتی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم *MS-CCSIM*، تمامی پارامترهای ورودی برای هر دو الگوریتم یکسان در نظر گرفته شده اند. همچنین برای مقایسه دقیق تر راندمان محاسباتی الگوریتم ها تعداد سطوح تبدیل موجک گسسته معادل حداکثر سطح جستجوی چند-مقیاسی در الگوریتم *MS-CCSIM* در نظر گرفته شده است. پارامترهای ورودی هر دو الگوریتم در جدول ۲ ارائه شده است.

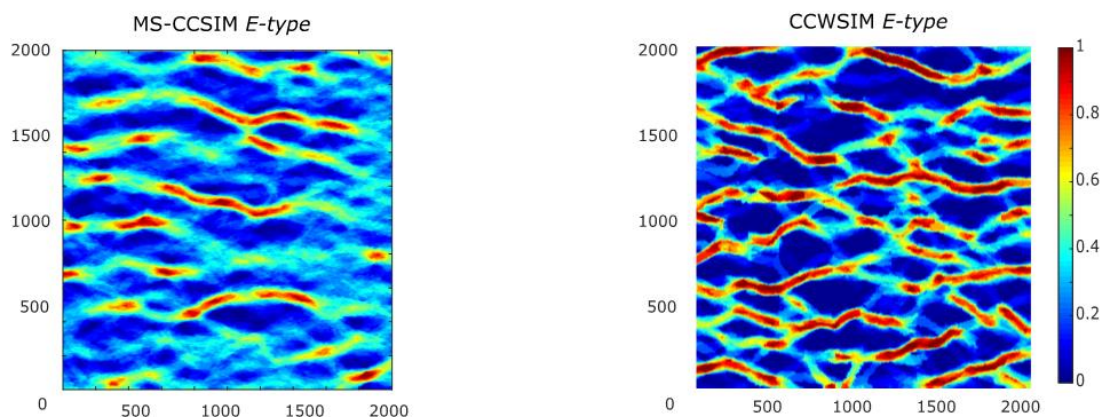
با استفاده از ۱۵۰ داده شرطی استخراج شده از تصویر مرجع و تصویر آموزشی کانال، تعداد ۵۰ تحقق برای هر کدام از الگوریتم های *MS-CCSIM* و *CCWSIM* تولید می شود. تعداد ۳ تحقق برای هر الگوریتم به صورت تصادفی از بین تحقق های تولید شده، انتخاب شده اند. تحقق های تولیدی الگوریتم های *MS-CCSIM* و *CCWSIM* در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین، نقشه میانگین (*E-type*) حاصل از ۵۰ تحقق برای هر کدام از الگوریتم ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که از تحقق ها و نقشه میانگین مشخص است الگوریتم *CCWSIM* ساختارهای تصویر آموزشی و رخساره های ماسه ای را با پیوستگی بالاتری نسبت به الگوریتم

جدول ۲. پارامترهای ورودی الگوریتم های *MS-CCSIM* و *CCWSIM*

۲۰۰۰×۲۰۰۰	ابعاد تصویر آموزشی
۲۰۰۰×۲۰۰۰	ابعاد شبکه شبیه سازی
۳۲×۲۰۰	ابعاد ناحیه هم پوشانی
۳	تعداد سطوح چند-مقیاسی (مخصوص الگوریتم <i>MS-CCSIM</i> )
۳	تعداد سطوح تجزیه موجک گسسته (مخصوص الگوریتم <i>CCWSIM</i> )



شکل ۶. تحقق های تولید شده توسط الگوریتم های *MS-CCSIM* و *CCWSIM* (علامت # نشان دهنده شماره تحقق است).



شکل ۷. نقشه میانگین (*E-type*) حاصل از ۵۰ تحقق الگوریتم *MS-CCSIM* (چپ) و الگوریتم *CCWSIM* (راست).

