الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده انطباق‌پذیر و سریع برای مدل‌سازی شبکه شکاف‌ها در مخازن شکاف‌دار طبیعی

سجاد قلی‌نژاد و محسن مسیحی*

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/٤/۲۲

چکیده

دانستن جهت و توزیع فضایی شکاف‌ها در مخازن شکاف‌دار برای پیش‌بینی جریان سیالات در این نوع مخازن امری ضروری است. در میان روش‌های موجود برای مدل‌سازی توزیع شکاف‌ها، روش بهینه‌سازی تبرید شبیه‌سازی شده به دلیل توانایی آن در حل مسائل بزرگ و نیز یافتن مقادیر کمینه مطلق از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مطالعه، هدف ارائه یک روش تبرید شبیه‌سازی شده انطباق‌پذیر و سریع، برای مدل‌سازی شکاف‌ها می‌باشد. این روش با ارائه یک مدل برای تخمین مقدار اولیه پارامتر شبه دما، پیشنهاد یک مدل انطباق‌پذیر برای طول زنجیر مارکوف و در نهایت پیشنهاد یک مدل انطباق‌پذیر و سریع برای کاهش مقدار پارامتر شبه دما، باعث افزایش سرعت محاسبات الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده می‌شود. همچنین در این مطالعه، یک تابع هدف خاص مورد بررسی قرار داده شده و این نکته نشان داده می‌شود که چرا الگوی شکاف‌های تولید شده با این روش منجر به دو دسته شکاف عمود برهم می‌شود. در ادامه تابع هدف بهبود داده شده که بتواند الگوی شکاف‌های مزدوج با هر زاویه دلخواهی را تولید کند.

کلمات کلیدی: توزیع فضایی شکاف‌ها، تبرید شبیه‌سازی شده انطباق‌پذیر، شکاف‌های مزدوج

مقدمه

امروزه در جهان، مخازن نفتی کربناته از نظر اقتصادی بسیار مهم هستند. زیرا بین یک سوم تا یک دوم تولید نفت دنیا از این نوع مخازن می‌باشد [۱]. بیشتر این مخازن یا به طور طبیعی شکاف‌دار[1] هستند و یا در طول عملیات مختلف شکاف‌دار شده‌اند [۲]. جهت‌گیری و توزیع فضایی شکاف‌ها بر روی مقدار نفوذپذیری مخزن تأثیر می‌گذارد به‌طوری که شکاف‌های بزرگ با مقدار بازشدگی[2] بالا معمولاً جریان سیالات را بهبود می‌بخشند [۳-۵]. به‌علاوه مدل‌سازی مخازن شکاف‌دار اولین گام در طراحی عملیات ایجاد شکاف هیدرولیکی[3] است. همچنین مدل‌سازی مخازن شکاف‌دار در طراحی تولید بهینه و نیز ارزیابی پتانسیل مخزن بسیار سودمند است. به طور کلی سه دلیل وجود دارد که ما را ترغیب به مطالعه جزئی توزیع شکاف‌ها می‌کند [٦]:

۱- تعیین بهترین مکان برای چاه‌های تولیدی و تزریقی.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی masihi@sharif.edu

1. Fractured
2. Aperture
3. Hydraulic Fracturing

۲- مطالعه رفتار مخازن شکاف‌دار در مقابل فرآیندهای تحریک چاه و لذا طراحی بهینه عملیات ایجاد شکاف هیدرولیکی.

۳- طراحی تولید بهینه و ارزیابی پتانسیل تولید مخزن.

به منظور دستیابی به اهداف فوق، مخازن شکافدار باید مورد ارزیابی قرار گرفته و مدل‌سازی شوند. شایان ذکر است که برای مدل‌سازی شکاف‌ها لازم است مشخصه‌هایی مانند جهت‌گیری دسته‌های مختلف شکاف‌ها در حجم مخزن (در سطح لایه و نیز در ضخامت لایه‌های مختلف)، چگالی شکاف‌ها و مورفولوژی دسته‌های مختلف شکاف‌ها لحاظ گردند. به طور معمول، روش‌های مدل‌سازی شکاف‌ها در مخازن شکاف‌دار طبیعی، باید با واقعیت‌های زمین‌شناسی (یعنی در نظر گرفتن عوامل مختلف ناهمگونی از قبیل تغییرات لیتولوژی، چینه‌شناسی و ساختاری) همخوانی داشته باشد. چرا که، شکاف‌ها و سایر عوامل ناهمسان‌گردی مخزن (مانند گسل‌ها و استیلولیت‌ها) در مراحل مختلف دگرشکلی تشکیل می‌شوند. بنابراین، در هر مرحله از دگرشکلی، شکل‌گیری و توزیع شکاف‌ها در بخش‌های مختلف یک لایه مخزنی یکسان نیست، و عناصر ساختاری قدیمی به مثابه یک عامل ناهمگونی عمل می‌کنند که شکل‌گیری و توزیع شکاف های مرحله بعد را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از روش‌های مدل‌سازی مخازن شکافدار، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی[1] است اما در این‌گونه مسائل، روش‌های بهینه‌سازی رایج مبتنی بر گرادیان به دلیل وجود تعداد زیادی نقاط مینیمم نسبی، وجود تعداد زیادی متغیر مستقل و یا دشواری محاسبه توابع هدف، ناکارآمد هستند [۳ و ۷]. در مقابل، روش‌های بهینه‌سازی که وابسته به گرادیان نباشند، می‌توانند مقدار مینیمم مطلق تابع هدف مربوطه را پیدا کرده و یک مدل مناسب از توزیع فضایی شکاف‌ها حاصل نمایند. یکی از معروف‌ترین روش‌های بهینه‌سازی غیروابسته به گرادیان، روش تبرید شبیه‌سازی شده[2] است. برخلاف روش‌های مبتنی بر گرادیان که تنها می‌توانند نقطه مینیمم نزدیک به حدس اولیه را پیدا کنند، روش تبرید شبیه‌سازی شده به نقطه مینیمم مطلق، همگرا شده و این همگرایی مستقل از حدس اولیه است [۷]. مسیحی و همکارانش روش مناسبی را برای مدل‌سازی مخازن کربناته بر مبنای فیزیک شکافته شدن ارائه دادند [۸]. این روش با یک تابع انرژی شروع می‌شود که برمبنای ارتباط فضایی[3] بین شکاف‌ها بوده و به عنوان یک تابع هدف در الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به کار می‌رود [۲، ۸، ۹، ۱۰]. در این مقاله ضمن پیاده‌سازی این مدل و اصلاح آن، مدل جدیدی ارائه خواهد شد که می‌تواند برای تولید الگوی شکاف‌های مزدوج[4] با هر زاویه‌ی دلخواه به کار رود. همچنین این روش الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده معمول را بهبود داده و با ارائه راهکارهایی آن را ارتقا می‌بخشد. این راهکارها عبارتند از:

-ارائه یک روش برای تخمین مقدار اولیه پارامتر شبه‌دما[5].

- ارائه یک مدل انطباق‌پذیر[6] برای طول زنجیر مارکوف[7].

- ارائه یک مدل انطباق‌پذیر برای برنامه کاهش[8] مقدار پارامتر شبه‌دما.

راهکارهای فوق باعث افزایش سرعت محاسبات شده و از محاسبات اضافی جلوگیری می‌کند به‌طوری‌که الگوریتم انطباق‌پذیر پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده معمول، خیلی سریع‌تر است.

چهارچوب کلی این مقاله به این صورت است که در ابتدا مروری بر روش‌های مدل‌سازی شکاف‌ها خواهیم داشت. سپس روش تبرید شبیه‌سازی شده را به صورت جزئی بررسی خواهیم کرد. در ادامه مدل ارائه شده توسط مسیحی و همکارانش را بررسی و با توسعه این مدل، مدل جدیدی را ارائه خواهیم داد که می‌تواند برای تولید الگوی شکاف‌های مزدوج به کار رود. در پایان با استفاده از روش تبرید شبیه‌سازی شده پیشنهادی، در دو نمونه مختلف، الگوی شکاف‌ها را تولید خواهیم کرد.

روش‌های مدل‌سازی شکاف‌ها

برای شبیه‌سازی مخازن شکاف‌دار طبیعی، روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به چهار دسته کلی زیر تقسیم کرد.

1. Optimization
2. Simulated Annealing
3. Spatial Correlation
4. Conjugate Fractures
5. Temperature-like Parameter
6. Adaptive
7. Markov Chain Length
8. Annealing Schedule

روش‌های ریاضی و مکانیک سنگی[1]

یکی از ابتدایی‌ترین روش‌های شبیه‌سازی مخازن شکاف‌دار، روش‌های ریاضی و مکانیک سنگی هستند که در آنها از مدل‌های ریاضی، مدل‌های مکانیک سنگی و یا ترکیبی از این دو برای مدل‌سازی شبکه شکاف‌ها و نیز جریان سیالات در داخل این شبکه استفاده می‌شود. نگرش معمول در این روش‌ها برمبنای توصیف هندسی ساده سیستم‌های شکاف‌دار با در نظر گرفتن جریان در داخل شکاف‌ها است. محققان بسیاری از روش‌های مختلف مکانیک سنگی برای مدل‌سازی مخازن شکاف‌دار استفاده کرده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های آنالیز انحنا[2]، میدان تنش[3]، مکانیزم رشد شکاف‌ها و تحلیل عددی شکاف‌ها برمبنای حل دستگاه‌های معادلات غیرخطی با استفاده از روش اجزای محدود[4] اشاره کرد [٦].

