

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت، ژئوفیزیک

گروه مهندسی معدن-اکتشاف

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارائه الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه در زمین‌آمار چندنقطه‌ای

بنیامین شریعتی نیک

اساتید راهنما

دکتر بهزاد تخم‌چی

دکتر مجید انصاری جعفری

اردیبهشت ۱۳۹۵

شماره: ۴۹۹۵/۱۷۲۴
تاریخ: ۱۲/۳/۹۵
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

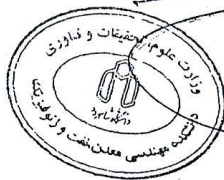
فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد
با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد
خانم / آقای بنیامین شریعتی نیک به شماره دانشجویی ۹۳۱۰۲۱۴ رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف تحت
عنوان ارائه الگوریتم نمونه گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوری در زمین آمار چند نقطه ای که در تاریخ
۱۳۹۵/۲/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : خیلی خوب امتیاز ۹۸.۹۵) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱- عالی (۲۰-۱۹)
۲- بسیار خوب (۹۹-۱۸/۹۹)
۳- خوب (۹۹-۱۷/۹۹)
۴- قابل قبول (۹۹-۱۵/۹۹)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر بهزاد تخم چی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر مجید انصاری جعفری	استادیار	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر رضا خالو کاکائی	استاد	

رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری



تشکر و قدردانی

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه‌سار بنده‌نوازی‌هایش پایان‌نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به‌جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود، هرگز این پایان‌نامه به انجام نمی‌رسید.

ابتدا از اساتید گرانقدرم جناب آقای دکتر بهزاد تخم‌چی و جناب آقای دکتر مجید انصاری جعفری که زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند، کمال سپاس را دارم.

سپاس آخر را به مهربان‌ترین همراهان زندگی‌ام، به پدر و مادر و همسر عزیزم تقدیم می‌کنم که حضورشان در فضای زندگی‌ام مصداق بی‌ریای سخاوت بوده است.

بنیامین شریعتی نیک

اردیبهشت ۱۳۹۵

تعهد نامه

اینجانب بنیامین شریعتی نیک دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن (اکتشاف) دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "ارائه الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه در زمین‌آمار چند نقطه‌ای" تحت راهنمایی دکتر بهزاد تخم‌چی و دکتر مجید انصاری جعفری 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 ۱۳۹۵/۳/۱۶

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها 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

الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو^۱، یکی از الگوریتم‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای^۲ است. در الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو، محدودیت‌هایی در روند شبیه‌سازی، برای کاهش زمان محاسبات در نظر گرفته شده است. این محدودیت‌ها عبارتند از:

- جستجوی درصد محدودی از الگوهای تصویرآموزشی^۳
- یک مقدار مرزی^۴ برای فاصله^۵ بین الگوهای^۶ استخراج‌شده از شبکه شبیه‌سازی^۷ و الگوهای تصویرآموزشی در نظر گرفته می‌شود.

محدودیت‌های فوق‌گرفته منجر به کاهش زمان محاسبات شده‌اند، ولی به علت نادیده گرفتن قسمتی از الگوهای تصویرآموزشی، باعث کاهش پیوستگی ساختارها و همچنین کاهش بازتولید داده‌های شرطی شده‌اند.

هدف از انجام این پایان‌نامه ارائه روشی برای کاهش زمان محاسبات انطباق الگو در تصویرآموزشی است؛ به‌نحوی که در هر مرحله از شبیه‌سازی، بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های بیان شده در الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو، همه الگوهای تصویرآموزشی جستجو شود.

در این پایان‌نامه الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو به نحوی تغییر داده شده است، که از تابع تبدیل فوریه^۸ در محاسبات انطباق الگو در تصویرآموزشی استفاده شود. تحقق‌های شرطی و غیرشرطی با استفاده از دو تصویرآموزشی مصنوعی تهیه شده است. مقایسه تحقق‌های تهیه‌شده به‌وسیله

^۱ Direct sampling bunch-pasting

^۲ Multiple-point geostatistics

^۳ Training image

^۴ Threshold

^۵ Distance

^۶ Template

^۷ Simulation grid

^۸ Fourier transform

الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو و الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه نشان می‌دهد:

- استفاده از تابع تبدیل فوریه موجب افزایش پیوستگی ساختارها شده است.
 - با استفاده از تابع تبدیل فوریه، بازتولید داده‌های شرطی به‌طور متوسط دو برابر شده است.
 - زمان محاسبات برای تحقق‌هایی که با استفاده از تبدیل فوریه تهیه شده است، به‌طور متوسط، ۶/۴٪ کمترین زمان محاسبات الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو است.
- کلمات کلیدی: زمین‌آمار چندنقطه‌ای، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو، تبدیل فوریه، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه، پیوستگی ساختار، زمان محاسبات، بازتولید داده‌های شرطی

مقاله مستخرج از پایان نامه

شریعتی نیک، ب، تخمچی ب، انصاری جعفری م، (۱۳۹۴)، "بهبودی در زمین آمار چندنقطه‌ای، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو"، سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، تهران

فهرست مطالب

فصل اول- کلیات

- ۱-۱ تعریف مسئله ۲
- ۲-۱ سابقه تحقیق ۳
- ۳-۱ هدف و ضرورت پایان نامه ۶
- ۴-۱ ساختار پایان نامه ۶

فصل دوم- زمین آمار چندنقطه‌ای

- ۱-۲ مقدمه ۱۰
- ۲-۲ تعریف رخداد داده چندنقطه‌ای ۱۰
- ۳-۲ زمینه تحقیق ۱۲
- ۴-۲ تصویرآموزشی ۱۳
- ۱-۴-۲ روش‌های شی مبنا ۱۴
- ۲-۴-۲ روش‌های فرآیند مبنا ۱۶
- ۵-۲ مروری بر برخی از الگوریتم‌های زمین آمار چندنقطه‌ای ۱۷
- ۶-۲ الگوریتم انسیم ۱۸
- ۷-۲ الگوریتم اسنسیم ۱۹
- ۸-۲ الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۲۰
- ۹-۲ محاسبه فاصله ۲۴
- ۱-۹-۲ محاسبه فاصله متغیرهای گسسته ۲۴
- ۲-۹-۲ محاسبه فاصله متغیرهای پیوسته ۲۴
- ۱۰-۲ الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو ۲۵
- ۱۱-۲ کاستی‌های الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو ۲۶
- ۱۲-۲ جمع بندی ۲۸

فصل سوم- ساخت داده‌های مصنوعی و روش‌شناسی تحقیق

- ۱-۳ مقدمه ۳۰

۳-۲	داده‌های مصنوعی.....	۳۰
۳-۳	انطباق الگو.....	۳۵
۳-۴	واهمامیخت.....	۳۶
۳-۵	کاربرد واهمامیخت در انطباق الگو.....	۳۶
۳-۶	تبدیل فوریه.....	۴۱
۳-۷	کاربرد تبدیل فوریه در انطباق الگو.....	۴۳
۳-۸	الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه.....	۴۵
۳-۹	جمع‌بندی.....	۴۸

فصل چهارم- نتایج شبیه‌سازی

۴-۱	مقدمه.....	۵۰
۴-۲	استفاده از واهمامیخت در فرآیند انطباق الگو.....	۵۰
۴-۳	پارامترهای ورودی به الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم و نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو.....	۵۲
۴-۴	نتایج شبیه‌سازی غیرشرطی.....	۵۳
۴-۴-۱	نتایج شبیه‌سازی غیرشرطی با استفاده از تصویرآموزشی A.....	۵۳
۴-۴-۲	نتایج شبیه‌سازی غیرشرطی با استفاده از تصویرآموزشی B.....	۵۸
۴-۵	نتایج شبیه‌سازی شرطی.....	۶۳
۴-۵-۱	نتایج شبیه‌سازی شرطی با استفاده از تصویرآموزشی A.....	۶۳
۴-۵-۲	نتایج شبیه‌سازی شرطی با استفاده از تصویرآموزشی B.....	۶۸
۴-۶	بحث.....	۷۳
۴-۶-۱	پیوستگی ساختار.....	۷۴
۴-۶-۲	زمان محاسبات.....	۷۶
۴-۶-۳	بازتولید داده‌های شرطی.....	۷۹
۴-۷	نتیجه‌گیری.....	۸۰

فصل پنجم- نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری ۸۴

۵-۲ پیشنهادات ۸۵

پیوست ۱: الگوریتم نمونه گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه..... ۸۷

مراجع ۹۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ شمایی از یک رخداد داده پنج نقطه‌ای ۱۱
- شکل ۲-۲ یک مدل ساده شی‌مبناء از ساختارهای کانالی ۱۶
- شکل ۳-۲ شمایی از محدودیت‌های اعمال‌شده به شبیه‌سازی فرآیند مبناء ۱۷
- شکل ۴-۲ شمایی از نحوه عملکرد الگوریتم اسنسیم ۲۰
- شکل ۵-۲ شمایی از نحوه عملکرد الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۲۳
- شکل ۶-۲ نمایی شماتیک از تفاوت بین الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم و نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو ۲۵
- شکل ۷-۲ شمایی از انواع الگوهای استخراج گره‌های شبکه شبیه‌سازی ۲۶
- شکل ۱-۳ تصویرآموزشی A توزیع یک متغیر پیوسته ۳۱
- شکل ۲-۳ تصویرآموزشی B مربوط به کانال‌های مدفون ۳۲
- شکل ۳-۳ داده‌های شرطی مربوط به تصویرآموزشی ۳۴
- شکل ۴-۳ داده‌های شرطی مربوط به تصویرآموزشی ۳۴
- شکل ۵-۳ نمونه‌ای از فرآیند انطباق الگو در تصویر ۳۵
- شکل ۶-۳ مکان اولین انطباق الگو در تصویر ۳۸
- شکل ۷-۳ دو مرحله از روند محاسبه واهمامیخت در تصویر ۳۹
- شکل ۱-۴ شبیه‌سازی غیرشرطی تصویرآموزشی A با استفاده از واهمامیخت ۵۱
- شکل ۲-۴ شبیه‌سازی غیرشرطی تصویرآموزشی B با استفاده از واهمامیخت ۵۲
- شکل ۳-۴ تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی A، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۵۶
- شکل ۴-۴ تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی A، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه ۵۸
- شکل ۵-۴ تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی B، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۶۱
- شکل ۶-۴ تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی B، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه ۶۲
- شکل ۷-۴ تحقق‌های شرطی تصویرآموزشی A، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۶۶
- شکل ۸-۴ تحقق‌های شرطی تصویرآموزشی A با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه ۶۸
- شکل ۹-۴ تحقق‌های شرطی تصویرآموزشی B با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۷۱
- شکل ۱۰-۴ تحقق‌های شرطی تصویرآموزشی B با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه ۷۳
- شکل ۱۱-۴ مقایسه پیوستگی ساختاره در تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی A ۷۵

- شکل ۴-۱۲ مقایسه پیوستگی ساختاره در تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی B ۷۶
- شکل ۴-۱۳ نمودار میله‌ای متوسط زمان محاسبات شبیه‌سازی غیرشرطی، تصویرآموزشی A ۷۷
- شکل ۴-۱۴ نمودار میله‌ای متوسط زمان محاسبات شبیه‌سازی غیرشرطی، تصویرآموزشی B ۷۷
- شکل ۴-۱۵ نمودار میله‌ای متوسط زمان محاسبات شبیه‌سازی شرطی، تصویرآموزشی A ۷۸
- شکل ۴-۱۶ نمودار میله‌ای متوسط زمان محاسبات شبیه‌سازی غیرشرطی، تصویرآموزشی B ۷۸
- شکل ۴-۱۷ نمودار میله‌ای متوسط بازتولید داده‌های شرطی، تصویرآموزشی A ۷۹
- شکل ۴-۱۸ نمودار میله‌ای متوسط بازتولید داده‌های شرطی، تصویرآموزشی B ۸۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ محدودیت‌های فرضی اعمال شده به یک مدل شی مبنا..... ۱۵
- جدول ۱-۴ زمان انجام محاسبات برای تحقق‌های غیرشرطی تهیه شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم..... ۵۷
- جدول ۲-۴ زمان انجام محاسبات برای تحقق‌های غیرشرطی تهیه شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۶۱
- جدول ۳-۴ میزان بازتولید داده‌های شرطی برای تحقق‌های شرطی تهیه شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۶۶
- جدول ۴-۴ زمان انجام محاسبات برای تحقق‌های شرطی تهیه شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم..... ۶۷
- جدول ۵-۴ درصد بازتولید داده‌های شرطی برای تحقق‌های تهیه شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۷۲
- جدول ۶-۴ زمان انجام محاسبات برای تحقق‌های تهیه شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ۷۲

فصل اول

کلیات

۱-۱ تعریف مسئله

ایده اولیه استخراج آمار چندنقطه‌ای^۹ از تصویرآموزشی، زمین‌آمار چندنقطه‌ای بر پایه تصویرآموزشی، توسط گواردیانو و سریواستاوا^{۱۰} در سال ۱۹۹۳ ارائه شد [۱]. در این الگوریتم برای شبیه‌سازی هر گره^{۱۱} نامعلوم از شبکه شبیه‌سازی، تصویرآموزشی یک‌بار به‌طور کامل جستجو می‌شود [۲]. ایده آن‌ها به دلیل حجم زیاد محاسبات، جنبه عملی پیدا نکرد.

یکی از محدودیت‌های الگوریتم‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای حجم زیاد محاسبات است. الگوریتم‌های ارائه‌شده، با اعمال محدودیت‌هایی در روند جستجوی تصویرآموزشی، راندمان محاسبات را افزایش داده‌اند. الگوریتم اسنسیم^{۱۲} در سال ۲۰۰۰ توسط استربل^{۱۳} ارائه شد [۱]. اسنسیم اولین الگوریتم کاربردی در حوزه زمین‌آمار چندنقطه‌ای بر پایه تصویرآموزشی است. این الگوریتم با معرفی ساختاری به نام درخت جستجو^{۱۴} راندمان محاسبات را افزایش داد و باعث شد که زمین‌آمار چندنقطه‌ای جنبه عملی به خود بگیرد.

^۹ Multiple-point statistics

^{۱۰} Guardiano and Srivastava

^{۱۱} Node

^{۱۲} SNESIM

^{۱۳} Strebel

^{۱۴} Search tree

الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم^{۱۵} در سال ۲۰۱۰ توسط ماریتوز^{۱۶} و همکاران ارائه شد [۳]. در این الگوریتم برای کاهش زمان محاسبات محدودیت‌هایی به روند محاسبات انطباق الگو در تصویرآموزشی اعمال شده است، که عبارتند از:

- جستجوی درصد محدودی از الگوهای تصویرآموزشی
 - یک مقدار مرزی برای فاصله بین الگوهای استخراج‌شده از شبکه شبیه‌سازی و الگوهای تصویرآموزشی در نظر گرفته می‌شود.
- محدودیت‌های فوق گرچه منجر به کاهش زمان محاسبات شده‌اند، ولی به علت نادیده گرفتن قسمتی از الگوهای تصویرآموزشی باعث کاهش پیوستگی ساختارها و همچنین کاهش بازتولید داده‌های شرطی شده‌اند.
- با ارائه راهکاری برای کاهش زمان محاسبات انطباق الگو در تصویرآموزشی، امکان جستجوی همه‌ی الگوهای موجود در تصویرآموزشی در هر مرحله از روند شبیه‌سازی میسر خواهد شد. این مسئله می‌تواند سبب افزایش پیوستگی ساختارها و همچنین افزایش بازتولید داده‌های شرطی بشود.

۲-۱ سابقه تحقیق

پیش از معرفی زمین‌آمار و روش‌های تخمین زمین‌آماري، به‌طورکلی دو دسته روش‌های درون‌یابی مورد استفاده قرار می‌گرفتند، که عبارتند از:

- روش‌های هندسی
- روش‌های وزن بر اساس فاصله

^{۱۵} Direct sampling algorithm

^{۱۶} Mariethoz

از جمله روش‌های هندسی می‌توان به روش‌های چندضلعی، مثلث و مقاطع عرضی اشاره کرد. این روش‌ها به‌طور عمده در زمانی که محاسبات بدون استفاده از کامپیوتر انجام می‌شد، کاربرد داشتند. [۴].

بعد از ورود کامپیوتر به عرصه علوم زمین بیشتر از روش‌های وزن‌دهی بر اساس فاصله استفاده شده است. اساس این روش‌ها بر در نظر گرفتن شعاع تاثیر برای هر داده در فضای تخمین است. در این روش‌ها وزن‌دهی خطی به داده‌هایی که در همسایگی یک داده قرار دارند بر اساس فاصله صورت می‌گیرد. مشکل این روش‌ها در خطی فرض کردن رابطه بین نقاط است. این روش‌ها توانایی ارائه یک مدل تخمین‌گر را نداشتند، بنابراین در مرحله بعد روش‌های زمین‌آماري معرفی شدند [۴].

علم زمین‌آمار در اواخر دهه ۱۹۵۰ بر پایه نظریه متغیر ناحیه‌ای^{۱۷} پایه‌گذاری شد [۵]. در ابتدا هدف زمین‌آمار حل مشکلات تخمین در حوزه معدن با استفاده از اطلاعات مغزه‌های حفاری بود. ولی خیلی زود در حوزه‌های دیگر نیز کاربرد پیدا کرد. این علم به‌طور معمول در حوزه‌های معدن و نفت کاربرد داشت ولی اکنون در حوزه‌های آب‌شناسی، مطالعات زیست‌محیطی و علم مواد و ... کاربرد دارد [۶].

در اواخر دهه ۱۹۷۰ زمین‌آمار به‌صورت گسترده‌ای در صنعت نفت و اساساً برای مدل‌سازی هندسه مخزن مورد استفاده قرار گرفت. برخی از کاربردهای آن عبارتند از [۶]:

- تخمین مکان فصل مشترک لایه‌های زمین‌شناسی
- تخمین تخلخل متوسط یا میزان تولید نفت با استفاده از داده‌های چاه
- ترکیب اطلاعات حاصل از داده‌های چاه و لرزه‌نگاری

در اواخر دهه ۱۹۸۰ علاوه بر سهم اساسی زمین‌آمار در توصیف خواص مخزن، استفاده از آن در زمینه‌های دیگری از صنعت نفت گسترش یافت که هدف اصلی آن تولید یک مدل عددی سه‌بعدی از توزیع تراوایی و

^{۱۷} Regionalized variable

تخلخل مخزن با استفاده از روش‌های زمین‌آماري بود. در دهه ۱۹۹۰ زمین‌آمار حول سه محور گسترش یافت [۶]:

- گسترش مدل‌های جدید برای توصیف مخزن
- استفاده بیشتر از داده‌های لرزه‌ای
- تلفیق داده‌ها برای مدل‌سازی مخزن

هدف اصلی این مطالعات پیش‌بینی تولید مخزن و ارائه نقاط مطلوب جهت حفاری چاه‌های جدید بوده است.

زمین‌آمار دونقطه‌ای^{۱۸} در مدل‌سازی ساختارهای پیچیده نظیر کانال‌های سینوسی و کانال‌های مدفون^{۱۹} مدلی را ارائه می‌دهد، که معرف تغییرپذیری و پیوستگی حقیقی این ساختارها نیست. پس از شناخت محدودیت‌های زمین‌آمار دونقطه‌ای، روش‌های متعددی برای بازتولید الگوهای پیچیده زمین‌شناسی ارائه شدند [۱].

گواردیانو و سریواستاوا ایده استفاده از یک منبع خارجی به نام تصویرآموزشی را برای استخراج آمار چندنقطه‌ای مطرح کردند، بر اساس همین ایده، الگوریتم‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای بسط و گسترش یافتند. در ابتدا ایده استفاده از تصویرآموزشی به علت حجم محاسبات بالای آن جنبه عملی نداشت. استربل اولین الگوریتم کاربردی زمین‌آمار چندنقطه‌ای را ارائه داد [۷].

در طی سال‌های اخیر زمین‌آمار چندنقطه‌ای، به‌عنوان یک خانواده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تصادفی بسط و گسترش یافته است. زمین‌آمار چندنقطه‌ای در زمینه‌های مختلف علوم از جمله، معدن، نفت، دورسنجی، علوم خاک و هواشناسی کاربرد دارد [۸].

^{۱۸} Two-point geostatistics

^{۱۹} Meander channel

۱-۳ هدف و ضرورت پایان نامه

همانطور که در بخش ۱-۱ بیان شد، یکی از محدودیت‌های اساسی الگوریتم‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای، حجم زیاد محاسبات است. راهکارهای متفاوتی برای رفع این مشکل ارائه شده است، که هدف آن‌ها کاهش محاسبات مربوط به فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی است.

هدف این پایان‌نامه ارائه راهکاری برای بهبود سرعت محاسبات در روند انطباق الگو در تصویرآموزشی است. ارائه چنین راهکاری می‌تواند به حذف محدودیت‌های اعمال‌شده در الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو بر روند انطباق الگو در تصویرآموزشی منجر شود، و در نتیجه به افزایش پیوستگی ساختارهای بازتولید شده و افزایش بازتولید داده‌های شرطی کمک کند.

۱-۴ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم، ابتدا مفاهیم پایه‌ای زمین‌آمار چندنقطه‌ای، از جمله آمار چندنقطه‌ای و تصویرآموزشی توضیح داده شده است. سپس دو مورد از متداول‌ترین روش‌های تهیه تصویرآموزشی معرفی شده‌اند. در ادامه فصل چهارم مورد از الگوریتم‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای معرفی شده‌اند. در انتهای فصل محدودیت‌های الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو توضیح داده شده است.

در فصل سوم، ابتدا تصاویر آموزشی مصنوعی استفاده شده در این مطالعه نمایش داده شده است، سپس نحوه تهیه داده‌های شرطی مصنوعی شرح داده شده است. در ادامه مفهوم واهمامیخت و کاربرد آن در فرآیند انطباق الگو توضیح داده شده است. در ادامه فصل کاربرد تبدیل فوریه در فرآیند انطباق الگو معرفی شده است و سپس الگوریتمی بر مبنای تبدیل فوریه ارائه شده است.

در فصل چهارم نتایج مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو و الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه آورده شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از دو

تصویرآموزشی مصنوعی تهیه شده است. نتایج شبیه سازی های غیرشرطی و شرطی به صورت گرافیکی نمایش داده شده است. پارامترهای زمان محاسبات و بازتولید داده های شرطی برای همه تحقق ها در قالب جدول آورده شده اند. و در انتهای فصل به مقایسه نتایج شبیه سازی ها پرداخته شده است.

در فصل پنجم نتایج بدست آمده ارائه شده است و پیشنهاداتی برای مطالعات بعدی ارائه شده است.

فصل دوم

زمین آمار چند نقطه‌ای

۲-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به معرفی مفهوم آمار چندنقطه‌ای به عنوان اساسی‌ترین مفهوم در زمین آمار چندنقطه‌ای پرداخته شده است. سپس الگوریتم‌هایی که آمار چندنقطه‌ای را مورد استفاده قرار می‌دهند مرور شده است. در قسمت بعد تصویرآموزشی و دو مورد از مهم‌ترین روش‌های تهیه آن معرفی شده است. الگوریتم‌های مختلفی در زمین آمار چندنقطه‌ای ارائه شده است، که به چهار مورد از آن‌ها اشاره شده است. در انتها الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو و کاستی‌های این الگوریتم توضیح داده شده است.

۲-۲ تعریف آمار چندنقطه‌ای

فرض کنید Z معرف یک ویژگی زمین‌شناسی باشد. اگر این ویژگی معرف یک متغیر گسسته^{۲۰} باشد، فضا را می‌توان به K کلاس افراز کرد. همچنین اگر ویژگی Z معرف یک متغیر پیوسته^{۲۱} باشد، فضا را می‌توان به $K-1$ مقدار مرزی تفکیک کرد [۹].

