دانشکده مهندسی – گروه مهندسی برق
پایان‌نامه کارشناسی ارشد مخابرات – میدان

طراحی ادوات مبتنی بر تشدید مودهای هدایتی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی

محمد علی بهار

استاد راهنما:
دکتر مهرداد شکوه صارمی

مهر ۱۳۹۲

بنده همان به که ز تقصیر خویش

عذر به درگاه خدای آورد

ور نه سزاوار خداوندیش

کس نتواند که به جای آورد

سپاس گزاری

پس از حمد خدای متعال، لازم می دانم از همه کسانی که دینی به آنان دارم به ویژه پدر و مادر فداکارم تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از استادان ارجمند جناب آقای دکتر شکوه صارمی که هدایت این پایان نامه را بر عهده داشته اند و آقایان دکتر میرصالحی و دکتر نشاطی که با پیشنهادهای ارزنده به انجام این پایان-نامه یاری رسانده اند سپاس گزاری می کنم.

چکیده :

هدف از ارائه این پایان‌نامه طراحی فیلتر پهن‌باند نوری مبتنی بر تشدید مودهای موجبری توری پراش است. بر این اساس تشدید مودهای موجبری در توری پراش و رفتار الکترومغناطیسی ساختارهای متناوب بررسی می‌شوند و روش تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال به عنوان ابزاری برای تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی در ساختارهای متناوب معرفی می‌گردد. با توجه به این که برای طراحی یک ساختار متناوب با توجه به ضریب بازتابش فیلتر بازتابنده روش مستقیمی وجود ندارد برای انجام این مهم از الگوریتم‌های تکاملی استفاده می‌شود. بر این اساس تابع برازندگی در الگوریتم‌های استفاده شده ضریب بازتابشی است که با روش تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال محاسبه می‌شود. از چهار الگوریتم تکاملی برای طراحی فیلتر بازتابنده نوری استفاده می‌شود و این چهار الگوریتم عبارتند از: الگوریتم ژنتیک با فضای جستجوی منعطف، الگوریتم ممتیک با جستجوی محلی مبتنی بر تبرید شبیه‌سازی شده، الگوریتم فازی- ممتیک (الگوریتم ممتیک با جستجوی محلی مبتنی بر تصمیم‌گیری با منطق فازی) و الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به‌هم آمیخته ارتقا یافته با روش نخبه‌گرایی. پس از معرفی این الگوریتم‌ها، نحوه پیاده‌سازی آن‌ها در برنامه متلب تشریح می‌شود و نتایج طراحی فیلتر بازتابنده پهن‌باند با این چهار الگوریتم ارائه می‌گردد. نهایتاً عملکرد این چهار الگوریتم از نظر کیفیت نتایج و سرعت همگرایی با یکدیگر مقایسه می‌شود.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه **۱**

۱-۱-تشدید مودهای هدایتی ۲

۱-۲- روش‌های تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی در ساختارهای متناوب ۲

۱-۳- استفاده از الگوریتم‌های تکاملی برای طراحی ادوات اپتیکی ۳

فصل دوم : آشنایی با الگوریتم‌های تکاملی **۵**

۲-۱- مشخصات الگوریتم‌های تکاملی ۵

۲-۱-۱- تولید و نمایش پاسخ‌ها ۵

۲-۱-۲- محاسبه برازندگی افراد جمعیت ۵

۲-۱-۳- روش‌های اکتشافی ۶

۲-۱-۴-بررسی شرط توقف ۶

۲-۲- مزیت‌ها و معایب الگوریتم‌های تکاملی ۷

۲-۳- الگوریتم ژنتیک ۷

۲-۳-۱- رویکرد داروینیستی ۸

۲-۳-۲- تعریف الگوریتم ژنتیک ۸

۲-۳-۲-۱-عملگر انتخاب ۹

۲-۳-۲-۱-۱-انتخاب نخبه‌گرایانه ۹

۲-۳-۲-۱-۲-انتخاب چرخ رولت ۹

۲-۳-۲-۱-۳- انتخاب مسابقه‌ای ۹

۲-۳-۲-۱-۴- انتخاب حالت پایدار ۱۰

۲-۳-۲-۲- عملگر تقاطع ۱۰

۲-۳-۲-۳- عملگر جهش ۱۰

۲-۳-۲-۴- اصل جایگزینی ۱۱

۲-۳-۳- مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک ۱۱

۲-۴- الگوریتم ممتیک ۱۲

۲-۴-۱- تعریف الگوریتم ممتیک ۱۲

۲-۴-۲- جستجوی محلی ۱۳

۲-۴-۲-۱- تپه‌نوردی ۱۳

۲-۴-۲-۲- تبرید شبیه‌سازی شده ۱۳

۲-۴-۳-مراحل اجرای الگوریتم ممتیک ۱۴

۲-۵- منطق فازی ۱۴

۲-۵-۱- مجموعه فازی ۱۵

۲-۵-۲- عملیات‌ها روی مجموعه‌های فازی ۱۵
۲-۵-۲-۱- اجتماع فازی ۱۶
۲-۵-۲-۲- اشتراک فازی ۱۶
۲-۵-۲-۳- متمم فازی ۱۷
۲-۶- الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به‌هم آمیخته ۱۸
۲-۶-۱- تعریف الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به‌هم آمیخته ۱۸
۲-۶-۲- مراحل اجرای الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به‌هم آمیخته ۱۸
فصل سوم : نکاتی برای طراحی فیلتر بازتابنده پهن‌باند ۲۱
۳-۱- تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال ۲۲
۳-۱-۱- تحلیل الکترومغناطیسی ساختارهای متناوب ۲۲
۳-۱-۲- پیاده‌سازی تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال ۲۴
۳-۱-۳- شبیه‌سازی رفتار الکترومغناطیسی ساختارهای متناوب چندلایه با استفاده از روش تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال ۲۹
۳-۲- بهینه‌سازی ضریب بازتابش برای ارتقای برازندگی ۳۳
۳-۳- تولید افراد جمعیت ۳۴
۳-۴- مطلوبیت برازندگی به عنوان شرط توقف عملیات الگوریتم ۳۵
فصل چهارم : تشریح عملکرد الگوریتم‌های تکاملی در طراحی فیلتر بازتابنده پهن‌باند نوری ۳۶
۴-۱- الگوریتم ژنتیک با فضای جستجوی منعطف ۳۶
۴-۱-۱-پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک با فضای جستجوی منعطف ۳۷
۴-۱-۲- طراحی فیلتر بازتابنده پهن‌باند با الگوریتم ژنتیک با فضای جستجوی منعطف ۴۰
۴-۲- الگوریتم ممتیک ۴۱
۴-۲-۱- پیاده‌سازی الگوریتم ممتیک ۴۱
۴-۲-۲- طراحی فیلتر بازتابنده پهن‌باند با الگوریتم ممتیک ۴۵
۴-۳- الگوریتم فازی- ممتیک ۴۶
۴-۳-۱-پیاده‌سازی الگوریتم فازی-ممتیک ۴۶
۴-۳-۲- طراحی فیلتر بازتابنده پهن‌باند با الگوریتم فازی-ممتیک ۵۲
۴-۴- الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به‌هم آمیختهارتقا یافته با نخبه‌گرایی ۵۲
۴-۴-۱-پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به‌هم آمیخته ارتقا یافته با روش نخبه‌گرایی ۵۳
۴-۴-۲- طراحی فیلتر بازتابنده پهن‌باند با الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به‌هم آمیخته ارتقا یافته با روش نخبه-گرایی ۵۸
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۶۰
پیوست الف: شبه‌کدهای الگوریتم‌های تکاملی استفاده شده در طراحی ۶۳
پیوست ب: کدهای متلب ۶۶