شرقی-غربی محاسبه شده است. واریوگرام ۱۰ تحقق از الگوریتم پیشنهادی و تصویر آموزشی در راستاهای مشخص در شکل ۸ (ب و ج) نشان داده شده است. واضح است که شیب و سقف واریوگرام‌های تحقق‌های الگوریتم پیشنهادی سازگاری بسیار بالایی با شیب و سقف واریوگرام تصویر آموزشی دارند.

تابع احتمال پیوستگی، به صورت احتمال اتصال پیکسل‌های یک رخساره در یک فاصله و راستای مشخص تعریف می‌شود (Allard, 1994). از آنجاکه راستای اصلی کانال‌های ماسه‌ای در تحقق‌ها و تصویر آموزشی شرقی-غربی است، تابع احتمال پیوستگی در همین راستا محاسبه شده است. تابع احتمال پیوستگی تحقق‌های الگوریتم پیشنهادی و تصویر آموزشی در شکل ۸ (د) نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت، تابع احتمال پیوستگی در تحقق‌های الگوریتم پیشنهادی تطابق خوبی با تابع احتمال پیوستگی تصویر آموزشی دارد.

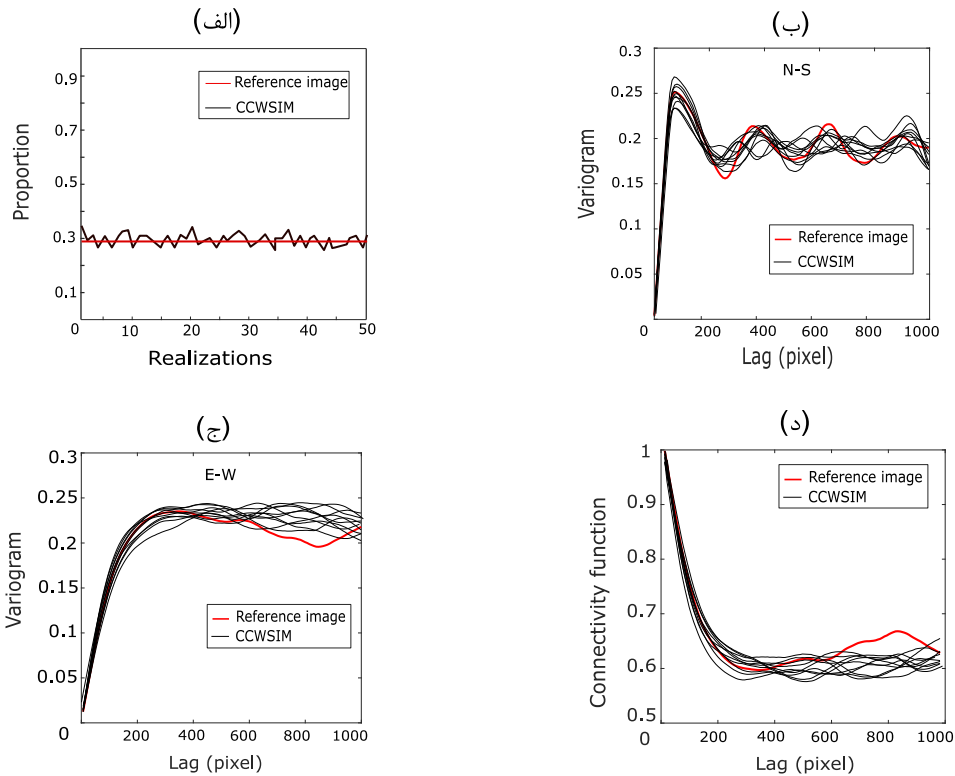
### ۱.۳ اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج تحقق‌های الگوریتم پیشنهادی، برخی معیارهای (آماره‌های) تک و دونقطه‌ای شامل نسبت رخساره<sup>۸</sup>، واریوگرام و تابع احتمال پیوستگی<sup>۹</sup> در تحقق‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. هرچند بازتولید آماره‌های مراتب پایین‌تر (واریانس و میانگین) شرط کافی برای بازتولید آماره‌های مرتبه بالاتر نیست، ولی بازتولید این آماره‌ها شرط لازم برای بازتولید آماره‌های چندنقطه‌ای است (Honarkhah & Caers, 2010). به عنوان اولین آماره، نسبت رخساره‌ها در تحقق‌ها و تصویر آموزشی محاسبه شده‌اند. نسب رخساره‌ها در تصویر آموزشی و ۱۰ تحقق از الگوریتم پیشنهادی در شکل ۸ (الف) نشان داده شده است. روشن است که الگوریتم *CCWSIM* به خوبی نسبت رخساره‌ها را در تحقق‌ها بازتولید کرده است. به عنوان دومین آماره، واریوگرام تحقق‌ها در تحقق‌های و تصویر آموزشی در دو راستای شمالی-جنوبی و