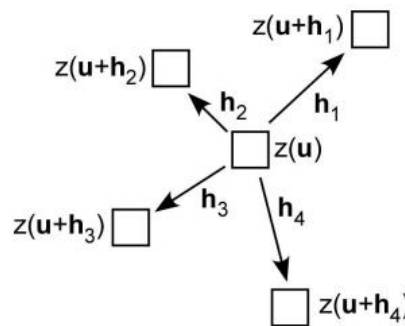
Z_u مقدار ویژگی Z در مکان u در نظر گرفته شده است، مقدار ویژگی Z در این مکان مجهول است. $z(u + h_\alpha)$ معرف n مقدار معلوم ویژگی Z است، که در مکان‌های $u + h_\alpha$ قرار دارند. بردار h_α که در آن

^{۲۰} Categorical

^{۲۱} Continuous

$\alpha = 1, \dots, n$ است، معرف برداری است که مکان داده نامعلوم Z_u را به مکان داده‌های معلوم $z(u + h_\alpha)$ ارتباط می‌دهد [۹].

یک آمار چندنقطه‌ای، با نماد d_n نشان داده می‌شود و به عنوان موقعیت قرارگیری نسبی داده‌های معلوم نسبت به داده نامعلوم تعریف می‌شود. شکل ۱-۲ شمایی از یک آمار پنج نقطه‌ای با چهار نقطه معلوم است [۹].



شکل ۱-۲ شمایی از یک آمار پنج نقطه‌ای [۹]

زمانی که شبیه‌سازی در سه بعد انجام می‌گیرد، برای توصیف عملی ناهمگنی منطقه، نیاز به آمارهای با نقاط بیشتر (۱۰ تا ۴۰ نقطه‌ای) است [۹].

احتمال وقوع یک آمار چندنقطه‌ای، با فرض وجود پایایی^{۲۲}، به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$P(Z_{(u)} = Z_k \parallel d_n) \quad ۱-۲$$

در رابطه ۱-۲، $Z_{(u)}$ معرف مقدار متغیر Z در مکان u است، که مقدار آن مجهول است. Z_k مقدار متغیر Z در مکان k است. طبق رابطه ۱-۲، در صورتی که آمار چندنقطه‌ای d_n در مکان k انطباق داشته باشد، مقدار $Z_{(u)}$ برابر با Z_k قرار داده می‌شود.

^{۲۲} Stationary

۳-۲ زمینه تحقیق

روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند تا به وسیله آن‌ها آمارهای چندنقطه‌ای استخراج شوند و در فرآیند شبیه‌سازی مورد استفاده قرار بگیرند. آمارهای چندنقطه‌ای به‌طور کلی در چهار دسته روش مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰]:

- روش‌های شبیه‌سازی آنیلینگ^{۲۳} جهت استخراج تعدادی از آمارهای چندنقطه‌ای از یک تصویرآموزشی، پیش از انجام فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱ و ۱۲]. در این روش، آمارهای مرتبه بالا به‌عنوان یک محدودیت در هر مرحله از تولید تحقیقات به شبیه‌سازی اعمال می‌شوند. ولی در عمل فقط تعداد کمی از آمارها را می‌توان به‌صورت همزمان به‌عنوان محدودیت مورد استفاده قرار داد.
- تجملانند^{۲۴} در سال ۱۹۹۶ یک رویکرد آماری در روش میدان تصادفی مارکوف^{۲۵} ارائه کرد [۱۳]. مشکل این روش در راندمان محاسباتی بسیار پایین آن بود که به دلیل تکراری بودن فرآیند شبیه‌سازی است. این نقطه‌ضعف منجر به عدم کاربرد این روش برای شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی و شبکه‌های بزرگ شبیه‌سازی شد.
- کرز و جورنل^{۲۶} در سال ۱۹۹۸ و کرز و همکاران در سال ۱۹۹۹ روشی را بر مبنای کاربرد شبکه‌های عصبی ارائه دادند [۱۴ و ۱۵]. در این روش آمارهای چندنقطه‌ای از یک تصویرآموزشی استخراج شده و با استفاده از شبکه عصبی احتمال حضور یک رخساره در گره موردنظر محاسبه می‌شود. این روش نتایج قابل قبولی را ارائه داده است. با این وجود مشکل

^{۲۳} Simulated Annealing

^{۲۴} Tjelmeland

^{۲۵} Markov random field

^{۲۶} Caers and Journell

آن در راندمان محاسباتی پایین آن است، به علت اینکه که برای هر گره در فرآیند شبیه‌سازی شبکه‌عصبی باید یک‌بار بهینه‌سازی شود.

- سریواستاوا^{۲۷} در سال ۱۹۹۲ و سریواستاوا و گواردیانو در سال ۱۹۹۳ ایده‌ای را مطرح کردند که در نهایت منجر به ارائه الگوریتم‌های زمین‌آمار نوین شد [۲ و ۱۶]. ایده آن‌ها بر پایه استخراج آمارهای چندنقطه‌ای از تصویرآموزشی و ترکیب آن‌ها با استفاده از قواعد احتمالاتی است. اساس الگوریتم‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای تصویرآموزشی است. کاربرد تصویرآموزشی در فرآیند شبیه‌سازی زمین‌آمار چندنقطه‌ای، مشابه با واریوگرام در زمین‌آمار دونقطه‌ای است، با این تفاوت که با استفاده از تصویرآموزشی می‌توان ارتباط فضایی بین بیش از دو نقطه را به‌طور همزمان برقرار کرد درحالی‌که واریوگرام ارتباط فضایی بین دو نقطه را در هر لحظه اندازه‌گیری می‌کند [۷]. در ادامه به توضیح مفهوم تصویرآموزشی و دو مورد از مهم‌ترین روش‌های تهیه آن خواهیم پرداخت.

۲-۴ تصویرآموزشی

تصویرآموزشی یک مفهوم جدید و اساسی است، که در زمین‌آمار چندنقطه‌ای ارائه شده است. این مفهوم به‌عنوان یک تصویر سه‌بعدی فرضی از الگوهای زمین‌شناسی تعریف می‌شود. تصویرآموزشی باید تمام اشکال و ابعاد رخساره‌های زمین‌شناسی زیرسطحی که تصور می‌شود وجود داشته باشند را ارائه دهد [۱].

تصویرآموزشی یک مدل کاملاً فرضی است، که شامل هیچ اطلاعات دقیقی از موقعیت فضایی رخساره‌های زمین‌شناسی نیست و به هیچ داده سخت و یا نرمی شرطی نمی‌شود. به‌طور دقیق تصویرآموزشی، یک تصویر رقومی شده از رخنمون‌ها و یا نقشه‌های رسم شده به‌وسیله یک زمین‌شناس

^{۲۷} Srivastava

است که به صورت یک تصویرآموزشی اولیه در نظر گرفته می شود [۷]. در زیر دو مورد از مهم ترین روش های تهیه تصویرآموزشی توضیح داده خواهد شد.

۲-۴-۱ شبیه سازی شی مبنا^{۲۸}

روش های شی مبنا (که روش های بولین^{۲۹} نیز نامیده می شوند) یک خانواده از روش های شبیه سازی تصادفی^{۳۰} هستند که به صورت گسترده ای در مدل سازی ساختارهای زمین شناسی مورد استفاده قرار گرفته اند. مشکل اساسی این روش ها در شرطی شدن به داده های محلی است. برای تهیه مدل های اولیه تصویرآموزشی از شبیه سازی های غیرشرطی شی مبنا به طور گسترده ای استفاده می شود [۱۷].

اولین پیش نیاز برای انجام شبیه سازی های شی مبنا، توصیف ناهمگنی رخساره های زمین شناسی به وسیله پارامترهای هندسی است. به عبارت دیگر ساختارهای زیرسطحی باید به وسیله اشکال هندسی توصیف شوند. دومین پیش نیاز وجود اطلاعات کافی از نحوه توزیع رخساره های زمین شناسی است [۹]. برای فهم بهتر نحوه عملکرد شبیه سازی های غیرشرطی شی مبنا محدودیت های اعمال شده به یک شبیه سازی غیرشرطی شی مبنا جهت تهیه یک تصویرآموزشی در جدول ۱-۲ ارائه شده است.

در ستون اول جدول ۱-۲ یک سری رخساره های زمین شناسی تعریف شده است. نحوه عملکرد شبیه سازی های شی مبنا به این صورت است، ابتدا رخساره ها با توجه به اطلاعات ستون دوم جدول ۱-۲ در فضای تخمین تعریف می شوند، سپس این اشکال هندسی در فضای تخمین به صورت تصادفی گسترده می شوند و در طی فرآیند شبیه سازی، تولید و حذف می شوند و تغییر شکل می دهند تا پارامترهای آماری توزیعی که در ستون سوم جدول ۱-۲ آورده شده است، بازتولید شوند [۱۸].

^{۲۸} Object-based methods

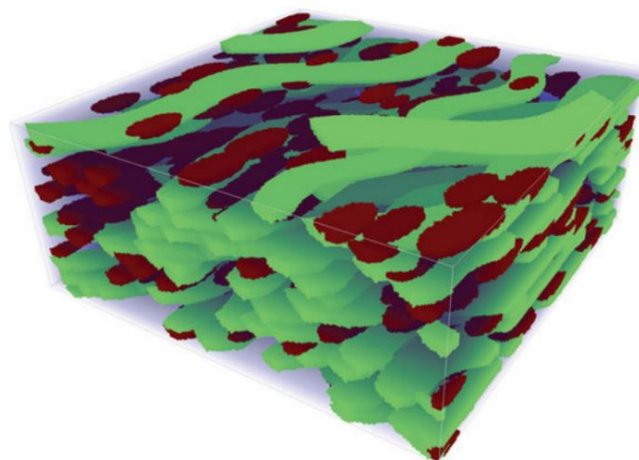
^{۲۹} Boolean methods

^{۳۰} Stochastic simulations

جدول ۱-۲ محدودیت‌های فرضی اعمال شده به یک مدل شی‌مبنا [۱۸].

نوع رخساره‌ها	توضیحات فرضی	چینه‌شناسی	طول (اینچ)	عرض (اینچ)	ضخامت (اینچ)
ساختارهای بیضوی ماسه‌ای	بیضی‌های کشیده	همه‌جا حضور دارد	۲۰۰۰-۴۰۰۰	۵۰۰	۳-۷
صفحه‌های ماسه- ای	صفحه‌های مستطیلی	همه‌جا حضور دارد و به‌وسیله ماسه فرسایش یافته	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۶
صفحه‌های شیلی	صفحه‌های مستطیلی	در بالای مخزن حضور دارد	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۸
ماسه‌های دهانه رودخانه	صفحه‌های مستطیلی	بالای دهانه رودخانه حضور دارد	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۴

محدودیت‌هایی که در جدول فوق بیان شده است، از گزارش‌های زمین‌شناسی و اطلاعات بررسی‌های لرزه نگاری و... می‌تواند بدست آورده شود.

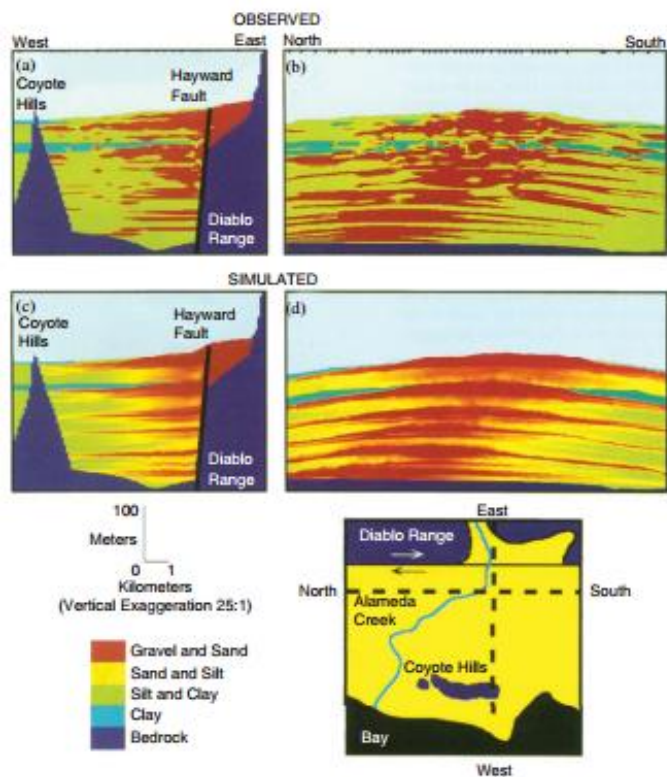


شکل ۲-۲ یک مدل ساده شی مبنا از ساختارهای کانالی. تصویر با استفاده از نرم افزار TiGenerator ایجاد شده است. ابعاد شبکه: ۱۰۰*۲۵۰*۲۵۰ گره (Maharaja, 2008) [۱۷].

۲-۴-۲ روش‌های فرآیند مبنا^{۳۱}

نحوه عملکرد روش‌های فرآیند مبنا و روش‌های شی مبنا مشابه است. تفاوت اصلی بین روش‌های شی مبنا و روش‌های فرآیند مبنا در نوع محدودیت‌هایی است که به مدل اعمال می‌شود. محدودیت‌ها در روش فرآیند مبنا بر اساس قوانین فیزیکی، شیمیایی و شیمی-فیزیکی اعمال می‌شوند [۱۷]. به عنوان مثال در یک ذخیره معدنی، می‌توان از قوانینی که بر اساس آن‌ها ماگما صعود کرده و فازهای مختلف حرارت و فشار را طی می‌کند و در نهایت قوانین حاکم بر ته‌نشست مواد معدنی در مراحل انتهایی مهاجرت ماگما استفاده کرد [۴]. شکل ۲-۳ شمایی از محدودیت‌های اعمال شده به روش‌های فرآیند مبنا را نمایش می‌دهد [۱۷].

^{۳۱} process-based methods



شکل ۲-۳ شمایی از محدودیت‌های اعمال شده به شبیه‌سازی فرآیند مبنا [۱۷].

۵-۲ مروری بر برخی از الگوریتم‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه زمین‌آمار چندنقطه‌ای انجام شده است و الگوریتم‌های زیادی بسط و توسعه پیدا کرده‌اند. این الگوریتم‌ها روش‌های متفاوتی جهت استخراج و ذخیره الگوهای چندنقطه‌ای مورد استفاده قرار داده‌اند. در ادامه به برخی از مهم‌ترین الگوریتم‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای اشاره خواهد شد.

۲-۶ الگوریتم انسیم^{۳۲}

الگوریتم انسیم توسط گواردیانو و سریواستاوا در سال ۱۹۹۳ ارائه شد. این الگوریتم اولین روش ارائه شده در استخراج آمارهای چندنقطه‌ای با استفاده از تصویرآموزشی و ترکیب آن با قوانین آمار و احتمالاتی است. این الگوریتم به علت پایین بودن راندمان محاسبات، کاربرد عملی پیدا نکرد [۱۰].

پارامترهای زیر به عنوان ورودی به الگوریتم انسیم وارد می‌شوند [۲]:

- یک متغیر گسسته برای انجام شبیه‌سازی، که با نماد z مشخص می‌شود.
 - ایجاد یک شبکه شبیه‌سازی که گره‌های آن با نماد x مشخص می‌شوند.
 - ایجاد یک تصویرآموزشی برای متغیر z ، جهت استخراج الگوهای شبکه شبیه‌سازی
 - داده‌های برداشت‌شده مانند داده‌های حفاری و ...
 - تعریف یک الگو
- مراحل زیر پیش از شروع فرآیند شبیه‌سازی انجام می‌شود:
- قرار دادن داده‌های شرطی در شبکه شبیه‌سازی
 - تعریف یک مسیر شبیه‌سازی در شبکه شبیه‌سازی
 - مراحل زیر تا پایان شبیه‌سازی، برای تمام گره‌های شبیه‌سازی نشده تکرار می‌شود:
- در نظر گرفتن گره نامعلوم x در شبکه شبیه‌سازی
 - تعریف یک رخداد داده برای گره x ، الگوی استخراج‌شده از شبکه شبیه‌سازی رخداد داده نامیده می‌شود.
 - انطباق رخداد داده با همه الگوهای موجود در تصویرآموزشی
 - محاسبه احتمال رخداد یک واقعه در گره x

^{۳۲} ENESIM

- تعیین الگو با بیشترین احتمال وقوع
 - نسبت دادن مقدار گره مرکزی الگو به گره مرکزی رخداد داده x
 - پایان فرآیند شبیه‌سازی
- خروجی الگوریتم، یک شبکه شبیه‌سازی است، که تمام گره‌های آن دارای مقدار هستند.

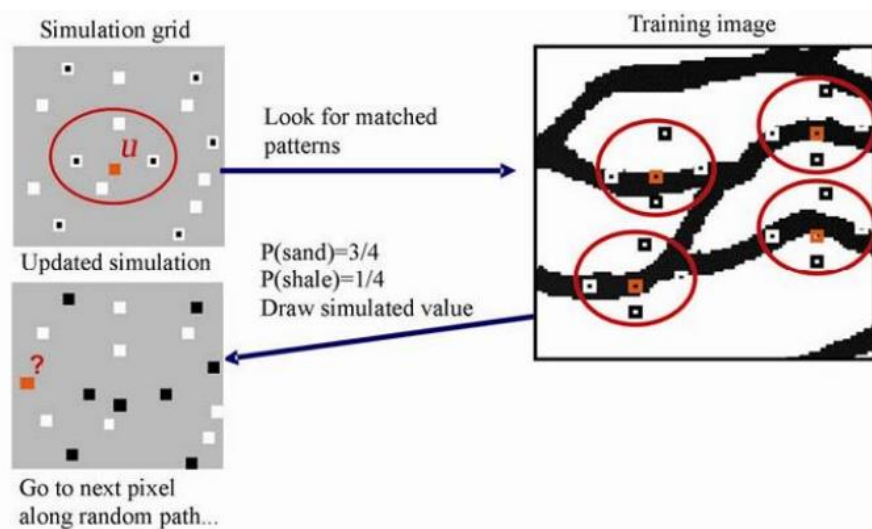
۷-۲ الگوریتم انسسیم

بعد از ارائه الگوریتم انسسیم و شناخت محدودیت‌های این الگوریتم مطالعات زیادی انجام شد، که سرانجام منجر به ارائه اولین الگوریتم کاربردی زمین‌آمار چندنقطه‌ای به نام انسسیم شد [۷]. استربل در سال ۲۰۰۰ در پایان‌نامه دکتری خود الگوریتم انسسیم را ارائه کرد. این الگوریتم امروزه به‌شدت مورد استفاده کاربران قرار دارد. شمایی از نحوه عملکرد الگوریتم انسسیم در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است.

پارامترهای زیر به‌عنوان ورودی به الگوریتم وارد می‌شوند [۴]:

- متغیری گسسته جهت انجام شبیه‌سازی، که با نماد z مشخص می‌شود.
- ایجاد یک شبکه شبیه‌سازی که گره‌های آن با نماد x مشخص می‌شوند.
- ایجاد یک تصویرآموزشی برای متغیر گسسته
- داده‌های شرطی که از منطقه مورد بررسی برداشت شده است.
- تعریف الگوی جستجو که به خواص آنیزوتروپی منطقه وابسته است.
- برای هر گره در شبکه شبیه‌سازی مراحل زیر تکرار می‌شوند:
- داده‌های شرطی، که خود شامل داده‌های سخت و داده‌های از پیش شبیه‌سازی شده هستند از پنجره جستجو استخراج می‌شوند.

- تصویرآموزشی برای الگوی استخراج شده جستجو خواهد شد، و تمامی الگوهای مشابه در ساختاری تحت عنوان درخت جستجو ذخیره می شوند.
- احتمال شرطی حضور هر یک از رخساره های مورد شبیه سازی محاسبه می شود.
- نقطه شبیه سازی شده به مجموعه داده های شرطی اضافه شده و نقطه بعدی شبیه سازی می شود.
- پایان شبیه سازی.



شکل ۲-۴ شمایی از نحوه عملکرد الگوریتم اسنسیم [۱۵]

۲-۸ الگوریتم نمونه گیری مستقیم^{۳۳}

الگوریتم نمونه گیری مستقیم توسط ماریتوز و همکاران در سال ۲۰۱۰ ارائه شد [۳]. این الگوریتم توانایی شبیه سازی متغیرهای گسسته نظیر نوع سنگ، و همچنین متغیرهای پیوسته نظیر تراوایی، تخلخل و عیار ماده معدنی و همچنین توانایی انجام شبیه سازی های چندمتغیره را دارد. مهم ترین بهبودی که می توان برای این الگوریتم در نظر گرفت، سادگی و انعطاف پذیری الگوریتم در شبیه سازی انواع متغیرها است [۲۰].

^{۳۳} Direct sampling

همان گونه که در بخش ۲-۷ بیان شد، الگوریتم اسنسیم برای شبیه سازی هر گره نامعلوم از شبکه شبیه سازی، احتمال وقوع یک رخداد را در آن گره محاسبه می کند [۱۰]، ولی در الگوریتم نمونه گیری مستقیم مبنای شبیه سازی و تخمین یک گره بر اساس فاصله بین رخداد داده استخراج شده از شبکه شبیه سازی و الگوی استخراج شده از تصویرآموزشی است. نحوه عملکرد الگوریتم نمونه گیری مستقیم به صورت شماتیک در شکل ۲-۵ نمایش داده شده است [۳].

پارامترهای ورودی به الگوریتم به شرح زیر هستند:

- شبکه شبیه سازی که گره های آن با نماد x مشخص شده است.
- تصویرآموزشی که گره های آن با نماد y مشخص شده است.
- داده های شرطی، مانند داده های چال های حفاری، که در صورت وجود با نماد $z(x_i)$ مشخص می شوند که در آن $i \in [1, \dots, N]$ است. هر کدام از داده های شرطی در نزدیک ترین گره در شبکه شبیه سازی قرار می گیرند. در صورتی که چند داده شرطی در یک گره خاص قرار بگیرند، باید نزدیک ترین آن ها به مرکز گره را به گره مورد نظر نسبت داد.

مراحل انجام شبیه سازی به ترتیب زیر انجام خواهد شد:

- داده های شرطی به نحوی که بیان شد، در شبکه شبیه سازی قرار داده می شوند.
 - یک مسیر شبیه سازی در شبکه شبیه سازی برای گره های باقی مانده تعریف می شود. مسیر شبیه سازی، یک بردار شامل مختصات همه گره های شبیه سازی نشده در شبکه شبیه سازی است. این مسیر می تواند تصادفی و یا یک طرفه باشد.
 - برای هر گره شبیه سازی نشده x مراحل زیر تکرار خواهند شد:
 - تعداد حداکثر n داده $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ در همسایگی گره مورد نظر در نظر گرفته می شود.
- این داده ها یا داده های شرطی هستند که در ابتدای شبیه سازی در شبکه شبیه سازی

قرار گرفته‌اند و یا داده‌های شبیه‌سازی شده هستند، که از انجام شبیه‌سازی در مراحل قبل بدست آمده‌اند.

- مختصات همسایگی‌های گره x با استفاده از بردار $L = \{h_1, \dots, h_n\}$ مشخص می‌شود، به‌طوری‌که بردار h برابر است با:

$$h = \{x_1 - x, \dots, x_n - x\} \quad 2-2$$

در صورتی‌که هیچ نقطه شرطی در همسایگی گره x یافت نشود، یک گره به‌صورت تصادفی از تصویرآموزشی انتخاب می‌شود و به گره x نسبت داده خواهد شد.

- رخداد داده استخراج‌شده از شبکه شبیه‌سازی با نماد d_n نمایش داده می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d_n(x, L) = \{Z(x + h_1), \dots, Z(x + h_n)\} \quad 3-2$$

- پنجره جستجو در تصویرآموزشی تعریف می‌شود. این پنجره مطابق شکل ۲-۵ با توجه به مقادیر حداکثر و حداقل بردار L تعریف می‌شود.