به هر حال به دلیل طبیعت پیچیده سیستم‌های شکاف‌دار، بیشتر مطالعات انجام گرفته تا به امروز فقط در مدل‌سازی مخازن همگن غیرواقعی موفق بوده‌اند. همچنین بیشتر این روش‌ها فقط از داده‌های محدودی، مانند داده‌های لرزه‌نگاری و یا چاه‌نگاری استفاده کرده‌اند. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی مخازن شکاف‌دار طبیعی، بهتر است که انواع مختلف داده‌ها باهم مورد استفاده قرار گیرند تا یک مدل جامع به دست آید [٦].

شبیه‌سازی تصادفی[5]

شبیه‌سازی تصادفی یکی از رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی مخازن است. به دلیل اینکه مقادیر دقیق پارامترهای مربوط به شکاف‌ها فقط در اطراف چاه‌ها معلوم هستند برای به دست آوردن یک تخمین از مقادیر پارامترهای مربوط به شکاف‌ها در نقاط دور از چاه می‌توان از روش‌های آماری استفاده کرد. در بیشتر موارد برای پارامترهای مختلف معمولاً از توزیع‌های احتمالی نرمال ساده، توانی و یا لگاریتم نرمال[6] استفاده می‌شود. در روش شبیه‌سازی تصادفی با استفاده از فرآیند پواسون[7] تعداد زیادی الگوی شبکه شکاف‌ها به دست می‌آید. به هر حال به دلیل اینکه توزیع شکاف‌ها در نواحی دور از چاه دارای عدم قطعیت است، لذا این روش از نظر زمین‌شناسی مناسب نمی‌باشد. صحت این روش فقط در مناطق نزدیک چاه‌ها قابل تائید است. یک عیب عمده دیگر روش‌های شبیه‌سازی تصادفی این است که این روش‌ها برای تخمین پارامترهای شکاف از توزیع‌های آماری استفاده می‌کنند که خیلی رضایت‌بخش نیستند. همچنین روش‌های شبیه‌سازی تصادفی قادر به استفاده از پارامترهای آماری پیشرفته مانند واریوگرام[8] و کورلوگرام[9] نیستند [٦].

روش‌های بهینه‌سازی مطلق[10]

در دو دهه گذشته، کاربرد روش‌های بهینه‌سازی مطلق تصادفی گسترش یافته است. نکته قابل توجه در مورد این روش‌ها این است که همه آنها از پدیده‌های طبیعی الهام گرفته‌اند. این روش‌ها چارچوبی را فراهم می‌کنند که باعث می‌شود توابع هدف به مقادیر مینیمم مطلق خود هم‌گرا شوند. در روش‌های بهینه‌سازی مطلق یک توزیع از شکاف‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس این توزیع با جابه‌جا کردن شکاف‌ها به طور مرتب تغییر می‌یابد تا در نهایت یک تابع هدف ارضا شود. در نهایت الگوی نهایی که تابع هدف را ارضا کند به عنوان توزیع شکاف‌ها در نظر گرفته می‌شود [٦]. توابع هدف، معمولاً به صورت اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر به دست آمده از مدل، فرمول‌بندی می‌شوند [۳ و ٦]. روش‌های مختلفی از این دست وجود دارد. در میان این روش‌ها روش تبرید شبیه‌سازی شده و الگوریتم ژنتیک[11] روش‌های استانداردتری هستند [۷ و ۱۱]. الگوریتم ژنتیک برمبنای مکانیک ژنتیک طبیعی بوده و با استفاده از اصل تکامل گونه‌ها در طبیعت، جوابی را برای مسئله ارائه می‌کند [۷ و ۱۲]. در مسائل دنیای مهندسی که یافتن یک مقدار بهینه مطلق و یا تطابق دادن داده‌های تجربی با داده‌های محاسبه شده مورد نظر است، این روش‌ها بسیار سودمند می‌باشند [۱۱]. یکی از اشکالات این روش‌ها این است که اغلب نیازمند عملیات سنگین ریاضی هستند.

1. Mathematical and Geo-Mechanical Models
2. Curvature Analysis
3. Stress Field
4. Finite Element
5. Stochastic Simulation
6. Lognormal
7. Poisson
8. Variogram
9. Correlogram
10. Global Optimization Methods
11. Genetic Algorithm

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که استفاده هم زمان از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی و دقیق و به عبارتی استفاده از روش‌های ترکیبی می‌تواند باعث افزایش سرعت همگرایی در برخی مسائل شود [۳، ۱۱، ۱۳ و ۱٤].

روش هوش مصنوعی [1]

اخیراً تلاش‌هایی به منظور شبیه‌سازی شکاف‌های طبیعی با استفاده از منطق فازی[2] و شبکه‌های عصبی[3] انجام شده است. خروجی این روش‌ها یک شبکه از شکاف‌ها است. این روش‌ها از منطق فازی برای کمی کردن و دسته‌بندی میزان اهمیت هر پارامتر بر روی توزیع شکاف‌ها استفاده می‌کنند. در این روش‌ها برای ارزیابی رابطه غیرخطی پیچیده بین پارامترهای زمین‌شناسی و چگالی شکاف‌ها از یک شبکه عصبی استفاده می‌شود. بنابراین اثر کلی شبکه شکاف‌ها بر روی جریان سیال در مخزن و نیز عملکرد چاه‌ها در مخزن در نظر گرفته می‌شود [٦]. توصیف دقیق این روش‌ها از حوصله این مقاله خارج است. برای اطلاعات بیشتر درباره این روش‌ها می‌توان به مقالات اوهد و همکاران و همچنین دارابی و همکارانش رجوع شود [۱۵ و ١٦].

روش تبرید شبیه‌سازی شده

روش تبرید شبیه‌سازی شده، یک روش بهینه‌سازی برمبنای روش مونت‌کارلو[4] است که توسط متروپولیس و همکارانش در سال ۱۹۵۳ ارائه شد [۱، ۳ و ۱۷]. در سال ۱۹۸۳، کیرک پاتریک و همکارانش از روش تبرید شبیه‌سازی شده برای حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی ترکیبی پیچیده استفاده کردند [۳، ۱۷]. از آن موقع به بعد روش تبرید شبیه‌سازی شده برای حل مسائل بهینه‌سازی مختلفی که شامل متغیرهای مستقل بسیاری هستند به کار گرفته شده است [۳ و ۱۸]. برخلاف روش‌های بهینه‌سازی موضعی که فقط می‌توانند یک مقدار مینیمم نزدیک به حدس اولیه را پیدا کنند، روش تبرید شبیه‌سازی شده، مقدار مینیمم مطلق را پیدا می‌کند [٦]. مفهوم اصلی روش تبرید شبیه‌سازی شده از فرآیند فیزیکی تبرید فلزات مذاب سرچشمه می‌گیرد. در فرآیند تبرید، یک فلز مذاب با دمای بسیار بالا به‌تدریج خنک می‌شود. در دماهای بالا، اتم‌های سازنده‌ی فلز به صورت تصادفی قرار گرفته‌اند و لذا می‌توانند به آسانی نسبت به یکدیگر جابه‌جا شوند. با کاهش تدریجی دما، حرکت اتم‌ها محدود می‌شود به‌طوری‌که اتم‌ها شروع به مرتب شدن نموده و تشکیل کریستال می‌دهند. سطح انرژی کریستال تشکیل شده به سرعت سرد کردن فلز بستگی دارد. اگر کاهش دما خیلی سریع صورت بگیرد، ممکن است ساختار کریستالی تشکیل نشده و به جای آن ساختاری غیرکریستالی با سطح انرژی بالا تشکیل شود. بنابراین برای رسیدن به کمترین میزان سطح انرژی، فرآیند سرد کردن باید به‌آرامی صورت پذیرد [۳، ۱۱، ۱۲، ۱۸ و ۱۹].

روش تبرید شبیه‌سازی شده با استفاده از شبیه‌سازی فرآیند تبرید ذکر شده در بالا، مقدار مینیمم مطلق یک تابع هدف را پیدا می‌کند. تابع هدف معادل سطح انرژی است که باید با استفاده از یک سری تغییرات بهینه‌کننده، مینیمم شود. در این روش، فرآیند سرد کردن با کنترل یک پارامتر شبه‌دما برمبنای تابع توزیع احتمالی بولتزمن[5] شبیه‌سازی می‌شود [۳، ۱۱ و ۱۲]. کاهش آرام دما معادل با پذیرش تغییرات غیربهینه‌کننده با یک احتمال معین است که با کاهش مقدار تابع هدف، کاهش می‌یابد [۱۹ و ۲۰].