<sup>8</sup> Proportion

<sup>9</sup> Probability Connectivity Function

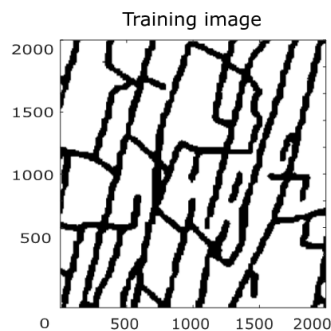
مدل سازی زمین آماری چندنقطه ای رخساره های ناهمگون مخازن نفتی به منظور کنترل تولید ماسه



شکل ۸. آماره های حاصل از ۱۰ تحقق الگوریتم *CCWSIM*: (الف) نسبت رخساره، (ب) واریوگرام در راستای *N-S*، (ج) واریوگرام در راستای *E-W*، (د) تابع احتمال پیوستگی در راستای *E-W*.

### ۲.۳ تصویر آموزشی شکستگی (Fractures)

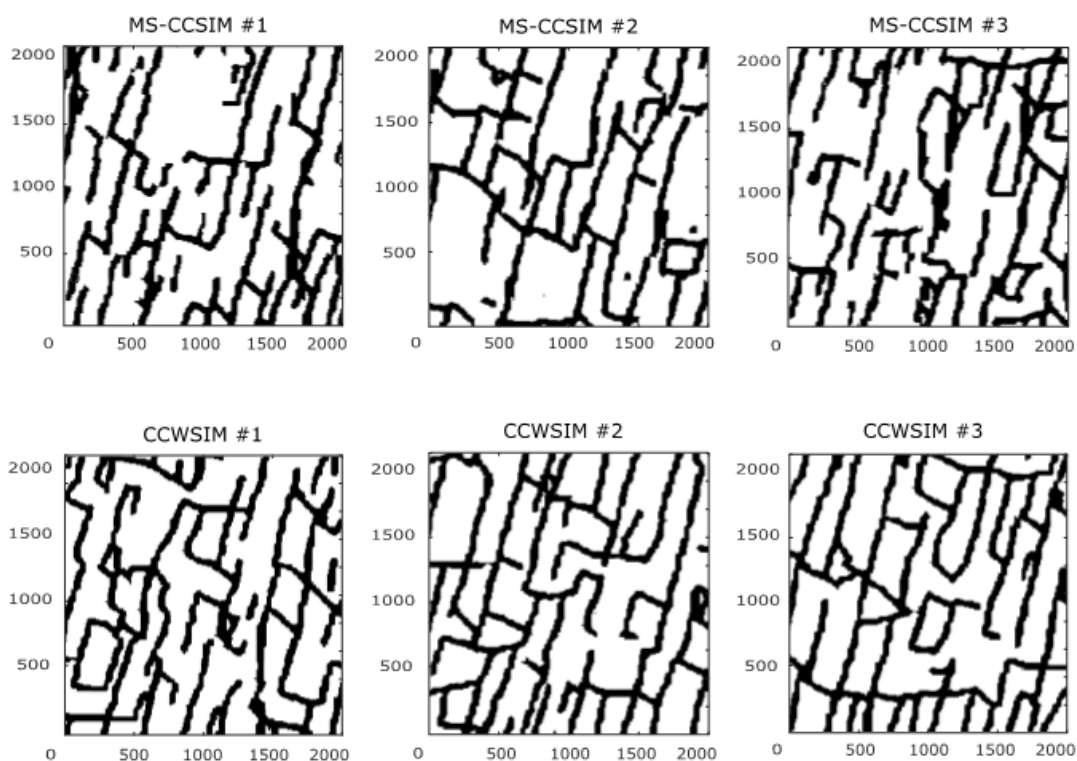
ناپیوستگی های کمتری، نسبت به تحقق های الگوریتم *MS-CCSIM* دارند. به علاوه، زمان اجرای شبیه سازی ها برای الگوریتم پیشنهادی به طور متوسط ۱۰ مرتبه سریع تر از الگوریتم *MS-CCSIM* بوده است.