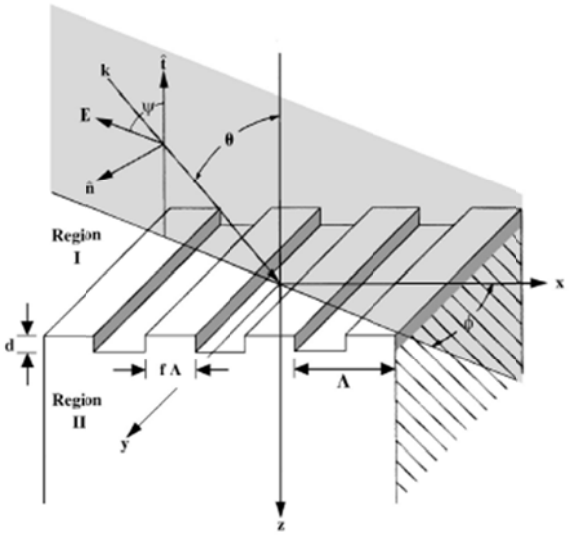
مراجع ٧٠

فصل اول

مقدمه

در دهه‌های اخیر استفاده از ادوات اپتیکی به دلیل سرعت عملکرد بالا و اتلاف کم افزایش یافته است. از جمله این ادوات می‌توان به فیلترهای پهن‌باند[۱] میان‌گذر[۲] و میان‌نگذر[۳]، فیلترهای باندباریک[۴] میان‌گذر و میان‌نگذر، پرتوشکاف‌ها[۵] و قطبنده‌ها[۶] اشاره کرد.

یکی از قطعاتی که در ساخت ادوات اپتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد توری پراش[۷] است. توری پراش قطعه‌ای است که ضریب شکست[۸] آن به صورت متناوب تغییر می‌کند و باعث می‌شود پرتوی نوری که به آن می‌تابد به طیف-های سازنده خود پراشیده شود [۱]. در شکل ۱-۱ یک ساختار توری پراش که تحت زاویه θ در معرض تابش نور قرار گرفته نمایش داده شده است. در این شکل Λ دوره تناوب[۹] توری پراش، f ضریب پرشدگی[۱۰] و d ضخامت لایه توری پراش هستند. این پارامترها اصلی‌ترین مشخصات فیزیکی توری پراش می‌باشند.



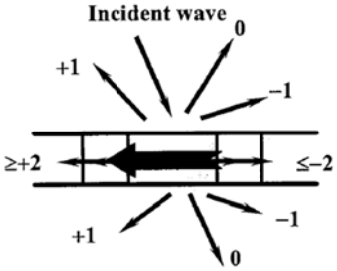
شکل۱-۱: یک ساختار توری پراش که یک موج مسطح با زاویه φ نسبت به صفحه x-z و تحت زاویه θ نسبت به محور z به آن تابیده است[۲].

---

۱ Wide band filter
۲ Band pass
۳ Band pass
۴ Narrow band filter
۵ Beam splitters
۶ Polarizers
۷ Diffraction grating
۸ Refractive index
۹ Period
۱۰ Filling factor

۱-۱- تشدید مودهای هدایتی[۱]

یکی از پدیده‌هایی که ممکن است در اثر تابش نور به توری پراش بوجود آید پدیده تشدید مودهای هدایتی است. هرگاه بین ثابت انتشار[۲] موج تابشی و ثابت انتشار مودهای نشتی[۳] موجبر توری تطبیق برقرار باشد تزویج اتفاق می‌افتد و مودهای نشتی تحریک می‌شوند. این پدیده به صورت تغییرات ناگهانی در دامنه میدان‌های عبوری و بازتابشی ظاهر می‌شود [۳]. به طول موج‌های مودهای موجبر توری پراش، طول موج تشدید[۴] گفته می‌شود. شکل ۱-۲ نشان می‌دهد که در شرایط تشدید، نور تابشی با مودهای هدایتی توری پراش تزویج می‌شود.



شکل۱-۲- تزویج بین مودهای نشتی موجبر توری و مراتب پراشی بالاتر از مرتبه اول [۴]

همان‌طور که در شکل۱-۲ مشاهده می‌شود به جز مراتب پراشی اول و طیف بازتابشی سایر مراتب پراشی با مودهای هدایتی توری پراش تزویج شده‌اند. از این خاصیت می‌توان در طراحی ادوات اپتیکی استفاده نمود. برای بررسی عملکرد ادوات اپتیکی مبتنی بر تشدید مودهای هدایتی ابتدا لازم است رفتار الکترومغناطیسی یک ساختار متناوب که در معرض تابش قرار گرفته است مورد بررسی قرار بگیرد.

۱-۲- روش‌های تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی در ساختارهای متناوب

روش‌های متفاوتی برای تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی در ساختارهای چند لایه متناوب وجود دارد که معروفترین آن‌ها روش تحلیل دقیق موج تزویج شده[۵] است. در این روش با استفاده از معادلات ماکسول در نواحی مختلف فضا و اعمال کردن شرایط مرزی در این معادلات، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی بدست می‌آید. برای به دست آوردن مجهول‌های این مجموعه معادلات، از تحلیل فضای حالت و روش مختصر کردن ماتریس‌ها استفاده می‌شود[۵]. بنابراین این روش از نظر محاسباتی روشی پیچیده تلقی می‌شود که نیازمند استفاده از عملیات گسترده محاسباتی (مخصوصاً در مورد ساختارهای چندلایه متناوب) است.