- یک گره به‌صورت تصادفی از پنجره جستجو انتخاب می‌شود و جستجو از آن گره آغاز می‌شود. برای هر گره y در تصویرآموزشی مراحل زیر را تکرار می‌شود:

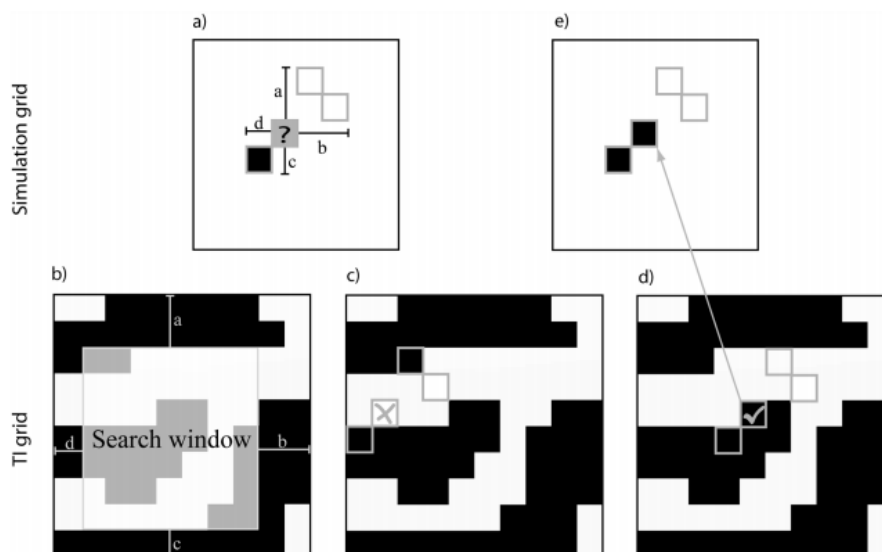
- الگوی داده d_n از پنجره جستجو استخراج می‌شود.

$$d_n(y, L) = \{Z(y + h_1), \dots, Z(y + h_n)\} \quad 4-2$$

- فاصله بین رخداد داده استخراج‌شده از شبکه شبیه‌سازی و الگوی تصویرآموزشی با نماد $d\{d_n(x, L), d_n(y, L)\}$ نشان داده می‌شود. محاسبه فاصله بین الگوها،

برای متغیرهای گسسته و متغیرهای پیوسته متفاوت است. این مفهوم در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد.

- در صورتی که مقدار فاصله محاسبه شده در هر مرحله، کمترین مقدار را در بین فواصل محاسبه شده در مراحل قبل داشته باشد، مختصات گره y و مقدار آن در تصویرآموزشی، که با نماد Z_y نمایش داده می شود، ذخیره خواهند شد.
- در صورتی که مقدار فاصله محاسبه شده در هر مرحله، از یک مقدار مرزی از پیش تعیین شده کمتر باشد، مقدار گره x ، برابر با مقدار Z_y قرار داده می شود.
- پارامتر F به عنوان درصدی از ابعاد تصویرآموزشی در نظر گرفته می شود. اگر تعداد تکرارهای مراحل قبل از F بیشتر شود، جستجو متوقف شده و مقدار Z_y ، متناظر با کمترین فاصله به گره x نسبت داده خواهد شد.



شکل ۲-۵ شمایی از نحوه عملکرد الگوریتم نمونه گیری مستقیم، در تصویرآموزشی تنها دو رخساره در نظر گرفته شده است که با رنگ های سفید و سیاه تفکیک شده اند [۳].

۹-۲ محاسبه فاصله

فاصله بین رخداد داده استخراج شده از شبکه شبیه سازی که با نماد $d_n(x, L)$ مشخص می شود و الگوی استخراج شده از تصویرآموزشی، که با نماد $d_n(y, L)$ نمایش داده می شود، برای اولین بار در الگوریتم نمونه گیری مستقیم معرفی شده است. فاصله بین الگوها یک مفهوم قوی و انعطاف پذیر است که می تواند در شبیه سازی متغیرهای گسسته و پیوسته بکار برده شود [۳].

۱-۹-۲ محاسبه فاصله متغیرهای گسسته

فاصله متغیرهای گسسته با استفاده از رابطه ۵-۲ محاسبه می شود. در این رابطه میزان عدم انطباق گره های دو الگو با استفاده از رابطه فاصله همینگ^{۳۴}، اندازه گیری می شود. در صورتی که مقادیر متناظر گره ها در دو الگو باهم برابر نباشد، مقدار a ، صفر و در غیر این صورت یک قرار داده می شود. فاصله دو الگو با استفاده از فرمول زیر می تواند محاسبه شود [۳]:

$$d\{d_n(x), d_n(y)\} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad \in [0, 1] \quad ۵-۲$$

$$a_i = \begin{cases} 0 & \text{if } Z(x_i) = Z(y_i) \\ 1 & \text{if } Z(x_i) \neq Z(y_i) \end{cases}$$

۲-۹-۲ محاسبه فاصله متغیرهای پیوسته

در صورتی که متغیر مورد نظر از نوع پیوسته باشد، مقدار فاصله به وسیله فرمول تفریق اقلیدسی^{۳۵}، طبق رابطه ۶-۲ محاسبه می شود. بدین معنی که گره های معادل در الگوهای استخراج شده از تصویرآموزشی و شبکه

^{۳۴} Hamming distance

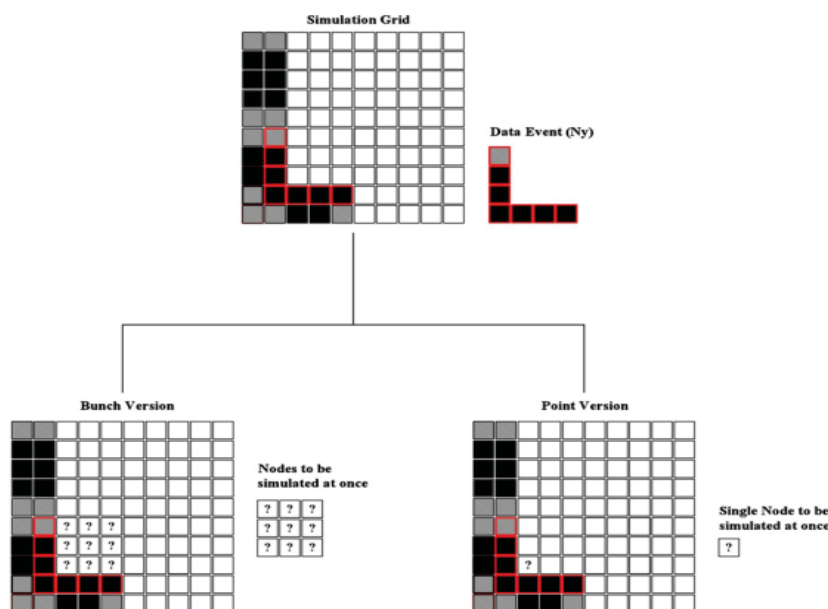
^{۳۵} Euclidean Distance

شبیه‌سازی تفریق می‌شوند و به توان دو می‌رسند، تا از منفی شدن حاصل جمع تفریق‌ها جلوگیری شود [۳].

$$d\{d_n(x), d_n(x)\} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(y_i)]^2} \quad ۶-۲$$

۱۰-۲ الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو

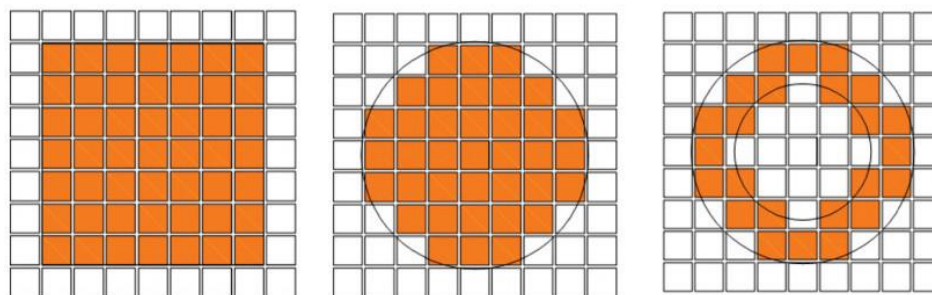
در بخش قبل الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم شرح داده شد. این الگوریتم بر مبنای شبیه‌سازی یک گره در هر مرحله از شبیه‌سازی است. الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو توسط رضایی و همکاران در سال ۲۰۱۳ ارائه شد [۲۱]. این الگوریتم بر مبنای شبیه‌سازی یک بسته^{۳۶} از گره‌های شبیه‌سازی نشده، در هر مرحله از شبیه‌سازی است. تفاوت بین الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم و الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو در شکل ۶-۲ به صورت شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۶-۲ نمایی شماتیک از تفاوت بین الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم و نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو [۲۱].

تعداد گره‌هایی که در هر مرحله از شبکه شبیه‌سازی استخراج و شبیه‌سازی می‌شوند، وابسته به شکل و اندازه الگویی است که در ابتدای شبیه‌سازی تعریف شده است. این الگوها مطابق با شکل ۲-۷ به سه صورت مربعی، دایره‌ای و دیسکی هستند [۲۱].

در مسیر شبیه‌سازی با انتخاب هر گره از شبکه شبیه‌سازی، الگوی انتخاب‌شده، در اطراف گره موردنظر قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که گره انتخاب‌شده در مرکز الگو واقع شود. همه گره‌هایی که در الگو قرار بگیرند انتخاب می‌شوند و به‌عنوان رخداد داده از شبکه شبیه‌سازی استخراج خواهند شد [۲۱].



شکل ۲-۷ شمایی از انواع الگوهای استخراج گره‌های شبکه شبیه‌سازی [۲۱].

در ادامه پایان‌نامه الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو به‌اختصار الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ذکر می‌گردد.

۲-۱۱ کاستی‌های الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو

تصویرآموزشی اساس مدل‌سازی زمین‌آمار چندنقطه‌ای است. در صورتی‌که تصویرآموزشی از الگوهای مورد انتظار در منطقه مورد مطالعه غنی نباشد و یا همه الگوهای موجود در تصویرآموزشی جستجو نشوند، نتایج شبیه‌سازی از لحاظ پیوستگی ساختار و بازتولید داده شرطی تحت تاثیر قرار خواهد گرفت.

در صورتی که برای هر رخداد داده استخراج شده از شبکه شبیه سازی، تمام الگوهای تصویرآموزشی جستجو شوند و الگویی که بیشترین انطباق را با رخداد داده دارد از تصویرآموزشی استخراج شود و به شبکه شبیه سازی انتقال داده شود، کیفیت نتایج شبیه سازی از لحاظ پیوستگی ساختار و بازتولید داده های شرطی می تواند بهبود یابد.

چنانچه در هر مرحله از شبیه سازی، یک بار تصویرآموزشی به طور کامل جستجو شود، زمان محاسبات به شدت افزایش می یابد. به همین دلیل محدودیت هایی در روند جستجوی تصویرآموزشی به الگوریتم نمونه گیری مستقیم اعمال شده است. همانطور که در بخش های قبل نیز بیان شد

- جستجوی درصد محدودی از الگوهای تصویرآموزشی
- در نظر گرفتن یک مقدار مرزی برای فاصله بین رخداد داده و الگوهای تصویرآموزشی، برای پایان فرآیند جستجو تصویرآموزشی

محدودیت هایی هستند که برای افزایش راندمان محاسبات به الگوریتم اعمال شده اند. جستجوی درصد محدودی از الگوهای تصویرآموزشی که با پارامتر F معرفی می شود، منجر به نادیده گرفته شدن تعداد زیادی از الگوهای موجود در تصویرآموزشی خواهد شد. به عنوان مثال در صورتی که پنجاه درصد از تصویرآموزشی جستجو شود، پنجاه درصد دیگر از الگوهای تصویرآموزشی نادیده گرفته شده است. در حالی که ممکن است بهترین انطباق های بین الگو و تصویرآموزشی در میان الگوهای حذف شده باشند. حد مرزی برای فاصله بین الگوی استخراج شده از شبکه شبیه سازی و الگوهای تصویرآموزشی با پارامتر Th تعیین می شود. به عنوان مثال، اگر $Th = 0.01$ تعیین شود، بدین معنی است، که اگر در فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی الگویی یافت شود که میزان عدم انطباق آن با تصویرآموزشی 0.01 یا کمتر باشد، جستجوی تصویرآموزشی متوقف می شود، و آن الگو به عنوان بهترین انطباق به شبکه شبیه سازی

منتقل می‌شود. این در حالی است که ممکن است در بین الگوهای باقی‌مانده الگویی با فاصله صفر وجود داشته باشد که با در نظر گرفتن حد مرزی برای فاصله نادیده گرفته می‌شود.

درحالی که محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم منجر به کاهش زمان محاسبات می‌شود، ولی کیفیت نتایج شبیه‌سازی را به علت نادیده گرفتن الگوهای تصویرآموزشی از نظر پیوستگی ساختار و بازتولید داده‌های شرطی تحت تاثیر قرار می‌دهند.

۲-۱۲ جمع‌بندی

زمین‌آمار چندنقطه‌ای با استخراج آمارهای چندنقطه‌ای از تصویرآموزشی توانایی بازتولید ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی را دارد ، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم یکی از الگوریتم‌های ارائه‌شده در زمین‌آمار چندنقطه‌ای است که توانایی شبیه‌سازی متغیرهای گسسته و پیوسته و همچنین انجام شبیه‌سازی‌های چند متغیره را دارد. برای افزایش راندمان محاسبات محدودیت‌هایی در روند جستجوی تصویرآموزشی به این الگوریتم اعمال شده است. این محدودیت‌ها گرچه منجر به کاهش زمان محاسبات شده‌اند ولی نتایج شبیه‌سازی را از جنبه‌های مختلفی تحت تاثیر قرار داده‌اند.

فصل سوم

ساخت داده‌های مصنوعی و روش‌شناسی

تحقیق

۳-۱ مقدمه

اساس شبیه‌سازی‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای، تصویرآموزشی است. در این فصل، ابتدا تصاویرآموزشی مصنوعی استفاده شده، برای تهیه تحقق‌ها نمایش داده شده‌اند. در ادامه داده‌های شرطی که برای انجام شبیه‌سازی‌های شرطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، و نحوه تهیه آن‌ها معرفی شده است.

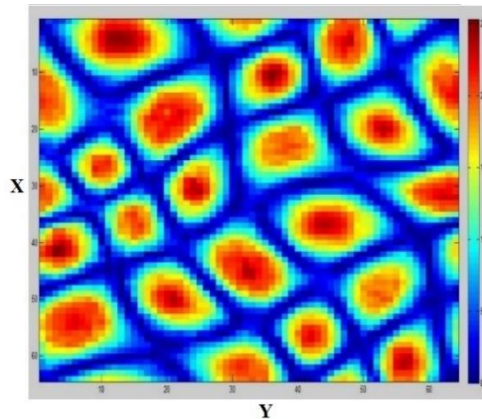
سپس مفهوم واهمامیخت^{۳۷} و کاربرد آن در فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی توضیح داده شده است. در ادامه روند محاسبه تبدیل فوریه یک ماتریس توضیح داده شده است. ارتباط بین واهمامیخت در فضای مکان و ضرب نقطه‌ای در فضای فرکانس معرفی شده است. سپس کاربرد تبدیل فوریه در فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی توضیح داده شده است. در انتهای فصل الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه معرفی شده است.

۳-۲ داده‌های مصنوعی

متغیرهای زمین‌شناسی را می‌توان به دو دسته کلی متغیرهای پیوسته و متغیرهای گسسته تقسیم‌بندی کرد. متغیرهای پیوسته مانند عیار ماده معدنی، تخلخل و تراوایی یک مخزن است و متغیرهای گسسته مانند رخساره‌های زمین‌شناسی، ساختار گسل‌ها و کانال‌های مدفون است.

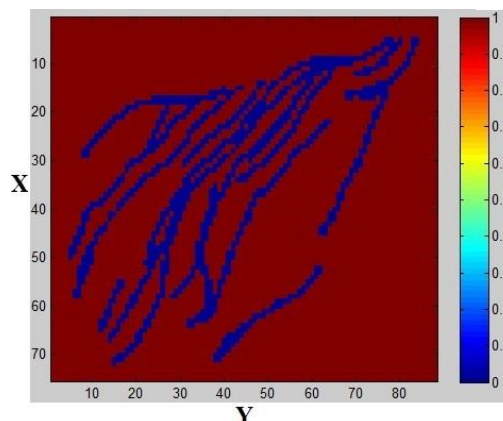
^{۳۷} Convolution

در این مطالعه از دو تصویرآموزشی مصنوعی برای تهیه تحققات استفاده شده است [۲۱]. شکل ۱-۳ تصویرآموزشی توزیع یک متغیر پیوسته است. مقدار متغیر در بازه [۰-۲۵۰] تغییر می‌کند. ابعاد تصویرآموزشی ۶۴x۶۴ پیکسل است.



شکل ۱-۳ تصویرآموزشی A توزیع یک متغیر پیوسته، اندازه تصویرآموزشی ۶۴x۶۴ پیکسل است [۲۳].

شکل ۲-۳، تصویرآموزشی مربوط به ساختارهای کانالی است. ابعاد این تصویرآموزشی ۷۵x۸۸ پیکسل است. این ساختارها در اکتشافات نفتی اهمیت بالایی دارند، به دلیل اینکه ساختار داخلی آنها در برخی موارد دارای تخلخل زیادی است. بنابراین مکان‌های مناسبی برای تشکیل مخازن نفتی به شمار می‌آیند. در این تصویرآموزشی دو رخساره آبی و قرمز حضور دارند. گره‌های آبی نشان‌دهنده وجود کانال و گره‌های قرمز نشان‌دهنده عدم وجود کانال هستند.



شکل ۳-۲ تصویرآموزشی B مربوط به کانال‌های مدفون، تصویرآموزشی ۷۵x۸۸ پیکسل است [۲۳].

شبیه‌سازی زمین‌آمار چندنقطه‌ای با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم برحسب در دسترس بودن یا نبودن داده‌های شرطی به دو صورت انجام می‌شود:

- شبیه‌سازی شرطی^{۳۸}
- شبیه‌سازی غیرشرطی^{۳۹}

برای انجام شبیه‌سازی شرطی به داده شرطی برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه نیاز است. این نوع داده‌ها به دو صورت داده‌های سخت^{۴۰}، مانند داده‌های حاصل از حفاری و داده‌های نرم^{۴۱}، مانند داده‌های حاصل از چاه‌نگاری هستند.

در این مطالعه از یک سری داده مصنوعی برای شرطی کردن شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. ابتدا نحوه تهیه داده‌های مصنوعی توضیح داده خواهد شد. یکی از روش‌های تهیه داده‌های مصنوعی، برداشت داده از تصویرآموزشی و قرار دادن آن‌ها به صورت تصادفی در شبکه شبیه‌سازی است. در این روش نمودار

^{۳۷} Conditional simulation

^{۳۸} Unconditional simulation

^{۳۹} Hard data

^{۴۰} Soft data

فراوانی داده‌های برداشت‌شده از تصویرآموزشی و داده‌هایی که در شبکه شبیه‌سازی قرار داده‌شده‌اند، یکسان خواهد بود، ولی مدل واریوگرام متفاوتی خواهند داشت [۳].

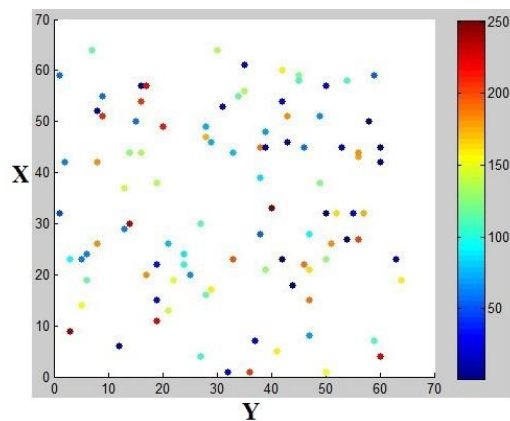
برای اینکه نمودار فراوانی و همچنین مدل واریوگرام داده‌ها حفظ شود، داده‌های مصنوعی از یک شبیه‌سازی غیرشرطی برداشت می‌شوند. بدین ترتیب که ابتدا یک شبیه‌سازی غیرشرطی تهیه خواهد شد، سپس تعدادی داده به‌صورت تصادفی از شبکه شبیه‌سازی برداشت می‌شود. این داده‌ها به‌عنوان داده‌های شرطی برای انجام شبیه‌سازی‌های شرطی مورد استفاده قرار خواهند گرفت [۳].

بنابراین روند تهیه داده‌های شرطی مصنوعی در شبیه‌سازی‌های شرطی به صورت زیر است:

- یک شبکه شبیه‌سازی هم اندازه با شبکه شبیه‌سازی اصلی ایجاد می‌شود.
- تعدادی شبیه‌سازی غیرشرطی تهیه می‌شوند. به عنوان مثال ۱۰۰ شبیه‌سازی غیرشرطی تهیه می‌شود.
- میانگین همه شبیه‌سازی‌های غیرشرطی محاسبه می‌شود.
- به تعداد داده‌های شرطی مورد نیاز عدد تصادفی تولید می‌شود. عددهای تصادفی باید در بازه اندازه شبکه شبیه‌سازی باشد. به عنوان مثال، برای یک شبکه شبیه‌سازی با اندازه 64×64 پیکسل، اعداد تصادفی تولید شده باید در بازه $[1-4096]$ باشد.
- سپس گره‌هایی از شبکه شبیه‌سازی که معادل با اعداد تصادفی تولید شده هستند را استخراج می‌کنیم.
- مقادیر گره‌های استخراج شده از شبکه شبیه‌سازی به عنوان داده شرطی مصنوعی استفاده می‌شوند.

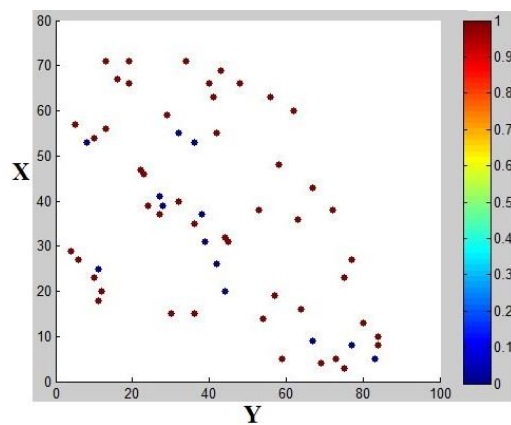
شکل ۳-۳ نمایش داده‌های شرطی است که برای انجام شبیه‌سازی شرطی با استفاده از تصویرآموزشی

A استفاده شده است. تعداد داده‌ها ۱۰۰ نمونه است، که مقدار آن‌ها در بازه $[0-250]$ تغییر می‌کند.



شکل ۳-۳ داده‌های شرطی مربوط به تصویرآموزشی A [۲۳].

شکل ۳-۴ نمایش داده‌های شرطی است، که برای انجام شبیه‌سازی‌های شرطی با استفاده از تصویرآموزشی B استفاده شده است. تعداد داده‌ها ۶۱ نمونه است.



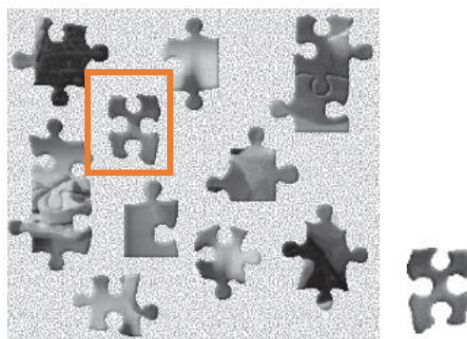
شکل ۳-۴ داده‌های شرطی مربوط به تصویرآموزشی B [۲۳].

۳-۳ انطباق الگو

فرآیند انطباق الگو یک مفهوم فرضی بسیار ساده است. یک الگو با یک تصویر انطباق داده می‌شود، و مکانی از تصویر که منطبق با الگو است یافته می‌شود. در این فرآیند، الگو بر روی مناطق مختلف عکس قرار داده می‌شود. در هر منطقه از عکس، که الگو بر روی آن قرار می‌گیرد، تعداد نقاطی از الگو که با آن قسمت از عکس انطباق دارند، شمرده می‌شوند. این فرآیند برای همه مناطق عکس تکرار می‌شود. در نهایت قسمتی از عکس که بیشترین انطباق را با الگو دارد به‌عنوان بهترین انطباق انتخاب می‌شود [۲۲].

