بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه پیام‌نور

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد

رشته سازه‌های هیدرولیکی

گروه عمران

عنوان پایان‌نامه:

بهینه‌سازی دوهدفه شبکه توزیع آب با اهداف کمینه‌سازی هزینه و نوسانات فشار

زهرا سجادی

شماره دانشجویی: ۹۰۰۱۰۳۱۶۳

استاد راهنما: دکتر جلیلی قاضی‌زاده

تیر ۹۳

با سپاس از سه وجود مقدس :

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موهایشان سپید شد تا ماروسفید شویم...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

چکیده

یکی از مشکلات اساسی در شبکه‌های توزیع آب، وجود نشت در سیستم و هدر رفت مقادیر قابل توجهی آب است. نوسان فشار بالای جریان در لوله‌ها به مرور زمان باعث ایجاد ترک و شکستگی در لوله‌ها و خروج مقادیر قابل توجه آب از سیستم توزیع می‌شود. با کاهش این اختلاف فشار در شبکه می‌توان باعث جلوگیری از نشت در سیستم و در نتیجه افزایش اطمینان‌پذیری سیستم شد. در این پایان‌نامه، کاهش نوسانات فشار در شبکه از دو طریق صورت پذیرفته است: ۱- نزدیک کردن فشار در گره‌ها به فشار متوسط و ۲- نزدیک کردن فشار در گره‌ها به فشار حداقل مجاز. مزیت استفاده از روش اول، تامین فشار کافی در گره‌های دوردست، کاهش فشارهای بالا در سیستم، کاهش احتمال نشت و افزایش اطمینان‌پذیری شبکه است. همچنین در روش دوم، علاوه بر کاهش نوسانات فشار، فشار در تمامی گره‌ها به فشار حداقل نزدیک شده و کاهش قابل ملاحظه نشت از سیستم را نتیجه خواهد داد. این پایان‌نامه مدلی جهت بهینه‌سازی همزمان قطر و جانمایی لوله‌ها در شبکه‌های آبرسانی به منظور کاهش نوسانات فشار و کاهش هزینه لوله‌ها با استفاده از NSGA2 ارائه می‌دهد. الگوریتم NSGA2 در محیط متلب کدنویسی شده و تحلیل هیدرولیکی شبکه‌ها بوسیله نرم‌افزار EPANET2 صورت پذیرفته است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی دو هدفه، افزایش اطمینان‌پذیری، بهینه‌سازی همزمان قطر و جانمایی لوله‌ها، شبکه توزیع آب، NSGA2.

فهرست مطالب

۱-۱- مقدمه ۱
۱-۲- مدیریت فشار ۲
۱-۳- ضرورت تحقیق ۲
۱-۴- هدف تحقیق ۳
۱-۵- روش تحقیق ۴
۱-۶- مبانی نظری ۵
۱-۶-۱- معادلات شبکه‌های توزیع آب ۵
۱-۶-۲- انواع بهینه‌سازی ۶
۱-۶-۲-۱- الگوریتم‌های تکاملی ۹
۱-۷- الگوریتم ژنتیک ۱۰
۱-۷-۱- مکانیسم الگوریتم ژنتیک ۱۰
۱-۷-۲- عملگرهای الگوریتم ژنتیک ۱۳
۱-۷-۳- روش تابع پنالتی ۱۵
۱-۸- بهینه‌سازی چندهدفه ۱۶
۱-۸-۱ الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA2) ۱۷
۱-۹- جعبه ابزار برنامه‌نویس ایپانت ۱۸
۲-۱- مقدمه ۲۰
۲-۲- پیشینه تحقیق ۲۰
۲-۲-۱- بهینه‌سازی اقتصادی شبکه توزیع آب (کمینه کردن هزینه اجزاء شبکه) ۲۱
۲-۲-۲- بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با استفاده از مدیریت فشار ۳۱
۲-۲-۳- بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با رویکردهای متفاوت ۳۴
۲-۲-۳- تاریخچه الگوریتم ژنتیک ۳۹
۳-۱- مقدمه ۴۰
۳-۲- بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب ۴۱
۳-۲-۱- بهینه‌سازی همزمان جانمایی و قطر لوله‌ها با هدف کمینه کردن هزینه در شبکه(۱) ۴۱
۳-۲-۱-۱- روابط بهینه‌سازی همزمان جانمایی و قطر لوله‌ها (با هدف کاهش هزینه) ۴۲
۳-۲-۱-۲- طرح کلی الگوریتم ژنتیک ۴۴