روشی که در این پایان‌نامه استفاده می‌شود روش تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال[۶] نام دارد. روش تحلیل مودی ساختارهای متناوب در مقاله[۶] توسط تامیر[۷] و همکارانش ارائه شد و در مقاله [۷] از نظریه خطوط انتقال برای پیاده‌سازی روش تحلیل مودی استفاده شد. با بهره‌گیری از این نظریه هر لایه فلزی یا دی‌الکتریک در

---

[۱] Guided mode resonance
[۲] Propagation constant
[۳] Leaky modes
[۴] Resonance wavelength
[۵] Rigorous coupled wave analysis
[۶] Modal analysis based on transmission line theory
[۷] Tamir

ساختار چندلایه متناوب با یک خط انتقال معادل جایگزین می‌شود.

حسن این روش آن است که در تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی به جای استفاده از معادلات پیچیده دیفرانسیلی و اعمال شرایط مرزی از معادلات جبری ماتریسی ساده استفاده می‌شود. همچنین روش تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال می‌تواند انواع ساختارهای چند لایه متناوب (اعم از فلز و دی‌الکتریک و با اشکال متفاوت) را تحلیل نماید. مزیت دیگر این روش این است که چارچوب و زمینه مناسبی برای استفاده در الگوریتم‌های بهینه سازی فراهم می‌کند. همچنین این روش نسبت به سایر روش‌های تحلیلی که در تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی با قطبش TM و نیز لایه‌های فلزی نیازمند عملیات اضافی برای پایدارسازی پاسخ خروجی هستند[۸] ، سریعتر همگرا می‌شود. در فصل سوم نحوه پیاده‌سازی روش تحلیل مودی مبتنی بر خط انتقال بررسی می‌شود.

بنابر آنچه گفته شد با مشخص بودن پارامترهای فیزیکی ساختار چندلایه متناوب و با استفاده از تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال می‌توان رفتار الکترومغناطیسی ساختار چندلایه را تحلیل کرد. در این پژوهش هدف این است که با توجه به رفتار الکترومغناطیسی یک فیلتر بازتابنده پهن‌باند نوری و پدیده تشدید مودهای هدایتی، مشخصات فیزیکی ساختار چندلایه متناوب را تعیین کنیم.

۱-۳- استفاده از الگوریتم‌های تکاملی[۱] برای طراحی ادوات اپتیکی

با توجه به این که منحنی میدان‌های بازتابشی و عبوری در حالت تشدید مودهای هدایتی می‌توانند اشکال متفاوتی داشته باشند می‌توان انواع مختلفی از ادوات اپتیکی را با استفاده از تشدید مودهای هدایتی در توری پراش طراحی کرد [۹و۱۰] . تعیین مشخصات فیزیکی یک ساختار چندلایه متناوب بر اساس ضرایب بازتابشی و عبوری مطلوب، فرآیند این طراحی را تشکیل می‌دهد.

در تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال با مشخص بودن ویژگی‌های فیزیکی ساختار متناوب می‌توان منحنی‌های بازتابش و عبوری را معین نمود. اما برای تعیین پارامترهای فیزیکی ساختار متناوب با استفاده از منحنی‌های بازتابش و عبوری روش مستقیمی وجود ندارد. در این شرایط برای حل مسائل مبتنی بر روش‌های غیرخطی مانند طراحی ادوات اپتیکی می‌باید از روش‌های بهینه‌سازی استفاده نمود و الگوریتم‌های تکاملی از کارآمدترین انواع روش‌های بهینه‌سازی هستند. تا کنون از الگوریتم ژنتیک[۲] و الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات[۳] در طراحی ادوات اپتیکی مبتنی بر تشدید مودهای هدایتی استفاده شده است [۱۱].

در این پایان‌نامه از چند الگوریتم دیگر در طراحی فیلتر نوری استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها عبارتند از : الگوریتم ژنتیک با فضای جستجوی منعطف[۴] ، الگوریتم ممتیک[۵] با جستجوی محلی[۶] مبتنی بر الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده[۷]، الگوریتم فازی- ممتیک[۸] و الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به هم آمیخته ارتقا یافته با روش نخبه‌گرایی[۹]. از بین این الگوریتم‌ها، الگوریتم فازی- ممتیک از شیوه‌ای کاملاً ابتکاری بهره برده‌است. همچنین

---

[۱] Evolutionary algorithm
[۲] Genetic algorithm
[۳] Particle swarm optimization
[۴] Resilient search space
[۵] Memetic algorithm
[۶] Local search
[۷] Simulated annealing
[۸] Fuzzy-Memetic algorithm
[۹] Improved Shuffled frog leaping algorithm by elitism

راهبردهای کاوش در فضای جستجوی منعطف و روش کاوش نخبه‌گرایانه که به ترتیب در الگوریتم زنتیک و الگوریتم جستجوی قورباغه‌ها مطرح شده‌اند نیز ابتکاری هستند.

بنابر آن‌چه تاکنون گفته شد برای طراحی یک فیلتر نوری با استفاده از پدیده تشدید مودهای هدایتی در ساختارهای متناوب به ابزاری برای تحلیل رفتار الکترومغناطیسی ساختارهای متناوب (روش تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال) و همچنین روش‌های الگوریتم تکاملی نیاز است.

بنابراین در فصل دوم اشکال پایه و استاندارد الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ممتیک، الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به‌هم آمیخته و بعضی از قواعد منطق فازی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند بررسی می‌شوند.

در فصل سوم ابزارهای لازم برای طراحی فیلتر نوری از جمله نحوه پیاده‌سازی روش تحلیل مودی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال ارائه می‌شود.

در فصل چهارم نحوه پیاده‌سازی الگوریتم‌های تکاملی پیشنهاد شده با برنامه متلب تشریح می‌گردد و نتیجه عملکرد این الگوریتم‌ها در طراحی فیلتر بازتابنده پهن‌باند نوری گزارش می‌شود.

در فصل پنجم عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی با یکدیگر مقایسه می‌شود و پیشنهادهایی برای کارهای آینده ارائه می‌گردد.