شکل ۹. تصویر آموزشی شکستگی (Fracture)

به منظور تعمیم عملکرد الگوریتم *CCWSIM* در تصاویر آموزشی دیگر، از یک تصویر آموزشی دیگر بنام شکستگی<sup>۱۰</sup> استفاده می شود (Gardet et al., 2016). این تصویر آموزشی شامل شکستگی هایی در یک راستای مشخص است. تصویر آموزشی شکستگی در شکل ۹ نشان داده شده است. تعداد ۲۰ تحقق برای الگوریتم *CCWSIM* و *MS-CCSIM* تولید شده است. همانند مثال قبل، به منظور مقایسه منطقی بین عملکرد الگوریتم ها، تمامی پارامترهای ورودی برای هر دو الگوریتم یکسان در نظر گرفته شده اند. سه تحقق از میان تحقق های تولید شده برای هر الگوریتم به صورت تصادفی انتخاب و در شکل ۱۰ نشان داده شده اند. همان طور که از شکل پیداست، الگوریتم *CCWSIM* در بازتولید الگوها و ساختارهای تصویر آموزشی به مراتب بهتر از الگوریتم *MS-CCSIM* عمل کرده است و الگوهای بازتولید شده

<sup>10</sup> Fracture



شکل ۱۰. تحقق‌های تولید شده توسط الگوریتم‌های *MS-CCSIM* و *CCWSIM*.

متقابل بین الگوها را در فضای ویژگی الگوها محاسبه می‌کند. استفاده از فضای ویژگی تبدیل موجک گسسته موجب کاهش ابعاد مسئله و افزایش سرعت محاسباتی تا ۱۰ برابر شده است. همچنین با توجه به قابلیت ذاتی تبدیل موجک گسسته در استخراج ویژگی‌ها و تغییرپذیری‌های مهم از پدیده مورد بررسی، ساختارهای تصویر آموزشی با دقت مطلوبی در فضای ویژگی شبیه‌سازی شده‌اند. به طوری که در مقایسه با الگوریتم شبیه‌سازی چندنقطه‌ای *MS-CCSIM* که از جستجوی چند-مقیاسی برای کاهش ابعاد مسئله استفاده می‌کند، دقت بالاتری از خود نشان می‌دهد. به طور خلاصه دستاوردهای مهم پژوهشی که بر اساس الگوریتم *CCWSIM* در شبیه‌سازی چندنقطه‌ای در این تحقیق حاصل شده است، به شرح زیر است:

۱. با وجود ابعاد کاهش یافته ضرایب تقریبی موجک گسسته نسبت به الگوی اولیه، بازتولید ساختارهای بر اساس ضرایب تقریبی به دلیل توانایی ذاتی تبدیل موجک گسسته در استخراج الگوها و تغییرپذیری‌های مهم از الگوها، محاسبه