فرآیند انطباق الگو، برای الگو (شکل ۵-۳ الف) و عکس (شکل ۵-۳ ب) بدین ترتیب انجام می‌شود، که ابتدا الگو (شکل ۵-۳ الف) در مناطق مختلف عکس (شکل ۵-۳ ب) قرار می‌گیرد. در هر منطقه از عکس، تعداد نقاطی از الگو و قسمتی از عکس که الگو بر روی آن قرار می‌گیرد شمرده می‌شود.

منطقه‌ای از تصویر (شکل ۵-۳ ب) که با الگو (شکل ۵-۳ الف) انطباق کامل دارد با کادر قرمز در شکل ۵-۳ ب مشخص شده است. فرآیند شمردن تعداد نقاط منطبق بین الگو و قسمتی از عکس که الگو بر روی آن قرار می‌گیرد شبیه فرآیند واهمامیخت بین الگو و عکس است. مفهوم واهمامیخت و فرآیند انطباق الگو با استفاده از واهمامیخت در قسمت‌های بعد توضیح داده خواهد شد.



ب

الف

شکل ۵-۳ الف- الگو، ب-عکس، نمونه‌ای از فرآیند انطباق الگو در تصویر [۲۲].

۴-۳ واهمامیخت

در ریاضیات واهمامیخت، به صورت تابعی تعریف می شود، که بر روی دو تابع فرضی f و g اعمال می شود، و تابع سومی را نتیجه می دهد، که آن را می توان به عنوان نسخه تصحیح شده یکی از توابع اولیه در نظر گرفت. واهمامیخت در فضای گسسته دارای کاربردهایی است، که از جمله آن ها می توان به طراحی فیلترهای پردازش تصویر اشاره کرد [۲۳].

رابطه ۱-۳ واهمامیخت بین دو ماتریس را در فضای یک بعدی نشان می دهد. طبق رابطه ۱-۳، واهمامیخت بین ماتریس F و ماتریس I ، از جمع حاصل ضرب درایه به درایه دو ماتریس F و I محاسبه می شود.

$$F \times I = \sum_{i=-N}^N F(i)I(x-i) \quad 1-3$$

به عنوان مثال در صورتی که ماتریس های F و I به ترتیب به صورت ماتریس های یک بعدی زیر تعریف شوند:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{bmatrix}$$

حاصل واهمامیخت بین F و I در زیر به صورت ماتریس G تعریف شده است:

$$G = \begin{bmatrix} 6 & 9 & 12 & 15 & 18 \end{bmatrix} \quad \text{ماتریس حاصل واهمامیخت بین ماتریس های } F \text{ و } I$$

۵-۳ کاربرد واهمامیخت در انطباق الگو

واهمامیخت یکی از توابع پایه ای در ریاضیات است. از این تابع برای استخراج اطلاعات از یک تصویر، در مسائل پردازش تصویر استفاده می شود. یکی از کاربردهای واهمامیخت، یافتن مکان هایی از یک عکس است که بیشترین شباهت را به یک الگو دارد [۲۳]. جستجوی تصویر آموزشی بسیار مشابه با مسائل انطباق الگو در پردازش تصویر است.

در صورتی که رخداد داده استخراج شده از شبکه شبیه‌سازی را به‌عنوان الگو و تصویر آموزشی را به‌عنوان تصویر در نظر بگیریم، این الگو در سراسر تصویر حرکت داده می‌شود و در هر منطقه‌ای که الگو بر روی تصویر منطبق می‌شود، میزان فاصله، و یا به عبارت دیگر میزان عدم انطباق بین الگو و قسمتی از تصویر که الگو بر روی آن قرار گرفته است، محاسبه می‌شود [۲۳].

همانطور که در رابطه ۲-۳ مشاهده می‌شود، برای محاسبه فاصله بین الگو و قسمتی از تصویر که الگو بر روی آن قرار گرفته است، از رابطه تفریق اقلیدسی استفاده شده است. حاصل رابطه ۲-۳ برابر با مجموع مربع اختلاف بین گره‌های الگو و گره‌های معادل آن‌ها در عکس است.

$$distance = \sum_{i=-N}^N (F(i) - I(x + i))^2 \quad 2-3$$

در صورتی که فاصله را به‌عنوان معیاری از عدم انطباق بین الگو و تصویر در نظر بگیریم، به‌سادگی می‌توان دریافت، که هرچه میزان عدم انطباق الگو و تصویر بیشتر باشد، فاصله نیز مقدار بزرگ‌تری را اختیار می‌کند.

در صورتی که گره مرکزی الگو را x ، I را عنصر i ام الگو، F را عنصر i ام تصویر و N را نصف تعداد گره‌های الگو در نظر بگیریم، میزان فاصله بین الگو یک‌بعدی و تصویر یک‌بعدی را مطابق رابطه ۳-۳ می‌توان محاسبه کرد [۲۲]:

$$\sum_{i=-N}^N (F(i) - I(x + i))^2 = \quad 3-3$$

$$\sum_{i=-N}^N (F^2(i) + I^2(x + i) - 2F(i)I(x + i)) =$$

$$\sum_{i=-N}^N (F^2(i)) + \sum_{i=-N}^N (I^2(x + i)) - 2 \sum_{i=-N}^N (F(i)I(x + i))$$

رابطه ۳-۳ برای الگوها و تصاویر دوبعدی و سه بعدی نیز می تواند بسط داده شود. رابطه ۳-۳ را می توان به صورت رابطه ۴-۳ بازنویسی کرد.

$$(F - I)^2 = F^2 + I^2 - 2F \times I \quad 4-3$$

اندیس $\times$ در رابطه ۴-۳ معرف واهمامیخت بین الگو و تصویر است. رابطه ۴-۳ را می توان به سه قسمت تقسیم کرد، قسمت اول برابر است با حاصل جمع توان دو گره هایی از تصویر که الگو بر روی آن قرار گرفته است. قسمت دوم تنها به الگو وابسته است، و مقدار آن برابر با حاصل جمع توان دو همه گره های الگو است. قسمت سوم برابر با حاصل واهمامیخت بین الگو و تصویر است. حاصل واهمامیخت برابر با ضرب گره های الگو و گره های معادل با آن ها در آن قسمت از تصویر است، که الگو بر روی آن قرار گرفته است [۲۳].

شکل ۶-۳ الف یک تصویر و شکل ۶-۳ ب یک الگو فرضی را نشان می دهد. مکان اولین انطباق الگو در تصویر به صورت گره های رنگی در شکل ۶-۳ الف نشان داده شده است.

1	4	7		
2	5	8		
3	6	9		

1	4	7
2	5	8
3	6	9

ب

الف

شکل ۶-۳ الف- الگو، ب-عکس فرضی، مکان اولین انطباق در تصویر با گره های رنگی در شکل الف نشان داده شده است.

در صورتی که واهمامیخت بین الگو و کل تصویر را محاسبه کنیم، روند انطباق الگو در تصویر به صورت شکل ۷-۳ است. مطابق شکل ۷-۳ الف ابتدا الگو در مکان اولین انطباق در تصویر قرار می گیرد و سپس الگو در

تصویرآموزشی در راستای افقی و قائم جابجا می‌شود تا در نهایت کل تصویر جستجو شود. دو مرحله از فرآیند واهمامیخت بین الگو و تصویر در شکل ۷-۳ الف و ۷-۳ ب نشان داده شده است.

	1	4	7		
	2	5	8		
	3	6	9		

1	4	7			
2	5	8			
3	6	9			

ب: مرحله دوم

الف: مرحله اول

شکل ۷-۳ دو مرحله از روند محاسبه واهمامیخت بین الگو و تصویرآموزشی

قسمت سوم رابطه ۴-۳ با استفاده از واهمامیخت بین الگو و تصویر محاسبه می‌شود. قسمت اول رابطه ۴-۳ برابر است با جمع توان دو گره‌هایی از تصویر است که الگو بر روی آن قرار می‌گیرد. برای اینکه کل تصویر جستجو شود باید قسمت اول رابطه ۴-۳ نیز با استفاده از واهمامیخت محاسبه شود. برای این منظور ابتدا همه گره‌های تصویر به توان دو رسانده می‌شود. سپس ماتریس W در نظر گرفته می‌شود. اندازه ماتریس W برابر با ماتریس الگو است و مقدار همه گره‌های آن برابر یک است.

واهمامیخت بین ماتریس W و ماتریس توان دو تصویر، معادل با قسمت اول رابطه ۴-۳ برای همه تصویر است. قسمت دوم رابطه ۴-۳ نیز معادل با جمع توان دو همه گره‌های الگو است، که مقداری ثابت است.

رابطه ۴-۳ برای جستجوی همه الگوهای تصویر به صورت رابطه ۵-۳ بازنویسی می‌شود:

$$(F - I)^2 = (F^2 \times W) + I^2 - 2(F \times I) \quad 5-3$$

در ادامه مثالی عددی از کاربرد واهمامیخت در فرآیند انطباق الگو آورده شده است. در صورتی که ماتریس F را به عنوان تصویر و ماتریس I را به عنوان الگو در نظر بگیریم. نحوه جستجوی تصویرآموزشی به وسیله الگو، به صورت زیر است.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 2 \\ 3 & 4 & 4 \end{bmatrix} \quad \text{ماتریس تصویر}$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ماتریس الگو}$$

رابطه ۳-۵ را می توان به سه قسمت تقسیم کرد. در ادامه، هر یک از قسمت های رابطه ۳-۵ را به تفکیک محاسبه می کنیم.

• $F^2 \times W$: در این قسمت از رابطه، دو پارامتر وجود دارد، که عبارتند از F^2 و W ، ابتدا باید ماتریس

تصویر، به توان دو رسانده شود و سپس ماتریس W تعریف شود. در انتها واهمامیخت بین این دو

ماتریس محاسبه می شود.

$$F^2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 9 \\ 1 & 1 & 4 \\ 9 & 16 & 16 \end{bmatrix} \quad \text{ماتریس توان دو همه گره های تصویر}$$

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ماتریس } W$$

$$F^2 \times W = \begin{bmatrix} 4 & 15 \\ 27 & 37 \end{bmatrix} \quad \text{حاصل واهمامیخت بین } F^2 \text{ و } W$$

• I^2 : معادل با جمع توان دو گره های الگو است.

• $2F \times I$ که معادل با دو برابر حاصل واهمامیخت بین الگو و تصویرآموزشی است.

$$2F \times I = \begin{bmatrix} 8 & 14 \\ 18 & 22 \end{bmatrix}$$

در انتها برای محاسبه فاصله بین تصویر و الگو، مقادیر محاسبه شده در مراحل قبل را طبق رابطه ۲-۹ با

یکدیگر جمع می کنیم:

فاصله بین الگو و تصویر:

$$(F - I)^2 = F^2 \times W + I^2 - 2F \times I = \frac{4}{27} \frac{15}{37} + 4 - \frac{8}{18} \frac{14}{22} = \frac{0}{13} \frac{5}{19}$$

در ماتریس F ، گره‌هایی که منطبق با الگو I هستند، با کادر قرمز مشخص شده است. این گره‌ها مکان اولین انطباق بین تصویر و الگو را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، حاصل رابطه $(F - I)^2$ ماتریسی است، که گره اول آن صفر است. این گره، معادل فاصله بین اولین انطباق بین تصویر و الگو است.

بنابراین با استفاده از واهمامیخت بین الگو و تصویر آموزشی می‌توان همه تصویر آموزشی را، برای یافتن بهترین الگو منطبق با الگو استخراج شده از شبکه شبیه سازی جستجو کرد. در این پایان‌نامه در گام اول از واهمامیخت در فرآیند انطباق الگو در تصویر آموزشی استفاده شده است. سپس برای کاهش بیشتر زمان محاسبات، استفاده از تابع تبدیل فوریه در فرآیند انطباق الگو پیشنهاد شده است. که بر مبنای آن الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه معرفی شده است.

۳-۶ تبدیل فوریه

تابع تبدیل فوریه بر روی سیگنال‌های گسسته و پیوسته اعمال می‌شود. در این پایان‌نامه تبدیل فوریه بر روی ماتریس‌ها اعمال شده است. یک ماتریس به صورت یک سیگنال گسسته در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در ادامه به توضیح نحوه محاسبه تبدیل فوریه گسسته^{۴۲} پرداخته خواهد شد [۲۴].

برای سیگنال گسسته $x[n]$ تبدیل فوریه به صورت رابطه ۳-۶ تعریف می‌شود:

$$x[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{m}{N}n} \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \quad ۳-۶$$

در رابطه ۳-۶ N تعداد عناصر (نقاط) سیگنال $x[n]$ است و $x[m]$ تبدیل فوریه سیگنال $x[n]$ است.

ماتریس x را به صورت زیر است در نظر گرفته می‌شود.

^{۴۲} DFT

$$x = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}$$

تبدیل فوریه ماتریس x با استفاده از رابطه ۳-۶ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$x[m] = \sum_{n=0}^3 x[n] e^{-j2\pi\frac{m}{4}n} = 1 + 2e^{-j2\pi\frac{m}{4}n} + 2e^{-\pi jm} + e^{-\pi j\frac{3m}{2}} \quad m = 0, 1, 2, 3$$

$$x[0] = 1 + 2 + 2 + 1 = 6$$

$$x[1] = 1 + 2e^{-\frac{\pi j}{2}} + 2e^{-\pi j} + e^{-\pi j\frac{3}{2}}$$

$$x[2] = 1 + 2e^{-\pi j} + 2e^{-2\pi j} + e^{-3\pi j}$$

$$x[3] = 1 + 2e^{-\frac{3}{2}\pi j} + 2e^{-3\pi j} + e^{-\frac{9}{2}\pi j}$$

باتوجه به رابطه $e^{-j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$ خواهیم داشت:

$$x[0] = 1 + 2 + 2 + 1 = 6$$

$$x[1] = 1 + 2 \left(\cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right) + 2(\cos(-\pi) + j \sin(-\pi)) + \left(\cos\left(-\frac{3\pi}{2}\right) + j \sin\left(-\frac{3\pi}{2}\right) \right) = -1 - j$$

$$x[2] = 1 + 2(\cos(-\pi) + j \sin(-\pi)) + 2(\cos(-2\pi) + j \sin(-2\pi)) + (\cos(-3\pi) + j \sin(-3\pi)) = 0$$

$$x[2] = 1 + 2 \left(\cos\left(-\frac{3\pi}{2}\right) + j \sin\left(-\frac{3\pi}{2}\right) \right) + 2(\cos(-3\pi) + j \sin(-3\pi)) + \left(\cos\left(-\frac{9\pi}{2}\right) + j \sin\left(-\frac{9\pi}{2}\right) \right) = -1 + j$$

بنابراین تبدیل فوریه ماتریس x برابر است با:

$$FT(x) = \begin{bmatrix} 6 & 0 \\ -1 - j & -1 + j \end{bmatrix}$$

۷-۳ کاربرد تبدیل فوریه در انطباق الگو

ضرب نقطه‌ای در فضای فوریه معادل با واهمامیخت در فضای مکان است. این اصل، اساس استفاده از تبدیل فوریه در مسائل تشخیص الگو است [۲۳]. ضرب نقطه‌ای بین دو ماتریس برابر با ضرب درایه به درایه دو ماتریس است. ضرب نقطه‌ای بین دو ماتریس، با نماد $(\odot)$ نمایش داده می‌شود.

ماتریس‌های F و G به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$F = \begin{bmatrix} 2 & 4 \\ 1 & 5 \end{bmatrix}$$
$$G = \begin{bmatrix} 3 & 7 \\ 5 & 9 \end{bmatrix}$$

حاصل ضرب نقطه‌ای دو ماتریس F و G برابر است با:

$$F \odot G = \begin{bmatrix} 6 & 28 \\ 5 & 45 \end{bmatrix}$$

در بخش ۵-۳ نحوه استفاده از واهمامیخت، در فرآیند انطباق الگو توضیح داده شد. گرچه استفاده از واهمامیخت زمان محاسبات را کاهش می‌دهد ولی با استفاده از تابع تبدیل فوریه زمان محاسبات به علت کاهش پیچیدگی محاسبات بهبود قابل توجهی می‌یابد. در فضای فوریه واهمامیخت با ضرب نقطه‌ای ساده جایگزین می‌شود. در ادامه نحوه استفاده از تابع تبدیل فوریه برای انجام محاسبات انطباق الگو بحث خواهد شد.

در صورتی که I به عنوان تبدیل فوریه الگو و F به عنوان تبدیل فوریه تصویر آموزشی در نظر گرفته شود، محاسبات انطباق الگو را می‌توان در فضای فوریه انجام داد. همانطور که در ابتدای بخش ۶-۳ توضیح داده شد، واهمامیخت در فضای مکان معادل با ضرب نقطه‌ای در فضای فرکانس است [۲۲].

در رابطه ۵-۳ واهمامیخت با نماد $(\times)$ نشان داده شده است، چنانچه محاسبات تشخیص الگو در فضای فوریه انجام شود، واهمامیخت در رابطه ۵-۳ با ضرب نقطه‌ای جایگزین می‌شود. ضرب نقطه‌ای با نماد

($\odot$) نمایش داده می‌شود. در رابطه ۷-۳ از ضرب نقطه‌ای در فضای فوریه برای محاسبه میزان عدم انطباق بین الگو و تصویر آموزشی استفاده شده است [۲۲].

$$(F - I)^2 = F^2 \odot W + I^2 - 2F \odot I \quad ۷-۳$$

رابطه ۷-۳ معرف عدم انطباق بین الگو و تصویر آموزشی است. رابطه ۷-۳ را می‌توان به شکل رابطه ۸-۳ بازنویسی کرد.

$$\sum_{i=-N}^N (F(i) - I(x + i))^2 = \text{inv}(F^{2'} \odot W') + I^2 - 2\text{inv}(F' \odot I') \quad ۸-۳$$

$F' = FT(F)$	تبدیل فوریه تصویر آموزشی
$I' = FT(I)$	تبدیل فوریه الگو
$W' = FT(W)$	تبدیل فوریه ماتریس W
$F^{2'} = FT(F^2)$	تبدیل فوریه توان دو تصویر آموزشی

همانطور که در ابتدای بخش ۶-۳ بیان شد، در صورتی که محاسبات انطباق الگو در فضای فوریه انجام شود، ضرب نقطه‌ای جایگزین واهمامیخت در رابطه ۵-۳ خواهد شد. رابطه ۷-۳ کاربرد تبدیل فوریه در فرآیند انطباق الگو در تصویر آموزشی را نشان می‌دهد. در این رابطه از تبدیل فوریه ماتریس تصویر آموزشی و تبدیل فوریه ماتریس الگو استفاده شده است. رابطه ۷-۳ را می‌توان به سه قسمت تقسیم کرد، نحوه محاسبه هر یک از آن‌ها در ادامه توضیح داده خواهد شد:

• $\text{inv}(F^{2'} \odot W')$: ابتدا ضرب نقطه‌ای در فضای فوریه بین ماتریس‌های $F^{2'}$ و W' محاسبه

می‌شود. سپس تبدیل فوریه معکوس حاصل ضرب آن‌ها محاسبه می‌شود که معادل قسمت

اول رابطه ۷-۳ است.

• I^2 : این قسمت از رابطه مشابه با رابطه ۵-۳ محاسبه می‌شود.

• $2\text{inv}(F' \odot I')$: ابتدا ضرب نقطه‌ای در فضای فوریه بین ماتریس‌های F' و I' محاسبه

می‌شود. سپس تبدیل فوریه معکوس حاصل ضرب آن‌ها محاسبه می‌شود و ضربدر ۲

می‌شود، که معادل قسمت سوم رابطه ۳-۷ است.

با استفاده از رابطه ۳-۸ محاسبات انطباق الگو در الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم با سرعت بیشتری می‌تواند

انجام بشود. این رابطه به‌عنوان اساس محاسبات انطباق الگو در تصویرآموزشی در نظر گرفته شده است. با

استفاده از رابطه ۳-۸ الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو به صورت زیر بازنویسی شده

است.

۳-۸ الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه

پارامترهای ورودی به الگوریتم به شرح زیر هستند:

- شبکه شبیه‌سازی که گره‌های آن با نماد x مشخص می‌شوند.
- تصویرآموزشی که گره‌های آن با نماد y مشخص می‌شوند.
- داده‌های شرطی، مانند داده‌های چال‌های حفاری، که در صورت وجود با نماد $z(x_i)$ مشخص می‌شوند که در آن $i \in [1, \dots, N]$ است.

هرکدام از داده‌های شرطی در نزدیک‌ترین گره در شبکه شبیه‌سازی قرار داده خواهند شد. در صورتی که

چند داده شرطی در یک گره خاص قرار بگیرند، نزدیک‌ترین داده به گره موردنظر نسبت داده می‌شود.

مراحل شبیه‌سازی به ترتیب زیر انجام خواهد شد:

- داده‌های شرطی به‌نحوی که توضیح داده شد، به شبکه شبیه‌سازی انتقال داده خواهند شد.

- یک مسیر شبیه‌سازی در شبکه شبیه‌سازی برای گره‌های باقی‌مانده تعریف می‌شود. مسیر شبیه‌سازی، یک بردار شامل مختصات همه گره‌های شبیه‌سازی نشده در شبکه شبیه‌سازی است. این مسیر می‌تواند تصادفی و یا یک‌طرفه باشد.
- برای هر گره شبیه‌سازی نشده x ، مراحل زیر تکرار خواهند شد:
- فرض کنید d یک ماتریس است، که برای ذخیره فاصله بین الگوهای استخراج‌شده از شبکه شبیه‌سازی و پنجره جستجو در نظر گرفته می‌شود.
- تعداد حداکثر n داده $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ، با توجه به الگوی از پیش تعریف‌شده از شبکه شبیه‌سازی استخراج می‌شوند. این داده‌ها یا داده‌های شرطی هستند که در ابتدا در شبکه شبیه‌سازی قرار داده‌شده‌اند و یا داده‌های شبیه‌سازی‌شده هستند، که از انجام شبیه‌سازی در مراحل قبل بدست آمده‌اند.
- در صورتی که هیچ داده شرطی در همسایگی گره x وجود نداشته باشد، یک دسته از گره‌های تصویرآموزشی به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و به شبکه شبیه‌سازی انتقال داده می‌شوند.

- رخداد داده استخراج‌شده از شبکه شبیه‌سازی با نماد d_n نمایش داده می‌شود:

$$d_n(x, L) = \{Z(x + h_1), \dots, Z(x + h_n)\} \quad 9-3$$

- تبدیل فوریه الگوی استخراج‌شده از شبکه شبیه‌سازی، $d_n(x, L)$ ، محاسبه می‌شود.
- با توجه به مسیری که در ابتدای شبیه‌سازی برای جستجوی تصویرآموزشی تعریف‌شده است، جستجو را آغاز می‌کنیم. برای هر گره y در تصویرآموزشی مراحل زیر را تکرار خواهند شد:

- الگوی d_n از تصویرآموزشی استخراج می‌شود.

$$d_n(y, L) = \{Z(y + h_1), \dots, Z(y + h_n)\}$$

- تبدیل فوریه، الگوی استخراج شده از پنجره جستجو، $d_n(y, L)$ ، محاسبه می شود.
- فاصله بین الگوهای استخراج شده از شبکه شبیه سازی و تصویرآموزشی $d\{d_n(x, L), d_n(y, L)\}$ ، با استفاده از فرمول ۲-۹ محاسبه خواهند شد.
- عکس تبدیل فوریه فاصله ای که در مرحله قبل بدست آمده است محاسبه می شود.
- فاصله محاسبه شده در مرحله قبل، $d\{d_n(x, L), d_n(y, L)\}$ ، را در ماتریس d ذخیره می کنیم.
- پس از جستجوی همه الگوهای موجود در تصویرآموزشی برای یک رخداد داده، مراحل زیر انجام می شوند:
- کمترین مقدار فاصله بین رخداد داده استخراج شده از شبکه شبیه سازی و الگوهای موجود در تصویرآموزشی از ماتریس d استخراج می شود.
- الگو متناظر با کمترین فاصله از تصویرآموزشی استخراج می شود و به گره های استخراج شده از شبکه شبیه سازی نسبت داده می شود.
- مراحل فوق، برای همه گره های شبیه سازی نشده در شبکه شبیه سازی تکرار می شود.
- در الگوریتم نمونه گیری مستقیم محدودیت هایی برای الگوریتم در طی فرآیند جستجوی تصویرآموزشی در نظر گرفته شده است که عبارتند از:
- جستجوی درصدی از الگوهای تصویرآموزشی
- در نظر گرفتن مقداری مرزی برای فاصله بین رخداد داده و الگوهای موجود در تصویرآموزشی
- برای اجرای الگوریتم نمونه گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه یک کد در محیط برنامه نویسی متلب تهیه شده است، که در پیوست ۱ آورده شده است.