فصل دوم

آشنایی با الگوریتم‌های تکاملی

با توجه به این‌که طراحی ادوات اپتیکی مبتنی بر تشدید مودهای هدایتی مسئله‌ای پیچیده است باید از الگوریتم‌های تکاملی در حل آن استفاده نمود. در این فصل اصول کلی و همچنین اشکال پایه الگوریتم‌هایی که به عنوان ابزار طراحی استفاده شده‌اند، معرفی می‌گردند. الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ممتیک، و الگوریتم جستجوی قورباغه‌های به هم آمیخته الگوریتم‌های استفاده شده در طراحی هستند. از آنجایی که در فصل آینده از منطق فازی[۱] نیز برای ارائه شکل جدیدی از الگوریتم ممتیک استفاده شده است بعضی از اصول و قواعد منطق فازی نیز در این فصل به‌طور مختصر معرفی می‌شوند.

۲-۱- مشخصات الگوریتم‌های تکاملی

هر الگوریتم تکاملی چند مرحله اجرا دارد که پیاده‌سازی این مراحل جزء ضروری حل مسئله است. در ادامه این مراحل توضیح داده شده‌اند.

۲-۱-۱- تولید و نمایش پاسخ‌ها

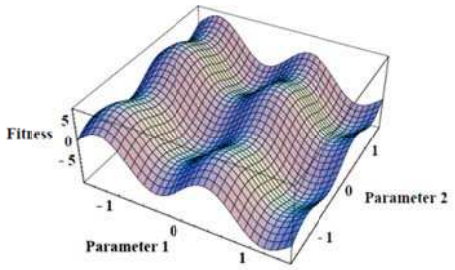
ابتدا مجموعه‌ای از پاسخ‌ها به صورت اتفاقی و در قالب یک جمعیت اولیه[۲] تولید می‌شوند. هر کدام از این پاسخ‌ها یک فرد[۳] نامیده می‌شود و این افراد بر اساس روش الگوریتم به صورت موازی متحول و بهینه می‌شوند. همچنین بازه‌ای از اعداد به عنوان فضای جستجو برای افراد مشخص می‌شود.

۲-۱-۲- محاسبه برازندگی[۴] افراد جمعیت

برازندگی تابعی از چند پارامتر است که الگوریتم تکاملی بر اساس یک راهبرد مقدار ماکزیمم آن را جستجو می‌کند [۱۲]. شکل۲-۱منحنی برازندگی را نسبت به دو پارامتر نشان می‌دهد.

---

۱ Fuzzy logic
۲ Initial population
۳ Individual
۴ Fitness



شکل۲-۱- منحنی سه‌بعدی برازندگی بر حسب دو پارامتر طراحی[۱۲]

به جز بهینه کلی[۱] که ماکزیمم مقدار تابع برازندگی است در نقاط مختلف فضای جستجو ممکن است بهینه‌های محلی[۲] هم وجود داشته باشند. اگر فضای جستجو به میزان کافی کاوش نشود ممکن است الگوریتم تکاملی به جای همگرا شدن در بهینه کلی در یک بهینه محلی همگرا شود.

پس از محاسبه برازندگی هر یک از افراد جمعیت، پاسخ‌ها بر اساس مطلوب بودن میزان برازندگی‌شان مرتب می‌شوند سپس بر اساس روش‌های انتخاب و میزان برازندگی افراد، بعضی از افراد جمعیت برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند.

۲-۱-۳- روش‌های اکتشافی[۳]

الگوریتم‌های تکاملی از راهبردهای مختلف برای یافتن پاسخ مسئله استفاده می‌کنند که این راهبردها روش‌های اکتشافی نامیده می‌شوند. روش‌های اکتشافی مبتنی بر معیارهایی هستند که بر اساس آن‌ها الگوریتم می‌تواند بین چندین گزینه انتخاب، بهترین گزینه را برگزینند. مهم‌ترین ویژگی روش‌های اکتشافی این است که به جای ارائه کردن راه حل‌های دقیق و اطمینان بخش، با توجه به شرایط موجود کم‌هزینه‌ترین مسیرها را برای حل مسائل انتخاب می‌کنند. وقتی با مسائل بسیار پیچیده و زمان‌بر مواجه می‌شویم کاراتر بودن روش‌های اکتشافی نسبت به روش‌های دقیق و یقینی[۴] بارز می‌شود. برای این که راهبرد یک الگوریتم مبتنی بر روش‌های اکتشافی باشد شرط کافی این است که الگوریتم مذکور بتواند فضاهای جستجوی نامناسب را تشخیص دهد و آنان را از لیست انتخاب حذف نماید. تکنیک‌های پیاده‌سازی این روش‌ها بسیار متنوع هستند بر این اساس افراد منتخب از نسل قبلی بر اساس این راهبردها افراد جدیدی تولید می‌کنند. سپس برازندگی افراد جدید محاسبه می‌گردد. افراد جدید و افراد نسل قبلی بر اساس میزان مطلوب بودن برازندگی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. و افرادی از نسل قبل که برازندگی مناسبی ندارند حذف شده و افراد جدید جایگزین می‌شوند.

۲-۱-۴- بررسی شرط توقف

عملیاتی که در الگوریتم‌های تکاملی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا زمانی که شرط توقف ارضا نشود در یک حلقه تکرار می‌شوند. محدودیت زمانی، محدودیت تعداد حلقه‌های تکرار و مطلوبیت برازندگی می‌توانند به عنوان معیارهایی برای توقف عملیات الگوریتم لحاظ شوند.

---

[۱] Global optimum
[۲] Local optimum
[۳] Heuristics
[۴] Deterministic

۲-۲- مزیت‌ها و معایب الگوریتم‌های تکاملی

الگوریتم‌های تکاملی در حل مسائل مزایای زیادی دارند که در ذیل به آن‌ها اشاره شده است:

الف- این الگوریتم‌ها می‌توانند متغیرهای پیوسته و گسسته را بهینه‌سازی کنند.

ب- به طور همزمان و به صورت موازی افراد جمعیت را تحلیل و پردازش می‌کنند.

ج- الگوریتم‌های تکاملی می‌توانند توابعی را که تعداد زیادی متغیر دارند بررسی و تحلیل نمایند.

د- الگوریتم‌های تکاملی می‌توانند به جای یک پاسخ یکتا فهرستی از پاسخ‌های بهینه ارائه کنند.

ه- الگوریتم‌های تکاملی می‌توانند صورت کدگذاری شده متغیرها را تحلیل و پردازش کنند.

و- متغیرهای موجود در روش‌های عددی، اطلاعات تجربی، توابع تحلیلی و غیره می‌توانند به عنوان پارامترهای طراحی در الگوریتم‌های تکاملی پردازش شوند.