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور انتخاب محل مناسب چاه‌های تولید، چارچوبی مبتنی بر شبیه‌سازی چندنقطه‌ای زمین‌آماري برای مدل‌سازی رخساره‌های ناهمگون مخازن نفتی و متعاقب آن تعیین منطقه‌بندی ژئومکانیکی پیشنهاد شده است. ایجاد یک مدل ژئومکانیکی که بتواند با دقت بالاتری رخساره‌های ناهمگون زیرسطحی را بر مبنای واقعیت‌های فیزیکی مدل‌سازی کند؛ می‌تواند الگوی مناسب‌تری برای انتخاب محل بهینه چاه‌های تولید و در نتیجه کاهش تولید ماسه در حین فرآیند تولید نفت داشته باشد.

در این پژوهش یک الگوریتم شبیه‌سازی چندنقطه‌ای بنام *CCWSIM* ارائه شده است که می‌تواند ساختارهای ناهمگون مخزن را با دقت و راندمان محاسباتی بالاتری مدل‌سازی کند. الگوریتم *CCWSIM* از تابع ضرایب تقریبی تبدیل موجک گسسته برای محاسبه فاصله شباهت بین الگوها استفاده می‌کند. در واقع الگوریتم پیشنهادی تابع همبستگی

انتخاب الگوی مناسب از میان الگوهای کاندید، انتقال از فضای ویژگی به فضای اولیه با استفاده از تبدیل معکوس موجک گسسته با سرعت بسیار بالایی انجام می شود و همین موضوع تأثیر چشم گیری در افزایش راندمان محاسباتی داشته است. ۳. محاسبه همبستگی متقابل بین ناحیه همپوشانی و الگوهای تصویر آموزشی بر اساس ضرایب تقریبی تبدیل موجک گسسته که دارای ابعاد کاهش یافته نسبت به الگوی اولیه هستند، با سرعت بسیار بالاتری انجام می شود و همین موضوع موجب افزایش راندمان محاسباتی الگوریتم *CCWSIM* نسبت به الگوریتم *MS-CCSIM* شده است.

فاصله شباهت بین الگوها در شبکه شبیه سازی و تصویر آموزشی در الگوریتم *CCWIM* با دقت بالایی انجام شده است. به طوری که در تحققات حاصل از الگوریتم *CCWSIM* مقدار ناپیوستگی ها و الگوهای غیرواقعی نسبت به الگوریتم *MS-CCSIM* کمتر است.

۲. انتخاب الگوی مناسب بر اساس داده های شرطی شبکه شبیه سازی از بین الگوهای کاندید در الگوریتم *CCWSIM* به دلیل کاهش ابعاد فضای جستجو الگوها، به مراتب سریع تر از فرآیند جستجوی الگوی مورد نظر در الگوریتم *MS-CCSIM* انجام شده است. همچنین پس از

## مراجع

- Allard, D. (1994). Simulating a geological lithofacies with respect to connectivity information using the truncated Gaussian model, *Geostatistical simulations*, Springer, pp 197-211.
- Arpat, G. B. & Caers, J. (2007). Conditional simulation with patterns, *Mathematical Geology*, Vol. 39(2), pp 177-203.
- Bavand Savadkoobi, M., Tokhmechi, B., Gloaguen, E. & Arab-Amiri, A. R. (2018). A comprehensive benchmark between two filter-based multiple point simulation algorithms, *Journal of Mining and Environment*, (*In Press*).
- Boutt, D., Cook, B. & Williams, J. (2011). A coupled fluid–solid model for problems in geomechanics: application to sand production, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 35(9), pp 997-1018.
- Caers, J. (2001). Geostatistical reservoir modelling using statistical pattern recognition, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 29(3-4), pp 177-188.
- Caers, J. & Zhang, T. (2004). Multiple-point geostatistics: a quantitative vehicle for integrating geologic analogs into multiple reservoir models, pp 383-394.
- Cordua, K. S., Hansen, T. M. & Mosegaard, K. (2015). Improving the pattern reproducibility of multiple-point-based prior models using frequency matching, *Mathematical Geosciences*, Vol. 47(3), pp 317-343.
- Crouse, M. S., Nowak, R. D. & Baraniuk, R. G. (1998). Wavelet-based statistical signal processing using hidden Markov models, *IEEE Transactions on signal processing*, Vol. 46(4), pp 886-902.
- da Cruz, P. S., Horne, R. N. & Deutsch, C. V. (1999). The quality map: a tool for reservoir uncertainty quantification and decision making, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers.