همانطور که در انتهای فصل دوم توضیح داده شد، محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم موجب کاهش پیوستگی ساختارها و همچنین کاهش بازتولید داده‌های شرطی می‌شود. در بخش ۳-۷ الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه معرفی شد. در این الگوریتم با کمک تابع تبدیل فوریه محاسبات انطباق الگو در تصویرآموزشی بدون اعمال محدودیت‌های الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم انجام می‌شود.

در فصل چهارم برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه و الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم شبیه‌سازی‌های شرطی و غیرشرطی انجام شده است و نتایج آن‌ها مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

۳-۹ جمع‌بندی

تصویرآموزشی به‌عنوان اساسی‌ترین مفهوم در زمین‌آمار چندنقطه‌ای معرفی شده است. تصویرآموزشی معادل با واریوگرام در زمین‌آمار دونقطه‌ای است با این تفاوت که در هر لحظه تنها ارتباط فضایی بین بیش از دو نقطه را برقرار می‌کند.

فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی شبیه به مسائل انطباق الگو در پردازش تصویر است. دو مورد از روش‌های مورد استفاده در مسائل انطباق الگو در پردازش تصویر، استفاده از واهمامیخت، و همچنین تابع تبدیل فوریه است. این روش‌ها می‌توانند در الگوریتم‌های زمین‌آمار چندنقطه‌ای نیز به کار گرفته شوند. الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه که در انتهای این فصل معرفی شده است، کاربرد تبدیل فوریه در فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی است.

فصل چهارم

نتایج شبیه‌سازی

۴-۱ مقدمه

پارامترهای متفاوتی به عنوان شاخص، برای ارزیابی نتایج مدل سازی در نظر گرفته می شوند. از جمله مهم ترین پارامترها می توان پیوستگی ساختارها، راندمان محاسبات و بازتولید داده های شرطی را نام برد. در این فصل ابتدا دو مورد از شبیه سازی های غیر شرطی با استفاده از کاربرد واهمامیخت در فرآیند انطباق الگو در تصویر آموزشی تهیه شده اند و متوسط زمان محاسبات آن ها آورده شده اند. در ادامه فصل تعدادی تحقق با استفاده از الگوریتم نمونه گیری مستقیم و الگوریتم نمونه گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه تهیه شده است. شبیه سازی ها به دو صورت شرطی و غیر شرطی انجام شده است. نتایج شبیه سازی ها به صورت گرافیکی نمایش داده شده اند، همچنین مدت زمان محاسبات و بازتولید داده های شرطی به صورت جداولی در هر بخش آورده شده اند.

۴-۲ استفاده از واهمامیخت در فرآیند انطباق الگو

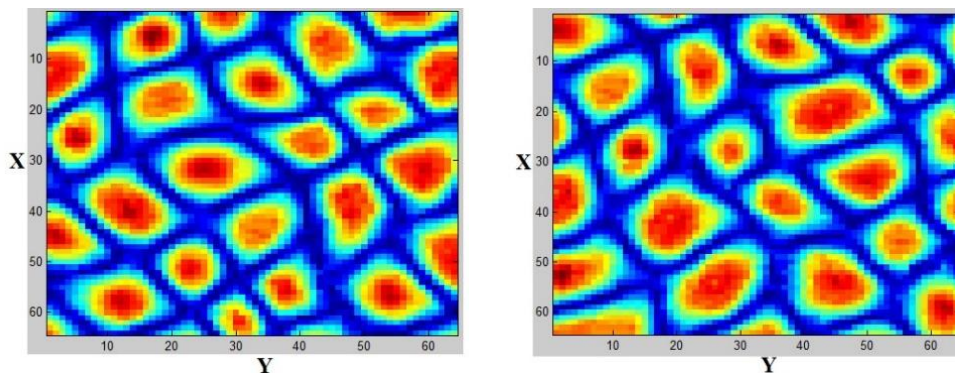
همانطور که در قسمت ۳-۵ بیان شد، در این پایان نامه ابتدا از واهمامیخت برای کاهش زمان محاسبات انطباق الگو در تصویر آموزشی استفاده شده است. نحوه استفاده از واهمامیخت در فرآیند انطباق الگو در قسمت ۳-۵ توضیح داده شده است.

تعداد ۲۰ تحقق غیرشرطی به وسیله واهمامیخت با استفاده از تصویرآموزشی A (شکل ۳-۱) و تصویرآموزشی B (شکل ۳-۲) تهیه شده است. دو مورد از شبیه سازی ها به صورت تصادفی انتخاب شده اند و در قالب شکل های ۴-۱ و ۴-۲ آورده شده اند. متوسط زمان محاسبات برای همه تحقق ها ذکر شده است. پارامترهای وردی به الگوریتم به شرح زیر هستند:

- ابعاد شبکه شبیه سازی (SG)
- شکل و اندازه الگوی شبیه سازی (B)
- مسیر شبیه سازی (P)

تصویرآموزشی A

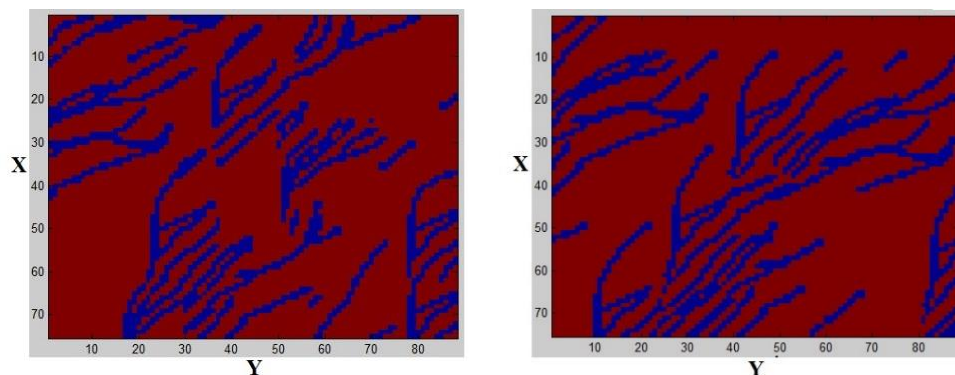
متوسط زمان محاسبات برای شبیه سازی های غیرشرطی با استفاده از واهمامیخت برای تصویرآموزشی A ۱/۸ ثانیه بوده است.



شکل ۴-۱ شبیه سازی غیرشرطی تصویرآموزشی A با استفاده از واهمامیخت

تصویرآموزشی B

متوسط زمان محاسبات برای شبیه سازی های غیرشرطی با استفاده از واهمامیخت برای تصویرآموزشی B ۲/۲ ثانیه بوده است.



شکل ۴-۲ شبیه‌سازی غیرشرطی تصویرآموزشی B با استفاده از واهمامیخت

۳-۴ پارامترهای ورودی به الگوریتم‌های نمونه‌گیری مستقیم و نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای

تبدیل فوریه

در فصل‌های دوم و سوم الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم و الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه

معرفی شد. پیش از شروع شبیه‌سازی‌ها پارامترهایی به الگوریتم وارد می‌شوند که عبارتند از:

پارامترهای ورودی به الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم:

- ابعاد شبکه شبیه‌سازی (SG)
- ماکزیمم درصد جستجوی تصویرآموزشی (F)
- حد آستانه‌ای (Th)
- شکل و اندازه الگوی شبیه‌سازی (B)
- شرطی و یا غیرشرطی بودن شبیه‌سازی
- مسیر شبیه‌سازی (P)

پارامترهای ورودی به الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه عبارتند از:

- ابعاد شبکه شبیه‌سازی (SG)

- شکل و اندازه الگوی شبیه‌سازی (B)
 - مسیر شبیه‌سازی (P)
 - شرطی و یا غیرشرطی بودن شبیه‌سازی
- در ادامه نتایج شبیه‌سازی آورده خواهند شد. شبیه‌سازی‌ها در محیط برنامه‌نویسی متلب و با استفاده از لپ‌تاپ Lenovo با پردازنده ۱/۸ GHz تهیه شده است.

۴-۴ نتایج شبیه‌سازی غیرشرطی

۴-۴-۱ نتایج شبیه‌سازی غیرشرطی با استفاده از تصویرآموزشی A

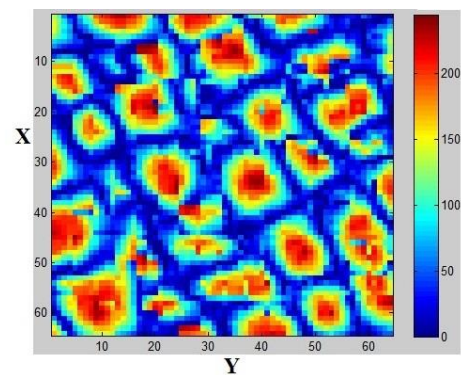
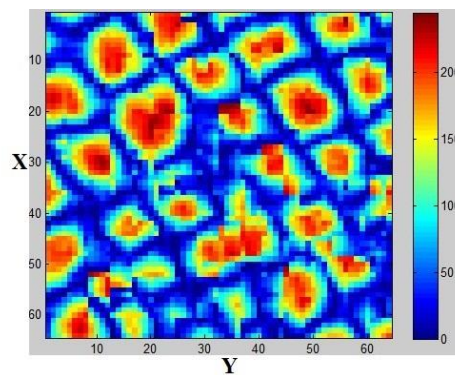
نتایج شبیه‌سازی غیرشرطی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم برای مقادیر مختلف پارامترهای F و Th نمایش داده شده است. به ازای هر کدام از مقادیر F و Th تعداد ۲۰ تحقق تهیه شده است و در نهایت یکی از تحقق‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده است که در شکل ۴-۳ نمایش داده شده‌اند. زمان انجام محاسبات برای هر کدام از تحقق‌های تهیه شده در قالب جدول ۴-۱ آورده شده است.

پارامترهای شبیه‌سازی عبارتند از:

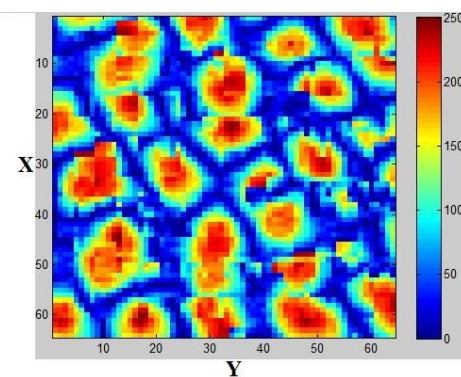
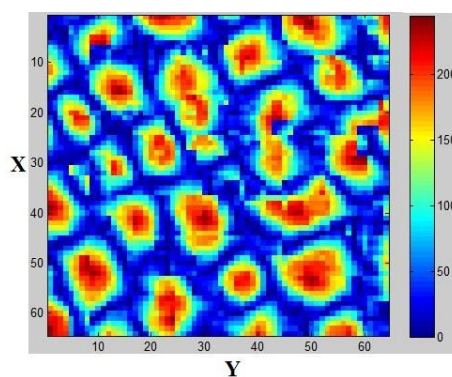
ابعاد شبکه شبیه‌سازی (SG): ۶۴x۶۴ پیکسل

شکل و اندازه الگوی شبیه‌سازی (B): مستطیلی، ۵x۵ پیکسل

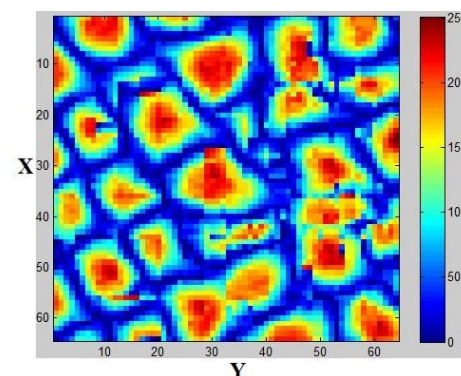
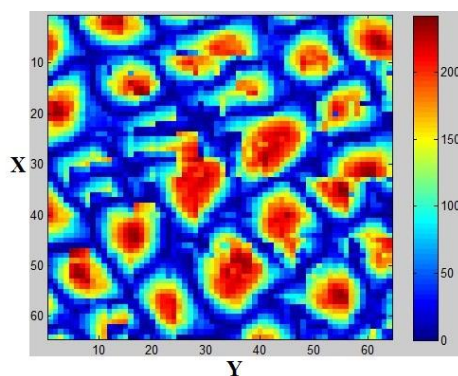
مسیر شبیه‌سازی (P): یک‌طرفه



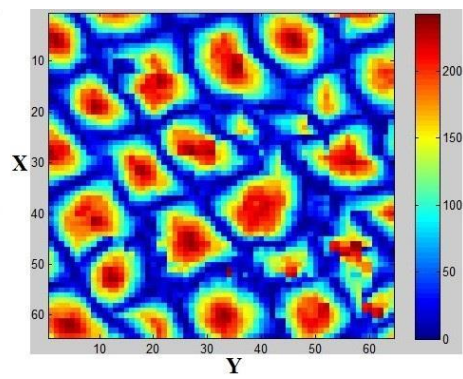
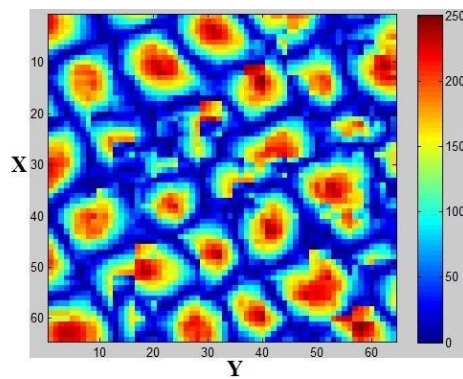
الف: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ب: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۱ و ۰/۱۰



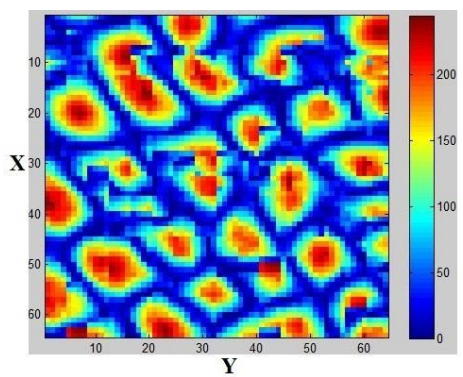
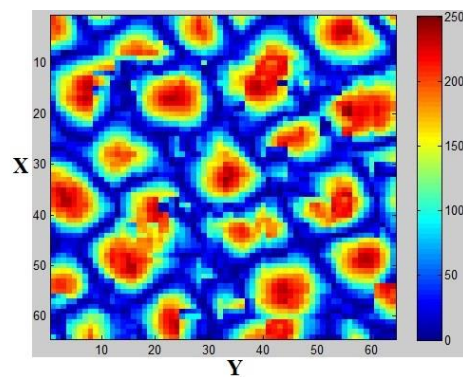
پ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ت: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۱ و ۰/۵ ۰/۱۰ و ۰/۷۵



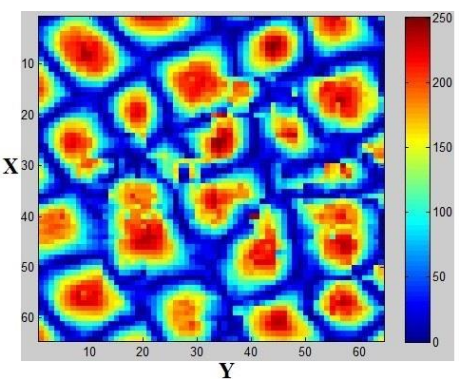
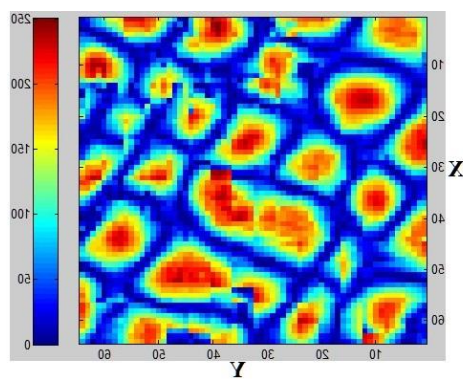
ث: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ج: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۳۰ و ۰/۱ ۰/۳۰ و ۰



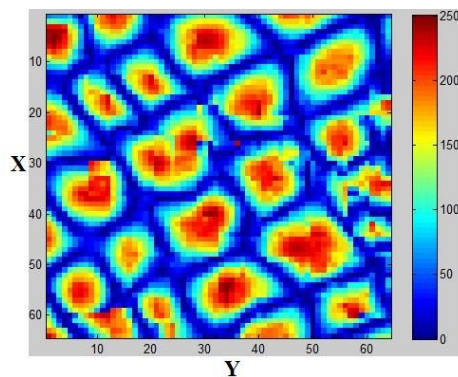
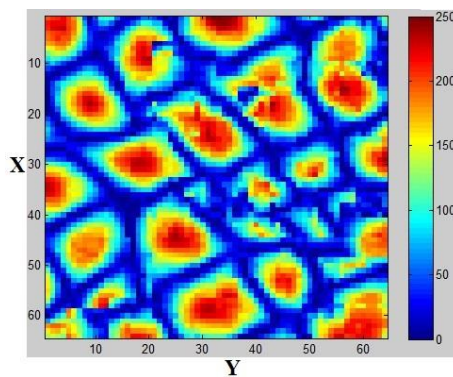
چ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: 0.30 و 0.75
 ح: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: 0.30 و 0.75



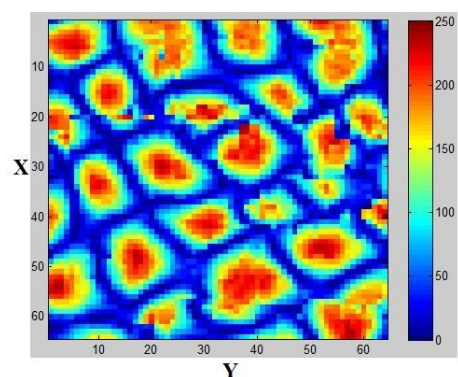
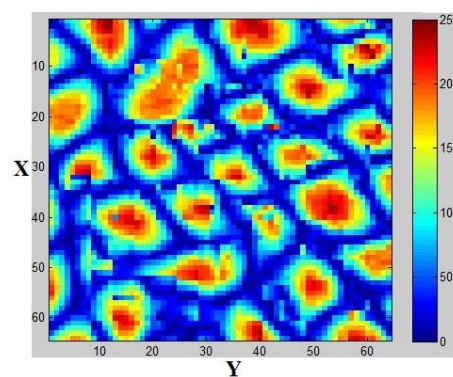
خ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: 0.50 و 0
 د: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: 0.50 و 0.1



ذ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: 0.50 و 0.75
 ر: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: 0.50 و 0.75



ز: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: س: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:
 0.70% و 0.1



ش: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ص: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:
 0.70% و 0.5 0.75%

شکل ۳-۴ تحقیقاتی غیرشرطی تصویرآموزشی A، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم

جدول ۴-۱ زمان انجام محاسبات برای تحقق‌های غیرشرطی تهیه‌شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم، برحسب

ثانیه

	Th=۰	Th=۰/۱	Th=۰/۵	Th=۰/۷۵
F=۰/۱۰	۱۲/۶	۱۱/۲	۱۰/۹	۱۰/۳
F=۰/۳۰	۲۹/۳	۲۸/۰۳	۲۷/۵	۲۷/۲
F=۰/۵۰	۴۶/۱	۴۵/۷	۴۴/۹	۴۴/۴
F=۰/۷۰	۷۸/۳	۷۶/۸	۷۵/۳	۷۴/۷

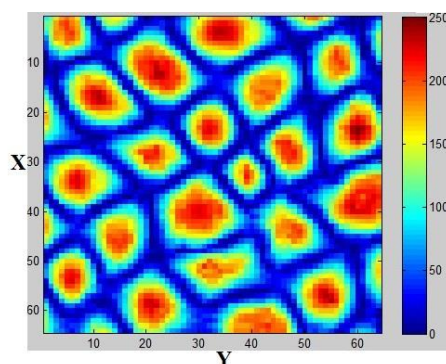
در ادامه نتایج شبیه‌سازی غیرشرطی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه آورده شده است. ۲۰ تحقق تهیه‌شده است و از میان آن‌ها ۳ تحقق به‌صورت تصادفی انتخاب‌شده است که در شکل ۴-۴ نمایش داده شده‌اند. متوسط زمان محاسبات برای همه تحقق ۰/۷ ثانیه است.

پارامترهای شبیه‌سازی عبارتند از:

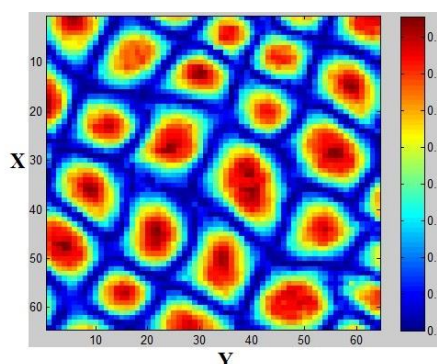
اندازه شبکه شبیه‌سازی (SG): ۶۴x۶۴ پیکسل

شکل و اندازه الگو شبیه‌سازی (B): مستطیلی، ۵x۵ پیکسل

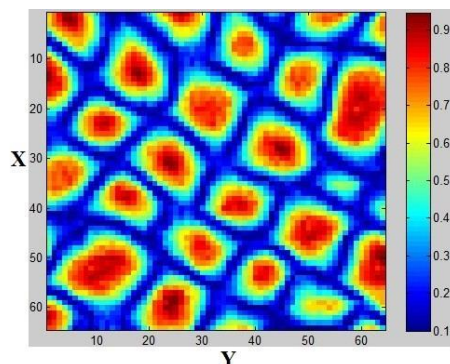
مسیر شبیه‌سازی (P): یک‌طرفه



ب: تحقق غیرشرطی شماره ۲



الف: تحقق غیرشرطی شماره ۱



پ: تحقق غیرشرطی شماره ۳

شکل ۴-۴ تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی A، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه

۴-۴-۲ نتایج شبیه‌سازی غیرشرطی با استفاده از تصویرآموزشی B

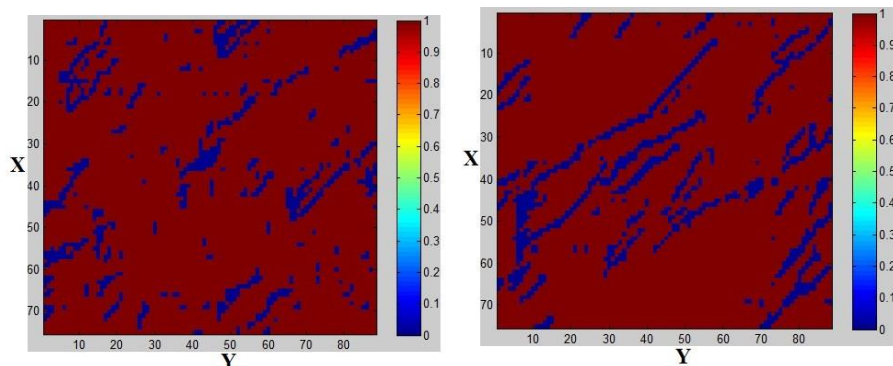
در ادامه تحقق‌های غیرشرطی تهیه‌شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم نمایش داده‌شده است، به ازای هرکدام از مقادیر پارامترهای F و Th تعداد ۲۰ تحقق تهیه‌شده است و از میان آن‌ها یک تحقق به صورت تصادفی انتخاب‌شده است که در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است. زمان انجام محاسبات برای همه تحقق‌ها در قالب جدول ۴-۲ نمایش داده شده است.