ز- الگوریتم‌های تکاملی به دلیل پیوندی که با سایر علوم نظیر علوم شناختی[۱] و علوم عصبی[۲] و غیره دارند می‌توانند از نوآوری‌های سایر حوزه‌ها در ارتقا دادن خود استفاده کنند.

علی‌رغم مزایای زیاد استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها با مشکلاتی مواجه است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود:

الف- این که تعداد افراد جمعیت تولید شده و حدود[۳] بازه‌های جستجو چه‌قدر باشند معمولاً با نظر طراح معین می‌شوند. بنابراین با توجه به این که این مقادیر نقش تعیین کننده‌ای در کیفیت عملکرد الگوریتم‌ها دارند چنان‌چه طراح انتخاب‌های نامناسبی داشته باشد عملکرد الگوریتم با مشکل مواجه می‌شود.

ب- اگر بین کاوش کلی در فضای جستجو و جستجوی محلی تعادل برقرار نباشد ممکن است الگوریتم پیش از یافتن بهینه کلی در یک بهینه محلی همگرا شود و یا ممکن است اصلاً نتواند بهینه کلی را بیابد و هیچ‌گاه همگرا نشود

ج- در الگوریتم‌هایی که از روش‌های اکتشافی مبتنی بر جستجوی محلی برای حل مسائل استفاده می‌کنند اگر برازندگی‌های افراد جمعیت به یکدیگر نزدیک باشند الگوریتم در یافتن پاسخ نهایی دچار مشکل می‌شود.

د- بدیهی است که بین نوع مسئله و روش حل آن نسبتی برقرار است. این که برای یک مسئله مشخص از کدام الگوریتم باید استفاده نمود خود یک مسئله است.

۲-۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک تکنیکی است که با الهام از تحولات طبیعی موجودات زنده و بر اساس اصل داروینی[۴] بقای اصلح[۵] پاسخ بهینه را جستجو می‌کند. این الگوریتم در اواخر دهه ۱۹۶۰ بر اساس ایده‌های هالند[۶] ابداع شد. هالند این ایده را مطرح کرد که می‌توان بر اساس سیستم‌های وفقی[۷] مسائل بهینه‌سازی را مورد بررسی قرار داد. این ایده

---

۱ Cognitive sciences
۲ Neurology
۳ Extremes
۴ Darwinian principle
۵ Survival of the fittest
۶ Holland
۷ Adaptive systems

توسط دانشجویان هالند پرورش یافت تا این که الگوریتم ژنتیک به شکل امروزی آن توسط گلدبرگ[۱] معرفی شد [۱۳].

۲-۳-۱- رویکرد داروینیستی

گونه‌های مختلف موجودات زنده در طی قرن‌ها در اثر تحولات طبیعی دچار دگرگونی می‌شوند. این دگرگونی می‌تواند باعث نابودی یک گونه و جایگزین شدن گونه دیگری از موجودات زنده گردد. مهمترین عاملی که بر ماندگاری و یا فنای یک گونه تاثیر می‌گذارد میزان سازگاری و یا وفق‌پذیری آن گونه با تحولات طبیعی می‌باشد. این قانون کلی اصل بقای اصلح نامیده می‌شود.

بنابراین می‌توان گفت که بر اساس اصل بقای اصلح در فرآیندهای طبیعی، نظام حاکم بر مجموعه ، برازنده‌ترین افراد را انتخاب می‌کند. گونه‌های طبیعی برای این که در ضمن تحولات طبیعی بقای خود را تداوم دهند باید با ایجاد تحول در نسل‌های بعدی برازندگی نوع خود را ارتقا دهند. کروموزوم‌ها[۲] نقش انتقال خصوصیات موروثی از والدین به فرزندان را ایفا می‌کنند. بنابراین بهبود برازندگی گونه‌های موجودات زنده باید از طریق تغییرات کروموزوم انجام شود. این تغییرات می‌توانند به دو صورت اتفاق بیافتند:

الف) اصل تقاطع[۳]: اگر افرادی از یک گونه موجودات زنده که برازندگی بهتری نسبت به سایر افراد آن گونه دارند با هم جفت‌گیری انجام دهند. به دلیل ترکیب کروموزوم‌های خوب، برازندگی فرزندان[۴] بهبود می‌یابد.

ب) اصل جهش[۵]: تغییرات جهشی کروموزوم یک فرد می‌تواند باعث بهبود برازندگی آن فرد گردد.

بنابراین می‌توان گفت در میدان رقابت طبیعت، افرادی که سازگاری بیشتری با طبیعت داشته باشند در طی زمان نسل خود را تکثیر می‌کنند و بقای خود را تداوم می‌بخشند و حتی می‌توانند خصوصیات گونه خود را ارتقا دهند. از سوی دیگر افرادی که خصوصیاتشان با ویژگی‌های فرآیندهای طبیعی ناسازگار باشند به تدریج حذف می‌شوند و نسل‌های دیگر جایگزین آن‌ها می‌شوند[۱۲].

۲-۳-۲- تعریف الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک تکنیک حل مسئله است که از تفسیر داروینی تحولات زیست شناختی موجودات زنده در حل مسائل بهره می‌گیرد. این الگوریتم مبتنی بر تکرار[۶] است و از فرآیندهایی نظیر انتخاب، اصل تقاطع و اصل جهش به عنوان عملگر در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و با اعمال این عملگرها بر داده‌های ورودی الگوریتم، عمل بهینه‌سازی پاسخ‌ها انجام می‌شود. داده‌های ورودی یا عملوندها در الگوریتم ژنتیک به صورت رشته‌ای از پارامترهای طراحی مشخص می‌شوند که هر رشته یک کروموزوم یا ژنوم[۷] و هر یک از پارامترهای طراحی یک ژن[۸] در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۲-۲ یک کروموزوم را به صورتی رشته‌ای از ۵ ژن نشان می‌دهد.

---

۱ Goldberg
۲ Chromosomes
۳ Crossover
۴ Offspring
۵ Mutation
۶ Iteration
۷ Genome
۸ Gene

شکل۲-۲- یک کروموزوم که از پنج ژن تشکیل شده است. هر یک از ژن‌ها یک پارامتر طراحی است.