- Deutsch, C. V. (2006). What in the reservoir is geostatistics good for?, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 45(04).
- Deutsch, C. V. & Wang, L. (1996). Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs, *Mathematical Geology*, Vol. 28(7), pp 857-880.
- Efros, A. A. & Freeman, W. T. (2001). Image quilting for texture synthesis and transfer, *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, AC, pp. 341-346.
- Fan, G. & Xia, X.-G. (2003). Wavelet-based texture analysis and synthesis using hidden Markov models, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, Vol. 50(1), pp 106-120.
- Feyen, L. & Caers, J. (2006). Quantifying geological uncertainty for flow and transport modeling in multi-modal heterogeneous formations, *Advances in Water Resources*, Vol. 29(6), pp 912-929.
- Gardet, C., Le Ravalec, M. & Gloaguen, E. (2016). Pattern-based conditional simulation with a raster path: a few techniques to make it more efficient, *Stochastic environmental research and risk assessment*, Vol. 30(2), pp 429-446.
- Goovaerts, P. (1998). Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties, *Biology and Fertility of soils*, Vol. 27(4), pp 315-334.
- Guardiano, F. B. & Srivastava, R. M. (1993). Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments. *Geostatistics Troia'92*, Springer, pp 133-144.
- Honarkhah, M. & Caers, J. (2010). Stochastic simulation of patterns using distance-based pattern modeling, *Mathematical Geosciences*, Vol. 42(5), pp 487-517.
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*, Oxford university press, pp 471-479.
- Larter, S., Adams, J., Gates, I., Bennett, B. & Huang, H. (2006). The origin, prediction and impact of oil viscosity heterogeneity on the production characteristics of tar sand and heavy oil reservoirs, *Canadian International Petroleum Conference*, Petroleum Society of Canada.
- Liu, Y. (2006). Using the Snesim program for multiple-point statistical simulation, *Computers & Geosciences*, Vol. 32(10), pp 1544-1563.
- Mallat, S. G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 11(7), pp 674-693.
- Mariethoz, G. (2018). When should we use multiple-point geostatistics? *Handbook of Mathematical Geosciences: Fifty Years of IAMG*, Springer, 645-653.