روش تبرید شبیه‌سازی شده از توزیع احتمالی بولتزمن، که در رابطه ۱ نشان داده شده است، استفاده می‌کند که در آن، E و T به‌ترتیب نشان‌دهنده انرژی و دمای سیستم هستند. همچنین k_b نشان‌دهنده ثابت بولتزمن است. این توزیع بر این نکته تأکید می‌کند که وقتی یک سیستم در دمای T در تعادل گرمایی قرار دارد، یک توزیع انرژی دارد که در بین کل حالات مختلف انرژی توزیع شده است. همیشه این امکان وجود دارد که حتی در یک دمای پایین، حالت انرژی سیستم بالا باشد. بنابراین شانس اینکه سیستم از یک مقدار انرژی مینیمم موضعی بیرون آمده و به یک مقدار مطلق همگرا شود، وجود دارد [۸، ۱۲، ۱۷، ۱۹، ۲۱].

$$P(E) \propto \exp(-E/k_b T) \qquad (۱)$$

1. Artificial Intelligence Approach
2. Fuzzy Logic
3. Neural Networks
4. Monte-Carlo
5. Boltzmann

برای استفاده از روش تبرید شبیه‌سازی شده در مدل‌سازی توزیع شکاف‌ها مشخص کردن موارد زیر ضروری است [٦ و ٨]:

– توزیع اولیه شکاف‌ها در سیستم.
– توپولوژی یا مکانیزمی برای ایجاد یک تغییر ناگهانی کوچک در این توزیع.
– یک تابع هدف که باید مینیمم شود.
– یک برنامه تغییر پارامتر شبه‌دما.
– معیار پذیرش تغییر جدید.
– معیار ایست (خاتمه محاسبات).

فلوچارت این الگوریتم در شکل ۱ نشان داده شده است. در زیر، مراحل فوق را به صورت جزئی‌تر بیان خواهیم کرد.

برای شروع مدل‌سازی، یک توزیع اولیه از شکاف‌ها مورد نیاز است. پارامترهای مربوط به این شکاف‌ها عبارتند از: تعداد کل شکاف‌ها، مختصات مرکز شکاف‌ها، جهت و اندازه شکاف‌ها. معمولاً برای پارامترهای ورودی و نیز شبکه خروجی شکاف‌ها یک سری محدودیت‌ها و شرایطی مانند داده‌های تصویری چاه‌ها وجود دارد. تبرید شبیه‌سازی شده می‌تواند تغییر داده شود تا با این محدودیت‌ها و نیز داده‌های تجربی مطابقت پیدا کند. به عنوان مثال، ممکن است در داده‌هایی مانند لرزه‌نگاری تعدادی از شکاف‌های بزرگ مشاهده شوند. همچنین جهت شکاف‌هایی که چاه را قطع می‌کنند، با استفاده از عکس‌های مربوط به دیواره چاه (مانند نمودارهای FMI) قابل تعیین است. از این داده‌ها می‌توان به عنوان نقاط اشتراک بین شبکه شبیه‌سازی شده و مخزن واقعی استفاده کرد [٦].

مدل‌سازی شکاف‌ها با استفاده از روش تبرید شبیه‌سازی شده، نیازمند توپولوژی یا مکانیزم ایجاد یک تغییر ناگهانی کوچک، در توزیع فعلی شکاف‌ها است [٨، ١١ و ١٧]. در این مطالعه، برای تغییر حالت فعلی شکاف‌ها به منظور به‌دست آوردن یک توزیع جدید شکاف‌ها یک شکاف i به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. شکاف انتخاب شده به‌عنوان یک شی مجزا ممکن است یک یا چند مورد از تغییرات زیر را تجربه کند [٢، ٨، ٩ و ١٠]:

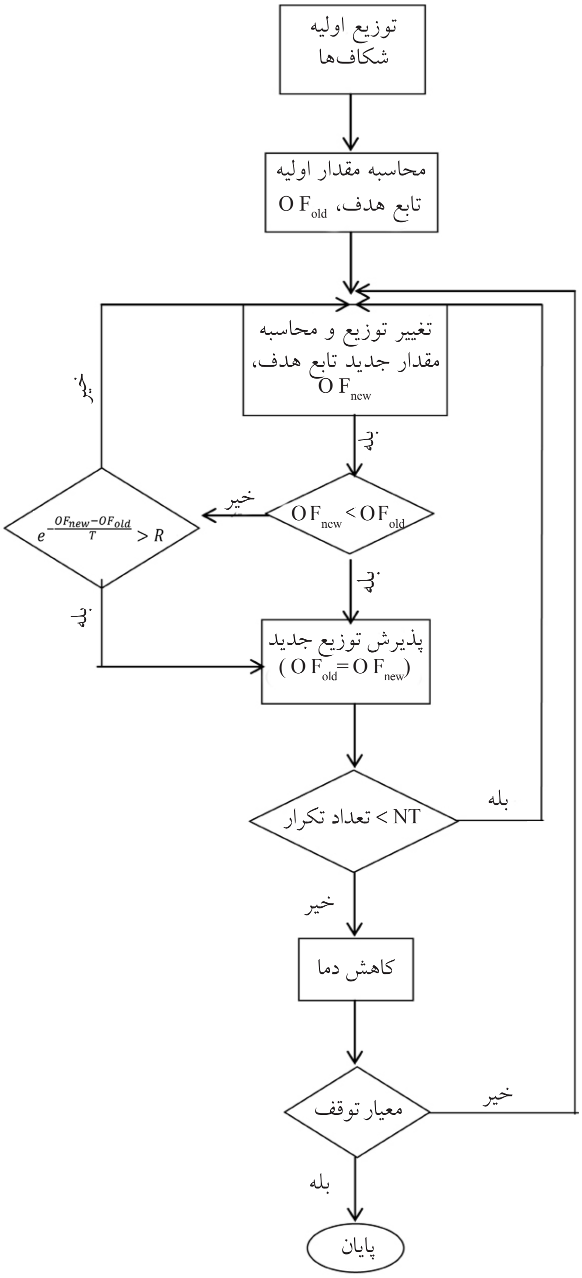
۱) کاهش یا افزایش طول؛ برای ایجاد یک تغییر کوچک در طول شکاف می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$l_i^{new} = l_i + 0.5(2R-1) \qquad (۲)$$

که در آن، R یک عدد تصادفی است که از یک توزیع نرمال در بازه (۱، ۰) انتخاب می‌شود. همچنین l نشان‌دهنده طول شکاف است.

۲) دوران؛ برای ایجاد یک تغییر کوچک در جهت شکاف می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\theta_i^{new} = \theta_i + 0.05\pi(2R-1) \qquad (۳)$$



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

که در آن θ نشان‌دهنده جهت شکاف نسبت به محور افقی است.

۳) جابه‌جایی؛ برای ایجاد یک تغییر کوچک در مختصات مرکز شکاف می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$x_i^{new} = x_i + 0.5(2R - 1) \quad (٤)$$

$$y_i^{new} = y_i + 0.5(2R - 1) \quad (٥)$$

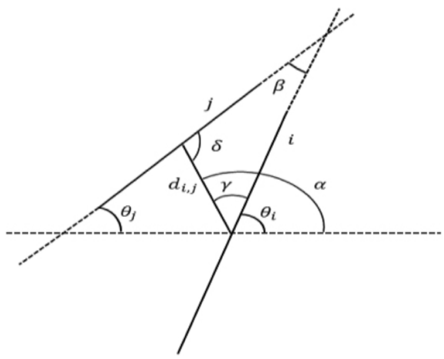
که در آن، x و y به‌ترتیب نشان‌دهنده مختصات افقی و عمودی شکاف هستند.

گام بعدی تعریف یک تابع هدف مناسب است. محققان مختلف از توابع هدفی که معمولاً برپایه اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای آماری و مقادیر به دست آمده از مدل، فرمول‌بندی می‌شوند، استفاده کرده‌اند [۱، ۳، ٦، ۱۱ و ۱۷]. یکی از نقایص این نوع توابع هدف این است که در آنها مکانیزم ایجاد شکاف و به عبارتی فیزیک مسئله در نظر گرفته نشده است. به همین دلیل در این مطالعه از تابع هدف معرفی شده توسط مسیحی و همکارانش که دارای مبنای فیزیکی است، استفاده شده است. نحوه به‌دست آوردن این تابع هدف از حوصله این بحث خارج است. خواننده علاقمند می‌تواند به منابع مربوطه مراجعه کند [۲، ۸ و ۹]. این تابع هدف به صورت زیر ارائه شده است:

$$OF = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \frac{l_i l_j [\eta |cos(\theta_j - \theta_i)| + |cos(\alpha - \theta_i)\, cos(\alpha - \theta_j)|]}{d_{ij}} \quad (٦)$$

که در آن، n نشان‌دهنده تعداد شکاف‌های موجود در سیستم، l_i نشان‌دهنده طول شکاف i، l_j نشان‌دهنده طول شکاف j و d_{ij} نشان‌دهنده فاصله بین مراکز دو شکاف i و j است. α، θ_i و θ_j به‌ترتیب نشان‌دهنده زاویه d_{ij}، l_i و l_j با محور افقی شکل ۲ این سه زاویه را نشان می‌دهد. ضریب η به نوع محیط بستگی دارد. مسیحی و همکارانش نشان دادند که حد پایینی و حد بالایی برای η به‌ترتیب ۱ و ۷ است. در این مطالعه ما از مقدار ٤ برای η استفاده کرده‌ایم. تابع هدف ارائه شده در معادله ٦، شکل اولیه تابع هدفی نیست که توسط مسیحی و همکارانش ارائه شده است. زیرا در شکل اولیه تابع هدف ارائه شده توسط او و همکارانش، اندیس j موجود در سری بیرونی از j=1 شروع می‌شود اما در معادله ٦ از j=i+1 شروع می‌شود.