پارامترهای شبیه‌سازی عبارتند از:

ابعاد شبکه شبیه‌سازی SG: ۷۵x۸۸ پیکسل

شکل و اندازه الگوی شبیه‌سازی B: مربعی، ۷x۷ پیکسل

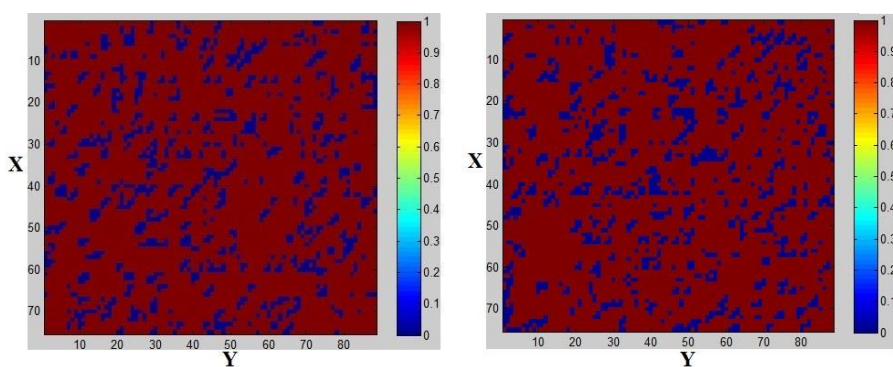
مسیر شبیه‌سازی (P): یک‌طرفه



الف: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:

۰/۱۰، ۰/۱۰

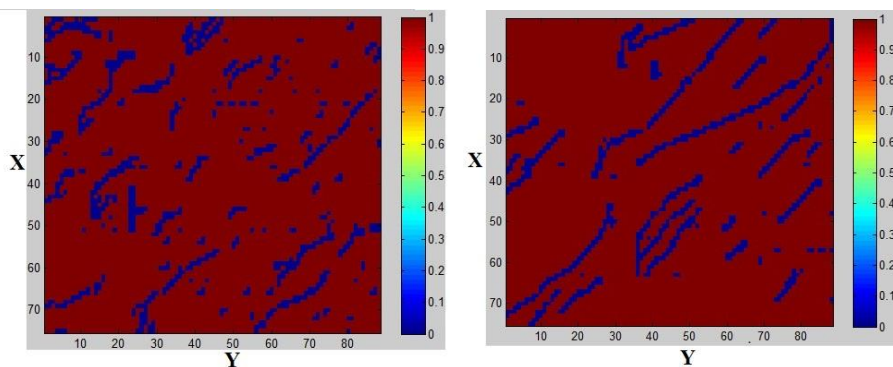
۰/۱۰، ۰/۱۰



ب: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:

۰/۷۵، ۰/۱۰

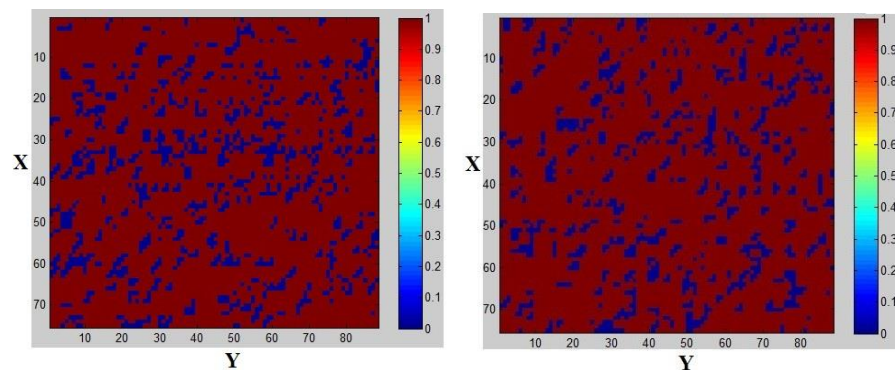
۰/۵، ۰/۱۰



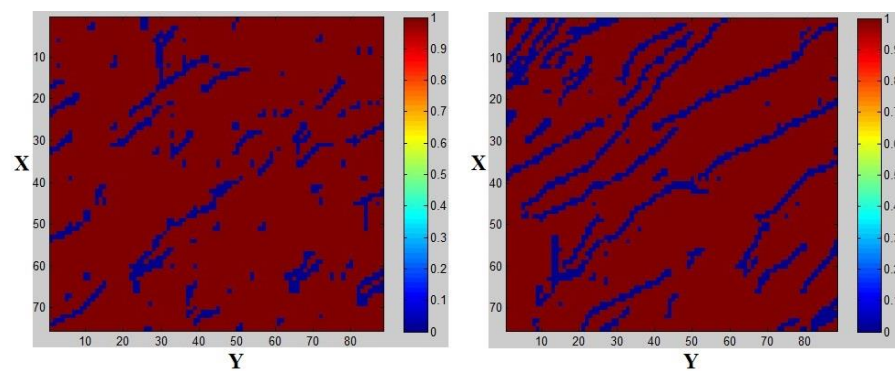
ث: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:

۰/۱، ۰/۳۰

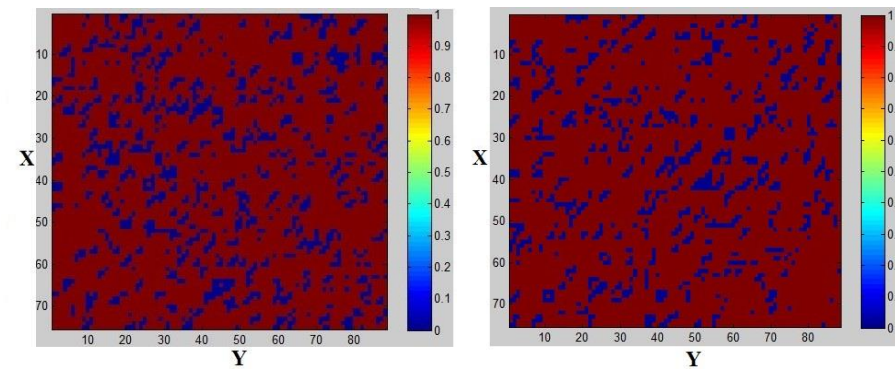
۰/۳۰، ۰/۱



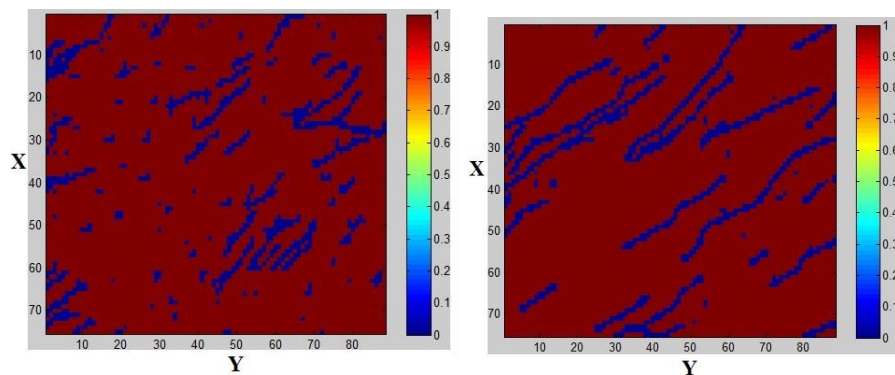
چ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.30, 0.75$



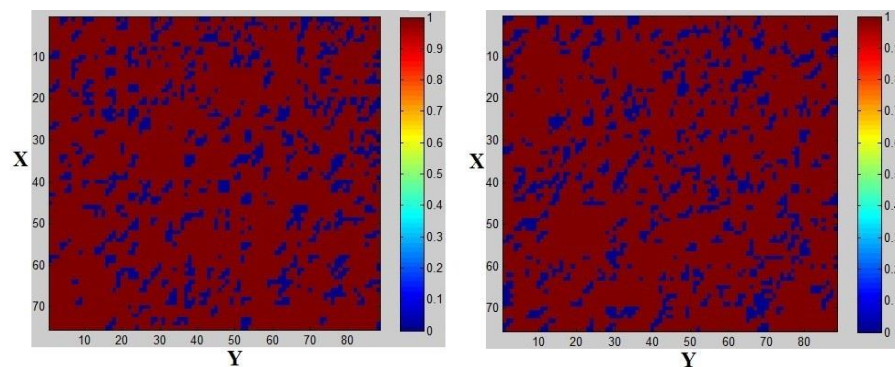
د: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.50, 0.1$



ذ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.50, 0.75$



ز: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰٫۷۰، ۰
 س: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰٫۷۰، ۰٫۱



ش: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰٫۷۰، ۰٫۵
 ص: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰٫۷۵، ۰

شکل ۴-۵ تحقیقات غیرشرطی تصویرآموزشی B، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم

جدول ۴-۲ زمان انجام محاسبات برای تحقیقات غیرشرطی تهیه‌شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم، برحسب ثانیه

	Th=۰	Th=۰٫۱	Th=۰٫۵	Th=۰٫۷۵
F=۰٫۱۰	۳۲/۸	۲۵/۹	۲۰/۸	۲۰/۱
F=۰٫۳۰	۵۱/۰۴	۳۰/۹	۲۱/۶	۲۰/۶
F=۰٫۵۰	۶۸/۲	۳۸/۲	۱۹/۲	۱۹/۱
F=۰٫۷۰	۱۰۶/۱	۳۶/۸	۱۹/۶	۱۹/۲

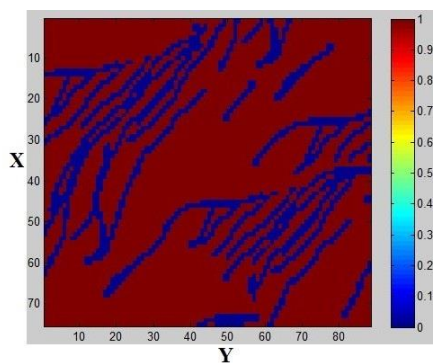
۲۰ تحقق با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه تهیه شده است. ۳ تحقق به صورت تصادفی انتخاب شده است که در شکل ۴-۶ نمایش داده شده اند. متوسط زمان محاسبات برای همه تحقق‌ها ۰/۹ ثانیه است.

پارامترهای شبیه‌سازی عبارتند از:

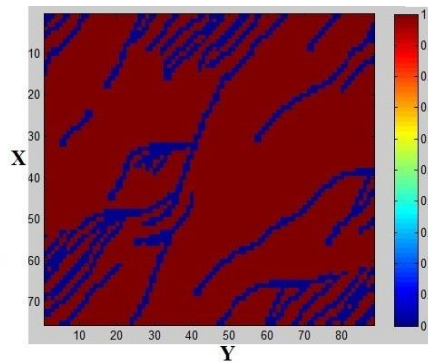
ابعاد شبکه شبیه‌سازی (SG): ۷۵x۸۸ پیکسل

شکل و اندازه الگوی شبیه‌سازی (B): مربعی، ۷x۷ پیکسل

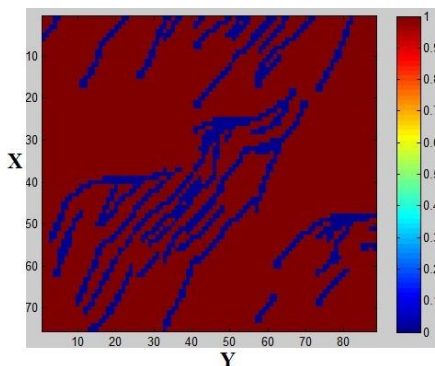
مسیر شبیه‌سازی (P): یک‌طرفه



ب: تحقق غیرشرطی شماره ۲



الف: تحقق غیرشرطی شماره ۱



پ: تحقق غیرشرطی شماره ۳

شکل ۴-۶ تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی B، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه

۴-۵ نتایج شبیه‌سازی شرطی

۴-۵-۱ نتایج شبیه‌سازی شرطی با استفاده از تصویرآموزشی A

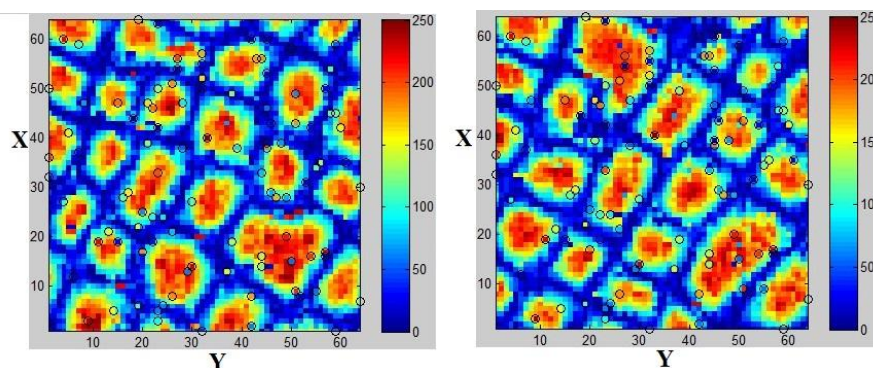
شبیه‌سازی‌های شرطی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم و به ازای مقادیر مختلف پارامترهای F و Th تهیه شده است. به ازای هر کدام از مقادیر پارامترهای F و Th تعداد ۲۰ تحقق تهیه شده است و در نهایت یک تحقق به صورت تصادفی انتخاب شده است که در شکل ۴-۷ نمایش داده شده‌اند. زمان انجام محاسبات و بازتولید داده‌های شرطی برای هر یک از تحقق‌ها در قالب جداول ۴-۳ و ۴-۴ آورده شده است.

پارامترهای شبیه‌سازی عبارتند از:

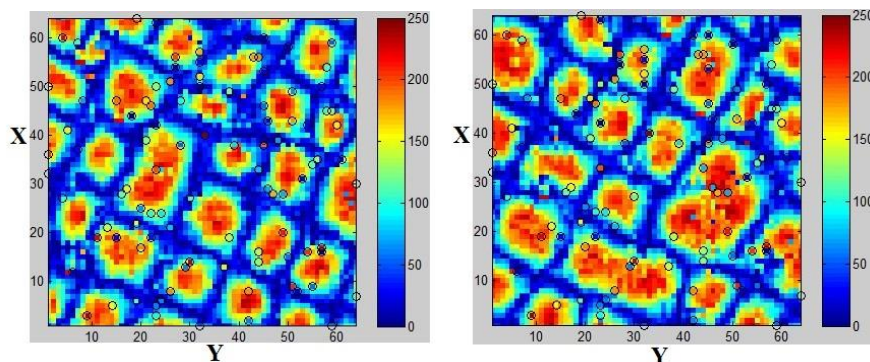
ابعاد شبکه شبیه‌سازی (SG): 64×64 پیکسل

شکل و اندازه الگوی شبیه‌سازی (B): مربعی، 5×5 پیکسل

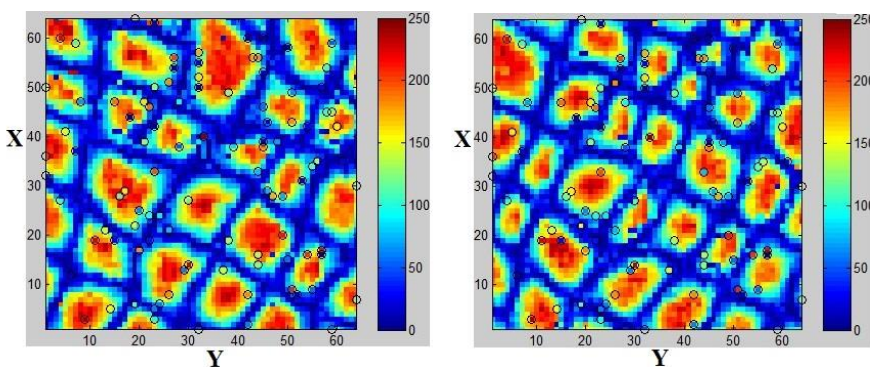
مسیر شبیه‌سازی (P): یک‌طرفه



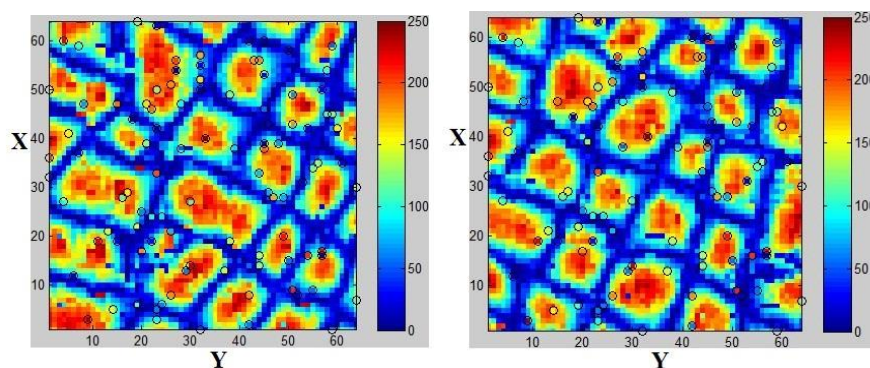
الف: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۱، ۰/۱۰
ب: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۱، ۰/۱۰



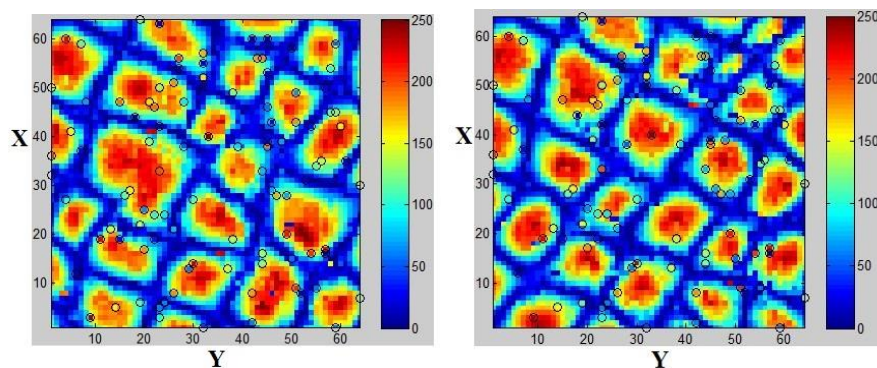
پ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۵، ۰/۱۰
 ت: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۷۵، ۰/۱۰



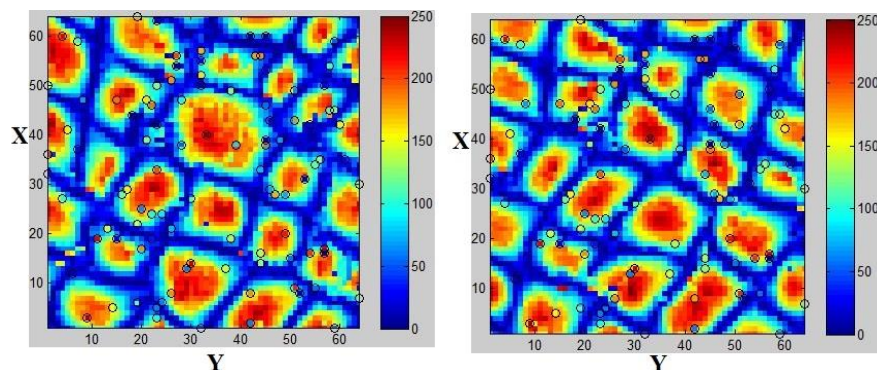
ث: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰، ۰/۳۰
 ج: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۱، ۰/۳۰



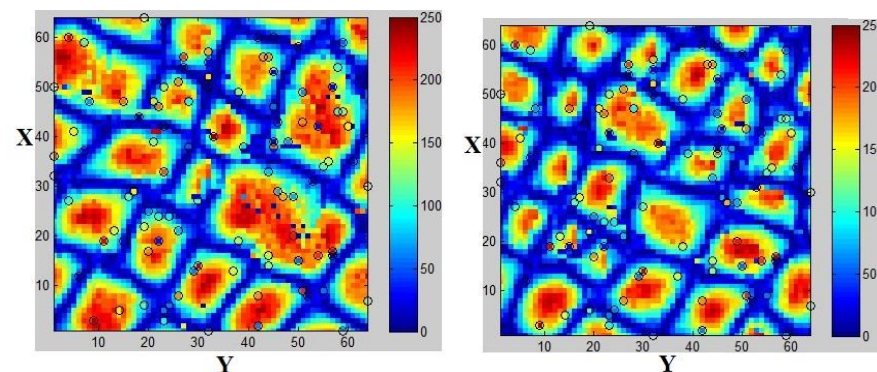
ح: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۷۵، ۰/۳۰
 ز: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ۰/۵، ۰/۳۰



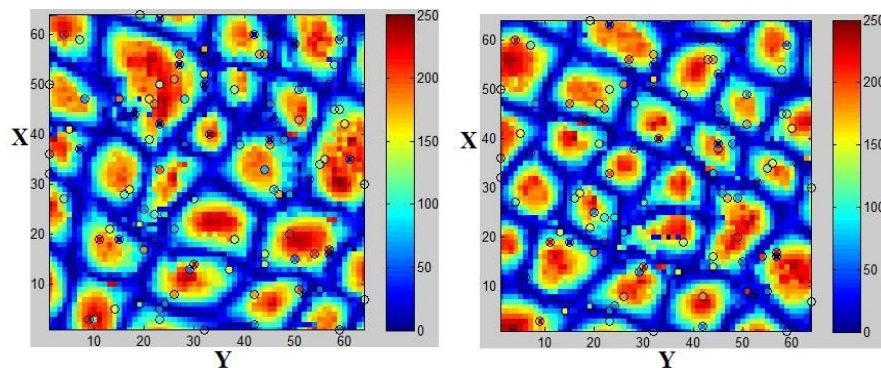
خ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: د: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:
 0.5% ، 0.1%



د: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ز: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:
 0.5% ، 0.75%



ز: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: س: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:
 0.7% ، 0.1%



ش: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: 0.70 ، 0.5
 ص: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: 0.70 ، 0.75

شکل ۷-۴ تحقق‌های شرطی تصویرآموزشی A، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم

جدول ۳-۴ بازتولید داده‌های شرطی برای تحقق‌های شرطی تهیه‌شده با استفاده الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم برحسب

درصد

	Th=۰	Th=۰/۱	Th=۰/۵	Th=۰/۷۵
F=۰/۱۰	۱۱/۴۳	۹/۷۴	۳/۰۲	۲/۳۸
F=۰/۳۰	۱۵/۴۹	۱۲/۸۹	۷/۷۹	۶/۰۶
F=۰/۵۰	۲۱/۰۷	۱۶/۲۴	۱۲/۷۵	۱۰/۰۷
F=۰/۷۰	۳۸/۶۱	۳۱/۲۵	۱۸/۹	۱۵/۴۹

جدول ۴-۴ متوسط زمان انجام محاسبات برای تحقق شرطی تهیه شده با استفاده از الگوریتم نمونه گیری مستقیم بر حسب

ثانیه

	Th=۰	Th=۰/۱	Th=۰/۵	Th=۰/۷۵
F=۰/۱۰	۱۰/۴۹	۹/۴۹	۸/۴۸	۸/۳۵
F=۰/۳۰	۲۶/۶۲	۲۵/۰۲	۲۴/۷	۲۴/۵
F=۰/۵۰	۴۶/۴	۴۲/۷	۴۰/۸	۴۰/۲
F=۰/۷۰	۵۱/۰۹	۵۰/۱	۴۹/۶	۴۹/۲۱

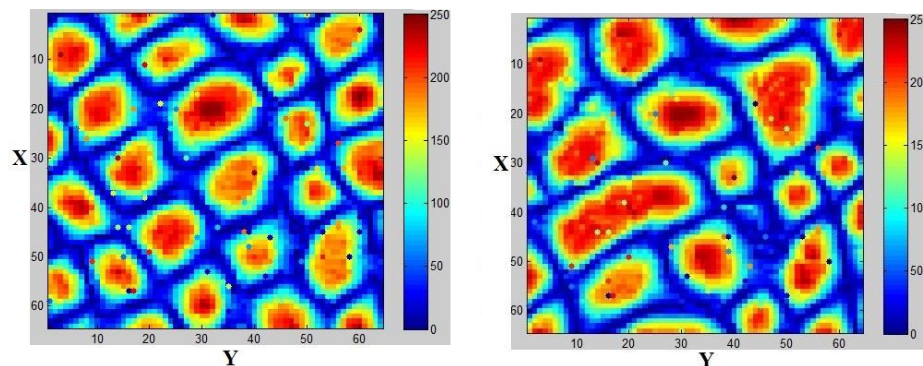
۲۰ تحقق با استفاده از الگوریتم نمونه گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه تهیه شده است. ۳ تحقق از میان آن ها به صورت تصادفی انتخاب شده است که در شکل ۴-۸ نمایش داده شده اند. متوسط زمان محاسبات و بازتولید داده های شرطی برای همه تحقق ها به ترتیب ۰/۸ ثانیه و ۶۱/۸٪ است.