در شکل۲-۲، g_i ها ژن‌های کروموزوم هستند و هر یک حاوی یکی از پارامترهای طراحی هستند. در ادامه عملگرهایی که در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند معرفی شده و نحوه عملکرد آن‌ها در تحول داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۳-۲-۱- عملگر انتخاب

برای این که نسل جدیدی از ژنوم‌ها تولید شود لازم است ژنوم‌هایی از نسل قبل انتخاب شوند تا به عنوان والد در تولید نسل جدید مشارکت کنند. ژنوم‌های والد باید برازندگی مناسبی داشته باشند تا ارتقای برازش نسل بعدی تضمین شود[۱۴]. بر این اساس چندین روش برای انتخاب والدین وجود دارد که در ادامه چهار روش کاربردی از میان این روش‌ها معرفی می‌شود.

۲-۳-۲-۱-۱- انتخاب نخبه‌گرایانه[۱]

در این روش نخبه‌ترین ژنوم‌ها به عنوان والد انتخاب می‌شوند. نخبه‌ترین ژنوم‌ها، ژنوم‌هایی هستند که بهترین برازندگی را داشته باشند. این روش باعث سریع‌تر همگرا شدن نتایج می‌شود[۱۴].

۲-۳-۲-۱-۲- انتخاب چرخ رولت[۲]

در این روش احتمال این که ژنوم i-ام به عنوان والد انتخاب شود از مقدار p_i مشخص می‌شود. در رابطه۲-۱ احتمال p_i معرفی شده است:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{N} fit_i} \qquad (۱-۲)$$

در رابطه۲-۱، fit_i برازندگی ژنوم i-ام و N تعداد کل ژنوم‌ها در یک جمعیت است. مزیت این روش نسبت به روش انتخاب نخبه‌گرایانه این است که کاوش بیشتری در فضای جستجو انجام می‌دهد[۱۴].

۲-۳-۲-۱-۳- انتخاب مسابقه‌ای[۳]

در این روش زیرمجموعه‌ای از ژنوم‌ها به صورت اتفاقی انتخاب می‌شوند و بر اساس معیار برازندگی با یکدیگر رقابت می‌کنند. ژنوم‌هایی که برازندگی بهتری داشته باشند در این رقابت پیروز شده و برای تولید نسل بعدی به کار می‌روند[۱۴].

---

[۱] Elitist selection
[۲] Roulette wheel selection
[۳] **T**ournament selection

۲-۳-۲-۱-۴- انتخاب حالت پایدار[۱]

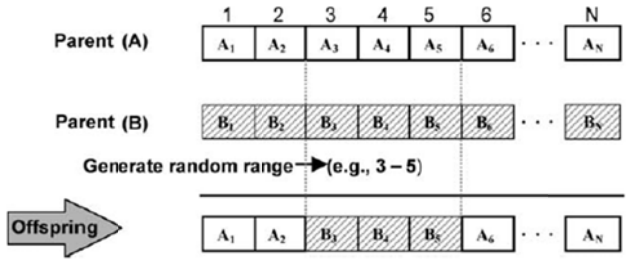
در بعضی از روش‌های انتخاب، در هر حلقه تکرار والدین به طور کلی حذف می‌شوند و فرزندان جایگزین آنان می‌گردند. در روش حالت پایدار به ژنوم‌هایی که برازندگی متوسطی دارند فرصت حضور در جمعیت بعدی داده می‌شود و فقط ژنوم‌های نامناسب حذف خواهند شد[۱۴].

۲-۳-۲-۲- عملگر تقاطع

اگر دو ژنوم والد بعضی از ژن‌های خود را با یکدیگر تعویض کنند ژنوم‌های جدیدی تولید می‌شوند که می‌توانند جایگزین ژنوم‌های قبلی شوند. ترکیب ژن‌ها منجر به از بین رفتن پراکندگی ژنتیکی می‌شود و باعث می‌شود ژن‌های مناسب یکدیگر را بیابند.

برای پیاده‌سازی تقاطع چند روش وجود دارد که تقاطع تک‌نقطه‌ای[۲] و تقاطع چندنقطه‌ای[۳] از آن جمله است. در تقاطع تک‌نقطه‌ای یک نقطه به صورت تصادفی در طول ژنوم‌ها و در محل اتصال ژن‌ها انتخاب می‌شود و از این نقطه ژنوم‌ها بریده می‌گردند سپس بخش‌های بریده شده از یک ژنوم با یکدیگر تعویض می‌شوند.

در تقاطع چندنقطه‌ای m نقطه در طول ژنوم‌ها و در محل اتصال ژن‌ها انتخاب می‌شوند و مشابه حالت قبل ژنوم‌ها از این نقاط برش خورده و تکه‌های ایجاد شده با یکدیگر تعویض می‌شوند. بدیهی است که مقدار m باید از تعداد محل اتصال ژن‌ها کوچکتر باشد. در شکل ۲-۳ تقاطع دو نقطه‌ای نشان داده شده است.



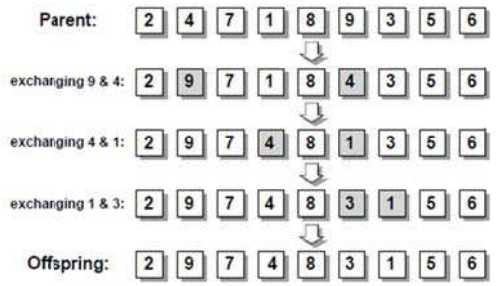
شکل۲-۳:تقاطع دو نقطه‌ای بین دو والد A و B[۱۵]

۲-۳-۲-۳- عملگر جهش

اگر اطلاعات مربوط به یک ژنوم به صورت اتفاقی تغییراتی یابد ژنوم جدیدی تولید می‌شود که می‌توان آن را جهش یافته ژنوم قبلی دانست. جهش می‌تواند به اشکال متفاوتی در الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی شود. برای مثال محتویات یک ژن می‌تواند به صورت اتفاقی تغییر کند. در شکل۲-۴ نوع دیگری از جهش نشان داده شده است که در آن ژن‌های یک ژنوم طی یک فرآیند موقعیت‌های خود را با یکدیگر تعویض می‌کنند.

---

[۱] Steady state selection
[۲] Single point crossover
[۳] Multi point crossover



شکل۲-۴-جهش ژنوم با تغییر تصادفی موقعیت ژن‌ها[۱۷]

می‌توان گفت اگر تعداد ژن‌ها در یک ژنوم برابر G باشد احتمال این‌که هر کدام از ژن‌ها برای جهش انتخاب شوند $1/G$ خواهد بود.

کارکرد جهش کاوش بیشتر در فضای جستجو است. بنابراین جهش مانع از همگرایی در بهینه محلی می‌شود. لذا مطلوب این است که در ابتدای کاوش جهش‌ها بزرگ باشند تا فضای جستجو به اندازه کافی کاوش شود و در انتهای کاوش باید جهش‌ها کوچک باشند تا الگوریتم بتواند بهینه کلی را بیابد.