دلیل این مسئله آن است که در حالت اول اثر هر جفت شکاف بر روی تابع هدف، دوبار محاسبه می‌شود که نصف آن محاسبات اضافی و غیر ضروری است اما در حالت دوم، اثر هر جفت شکاف بر روی تابع هدف، تنها یک بار محاسبه می‌شود که این باعث نصف شدن حجم محاسبات و لذا افزایش سرعت انجام محاسبات می‌گردد [۸ و ۹].



شکل ۲- مکان نسبی دو شکاف دلخواه در فضای دوبعدی

نکته دیگری که در روش تبرید شبیه‌سازی شده بسیار حائز اهمیت است، این است که در طول محاسبات، تابع هدف مورد استفاده باید قابلیت به‌روزرسانی داشته باشد. به عبارت دیگر بعد از هر بار تغییر ناگهانی کوچک در توزیع شکاف‌ها، تابع هدف باید با توجه به این تغییر به‌روز شود و دوباره از اول محاسبه نشود [٦، ۸ و ۱۱]. اگر تابع هدف قابلیت به‌روز شدن را نداشته باشد، حجم محاسبات بسیار زیاد خواهد بود و ممکن است روش تبرید شبیه‌سازی شده قابل انجام نباشد. تابع هدف ارائه شده در معادله ٦ این قابلیت را دارا بوده و لذا می‌تواند در روش تبرید شبیه‌سازی شده مورد استفاده قرار گیرد.

سرعت هم‌گرایی روش تبرید شبیه‌سازی شده در درجه اول به‌وسیله برنامه تغییر پارامتر شبه دمای آن کنترل می‌شود. در روش تبرید شبیه‌سازی شده موقعی که پارامتر شبه‌دما کاهش می‌یابد و الگوریتم از یک زنجیر مارکوف به زنجیر مارکوف دیگر می‌رود، تعادل حاکم به هم می‌خورد و لذا عمل کاهش پارامتر شبه‌دما باید به‌آرامی و بادقت انجام گیرد [۳، ۷، ۱۱، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲]. برنامه کاهش پارامتر شبه‌دما شامل سه عنصر اصلی است که عبارتند از:

الف) مقدار اولیه پارامتر شبه‌دما.

ب) تابع کاهش مقدار پارامتر شبه دما

ج) طول زنجیر مارکوف (تعداد حلقه‌ها در هر مقدار ثابت پارامتر شبه دما).

در ادامه به بررسی این سه عنصر می‌پردازیم.

مقدار اولیه پارامتر شبه‌دما

یکی از مهم‌ترین پارامترها که در روش تبرید شبیه‌سازی شده به‌ندرت مورد بحث قرار می‌گیرد، مقدار اولیه پارامتر شبه دما است. بسیاری از محققان از یک مقدار بسیار بزرگ به‌عنوان مقدار اولیه پارامتر شبه دما استفاده کرده‌اند [۳، ۸، ۱۰ و ۲۰]. اما اگر مقدار اولیه پارامتر شبه دما خیلی بزرگ باشد، الگوریتم با تعداد زیادی مینیمم نسبی روبرو می‌شود که موقع خروج از آنها با توجه به ماهیت تصادفی الگوریتم، تعداد زیادی حرکت رو به بالا (جواب نامناسب) مورد پذیرش قرار می‌گیرد. از طرف دیگر اگر مقدار اولیه‌ی پارامتر شبه‌دما خیلی کوچک باشد، الگوریتم به‌سرعت به یکی از مینیمم‌های موضعی همگرا شده و توان خروج از آن را نخواهد داشت. بنابراین باید یک مقدار بهینه برای مقدار اولیه پارامتر شبه‌دما انتخاب شود [۱۷]. ما در این مطالعه برمبنای کارهای انجام شده توسط دودک مدلی را برای تخمین مقدار اولیه پارامتر شبه‌دما ارائه خواهیم کرد [۷]. قبل از ارائه این مدل باید پارامتری به‌نام نسبت پذیرش[1] را معرفی کنیم. نسبت پذیرش، ψ که به‌صورت نسبت تعداد تغییرات پذیرفته شده به تعداد کل تغییرات پیشنهاد شده در هر زنجیر مارکوف تعریف می‌شود، با استفاده از رابطه ۷ قابل تخمین است:

$$\psi_k \approx \frac{m_1 + m_2 \exp\left(-\Delta(OF)_{m_2}/T_k\right)}{m_1 + m_2} \qquad (۷)$$

که در آن، m_1 تعداد تغییراتی است که در آنها $\Delta(OF) \le 0$. همچنین m_2 تعداد تغییراتی است که در آنها $\Delta(OF) > 0$. $\Delta(OF)_{m_2}$ نشان‌دهنده میانگین تغییرات تابع هدف در طول m_2 است. همچنین T_K نشان‌دهنده مقدار فعلی پارامتر شبه‌دما است. با در نظر گرفتن یک مقدار نسبتاً بزرگ برای ضریب پذیرش مانند ψ_1=۰/۹۹ مقدار اولیه پارامتر شبه دما، T_1 با استفاده از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$T_1 = -\frac{\Delta(OF)_{m_2}}{Ln\left(\psi_1 + \frac{m_1}{m_2}(\psi_1 - 1)\right)} \qquad (۸)$$

باید توجه داشت که وابستگی زمان انجام محاسبات به مقدار اولیه پارامتر شبه دما خیلی بیشتر از وابستگی آن به توزیع اولیه شکاف‌ها است [۲۳]. به‌گونه‌ای که استفاده از یک مقدار بزرگ برای مقدار اولیه پارامتر شبه دما باعث انجام محاسبات اضافی می‌شود، اما مقدار به دست آمده از معادله ۷ یک مقدار کاملاً بهینه بوده و از انجام محاسبات غیرضروری جلوگیری می‌کند.

تابع کاهش مقدار پارامتر شبه دما

در روش تبرید شبیه‌سازی شده، در هر زنجیر مارکوف، مقدار پارامتر شبه‌دما ثابت می‌ماند تا جایی که تعادل برقرار شود. وقتی تعادل برقرار شد، زنجیر مارکوف تغییر می‌کند و لذا باید با استفاده از یک تابع مناسب مقدار پارامتر شبه‌دما کاهش باید [۱۱ و ۱۷]. تعداد زیادی تابع کاهش مقدار پارامتر شبه‌دما وجود دارد که در روش تبرید شبیه‌سازی شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این توابع را می‌توان به دو دسته کلی استاتیک و دینامیک (انطباق‌پذیر) طبقه‌بندی کرد پارامترهای توابع استاتیک قبل از شروع محاسبات مشخص می‌شوند و در طول محاسبات تغییر نمی‌کنند. توابع انطباق‌پذیر معمولاً حاوی پارامترهایی هستند که با پیشرفت محاسبات و به‌دست آمدن اطلاعات جدید، تغییر می‌کنند. استفاده از توابع استاتیک آسان است اما مشکلی که دارند، کند بودن آنها است. استفاده از توابع انطباق‌پذیر سخت‌تر است [۲۰]. با این حال محققان مختلفی ادعا کرده‌اند که سرعت همگرایی توابع انطباق‌پذیر خیلی بیشتر از توابع استاتیک است [۲٤] و اگر سرعت انجام محاسبات مد نظر است، باید از توابع انطباق‌پذیر استفاده شود. ساده‌ترین و پرکاربردترین تابع کاهش پارامتر شبه‌دما، تابع هندسی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_{k+1} = \lambda T_k \qquad (۹)$$

که در آن، T_K و T_{K+1} به‌ترتیب مقدار پارامتر شبه‌دما در زنجیر مارکوف Kام و (K+1) ام است. λ پارامتر ثابتی است که مقدار آن به‌صورت دلخواه از بازه ۰/۸ – ۰/۹۹ انتخاب می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد λ ثابت موجب کند شدن محاسبات می‌شود لذا در این مطالعه مدلی را برای انطباق‌پذیر کردن λ و لذا افزایش سرعت محاسبات ارائه

1. Acceptance Ratio

می‌گردد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که زمانی که مقدار پارامتر شبه‌دما بالا است، λ می‌تواند کوچک باشد تا سرعت محاسبات افزایش یابد اما با پیشرفت محاسبات و کاهش مقدار پارامتر شبه‌دما باید مقدار λ بزرگ باشد تا هم‌گرا شدن روش تضمین شود. بنابراین ما از رابطه شماره ۱۰، برای به‌روز کردن λ در هر زنجیر مارکوف استفاده می‌کنیم:

$$\lambda_k = \lambda_1^{NT_1/NT_k} \tag{۱۰}$$

که در آن λ_K و λ_1 به‌ترتیب مقدار λ در زنجیر مارکوف K ام و اول است. همچنین NT_K و NT_1 به‌ترتیب طول زنجیر مارکوف Kام و اول است. λ_1 و NT_1 به نوع مسئله موردنظر بستگی دارند اما باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که هم کیفیت جواب نهایی و هم زمان محاسبات مناسب باشد. به نظر می‌رسد که در مسائل مدل‌سازی شکاف، محدوده (۰/۸ تا ۰/۹۵) برای λ_1 و محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰ برای NT_1 مناسب باشد. در این مطالعه ما از مقادیر ۰/۹۴ و ۱۰۰ به‌ترتیب برای λ_1 و NT_1 استفاده کرده‌ایم. در بخش بعدی روشی را برای محاسبه‌ی NT_1 ارائه می‌کنیم.