- Mariethoz, G. & Caers, J. (2014). Multiple-point geostatistics: stochastic modeling with training images, John Wiley & Sons.
- Mariethoz, G., Renard, P. & Caers, J. (2010). Bayesian inverse problem and optimization with iterative spatial resampling, *Water Resources Research*, Vol. 46(11), pp.
- McLennan, J. & Deutsch, C. V. (2005). Ranking geostatistical realizations by measures of connectivity, SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Society of Petroleum Engineers.
- Morita, N., Whitfill, D. L., Fedde, O. & Lovik, T. (1989). Supplement to SPE 16990, Parametric Study of Sand-Production Prediction: Analytical Approach.
- Palmer, I., Vaziri, H., Willson, S., Moschovidis, Z., Cameron, J. & Ispas, I. (2003). Predicting and managing sand production: A new strategy, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- Papamichos, E., Cerasi, P., Stenebraten, J., Berntsen, A., Ojala, I., Vardoulakis, I., Brignoli, M., Fuh, G.-F., Han, G. & Nadeem, A. (2010). Sand production rate under multiphase flow and water breakthrough, 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium, American Rock Mechanics Association.
- Papamichos, E. & Stavropoulou, M. (1998). An erosion-mechanical model for sand production rate prediction, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 4(35), pp 531-532.
- Parra, A. & Ortiz, J. M. (2011). Adapting a texture synthesis algorithm for conditional multiple point geostatistical simulation, *Stochastic environmental research and risk assessment*, Vol. 25(8), pp 1101-1111.
- Pinheiro, M., Vallejos, J., Miranda, T. & Emery, X. (2016). Geostatistical simulation to map the spatial heterogeneity of geomechanical parameters: A case study with rock mass rating, *Engineering Geology*, Vol. 205, pp 93-103.
- Pyrcz, M. J. & Deutsch, C. V. (2014). Geostatistical reservoir modeling, Oxford university press.
- Pyrcz, M. J. & White, C. D. (2015). Uncertainty in reservoir modeling, *Interpretation*, Vol. 3(2), pp 7-19.
- Rahmati, H., Jafarpour, M., Azadbakht, S., Nouri, A., Vaziri, H., Chan, D. & Xiao, Y. (2013). Review of sand production prediction models, *Journal of Petroleum Engineering*.
- Rezaee, H., Mariethoz, G., Koneshloo, M. & Asghari, O. (2013). Multiple-point geostatistical simulation using the bunch-pasting direct sampling method, *Computers & Geosciences*, Vol. 54, pp 293-308.
- Straubhaar, J., Renard, P., Mariethoz, G., Froidevaux, R & Besson, O. (2011). An improved parallel multiple-point algorithm using a list approach, *Mathematical Geosciences*, Vol. 43(3), pp 305-328.

- Strebelle, S. (2002). Conditional Simulation of Complex Geological Structures Using Multiple-Point Statistics, *Mathematical Geology*, Vol. 34(1), pp 1-21.
- Strebelle, S. B. & Journel, A. G. (2001). Reservoir modeling using multiple-point statistics, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers .
- Tahmasebi, P., Hezarkhani, A. & Sahimi, M. (2012) Multiple-point geostatistical modeling based on the cross-correlation functions, *Computational Geosciences*, Vol. 16(3), pp 779-797.
- Tahmasebi, P., Sahimi, M. & Caers, J. (2014). MS-CCSIM: Accelerating pattern-based geostatistical simulation of categorical variables using a multi-scale search in Fourier space, *Computers & Geosciences*, Vol. 67, pp 75-88.
- Tran, T., Mueller, U. & Bloom, L. (2002). Multi-level Conditional Simulation of Two-Dimensional Random Processes using Haar Wavelets .
- Vardoulakis, I., Stavropoulou, M. & Papanastasiou, P. (1996). Hydro-mechanical aspects of the sand production problem, *Transport in porous media*, Vol. 22(2), pp 225-244.
- Veeken, C., Davies, D., Kenter, C. & Kooijman, A. (1991). Sand production prediction review: developing an integrated approach, *SPE annual technical conference and exhibition*, Society of Petroleum Engineers .
- Willson, S., Moschovidis, Z., Cameron, J. & Palmer, I. (2002). New model for predicting the rate of sand production, *SPE/ISRM Rock Mechanics Conference*, Society of Petroleum Engineers .
- Xiao, Y. & Vaziri, H. H. (2011). Import of strength degradation process in sand production prediction and management, *45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association.
- Xu ,W., Tran, T., Srivastava, R. & Journel, A. G. (1992). Integrating seismic data in reservoir modeling: the collocated cokriging alternative, *SPE annual technical conference and exhibition*, Society of Petroleum Engineers .
- Zhang, T., Switzer, P. & Journel ,A. (2006). Filter-based classification of training image patterns for spatial simulation, *Mathematical Geology*, Vol. 38(1), pp 63-80.