پارامترهای شبیه سازی عبارتند از:

ابعاد شبکه شبیه سازی (SG): ۶۴x۶۴ پیکسل

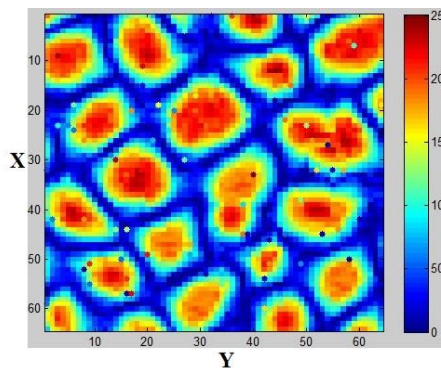
شکل و اندازه الگوی شبیه سازی (B): مربعی، ۵x۵ پیکسل

مسیر شبیه سازی (P): یک طرفه



الف: تحقق شرطی شماره ۱

ب: تحقق شرطی شماره ۲



پ: تحقق شرطی شماره ۳

شکل ۴-۸ تحقق‌های شرطی تصویرآموزشی A، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه

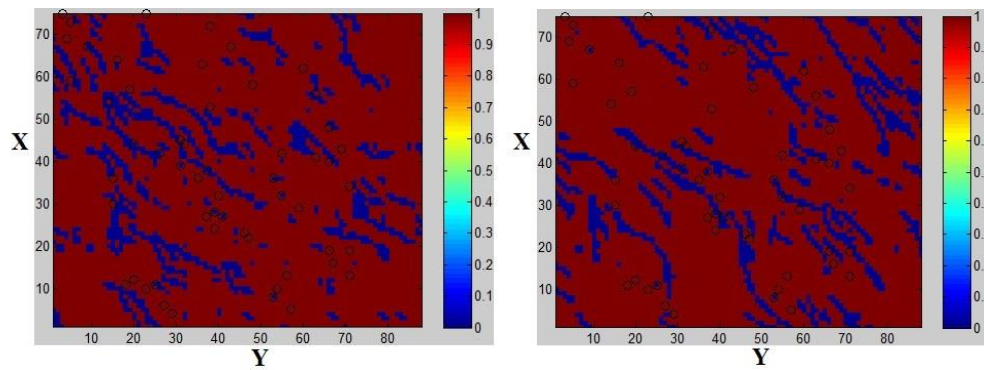
۴-۵-۲ نتایج شبیه‌سازی شرطی با استفاده از تصویرآموزشی B

تعدادی شبیه‌سازی شرطی با استفاده از داده‌های شرطی شکل ۳-۳ و به ازای مقادیر مختلف پارامترهای F و Th تهیه شده است. به ازای هر کدام از مقادیر پارامترهای F و Th تعداد ۲۰ تحقق تهیه شده است و در نهایت یک تحقق به صورت تصادفی انتخاب شده است که در شکل ۴-۹ نمایش داده شده‌اند. زمان انجام محاسبات و بازتولید داده‌های شرطی برای هر یک از تحقق‌ها در قالب جداول ۴-۵ و ۴-۶ آورده شده‌اند. پارامترهای شبیه‌سازی عبارتند از:

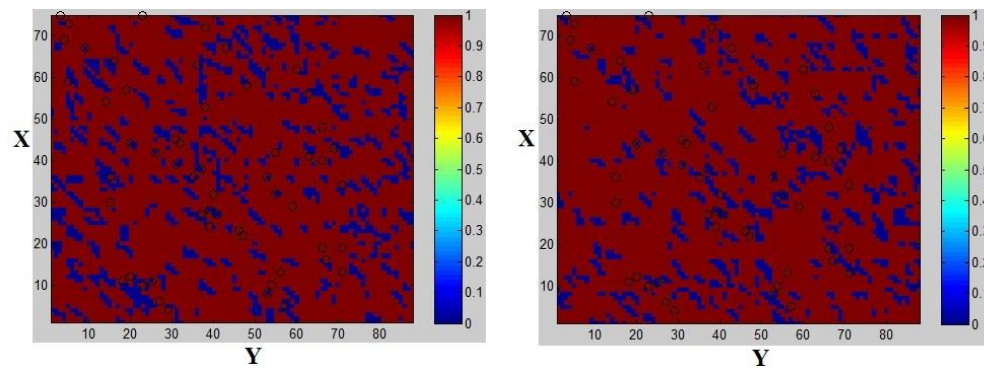
ابعاد شبکه شبیه‌سازی (SG): 75×88 پیکسل

شکل و اندازه الگوی شبیه‌سازی (B): مربعی، 7×7 پیکسل

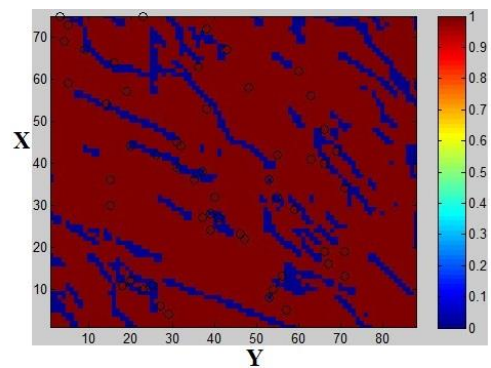
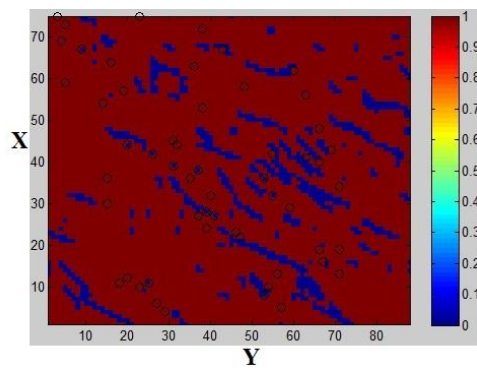
مسیر شبیه‌سازی (P): یک‌طرفه



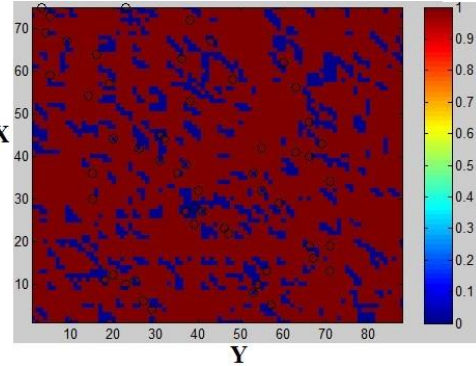
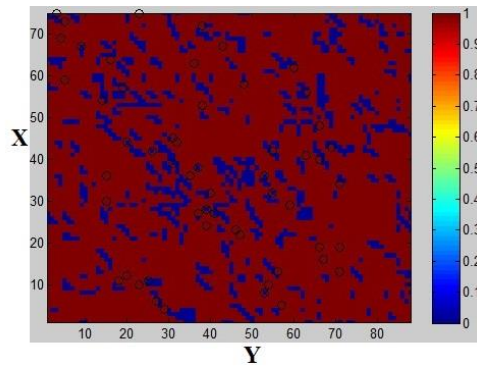
الف: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ب: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.1, 0.7$ $0.1, 0.7$



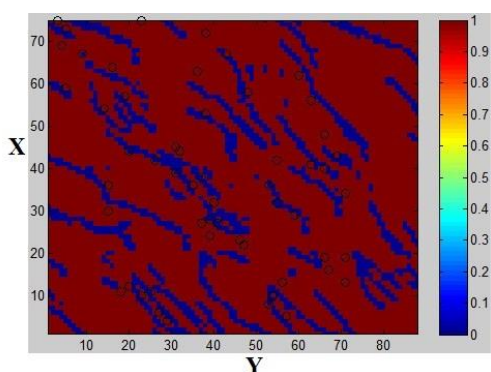
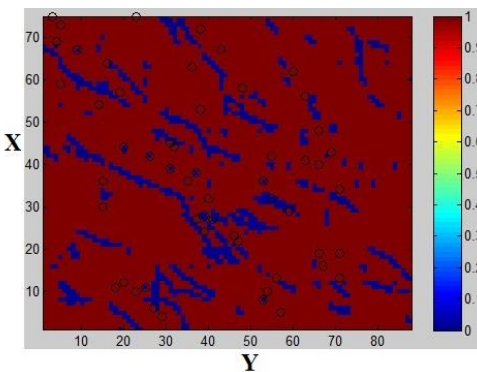
پ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ت: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.1, 0.7$ $0.1, 0.7$



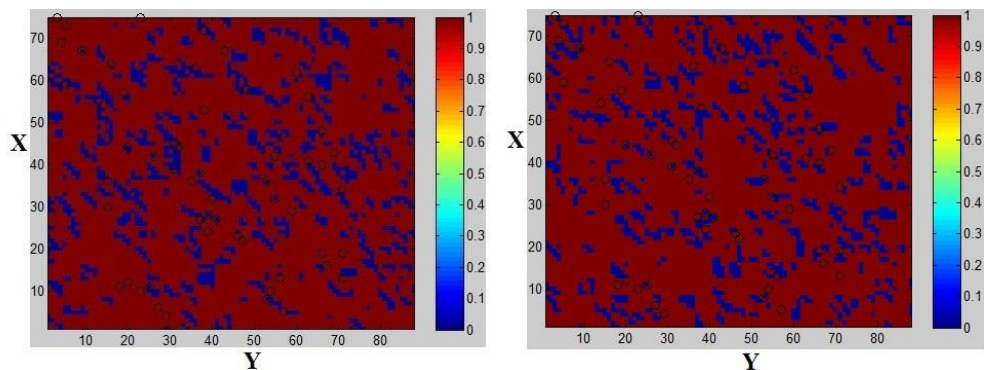
ث: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ج: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:
 0.30 ، 0.1



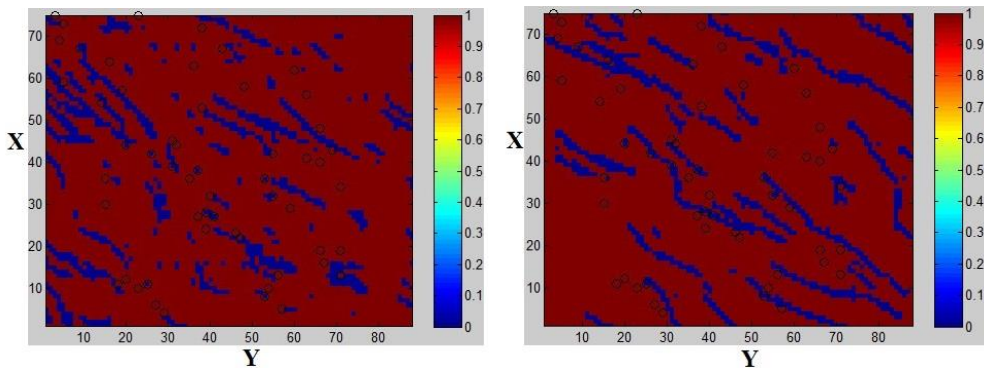
چ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: ح: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:
 0.30 ، 0.75



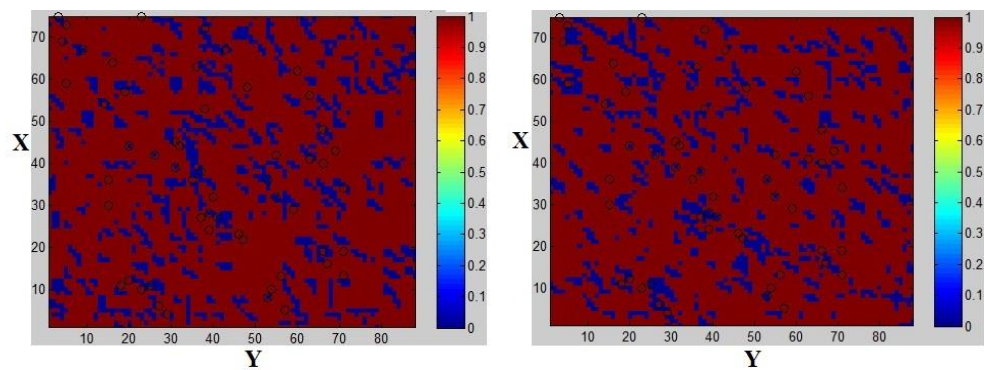
د: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: خ: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با:
 0.50 ، 0.1



د: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.5, 0.5$
 ر: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.5, 0.75$



ز: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.7, 0.1$
 س: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.7, 0.1$



ش: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.7, 0.5$
 ص: مقادیر پارامترهای F و Th به ترتیب برابر است با: $0.7, 0.75$

شکل ۴-۹ تحقق‌های شرطی تصویرآموزشی B، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم

جدول ۴-۵ درصد بازتولید داده‌های شرطی برای تحقق‌های تهیه‌شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم برحسب درصد

	Th=۰	Th=۰/۱	Th=۰/۵	Th=۰/۷۵
F=۰/۱۰	۱۳/۶۴	۹/۳	۶/۸	۵/۳
F=۰/۳۰	۱۸/۵	۱۲/۳	۹/۶	۷/۷
F=۰/۵۰	۲۱/۷۹	۱۷/۳	۱۱/۸	۸/۴
F=۰/۷۰	۳۸/۲۳	۱۹/۷۴	۱۴/۷۴	۱۱/۲۵

جدول ۴-۶ متوسط زمان انجام محاسبات برای تحقق‌های تهیه‌شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم برحسب ثانیه

	Th=۰	Th=۰/۱	Th=۰/۵	Th=۰/۷۵
F=۰/۱۰	۳۵/۷	۲۵/۱۷	۲۰/۰۵	۱۹/۶
F=۰/۳۰	۵۶/۶	۲۹/۲	۲۱/۵	۲۰/۸
F=۰/۵۰	۶۷/۹۷	۳۴/۰۷	۲۳/۸۲	۲۱/۳
F=۰/۷۰	۹۴/۳	۳۵/۶	۲۵/۲۹	۲۳/۷

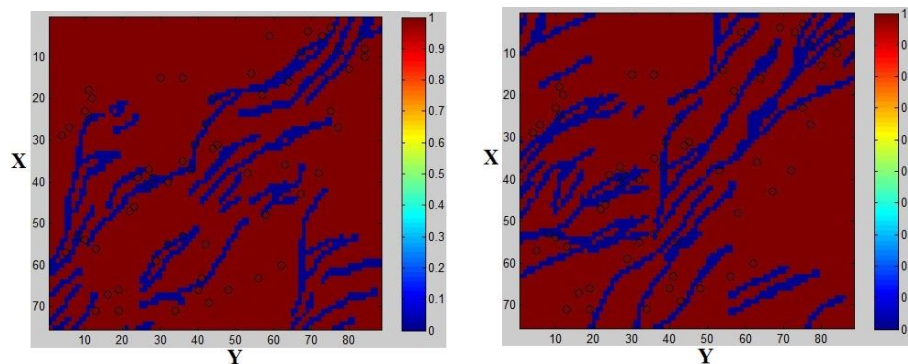
تعداد ۲۰ تحقق شرطی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه تهیه‌شده است. ۳ تحقق به‌صورت تصادفی انتخاب‌شده است که در شکل ۴-۱۰ نمایش داده شده‌اند. متوسط زمان محاسبات و بازتولید داده‌های شرطی برای همه تحقق‌ها به ترتیب ۱ ثانیه و ۹۸/۲٪ است.

پارامترهای شبیه‌سازی عبارتند از:

ابعاد شبکه شبیه‌سازی (SG): ۷۵x۸۸ پیکسل

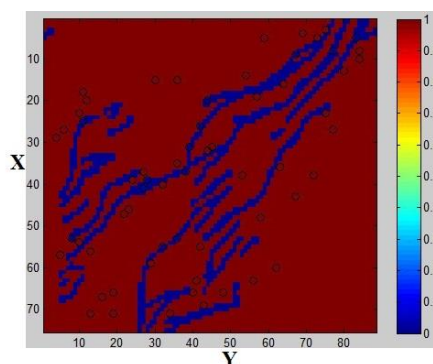
شکل و اندازه الگوی شبیه‌سازی (B): مربعی، ۷x۷ پیکسل

مسیر شبیه‌سازی (P): یک‌طرفه



تحقق شرطی شماره ۲

تحقق شرطی شماره ۱



تحقق شرطی شماره ۳

شکل ۴-۱۰ تحقق‌های شرطی تصویرآموزشی B، الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه

۴-۶ بحث

در بخش‌های قبل نتایج شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم و الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه آورده شده است. در این بخش به مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های شرطی و غیرشرطی که به‌وسیله این دو الگوریتم تهیه شده است، پرداخته خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها از سه جنبه مورد مقایسه قرار خواهند گرفت، که عبارتند از:

- پیوستگی ساختار

- زمان محاسبات
- بازتولید داده‌های شرطی

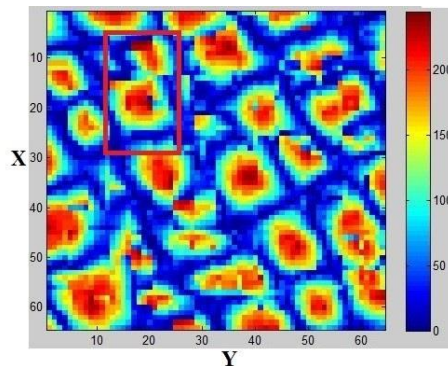
۴-۶-۱ پیوستگی ساختار

برای مقایسه پیوستگی ساختار، تحقق‌های غیرشرطی تهیه‌شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم و الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه در قالب شکل‌های ۴-۱۱ و ۴-۱۲ آورده شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم برای مقادیر مختلف F و $Th=0$ آورده شده است.

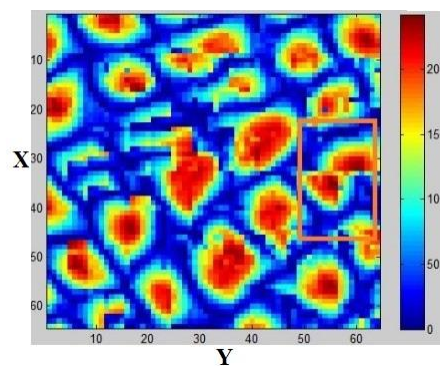
در تصویرآموزشی A ساختارهای بیضوی وجود دارند. روند تغییرات مقدار متغیر پیوسته در هر کدام از ساختارهای بیضوی شکل موجود در تصویرآموزشی از مقادیر زیاد، که در مرکز ساختارهای بیضوی قرار دارند به مقادیر کم که در حاشیه و زمینه تصویرآموزشی قرار دارند یک روند تدریجی را دنبال می‌کند. در صورتی که این روند در ساختارهای بازتولید شده رعایت نشود، بدین ترتیب که مقادیر کم و زیاد در مجاورت هم قرار بگیرند و روند تدریجی تغییرات مقدار متغیر رعایت نشود یک ناپیوستگی در ساختارهای بازتولید شده بوجود آمده است.

در تصویرآموزشی B نیز ساختارهای کانالی وجود دارند. در صورت که کانال‌های بازتولید شده ساختارهایی منقطع داشته باشند، به معنی وجود ناپیوستگی در ساختارهای بازتولید شده است. نمونه‌ای از ناپیوستگی در ساختارهای شبیه‌سازی‌شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم، به‌وسیله کادرهای رنگی در شبکه شبیه‌سازی در شکل‌های (۴-۱۱ الف و ب) و (۴-۱۲ الف و ب) نشان داده شده است. وجود ناپیوستگی در ساختارهای بازتولید شده به‌وسیله الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم ناشی از عدم جستجوی همه الگوهای تصویرآموزشی برای یافتن بهترین انطباق است.

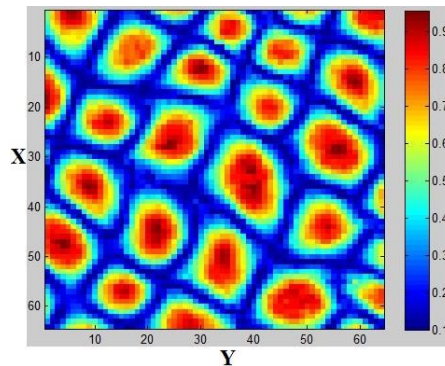
تصویر آموزشی A:



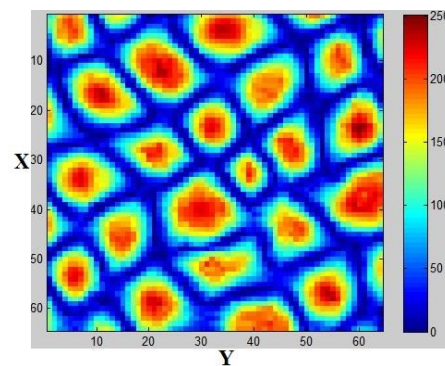
(ب)



(الف)



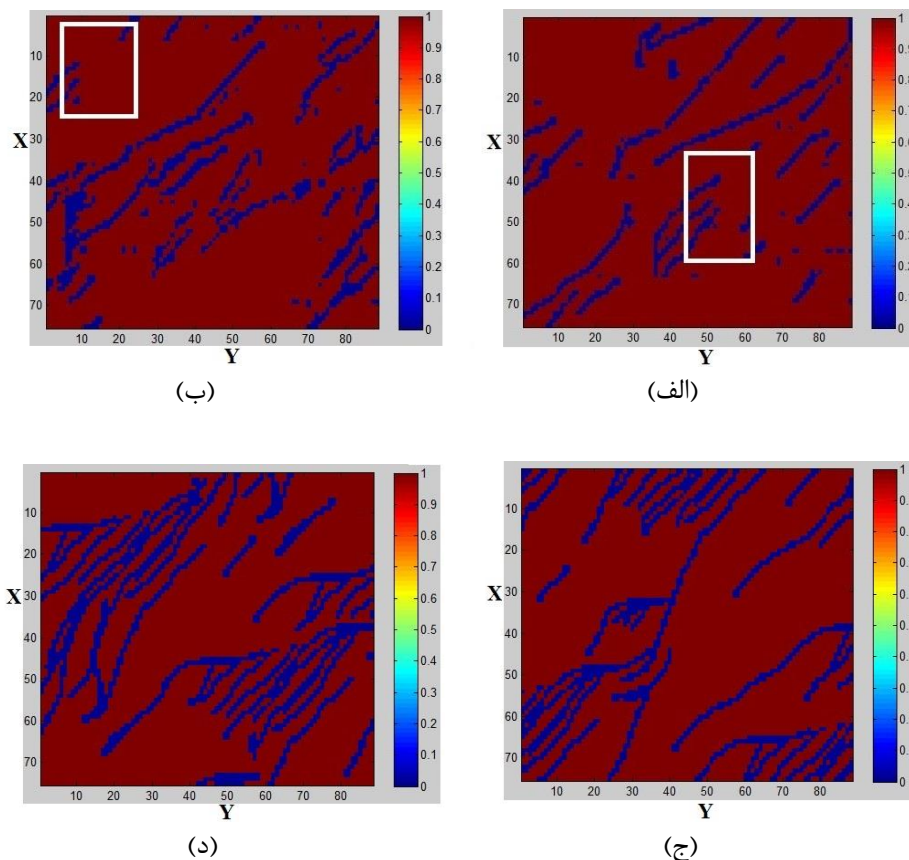
(د)



(ج)

شکل ۴-۱۱ تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی A با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم برای مقادیر مختلف F و $Th=0$ ، الف: $F=10$ ، ب: $F=30$ ، ج و د: تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی A با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه

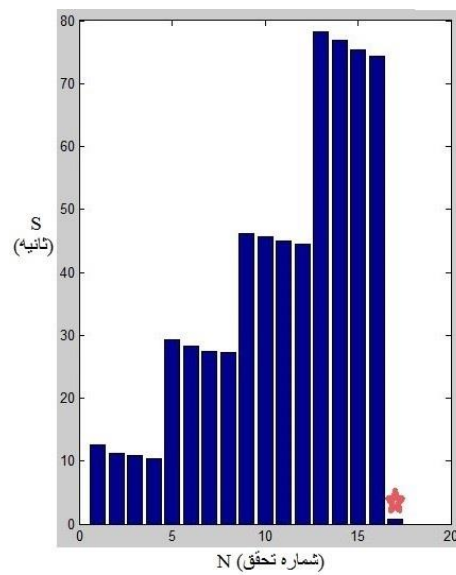
تصویر آموزشی B:



شکل ۴-۱۲ تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی B با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم برای مقادیر مختلف F و $Th=0$: الف: $F=10$ ، ب: $F=30$ ، ج و د: تحقق‌های غیرشرطی تصویرآموزشی B با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه

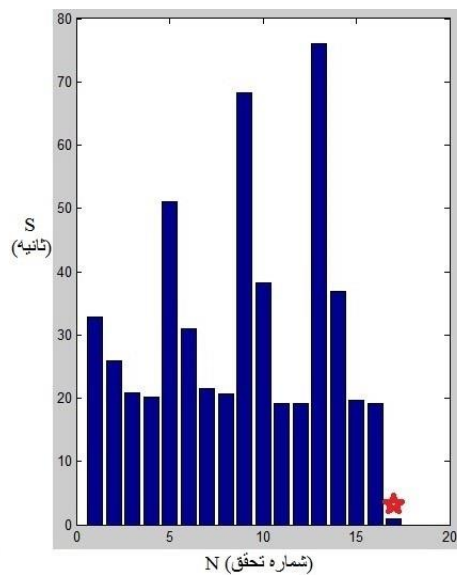
۴-۶-۲ زمان محاسبات

در شکل‌های ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ نمودارهای میله‌ای متوسط مدت زمان محاسبات برای همه تحقق‌ها نمایش داده شده است. نمودار میله‌ای مدت‌زمان محاسبات برای تحقق‌هایی که با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه تهیه‌شده است به‌وسیله نماد ستاره در بالای هر نمودار مشخص شده است. نمودار میله‌ای شکل ۴-۱۳ مربوط به مدت‌زمان محاسبات، برای تحقق‌های غیرشرطی است که با استفاده از تصویرآموزشی A تهیه‌شده است.