طول زنجیر مارکوف

طول زنجیر مارکوف یا همان تعداد حلقه‌ها در هر مقدار ثابت پارامتر شبه‌دما پارامتر مهم دیگری است که به‌ندرت در روش تبرید شبیه‌سازی شده به آن پرداخته می‌شود [۱۱]. مشابه توابع کاهش دما، طول زنجیر مارکوف می‌تواند استاتیک و یا انطباق‌پذیر باشد که هرکدام همان مزایا و معایب توابع کاهش دمای هم‌نوع خود را دارند. به دلیل سرعت پایین هم‌گرایی در صورت استفاده از طول زنجیر مارکوف استاتیک، ما در این مطالعه از طول زنجیر مارکوف انطباق‌پذیر استفاده می‌کنیم. ما از رابطه زیر برای برای به‌روز کردن طول زنجیر مارکوف استفاده می‌کنیم:

$$NTk=Round(NT1/\psi^{\xi}_{1-k}) \tag{۱۱}$$

که در آن، NT_K و NT_1 به‌ترتیب نشان‌دهنده طول زنجیر مارکوف Kام و اول هستند. ψ_{1-K} نشان‌دهنده مقدار میانگین ضریب پذیرش از زنجیر مارکوف اول تا زنجیر مارکوف Kام است و می‌توان از معادله ۷ مقدار آن را محاسبه کرد. ξ ثابتی است که مقدار آن به NT_1 بستگی دارد و باید با دقت انتخاب شود. به نظر می‌رسد که محدوده ۰/۱ تا ۱ برای حل مسائل مربوط به مدل‌سازی شکاف‌ها مناسب باشد. ما از مقدار ۰/۸ برای ξ استفاده می‌کنیم.

یکی از نقایص معادله ۱۱ این است که در مراحل پایانی حل مسئله که الگوریتم به نقطه مینیمم نزدیک می‌شود و بسیاری از تغییرات پیشنهادی رد می‌شوند، مقدار ψ_{1-K} کاهش می‌یابد و لذا مقدار NT_K محاسبه شده از معادله ۱۱ ممکن است بزرگ باشد. برای رفع این مشکل باید یک حد بالایی برای NT_K اعمال کنیم. ما در این مطالعه از مقدار ۳۰۰ به‌عنوان حد بالایی استفاده کرده‌ایم.

در روش تبرید شبیه‌سازی شده، زمانی که یک تغییر جدید پیشنهاد می‌شود، مقدار تابع هدف مربوط به آن، $OF_{new\ candid}$ محاسبه می‌شود. سپس مقدار $\Delta(OF)=OF_{newcandid}-OF_{old\ accepted}$ محاسبه می‌شود که $OF_{old\ accepted}$ نشان‌دهنده مقدار تابع هدف تغییر پذیرفته شده قبلی است. اگر $\Delta(OF)<0$ باشد، تغییر جدید پذیرفته می‌شود اما اگر $\Delta(OF)>0$ باشد، تغییر جدید برمبنای الگوریتم متروپولیس پذیرفته و یا رد می‌شود. الگوریتم متروپولیس به این صورت است که یک عدد تصادفی، R از توزیع نرمال در بازه ۰ تا ۱ انتخاب می‌کنیم. اگر $\exp(-\Delta(OF)\ (T) > R$ باشد، تغییر جدید پذیرفته می‌شود. در غیر این صورت رد می‌شود [۸، ۱۰، ۱۹ و ۲۰].

به لحاظ نظری، روش تبرید شبیه‌سازی شده باید آنقدر ادامه یابد تا مقدار پارامتر شبه‌دما به صفر برسد [۱۷]. اما در عمل رسیدن به این حالت امکان‌پذیر نیست و باید از معیارهای دیگری برای اتمام محاسبات استفاده شود. معیار مورد استفاده می‌تواند به یکی از صورت‌های زیر باشد:

– برای تعداد زیادی از تغییرات پیشنهادی متوالی، مقدار تابع هدف تغییر محسوسی نکرده است.

– برای تعداد زیادی از تغییرات پیشنهادی متوالی، تعداد تغییرات پذیرفته شده از یک مقدار آستانه کمتر شده است.

– مقدار پارامتر شبه‌دما از یک مقدار آستانه خیلی کوچک کمتر شده است.

– تعداد تغییرات پیشنهادی متوالی به یک مقدار از پیش تعریف شده رسیده است.

سه معیار اول مناسب هستند اما معیار چهارم ممکن است

مشکلاتی مانند نامناسب بودن جواب به دست آمده، زیاد شدن حجم محاسبات وغیره را به وجود آورد. در این مطالعه از معیار سوم استفاده کرده‌ایم.

بازبینی تابع هدف به‌کار رفته

در این بخش تابع هدف استفاده شده را مورد بررسی قرار می‌دهیم. دو شکاف i و j نشان داده شده در شکل ۲ را در نظر بگیرید. بخشی از تابع هدف که مربوط به این دو شکاف است را با $OF_{i,j}$ نشان می‌دهیم که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$OF_{i,j} = l_i l_j \left\{ \frac{\eta\left[\cos(\theta_j - \theta_i)\right]}{d_{i,j}} + \frac{\left[\cos(\alpha-\theta_i)\cos(\alpha-\theta_j)\right]}{d_{i,j}} \right\} \quad (۱۲)$$

وقتی فقط جهت شکاف‌ها نسبت به محور افقی تغییر کنند و طول و مکان مراکز شکاف‌ها ثابت باشد، عبارت $\frac{l_i l_j}{d_{ij}}$ تغییر نخواهد کرد و لذا می‌توانیم آن را به‌صورت ثابتی مانند C در نظر بگیریم. همچنین A تابع مکان مراکز شکاف‌ها بوده و تغییر نمی‌کند. بنابراین داریم:

$$OF_{i,j} = C\left[\eta\left|\cos(\theta_j - \theta_i)\right| + \left|\cos(\alpha - \theta_i)\cos(\alpha - \theta_j)\right|\right] \quad (۱۳)$$

با استفاده از روابط هندسی می‌توانیم نشان دهیم که:

$$\theta_i - \theta_j = \beta \quad (۱٤)$$

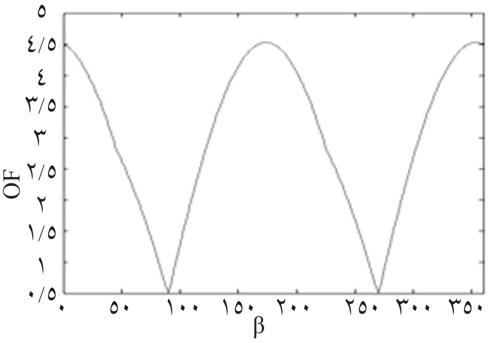
$$\alpha - \theta_i = \gamma \quad (۱۵)$$

$$\alpha - \theta_j = \beta + \gamma \quad (۱٦)$$

با جای‌گذاری معادلات ۱٤، ۱۵ و ۱٦ در معادله ۱۳ داریم:

$$OF_{i,j} = C\left[\eta|\cos\beta| + |\cos\gamma\cos(\beta+\gamma)|\right] \quad (۱۷)$$

همان‌طور که قبلاً گفتیم، همواره $\eta \geq 1$ است. با استفاده از روش‌های عددی می‌توانیم نشان دهیم که برای هر مقدار دلخواه γ، مینیمم $OF_{i,j}$ زمانی رخ می‌دهد که β برابر °۹۰ و یا ° ۲۷۰ باشد. به عنوان مثال برای C=۱، η=٤ و γ= ٤۵ نمودار $OF_{i,j}$ برحسب β در شکل ۳ رسم شده است. با توجه به این نمودار واضح است که در دو مقدار β = °۹۰ و β=°۲۷۰ مقدار $OF_{i,j}$ مینیمم شده است. این مشاهدات نشان می‌دهد که مقدار $OF_{i,j}$ وقتی مینیمم می‌شود که دو شکاف i و j برهم عمود باشند. چون OF درواقع مجموع $OF_{i,j}$ بر روی تمام زوج‌شکاف‌ها است، لذا وقتی مینیمم می‌شود که توزیع نهایی شکاف‌ها شامل دو دسته شکاف عمود برهم باشد که تعداد شکاف‌های موجود در دو دسته یکسان است.