۲-۳-۲-۴-اصل جایگزینی[۱]

جایگزینی را به دو صورت می‌توان پیاده سازی کرد. در روش اول فرزندانی که برازندگی مناسبی دارند جایگزین والدین می‌شوند و در روش دوم فرزندان بر اساس معیار برازندگی با جمعیت کل ژنوم‌ها مقایسه شده و سپس ژنوم-هایی که برازندگی مناسبی داشته باشند انتخاب می‌شوند.

۲-۳-۳- مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک

در الگوریتم ژنتیک پایه، عملیاتی که در ذیل آمده است به ترتیب اجرا می‌شوند:

الف- ابتدا پارامترهای طراحی در قالب ژنوم‌ها مرتب می‌شوند.

ب- جمعیت اولیه مقدار دهی می‌شود.

ج- برازندگی هر یک از افراد جمعیت محاسبه می‌گردد.

د- بر اساس یکی از معیارهای انتخاب، افرادی از جمعیت فعلی به عنوان والد برگزیده می‌شوند.

ه- بر اساس اصل تقاطع ژنوم‌های والدین ترکیب می‌شوند و ژنوم‌های جدیدی تولید می‌گردند.

و- ژنوم‌هایی که از بازترکیب تولید شده‌اند بر اساس اصل جهش ژنوم‌های دیگری تولید می‌کنند.

ز- ژنوم فرزندان بر اساس برازندگی با ژنوم‌های نسل قبل مقایسه می‌شوند. ژنوم‌های با برازندگی بهتر جایگزین ژنوم‌های با برازندگی نامناسب می‌شوند.

ح- شرط توقف عملیات بررسی می‌شود. اگر شرط توقف ارضا نشود الگوریتم به مرحله د بازمی‌گردد در غیر این صورت عملیات الگوریتم پایان می‌یابد و اطلاعات ژنومی که باعث ارضا شدن شرط توقف می‌شود به عنوان پارامترهای طراحی معرفی می‌شوند.

---

[۱] Replacement

۲-۴- الگوریتم ممتیک

واژه "مم"[۱] برای اولین بار در سال ۱۹۷۶توسط ریچارد داوکینز[۲] زیست شناس معروف ابداع شد. داوکینز این واژه را این‌گونه تعریف نمود: " واحد فرهنگی[۳] و اجتماعی که توان تقلید و انتقال الگوهای رفتاری را دارد[۱۷]".

در سال ۱۹۸۹پابلو موسکاتو[۴] در مقاله‌ای برای تحلیل دو مسئله فروشنده دوره‌گرد[۵] و مدل کافمان[۶] الگوریتمی را ابداع کرد و با الهام گرفتن از دیدگاه‌های داوکینز نام آن را الگوریتم ممتیک نهاد. این الگوریتم از دو فاکتور رقابت[۷] و مشارکت[۸] برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند [۱۸] .

۲-۴-۱-تعریف الگوریتم ممتیک

الگوریتم ممتیک نوعی الگوریتم تکاملی است که بر مبنای تحولات زیست‌شناختی[۹] و فرهنگی- اجتماعی به حل مسائل می‌پردازد. بر این اساس هر موجود زنده‌ای از دو منبع برای کسب اطلاعات استفاده می‌کند. منبع اول عامل ژنتیکی است که وابسته به خصوصیات والدین است و منبع دوم تجربیاتی است که فرد در اثر تعامل با محیط و دیگران کسب می‌کند. بنابراین الگوریتم ممتیک از الگوریتم ژنتیک که تاثیر عامل ژنتیکی را شبیه سازی می‌کند و راهبرد جستجوی محلی که تاثیر عامل تجربی را شبیه سازی می‌کند استفاده می‌نماید. در الگوریتم ممتیک معمولاً هر یک از افراد جمعیت که در حکم جوابی از مسئله هستند ابتدا در فرآیند جستجوی محلی وارد می‌شوند و پس از آن وارد فرآیند الگوریتم ژنتیک می‌شوند[۱۸و۱۹]

در مقابل ژن‌ها که در الگوریتم ژنتیک عامل انتقال خصوصیات وراثتی هستند، در الگوریتم ممتیک مم‌ها عامل انتقال خصوصیات فرهنگی[۱۰] هستند و یا به عبارت دیگر مم‌ها بر اساس تقلید[۱۱] با عوامل خارجی تعامل می‌کنند. به یک رشته از مم‌ها که یک فرد را تشکیل می‌دهند ممپلکس[۱۲] گفته می‌شود. بنابراین ممپلکس‌ها در الگوریتم ممتیک همان نقش ژنوم‌ها در الگوریتم ژنتیک را ایفا می‌کنند.

در عالم واقع عوامل محیطی نسبت به عوامل وراثتی تاثیر بیشتری بر رشد و تکامل افراد دارند. شکل‌گیری ایده-های خوب بیش از آن‌که محصول نبوغ ذاتی افراد باشد محصول تجربیاتی است که در اثر تعامل با محیط کسب شده‌اند. همچنین حجم و سرعت انتقال اطلاعات فرهنگی بیشتر از حجم و سرعت انتقال اطلاعات ژنتیکی است. بنابراین چنانچه الگوریتم جستجوی محلی به خوبی پیاده‌سازی شود الگوریتم ممتیک می‌تواند از نظر کیفیت و سرعت همگرایی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک داشته باشد.

---

۱ Meme
۲ Richard Dawkins
۳ Cultural unit
۴ Pablo Moscato
۵ Traveling sales man
۶ The Kauffman mod
۷ Competition
۸ Co-operation
۹ Biological evolution
۱۰ Cultural characteristics
۱۱ Imitation
۱۲ Memeplex

۲-۴-۲- جستجوی محلی

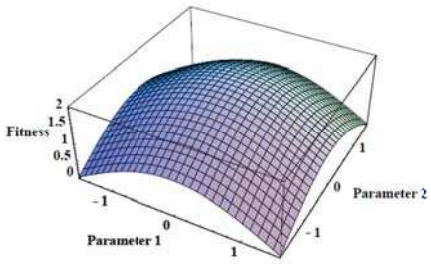
در الگوریتم ژنتیک افراد نخبه اطلاعات و ایده‌های خوب را فقط در اختیار فرزندان خود قرار می‌دهند و سایرین را از عرصه رقابت حذف می‌کنند. جستجوی محلی راهکاری است که در آن سایر افراد می‌توانند به نحو عادلانه‌ای از ایده‌های خوب بهره‌مند شوند و برازندگی خود را بهبود دهند و نقش فعال‌تری در یافتن بهینه کلی ایفا کنند.