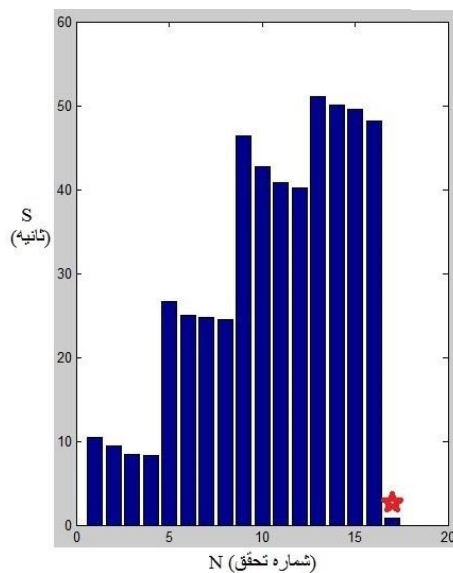
شکل ۴-۱۳ نمودار میله‌ای متوسط زمان محاسبات شبیه‌سازی غیرشرطی، تصویرآموزشی A

نمودار میله‌ای شکل ۴-۱۴ مربوط به مدت‌زمان محاسبات، برای تحقق‌های غیرشرطی است که با استفاده از تصویرآموزشی A تهیه شده است.



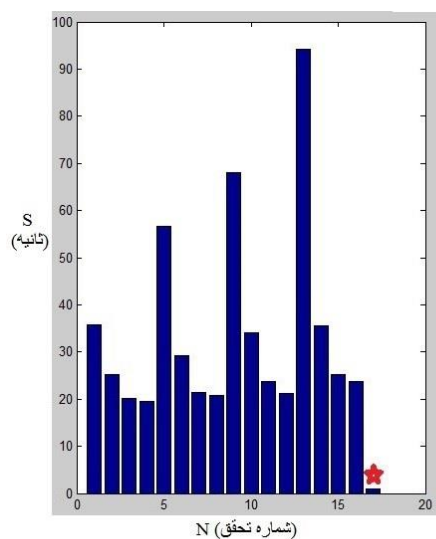
شکل ۴-۱۴ نمودار میله‌ای متوسط زمان محاسبات شبیه‌سازی غیرشرطی، تصویرآموزشی B

نمودار میله‌ای شکل ۴-۱۵ مربوط به مدت زمان محاسبات، برای تحقق‌های غیرشرطی است که با استفاده از تصویرآموزشی A تهیه شده است.



شکل ۴-۱۵ نمودار میله‌ای متوسط زمان محاسبات شبیه‌سازی شرطی، تصویرآموزشی A

نمودار میله‌ای شکل ۴-۱۶ مربوط به مدت زمان محاسبات، برای تحقق‌های غیرشرطی است که با استفاده از تصویرآموزشی B تهیه شده است.

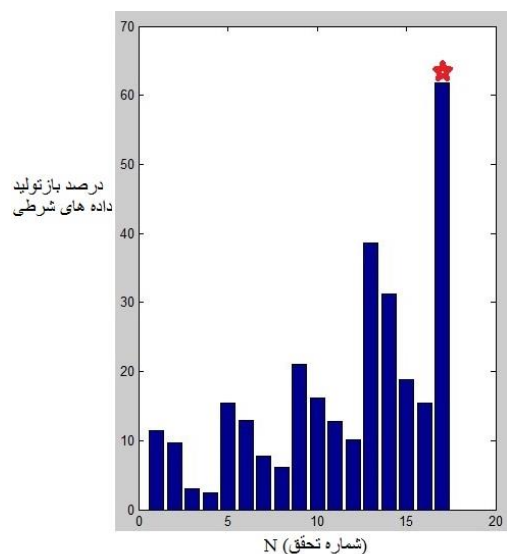


شکل ۴-۱۶ نمودار میله‌ای متوسط زمان محاسبات شبیه‌سازی شرطی، تصویرآموزشی B

۳-۶-۴ بازتولید داده‌های شرطی

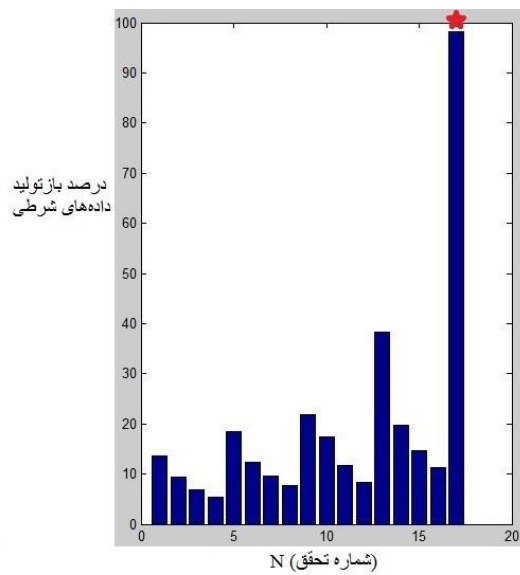
بازتولید داده‌های شرطی یکی از مهم‌ترین پارامترها در ارزیابی تحقق‌های شرطی است. ایجاد مدل‌هایی منطبق بر داده‌های شرطی، تاییدی بر کارایی الگوریتم استفاده‌شده است. در ادامه نمودار میله‌ای متوسط بازتولید داده‌های شرطی برای همه تحقق‌های شرطی در غالب شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ آورده شده است. نمودار مربوط به الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه با نماد ستاره در بالای نمودار مشخص شده است.

شکل ۴-۱۷ نمودار میله‌ای متوسط بازتولید داده‌های شرطی، برای تحقق‌های شرطی است، که با استفاده از تصویرآموزشی A تهیه‌شده است.



شکل ۴-۱۷ نمودار میله‌ای متوسط بازتولید داده‌های شرطی، تصویرآموزشی A

شکل ۴-۱۸ نمودار میله‌ای متوسط بازتولید داده‌های شرطی برای تحقق‌های شرطی است که با استفاده از تصویرآموزشی B تهیه‌شده است.



شکل ۴-۱۸ نمودار میله‌ای متوسط بازتولید داده‌های شرطی، تصویرآموزشی B

۴-۷ نتیجه‌گیری

با استفاده از واهمامیخت در فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی، همه الگوهای تصویرآموزشی با استفاده از رابطه ۳-۵ جستجو می‌شوند. بنابراین مشکل نادیده گرفتن الگوهای موجود در تصویرآموزشی با استفاده از واهمامیخت بر طرف شده است.

اگرچه زمان محاسبات انطباق الگو در تصویرآموزشی با استفاده از واهمامیخت بهبود یافته است، ولی ایده استفاده از تابع تبدیل فوریه برای بهبود بیشتر زمان محاسبات انطباق الگو در تصویرآموزشی ارائه شده است؛ که بر اساس آن الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه معرفی شده است. در زیر زمان محاسبات انطباق الگو برای تهیه شبیه سازی‌های غیرشرطی با استفاده از واهمامیخت و تابع تبدیل فوریه

مقایسه شده است:

تصویرآموزشی A:

واهمامیخت: ۱/۸ ثانیه

تبدیل فوریه: ۰/۷

تصویرآموزشی B:

واهمامیخت: ۲/۲

تبدیل فوریه: ۰/۹

در ادامه به مقایسه نتایج شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم و نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه پرداخته خواهد شد.

با توجه به شکل‌های ۱۱-۴ و ۱۲-۴ مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که ساختارهای شبیه‌سازی‌شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه پیوستگی بیشتری دارند. بهبود پیوستگی ساختارها در تحقق‌های تهیه‌شده با استفاده از تصویرآموزشی A (شکل ۳-۱) بیشتر است. نمودارهای میله‌ای شکل‌های ۱۳-۴، ۱۴-۴، ۱۵-۴ و ۱۶-۴ نشان می‌دهد که بهترین زمان محاسبات برای شبیه‌سازی‌های شرطی و غیرشرطی با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم به شرح زیر بوده است:

تحقق‌های شرطی: تصویرآموزشی A: SC ۸/۳، تصویرآموزشی B: SC ۱۹/۶

تحقق‌های غیرشرطی: تصویرآموزشی A: SC ۱۰/۳، تصویرآموزشی B: SC ۲۰/۱

متوسط زمان محاسبات برای تحقق‌های تهیه‌شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه به شرح زیر بوده است:

تحقق‌های شرطی: تصویرآموزشی A: SC ۰/۸، تصویرآموزشی B: SC ۱

تحقق‌های غیرشرطی: تصویرآموزشی A: SC ۰/۷، تصویرآموزشی B: SC ۰/۹

متوسط زمان محاسبات برای تحقق‌هایی غیرشرطی که با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه تهیه‌شده‌اند برای تصویرآموزشی A ۶/۷٪ و تصویرآموزشی B ۴/۴٪، کمترین زمان محاسبات الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو است.

متوسط زمان محاسبات برای تحقق‌هایی که با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه تهیه شده‌اند برای تصویرآموزشی A ۹/۵٪ و تصویرآموزشی B ۵/۱٪، کمترین زمان محاسبات الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو است.

نمودارهای میله‌ای شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ نشان می‌دهد که بیشترین میزان بازتولید داده‌های شرطی برای شبیه‌سازی‌های شرطی که با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم تهیه شده‌اند به شرح زیر بوده است:

تصویرآموزشی A: ۳۸/۶٪ تصویرآموزشی B: ۳۸/۲۳٪

بازتولید داده‌های شرطی برای تحقق‌های تهیه شده با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه:

تصویرآموزشی A: ۶۱/۸٪ تصویرآموزشی B: ۹۸/۲٪

متوسط زمان محاسبات برای تحقق‌هایی که با استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه تهیه شده‌اند برای تصویرآموزشی A ۹/۵٪ و تصویرآموزشی B ۵/۱٪، کمترین زمان محاسبات الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

اساسی‌ترین مشکل روش‌های زمین‌آمار دوندنقطه‌ای مربوط به واریوگرام است. واریوگرام در هر لحظه ارتباط فضایی بین دو نقطه را برقرار می‌کند بنابراین تمام روش‌های بر پایه واریوگرام در بازتولید ساختارهای غیرخطی با مشکل مواجه بودند. زمین‌آمار چندنقطه‌ای با استخراج آمارهای چندنقطه‌ای از تصویرآموزشی توانایی بازتولید ساختارهای غیرخطی را داراست. الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو یکی از الگوریتم‌های ارائه شده در زمین‌آمار چندنقطه‌ای است. برای کاهش زمان محاسبات در الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو، محدودیت‌هایی در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

- جستجوی درصدی از تصویرآموزشی
 - در نظر گرفتن مقداری مرزی برای فاصله بین رخداد داده و الگوهای موجود در تصویرآموزشی
- این محدودیت‌ها موجب کاهش پیوستگی ساختارها و کاهش بازتولید داده‌های شرطی شده‌اند. در این پایان نامه برای رفع این کاستی‌ها ابتدا واهمامیخت در فرآیند انطباق الگو استفاده شده است و سپس استفاده از تابع تبدیل فوریه پیشنهاد شده است که بر اساس آن الگوریتمی بر مبنای تبدیل فوریه معرفی شد. اساس الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه استفاده از تابع تبدیل فوریه در فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی است.

با استفاده از تابع تبدیل فوریه زمان محاسبات انطباق الگو در تصویرآموزشی کاهش چشمگیری داشته است بنابراین جستجوی کامل تصویرآموزشی در هر مرتبه از فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی امکان پذیر شده است.

شبیه سازی هایی با استفاده از الگوریتم نمونه گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو و همچنین الگوریتم نمونه گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه تهیه شد و نتایج شبیه سازی ها از سه جنبه:

- پیوستگی ساختار
- زمان محاسبات
- بازتولید داده های شرطی

مورد مقایسه قرار گرفتند که نتایج مقایسه نتایج شبیه سازی ها به شرح زیر هستند:

- استفاده از تابع تبدیل فوریه موجب افزایش پیوستگی ساختارها شده است.
- با استفاده از تابع تبدیل فوریه، بازتولید داده های شرطی به طور متوسط دو برابر شده است.
- زمان محاسبات برای تحقق هایی که با استفاده از تبدیل فوریه تهیه شده است، به طور متوسط، ۶/۴٪ کمترین زمان محاسبات الگوریتم نمونه گیری مستقیم بر مبنای استخراج الگو است.

۵-۲ پیشنهادات

- اگرچه با استفاده از تابع تبدیل فوریه زمان محاسبات بهبود یافته است، ولی ابعاد تصویرآموزشی و همچنین تعداد داده های شرطی، در نمونه های واقعی نسبت به نمونه های مصنوعی بیشتر است. لذا به منظور بهبود بیشتر زمان محاسبات پیشنهاد می شود، که با استفاده از ویژگی های آماری الگوی استخراج شده از شبکه شبیه سازی برای فیلتر کردن تصویرآموزشی پیش از شروع فرآیند انطباق الگو استفاده شود.

- بازتولید داده‌های شرطی و یا به عبارت دیگر ارائه مدلی منطبق با داده‌های برداشت‌شده، می‌تواند اعتبار بالایی به شبیه‌سازی‌ها بدهد. در عمل مشاهده شده است، که با افزایش بازتولید داده‌های شرطی، پیوستگی ساختارهای شبیه‌سازی شده کاهش می‌یابد. پیشنهاد می‌شود که در فرآیند انطباق الگو در تصویرآموزشی، به داده‌های شرطی الویت داده شود. به نحوی که الگوهای استخراج‌شده از تصویرآموزشی تا حد ممکن منطبق با داده‌های شرطی باشند، به گونه‌ای که پیوستگی ساختارها نیز در حد مطلوبی حفظ شود.

پیوست ۱: الگوریتم نمونه‌گیری مستقیم بر مبنای تبدیل فوریه

```
Clear all;
Close all;
Clc
simul_size = [64, 64];    %size of the simulation grid: y x z
Bunch=5;                  %size of patch
mode_cond=1;              %mode of conditioning: conditional: 1 unconditional: 2
Path mode=1;              %path simulation: horizontal: 1  vertical: 2  random:3
%loading training image
Load ('TI_A.txt');
ti_size= [size (TI, 1) size (TI, 2)];
%loading conditioning data
Load ('TI_A_Cond.txt');
%defining simulation path
path_sim =ones (1, simul_size (1)*simul_size (2));
If Path mode==1
For i=1:simul_size (1)
    For j=1:simul_size (2)
        path_sim((i-1)*simul_size(2)+j)=(j-1)*simul_size(1)+i+((k-
1)*simul_size(1)*simul_size(2));
    End
End
Else
    path_sim =1:simul_size (1)*simul_size (2)*simul_size (3);
End
%creating empty simulation Grid
Simul = Nan (simul_size (1), simul_size (2), simul_size (3));
%put conditioning data within SG
If mode_cond==1
For i = 1: size (data, 1)
```

```

%finding coordinate of data points
Dataid = (simul_size (1)*(data (i, 2)-1)) +data (i, 1));
Simul (dataid) = data (i, 4);
End
id_hard_da= (simul_size (1).*(data (: 2)-1)) +data (: 1));
End
%looping of simulation
While ~is empty (path_sim)
%finding where we are in the simulation
[Ysim, Xsim]=ind2sub (size (simul), path_sim (1));
%creating data event
[Template]=create template (Ysim, Xsim, Bunch, simul, simul_size);
If is empty (template) ==1 %there is no conditioning data
    Row=randperm ((ti_size (1)-(row_patch-1)), 1);
    Col=randperm ((ti_size (2)-(col_patch-1)), 1);
    Simul (ysim: ysim+ (row -1), xsim: xsim+ (col_patch-1)
Else
    [Distance]=distance function based on FFT (Template, TI, xsim, ysim, Bunch);
    [~, ss]=sort (distance_1 (:));
    k=randperm (10, 1);
    ID=ss (k);
    [Y, x] = ind2sub (size (TI), k);
    pattern=TI(y:y+(row -1),x:x+(col -1));
simul(id_si_1(1:row,1:col))=new pat;
    path_sim (id_simulated) = []; %Removing coordinate of simulated data from
simulation path
End
If mode_cond==1
%calculating reproduction rate
a=simul (id_hard_data);
Hard data=data (: 3);

```

```
corr2 (a, Hard data)
End
% Visualizing
Imagesc (simul)
Hold on
scatter(data(:,2),data(:,1),30,data(:,3),'o','filled')
```

مراجع

- [۱] Strebelle, S., 2012, Multiple-Point Geostatistics: from Theory to Practice, Ninth International Geostatistics Congress, Oslo, Norway June 11 – 15, 2012
- [۲] Guardiano, F. B. and Srivastava, R. M., 1993. Multivariate Geostatistics: Beyond Bivariate Moments.
- [۳] Mariethoz, G., Renard, P., Straubhaar, J., 2010. Direct sampling method to perform multiple point geostatistical simulations. Water Resources Research 46 (W11536)
- [۴] رضایی، ح.، (۱۳۹۰)، "زمین آمار چندنقطه‌ای: تئوری و کاربرد آن در شبیه سازی دایک، مطالعه موردی: کانسار مس سونگون"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران
- [۵] Matheron, G., 1971. The Theory of Regionalized Variables and its Applications. Les Cahiers du center de Morphologie Mathématique, Fasc. 5.
- [۶] Galli, A., 2002. Geostatistics: An Overview of Estimation and Simulation Methods for Oil Reservoirs and Basin Modeling. Center de géostatistique, Ecole des Mines de Paris, 35 rue Saint Honoré, 77305 Fontainebleau, France
- [۷] Strebelle, S., 2000. Sequential Simulation Drawing Structure from Training. PhD thesis, Stanford University, CA, 2000
- [۸] Mariethoz, G., Straubhaar, J., Renard P., Chugunova, T., Biver, P., 2015. Constraining distance-based multipoint simulations to proportion and trends. Environmental Modeling and Software, 72, 184-197
- [۹] Deutsch, C. V. and Pyrcz, M. J., 2015. Geostatistical Reservoir Modeling, Oxford University Press, 2nd edition. p. cm.
- [۱۰] Arpat, B. G., 2004. Sequential simulation with pattern, Ph.D. thesis, Stanford University, Stanford, CA.
- [۱۱] Farmer, C., 1990. Numerical rocks. In P. King, editor, The mathematical generation of reservoir geology, pages 22-23. Clarendon Press, Oxford.
- [۱۲] Deutsch, C. V. and Journel, A. G., 1998. GSLIB Geostatistical software library and user's guide; Oxford University Press, New York, 369 pp.

- [۱۳] Tjelmeland, H., 1996. Stochastic Model in Reservoir Characterization and Markov Random Fields for Compact Objects. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- [۱۴] Caers, J. and Journel, A. G., 1998. Stochastic reservoir simulation using neural networks trained on outcrop data. In SPE 49026. Society of Petroleum Engineers.
- [۱۵] Caers, J., Srinivasan, S., and Journel, A. G., 1999. Geostatistical quantification of geological information for a fluvial-type North Sea reservoir. In SPE ATCE Proceeding, number SPE 56655. Society of Petroleum Engineers.
- [۱۶] Srivastava, R. M., 1992. Iterative methods for spatial simulation. SCRF Annual Meeting Report 5, Stanford Center for Reservoir Forecasting, Stanford, CA 94305-2220.
- [۱۷] Mariethoz, G. and Caers, J. 2014. Geostatistical Reservoir Modeling; Wiley Blackwell Press, UK.
- [۱۸] www.knowledgette.com/JfjM/how-to-model-petrophysical-properties-with-sequential-gaussian-simulation
- [۱۹] Meerschman, E., Pirot, G., Mariethoz, G., Straubhaar, J., Meirvenne, M. V., Renard, P., 2013. A practical guide to performing multiple-point statistical simulations with the direct sampling algorithm. Computer and Geosciences, 52, 307-324
- [۲۰] Rezaee, H., Mariethoz, G., Koneshloo, M., Asghari, O., 2013. Multiple-point geostatistical simulation using the bunch-pasting direct sampling method. Computer and Geosciences, 54, 293-308.
- [۲۱] www.trainingimages.org/training-images-library.com
- [۲۲] Nixon, M. S., Aguado, A. S., 2008. Feature Extraction and Image Processing. Elsevier Press, 2nd edition.
- [۲۳] Jacobs, D., 2005. Correlation and Convolution. Class Notes for CMSC 426, fall 2005.

[۲۴] شیدفرع، (۱۳۸۶) "ریاضیات مهندسی" جلد اول، چاپ دوازدهم، انتشارات دالفک، تهران، ص ۳۶

Abstract

Direct sampling bunch pasting algorithm has been proposed in multiple-point geostatistics. The fraction of training image which is searched and considering a threshold for distance between patches which are extracted from simulation grid and TI, are two limits for reducing the time of calculation. Although these parameters reduce the calculation time, but they have negative impact on continuity of structure and reproduction rate of conditioning data due to disregarding a fraction of TI's patterns.

The aim of this study is to provide a method to reduce the calculation time. In this way the limits of direct-sampling are ignored. In this study the direct-sampling bunch-pasting algorithm has been changed to use the Fourier transform in the process of template matching in TI. Two artificial training images has been used to generate some conditional and unconditional realizations.

According to the simulation results of direct sampling bunch pasting and direct sampling based on Fourier transform, using of FFT makes some improvement:

- It increase the continuity of structures.
- It doubles reproduction rate of conditioning data in average.
- The calculation time for realizations which are generated by using of Fourier transform is 6.4 percent of minimum calculation time of direct sampling bunch pasting algorithm.

Keywords: multiple-point geostatistics, direct sampling bunch-pasting, Fourier transform, direct sampling based on fourier transform, continuity of structure, time of calculation, reproduction rate,



Shahrood University of Technology

**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering Mining
Department**

**Presentation of direct sampling method based on the Fourier
transform algorithm in multiple point geostatistics**

Benyamin shariati nik

Supervisors

Dr. B. Tokhmechi

Dr. M. Ansari Jafari

May 2016