شکل ۳- تغییرات $OF_{i,j}$ برحسب β

با استناد به بحث فوق، می‌توان تابع هدف معرفی شده توسط مسیحی و همکارانش (معادله ٦) را تغییر داد به‌طوری که این تابع بتواند الگوی شکاف‌های مزدوج را تولید کند (شکاف‌های مزدوج به شکاف‌هایی می‌گویند که در نتیجه فقط یک حالت تنش ایجاد می‌شوند و هم‌دیگر را قطع می‌کنند اما برهم عمود نیستند). همان‌طور که قبلاً گفتیم مینیمم معادله ٦ موقعی رخ می‌دهد که β = °۹۰ و یا β=°۲۷۰ باشد بنابراین اگر β را با β+ε جایگزین کنیم، می‌توانیم شکاف‌های مزدوجی تولید کنیم که همدیگر را با زاویه °(ε−۹۰) قطع می‌کنند. به‌عنوان مثال اگر می‌خواهیم زاویه بین شکاف‌ها °۳۰ باشد، کافی است که در معادله ٦، β را با β+٦۰ جایگزین کنیم. معادله نهایی برای تولید شکاف‌های مزدوج که یکدیگر را با زاویه ε−۹۰ قطع می‌کنند، به‌صورت زیر است:

$$OF = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \frac{l_i l_j\left[\eta\left|\cos(\theta_j - \theta_i + \varepsilon)\right| + \left|\cos(\alpha - \theta_i)\cos(\alpha - \theta_j)\right|\right]}{d_{ij}} \quad (۱۸)$$

بحث و نتایج

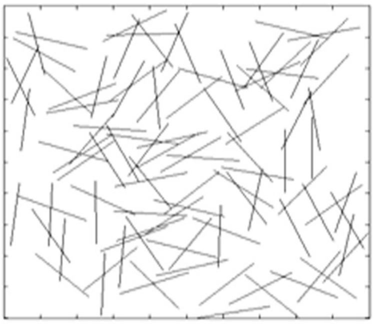
الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده مورد استفاده در این مطالعه را در نرم‌افزار MATLAB بر روی یک رایانه شخصی با پردازنده ۲/٤ گیگاهرتز پیاده‌سازی کرده و از آن برای تولید الگوی شکاف‌ها در دو حالت مختلف استفاده کرده‌ایم. با توجه به مطالب پیشین، ابتدا با معرفی مفهومی به نام نسبت پذیرش،

رابطه‌ای را برای تخمین مقدار بهینه مقدار اولیه پارامتر شبه‌دما به‌دست آوردیم که مقداری که از این رابطه به‌دست می‌آید کاملاً بهینه بوده و دو مشکل عمده حرکت روبه‌بالای الگوریتم (ناشی از مقدار بزرگ مقدار اولیه پارامتر شبه‌دما) و گیر کردن در مینیمم‌های موضعی (ناشی از مقدار کوچک مقدار اولیه پارامتر شبه‌دما) را که الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده معمولی با آن‌ها روبرو است را ندارد. در ادامه تابعی برای کاهش مقدار پارامتر شبه‌دما ارائه کردیم که کاملاً انطباق‌پذیر بوده و با پیشرفت محاسبات و به‌دست آمدن اطلاعات جدید، روند کاهش پارامتر شبه‌دما را تغییر می‌دهد و لذا باعث افزایش سرعت همگرایی محاسبات می‌شود. درنهایت یک تابع جدید برای تغییر طول زنجیر مارکوف ارائه شد که به‌دلیل انطباق‌پذیر بودن در مقایسه با الگوریتم معمولی تبرید شبیه‌سازی شده باعث افزایش سرعت همگرایی می‌شود، بدون آنکه تعادل موجود در هر زنجیر مارکوف از بین برود.

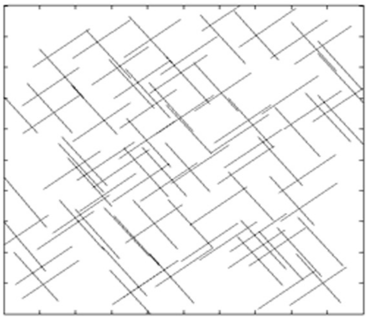
حالت اول) شبیه‌سازی شکاف‌ها با توزیع طول یکنواخت از طریق تغییر زاویه شکاف‌ها

یک فضای مربعی به طول ضلع $L=۲۰$ را در نظر بگیرید که در آن ۱۰۰ شکاف با طول ثابت $l=٤$ به طور تصادفی توزیع شده است (شکل ٤). برای توزیع اولیه شکاف‌ها، مقدار تابع هدف از معادله ٦ قابل محاسبه است. با استفاده از روش ذکر شده، مقدار اولیه پارامتر شبه دما برابر $T_0=۷$ محاسبه شده است. حال باید توزیع فعلی شکاف‌ها را تغییر دهیم. در این بخش فقط جهت شکاف‌ها را تغییر می‌دهیم که این کار با استفاده از معادله ۳ انجام می‌شود. توزیع به دست آمده برمبنای معیار پذیرفته و یا رد می‌شود.

واضح است که اندازه مدل استفاده شده محدود است لذا موقع تغییر توزیع شکاف‌ها ممکن است بعضی از شکاف‌های نزدیک به مرزها از محدوده مسئله خارج شوند. برای جلوگیری از این مشکل، توزیع مورد نظر را دور انداخته و توزیع دیگری تولید می‌کنیم. برای تابع کاهش مقدار پارامتر شبه‌دما و طول زنجیر مارکوف از معیارهایی استفاده کرده‌ایم. حالت نهایی برای توزیع شکاف‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

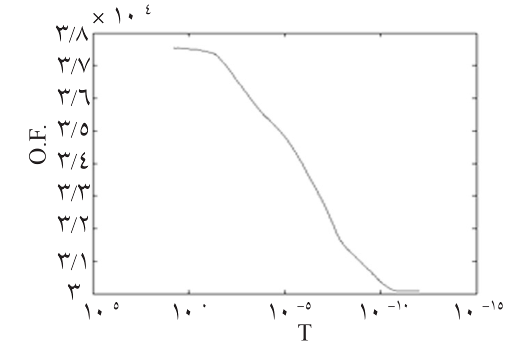


شکل ٤- الگوی اولیه برای شکاف‌های با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند.

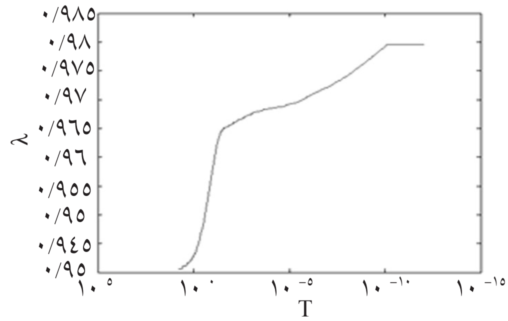


شکل ۵- الگوی نهایی برای شکاف‌های با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش انطباق‌پذیر).

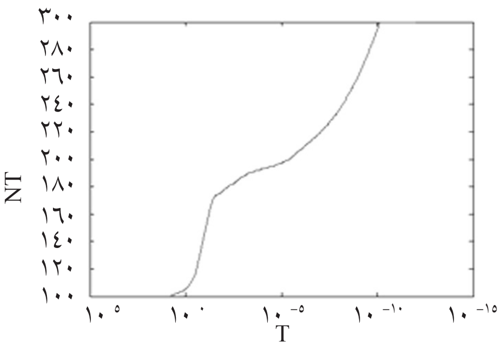
همانطور که دیده می‌شود الگوی نهایی شامل دو دسته شکاف عمود برهم است که تعداد شکاف‌های موجود در دو دسته تقریباً باهم مساوی است (برمبنای بحث انجام شده و نیز مشاهدات موجود در منابع ۸، ۹ و ۱۱). تغییرات تابع هدف برحسب مقدار پارامتر شبه‌دما در شکل ٦ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با کاهش مقدار پارامتر شبه‌دما و نزدیک شدن به صفر، تابع هدف به مقدار مینیمم مطلق خود همگرا می‌شود. همچنین تغییرات ثابت λ و نیز طول زنجیر مارکوف برحسب مقدار پارامتر شبه دما به‌ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. برای مقایسه‌ی نتایج، این مسئله را با الگوریتم اصلی روش تبرید شبیه‌سازی شده نیز حل کرده‌ایم (با مقادیر ثابت $T_0=۱۰۰۰۰۰$، $\lambda=۰/۹۸$ و $NT=۲۰۰$). الگوی نهایی شکاف‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین تغییرات تابع هدف با پارامتر شبه‌دما در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌اند. زمان محاسبات برای الگوریتم انطباق‌پذیر پیشنهادی ما و نیز الگوریتم اصلی روش تبرید شبیه‌سازی شده در جدول ۱ ارائه شده است.