راهکارهای متفاوتی برای انجام جستجوی محلی مطرح است. در ادامه راهکارهایی که تا کنون بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند بررسی می‌شوند.

۲-۴-۲-۱- تپه‌نوردی[۱]

در این روش که به آن جستجوی حریصانه[۲] نیز گفته می‌شود ابتدا در یک نقطه از فضا جستجو آغاز می‌شود و به ازای هر یک از مم‌های فرد جستجوگر یک همسایگی[۳] تعریف می‌گردد. فرد جستجوگر در این فضا که به عنوان همسایگی به آن اختصاص داده شده است کاوش می‌کند. اگر در همسایگی ممپلکس مذکور ممپلکس دیگری یافت شود که برازندگی بهتری نسبت به ممپلکس جستجوگر وجود داشته باشد ممپلکسی را که یافته‌ایم به عنوان ممپلکس جستجوگر برمی‌گزینیم و برای آن یک همسایگی جدید تعریف می‌کنیم. اگر در همسایگی ممپلکس جستجوگر ممپلکسی با برازندگی بهتر یافت نشود ممپلکس جستجوگر به عنوان بهینه محلی تلقی می‌شود. اگر در سایر نقاط فضای جستجو عملیات مشابهی انجام شود ممپلکسی که برازندگی آن از همه بهینه‌های محلی بیشتر باشد بهینه محلی خواهد بود.

اگر منحنی برازندگی نسبت به پارامترهای طراحی مانند شکل ۲-۵ شبیه یک تپه باشد روش تپه‌نوردی عملکرد خوبی خواهد داشت اما اگر تعداد قله‌ها و یا فلات‌ها[۴] در منحنی زیاد باشد عملکرد روش تپه‌نوردی با مشکل مواجه می‌شود.



شکل۲-۵: منحنی برازندگی که فقط یک ماکزیمم دارد و برای روش تپه‌نوردی مناسب است[۱۲]

۲-۴-۲-۲- تبرید شبیه‌سازی شده

این روش از فرآیند تبرید فلزات در متالوژی الهام گرفته شده است. به منظور اصلاح نواقص در بلور فلزات ابتدا فلزات گداخته می‌شوند و سپس به آرامی فلزات را سرد می‌کنند. برای سرد کردن فلزات از جابه‌جایی اتم‌هایی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند استفاده می‌شود. اگر جابه‌جایی بین دو اتم فلز باعث کاهش دمای فلز شود جابه‌جایی مورد پذیرش واقع می‌شود و در غیر این صورت جابه‌جایی با احتمال، مورد پذیرش قرار می‌گیرد.

---

[۱] Hill climbing
[۲] Greedy search
[۳] Neighborhood
[۴] Plateau

در الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده فرد جستجوگر در همسایگی خود کاوش می‌کند اگر در این همسایگی فردی یافت شود که برازندگی بهتری داشته باشد وظیفه جستجوگری به این فرد داده می‌شود و در غیر این صورت وظیفه جستجوگری با احتمال رابطه۲-۲-الف به فرد مذکور داده می‌شود.

$$p_i = e^{\frac{\Delta f}{T}} \qquad (۲-۲-الف)$$

$$\Delta \mathrm{f} = fit_i - fit_{searcher} \qquad (۲-۲-ب)$$

در رابطه ۲-۲-الف T تابع دماست و بر حسب زمان تغییر می‌کند. بر اساس فرآیند تبرید در ابتدا دما بسیار بالاست ولی با گذشت زمان دما کاهش می‌یابد. در رابطه ۲-۲-ب $fit_{searcher}$ برازندگی فرد جستجوگر و fit_i برازندگی فرد i-ام است که در همسایگی فرد جستجوگر قرار گرفته است.

اگر Δf مثبت باشد یعنی برازندگی فرد i-ام بیشتر از برازندگی فرد جستجوگر است بنابراین فرد i-ام به عنوان جستجوگر پذیرفته می‌شود و اگر Δf منفی باشد فرد i-ام با احتمال p_i جایگزین می‌شود. T نقش کنترل فرآیند تبرید را برعهده دارد. در لحظات ابتدایی T بسیار بالاست و باتوجه به رابطه ۲-۲-الف حتی اگر Δf منفی باشد احتمال گزینش فرد i-ام بالاست. بنابراین در شروع به کار الگوریتم، به افرادی که برازندگی نامناسبی دارند این امکان داده می‌شود که در فرآیند جستجو مشارکت کنند. اما با گذشت زمان (در حلقه‌های تکرار بعدی) T کاهش می‌یابد و در نتیجه p_i نیز به صفر میل می‌کند[۲۰].

در روش تبرید شبیه‌سازی شده جستجوی محلی در همه نقاط فضا و همچنین انتقال بین بهینه‌های محلی و بهینه کلی بهتر از روش تپه‌نوردی پیاده‌سازی می‌شود.

۲-۴-۳- مراحل اجرای الگوریتم ممتیک

همه مراحل در الگوریتم ژنتیک که در بخش ۲-۳ به آن اشاره شد در الگوریتم ممتیک نیز اجرا می‌شود. تفاوت الگوریتم ممتیک با الگوریتم ژنتیک انجام جستجوی محلی است که در هر حلقه تکرار پس از ارزیابی برازندگی افراد جمعیت و پیش از اعمال تقاطع و جهش صورت می‌گیرد. همان‌طور که گفته شد راهبردهای متفاوتی برای پیاده-سازی جستجوی محلی در الگوریتم ممتیک وجود دارد. در این پژوهش از روش تبرید شبیه‌سازی شده استفاده شده است.

۲-۵- منطق فازی

منطق فازی منطق عبارات مبهم است و در مقابل منطق کلاسیک تعریف می‌شود. در منطق کلاسیک هر گزاره-ای که واقعیت و یا یک وضعیت امر[۱] را وصف می‌کند از حیث ارزش یا صادق است و یا کاذب. بنابراین اصول حاکم بر طبیعت دقیق است اما دانش بشری که در قالب عبارات زبانی بارز می‌شود غیر دقیق و مبهم است. در طراحی سیستم‌هایی که بر مبنای تصمیم‌گیری و قضاوت رفتار می‌کنند لازم است که از امکانات دانش بشری استفاده شود. منطق فازی دانش بشری را به صورت دقیق فرموله و قواعد حاکم بر آن را مدل‌سازی می‌کند. بنابراین در منطق

[۱] State of affair