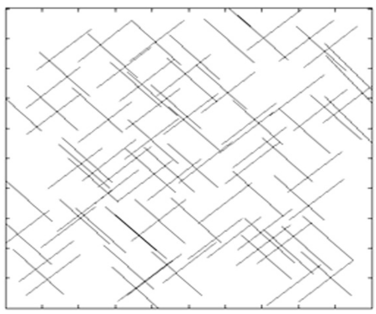
شکل ۶- تغییرات تابع هدف برای شکاف‌های با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش انطباق‌پذیر).



شکل ۷- تغییرات λ برای شکاف‌های با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش انطباق‌پذیر).



شکل ۸- تغییرات طول زنجیر مارکوف برای شکاف‌های با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش انطباق‌پذیر).



شکل ۹- الگوی نهایی برای شکاف‌های با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش اصلی).

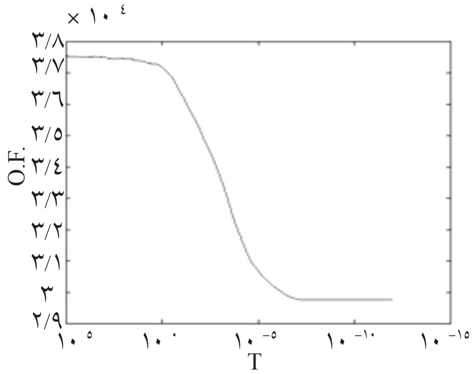
جدول ۱- زمان انجام محاسبات (برحسب ثانیه) برای الگوریتم انطباق‌پذیر و الگوریتم اصلی در حالت‌های مختلف.

حالت	الگوریتم انطباق‌پذیر	الگوریتم اصلی
دوران (با توزیع طول یکنواخت)	۶۸۵	۲۰۳۲
دوران (شکاف‌های مزدوج)	۴۸۳	۱۵۷۹

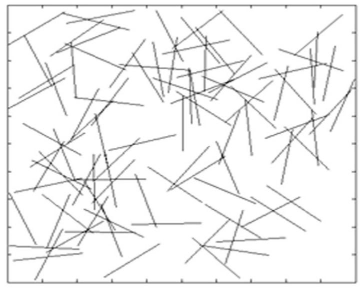
همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۱۰ دیده می‌شود تابع هدف به صورت کاملاً یکنواخت کاهش پیدا می‌کند تا در نهایت به مقدار مینیمم مطلق خود برسد. واضح است که الگوی نهایی به دست آمده با روش انطباق‌پذیر کاملاً مشابه الگوی به دست آمده با روش اصلی است. همچنین رفتار تابع هدف و نیز مقدار نهایی آن در هر دو روش یکسان است. مقایسه زمان انجام محاسبات در دو روش نشان می‌دهد که روش انطباق‌پذیر تقریباً سه برابر سریع‌تر از روش اصلی تبرید شبیه‌سازی شده است.

حالت دوم) تولید شکاف‌های مزدوج

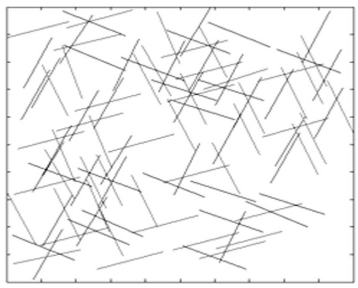
در این بخش، برمبنای بحث انجام شده با استفاده از معادله ۱۸، الگوی شکاف‌های مزدوج را تولید می‌کنیم. ما از مقدار $\xi=45^\circ$ استفاده کرده‌ایم، لذا الگوی نهایی شکاف‌ها شامل شکاف‌های مزدوجی خواهد بود که با زاویه 45° همدیگر را قطع می‌کنند. همه شرایط مشابه شرایط حالت قبلی هستند و موقع تغییر توزیع، فقط جهت شکاف انتخاب شده را تغییر می‌دهیم. مقدار اولیه پارامتر شبه دما برابر $T_0=14$ به‌دست آمده است. الگوی اولیه شکاف‌ها و نیز نتایج در شکل‌های ۱۱ تا ۱۷ نشان داده شده است. الگوی نهایی شکاف‌ها شامل چهار دسته شکاف مزدوج با تعداد شکاف یکسان در هر دسته است. همچنین شکاف‌های موجود در هر دسته با شکاف‌های موجود در دو دسته از سه دسته دیگر مزدوج بوده و زاویه‌ی بین آنها ۴۵ درجه است. با توجه به اعداد جدول ۱ واضح است که زمان انجام محاسبات در روش انطباق‌پذیر کمتر از یک-سوم روش اصلی است. درحالی‌که مقایسه‌ی شکل‌های مربوطه حاکی از آن است که دقت نتایج در هر دو روش یکسان است و رفتار تابع هدف، مقدار پایانی آن و نیز توزیع نهایی شکاف‌ها در هر دو روش تطابق خوبی باهم دارند. و مزدوج بودن شکاف‌ها در هر دو روش مشخص است.



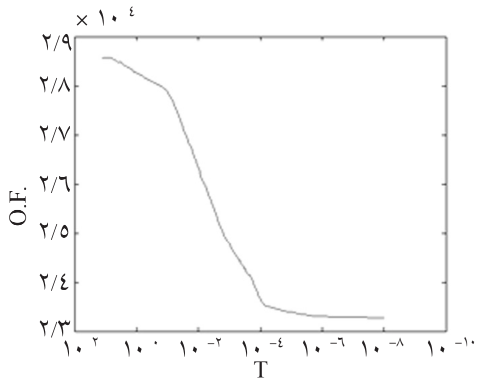
شکل ۱۰- تغییرات تابع هدف برای شکاف‌های با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش اصلی).



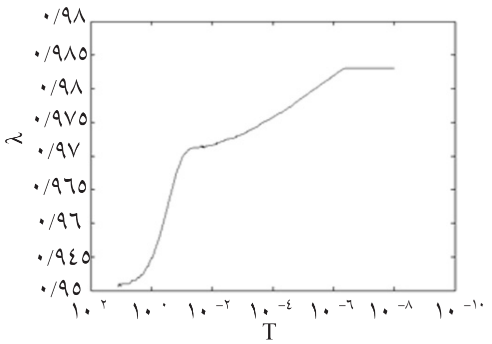
شکل ۱۱- الگوی اولیه برای شکاف‌های مزدوج با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند.



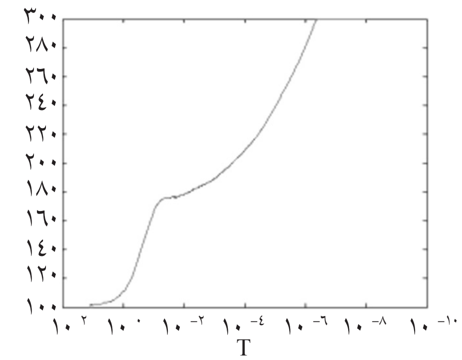
شکل ۱۲- الگوی نهایی برای شکاف‌های مزدوج با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش انطباق‌پذیر).



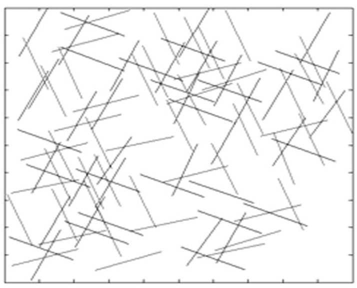
شکل ۱۳- تغییرات تابع هدف برای شکاف‌های مزدوج با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش انطباق‌پذیر).



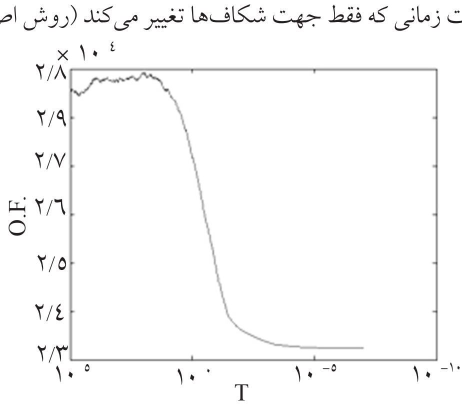
شکل ۱۴- تغییرات λ برای شکاف‌های مزدوج با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش انطباق‌پذیر).



شکل ۱۵- تغییرات طول زنجیر مارکوف برای شکاف‌های مزدوج با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش انطباق‌پذیر).



شکل ۱۶- الگوی نهایی برای شکاف‌های مزدوج با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش اصلی).



شکل ۱۷- تغییرات تابع هدف برای شکاف‌های مزدوج با توزیع طول یکنواخت زمانی که فقط جهت شکاف‌ها تغییر می‌کند (روش اصلی).

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از این مطالعه عبارتند از:

۱) در این مطالعه، مسئله مدل‌سازی الگوی شکاف‌ها با استفاده از روش تبرید شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفت و یک الگوریتم انطباق‌پذیر جدید ارائه شد که می‌تواند نتایج مناسب‌تری به دست بدهد. تفاوت این الگوریتم با الگوریتم اصلی در سه مورد زیر است:

- ارائه یک روش برای تخمین مقدار اولیه پارامتر شبه‌دما.
- ارائه یک مدل انطباق‌پذیر برای طول زنجیر مارکوف.
- ارائه یک مدل انطباق‌پذیر برای تابع کاهش مقدار پارامتر شبه دما.

راهکارهای فوق موجب تسریع محاسبات می‌شود و از محاسبات اضافی جلوگیری می‌کند به‌طوری‌که الگوریتم انطباق‌پذیر پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده معمول در زمان کمتری به جوابی با همان دقت هم‌گرا می‌شود.

۲) همچنین یک روش خاص مورد بحث قرار گرفت و این نکته بحث شد که چرا این روش الگوی شکاف‌های عمود برهم را تولید می‌کند. همچنین این مدل بهبود داده شد و مدل جدیدی ارائه گردید که می‌تواند الگوی شکاف‌های مزدوج را تولید کند.

علائم و نشانه‌ها

C: $\frac{l_i l_j}{d_{ij}}$

d_{ij}: فاصله بین مراکز دو شکاف i و j

E: انرژی

k_b: ثابت بولتزمن

l: طول شکاف

m_1: تعداد تغییرات پیشنهادی که در آنها $\Delta(OF) \le 0$

m_2: تعداد تغییرات پیشنهادی که در آنها $\Delta(OF) \ge 0$

n: تعداد شکاف‌ها

NT: طول زنجیر مارکوف

NT_1: طول اولین زنجیر مارکوف

NT_k: طول k امین زنجیر مارکوف

OF: تابع هدف

$OF_{i,j}$: مقدار تابع هدف حاصل از دو شکاف i و j

$OF_{new\ candid}$: مقدار تابع هدف برای تغییر جدید

$OF_{old\ accepted}$: مقدار تابع هدف پذیرش شده قبلی

$P(E)$: توزیع احتمالی انرژی

R: عدد تصادفی در بازه‌ی (۰ تا ۱)

T: پارامتر شبه‌دما

T_0: مقدار اولیه‌ی پارامتر شبه‌دما

T_1: مقدار پارامتر شبه‌دما در زنجیر مارکوف اول

T_k: مقدار پارامتر شبه‌دما در زنجیر مارکوف kام

T_{k+1}: مقدار پارامتر شبه‌دما در زنجیر مارکوف (k+1) ام

x: مکان افقی شکاف

y: مکان عمودی شکاف

α: جهت d_{ij} با محور افقی

ε: زاویه‌ی متمم زاویه‌ی تقاطع دو شکاف مزدوج

θ: جهت شکاف با محور افقی

η: پارامتر به کار رفته در تابع هدف

λ: ثابت تغییر دما

λ_1: ثابت تغییر دما در زنجیر مارکوف اول

λ_k: ثابت تغییر دما در زنجیر مارکوف (k+1) ام

ξ: ثابت تغییر طول زنجیر مارکوف

ψ: ضریب پذیرش

ψ_1: ضریب پذیرش در زنجیر مارکوف اول

ψ_{1-k}: میانگین ضریب پذیرش از زنجیر مارکوف اول تا زنجیر مارکوف (k+1) ام

ψ_k: ضریب پذیرش در زنجیر مارکوف (k+1) ام

$\Delta(OF)$: تغییر تابع هدف بین دو تغییر متوالی

$\Delta(OF)_{m_2}$: میانگین تغییرات تابع هدف در طول m_2

مراجع

[1]. Gonzalez R. C. and Perez V. S., "*Two procedures for stochastic simulation of vuggy formations*", SPE 69663, Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, pp. 25–28 March 2001.

[2]. Masihi M. and Nurfaza P. R., "*Fast estimation of performance parameters in fractured reservoirs using percolation theory*", SPE 94186, Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition, Madrid, Spain, pp. 13-16 June 2005.

[3]. Tran N. H. and Tran K., "*Combination of fuzzy ranking and simulated annealing to improve discrete fracture inversion Elsevier*", Mathematical and Computer Modeling, Vol. 45, pp. 1010–1020, 2007.

[4]. Tran N. H., Chen Z. and Rahman S. S., "*Object-based global optimization in modeling discrete-fracture*" Network Map: A Case Study SPE 84456, Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, U.S.A., 5-8 October 2003.

[5]. Tran N. H., Chen Z. and Rahman S. S., *Practical application of hybrid modelling to naturally fractured reservoirs*, Journal of Petroleum Science & Technology 2006.

[6]. Tran N. H., Chen Z. and Rahman S. S., "*Characterizing and Modeling of Naturally Fractured Reservoirs With the use of Object-Based Global Optimization*", Petroleum Society's Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, pp. 10 – 12 June 2003.

[7]. Dudek G., "*Adaptive simulated annealing schedule to the unit commitment problem",* Elsevier, Electric Power Systems Research, Vol. 80, pp. 465–472, 2010.

[8]. Masihi M. and King P., "*Connectivity of spatially correlated fractures: simulation and field studies*" paper SPE 107132 presented at the SPE Europe/EAGE Annual Conference and Exhibition, London, United Kingdom, pp. 11-14 June 2007.

[9]. Masihi M., Sobhani M., Al-Ajmi A. M., Al-Wahaibi Y. M. and Al-Wahaibi T. K., "*A physically-based three dimensional fracture network modeling technique Scientia Iranica*", Vol. 19, No. 3, pp. 594–604, 2012.

[10]. Shekhar R., Richard L. and Gibson J., *Correlated fracture network modeling using simulated annealing,* SEG Las Vegas Annual Meeting 2008.

[11]. Ouenesan A., Srinivasa B., Bunge P. H. and Travis B. J., "*Application of simulated annealing and other global optimization methods to reservoir description: myths and realities*", SPE 28415, 69th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orfeans, LA, U.S.A., pp. 25-28 September 1994.

[12]. Vasan A. and Raju K. S., "*Comparative analysis of simulated annealing*", Simulated Quenching and Genetic Algorithms for optimal reservoir operation Elsevier, Applied Soft Computing, Vol. 9, pp. 274–281, 2009.

[13]. Datta-Guptta A., Vasco D. W., Long J. C. S., Donfro P. S. and Rizer W. D., *Detailed characterization of a fractured limestone formation by use of stochastic inverse approaches,* SPE Formation Evaluation, September 1995.

[14]. Wang Z. G., Wong Y. S. and Rahman M., "*Development of a parallel optimization method based on genetic simulated annealing algorithm*", Elsevier, Parallel Computing, Vol. 31, pp. 839–857, 2005.

15. Ouahed A. K., Tiab D., Mazouzi A. and Sarfraz A. J., *Application of Artificial Intelligence to Characterize Naturally Fractured Reservoirs,* SPE 84870, International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific, Kuala

Lumpur, Malaysia, 20-21 Oct. 2003.

[16]. Darabi H., Kavousi A., Moraveji M. and Masihi M., "*3D fracture modeling in Parsi oil field using artificial intelligence tools*", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 71, pp. 67–76, 2010.

[17]. Misevicius A., "*A Modified simulated annealing algorithm for the quadratic assignment problem informatica*", Vol. 14, No. 4, pp. 497–514, 2003.

[18]. Fabian V., "*Simulated annealing simulated computers & mathematics with applications*", Vol. 33, No. 1/2, pp. 81-94, 1997.

[19]. Durand M. D. and White S. R., "*Trading accuracy for speed in parallel simulated annealing with simultaneous moves*", Elsevier Parallel Computing, Vol. 26, pp. 135–150, 2000.

[20]. Scott L. R. and Harmonosky C. M., "*An improved simulated annealing simulation optimization method for discrete parameter stochastic systems Elsevier*", Computers & Operations Research, Vol. 32, pp. 343–358, 2005.

[21]. Ingber L., "*Simulated annealing: practice versus theory elsevier, Mathematical and Computer Modelling*", Vol. 18, No. 11, pp. 29-57, 1993.

[22]. Lee D. Y. and Wexler A. S., "*Simulated annealing implementation with shorter Markov chain length to reduce computational burden and its application to the analysis of pulmonary airway architecture Elsevier*", Computers in Biology and Medicine, Vol. 41, 707–715, 2011.

[23]. Corana A., Marchesi M., Martini C. and Ridella S., "*Minimizing Multimodal Functions of Continuous Variables with the Simulated Annealing Algorithm ACM Transactions on Mathematical Software*", Vol. 13, No. 3, pp. 262-280, September 1987.

[24]. Chen S. and Luk B. L., "*Adaptive simulated annealing for optimization in signal processing applications Elsevier*", Signal Processing Vol. 79, pp. 117-128, 1999.