۳-۲-۱-۳- مثال ۱(شبکه گیم) ۵۷
۳-۲-۱-۴ مثال ۲ (شبکه گیم) با استفاده از معادله افت فشار دارسی- ویسباخ ۵۱
۳-۲-۲- بهینه‌سازی همزمان جانمایی و قطر لوله‌ها با هدف کمینه کردن هزینه در شبکه(۲) ۵۳
۳-۲-۲-۱- روابط بهینه‌سازی همزمان جانمایی و قطر لوله‌ها(با هدف کاهش هزینه) ۵۳
۳-۲-۲-۲- مثال (Rossman) ۵۵
۳-۲-۲- بهینه‌سازی همزمان آرایش و قطر لوله‌ها با هدف کمینه‌کردن هزینه و نوسانات فشار در شبکه با نزدیک کردن فشار به فشار متوسط با استفاده از NSGA2 ..... ۵۷
۳-۲-۲-۱- طرح کلی NSGA2 ..... ۵۷
۳-۲-۲-۲- روابط بهینه‌سازی همزمان آرایش و قطر لوله‌ها (با هدف کمینه کردن هزینه و نوسانات فشار با نزدیک کردن فشار به فشار متوسط) ۵۸
۳-۲-۲-۳- مثال (شبکه گیم) ۶۰
۳-۲-۳- بهینه‌سازی همزمان آرایش و قطر لوله‌ها با هدف کمینه‌کردن هزینه و نوسانات فشار در شبکه با نزدیک کردن فشار به فشار حداقل با استفاده از NSGA2 ..... ۶۳
۴-۱- جمع‌بندی ۶۶
۴-۲- نتیجه‌گیری ۶۷
۴-۳- پیشنهادات برای ادامه مطالعه ۶۸

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

شبکه‌های لوله‌ای یکی از اساسی‌ترین اجزاء در زیرساخت‌های صنایع مختلف در جوامع امروزی بشر می‌باشد. از جمله می‌توان به کاربرد وسیع این شبکه‌ها در صنایع آب و فاضلاب، نفت، گاز و کشاورزی اشاره کرد [۱۲]. تمامی شبکه‌های لوله‌ای عملکردی مشابه داشته به این شکل که جریان را از نقاط منبع مشخص به نقاط گرهی با تقاضای معین یا نامعین انتقال می‌دهند. شبکه‌های آب و فاضلاب شهری و شبکه‌های آبیاری بزرگترین شبکه‌های لوله‌ای کشور را تشکیل می‌دهند. گسترش شبکه‌های جدید و تعمیر و نگهداری شبکه‌های فرسوده باعث تحمیل مبالغ هنگفتی به شرکت‌های مجری طرح‌های مذکور خواهد شد. بدیهی است حتی کاهش جزیی در هزینه اجزاء و قطعات شبکه، کاهش چشمگیرهزینه‌ها را بدنبال خواهد داشت.

یکی از موضوعات حائز اهمیت در شبکه‌های انتقال جریان، فشار در شبکه می‌باشد. فشار بالا در شبکه‌های توزیع، اتلاف آب را به همراه خواهد داشت. افزایش فشار در شبکه، باعث خوردگی و فرسایش لوله‌ها شده، احتمال ترک و شکستگی لوله‌ها و نشت از سیستم را افزایش می‌دهد. کاهش مقدار نشت دارای مزایای زیادی می‌باشد که عبارتند از کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای ساخت تاسیسات منابع آب جدید و توسعه سامانه‌های آبرسانی، بالابردن عمر تاسیسات همجوار در شبکه توزیع آب از جمله تجهیزات تصفیه آب و پمپاژ، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، کاهش امکان ورود آلودگی از محل‌های نشت در لوله‌ها، افزایش بازدهی و کارایی شرکت آب و فاضلاب در بخش‌های فنی و مهندسی، بهره‌برداری و مشترکین، بالابردن درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب و جلب رضایت مشترکین.

۱-۲- مدیریت فشار[1]

یکی از کاراترین و مقرون به صرفه‌ترین راه‌های کنترل و کاهش نشت[2] از شبکه توزیع آب، مدیریت فشار است. مدیریت فشار به مجموعه برنامه‌ها و عملیاتی گفته می‌شود که به منظور تنظیم فشار[3] در شبکه صورت می‌پذیرد، بطوریکه علاوه بر تامین فشار آب مورد نیاز مصرف‌کنندگان، تغییرات و ناپایداری در فشار ایجاد نگردد. مدیریت فشار با کاهش نوسانات فشار و کاهش اضافه فشار در لوله‌ها، باعث افزایش طول عمر شبکه بدلیل کاهش احتمال شکستگی در لوله‌ها می‌شود. در این روش، فشار در گره‌ها باید در حد بهینه قرار گیرد. طراحی کارآمد شبکه در برابر نشت، تاثیر قابل توجهی بر حجم فعالیت‌های تعمیر و نگهداری خواهد داشت. راهکارهای مختلفی به منظور مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب ارائه شده است که تعدادی از آنها عبارتند از کاهش هد پمپاژ، تنظیم فشارهای ناحیه‌ای با استفاده از مجموعه‌ای از شیرهای فشارشکن[4] و یا استفاده از نصب تانک‌های فشارشکن[5] [۱۳]. روش‌های مذکور با ثابت فرض کردن شکل شبکه یعنی محل قرارگیری لوله‌ها ارائه شده‌اند، در حالیکه قطر و محل قرارگیری لوله‌ها تاثیر قابل توجهی بر نحوه توزیع فشار در گره‌ها و در نتیجه نشت از سیستم توزیع خواهد داشت. در این تحقیق، به بررسی تاثیر عوامل قطر وجانمایی لوله‌ها در کاهش نوسانات فشار و هزینه شبکه‌های توزیع آب پرداخته شده است.

۱-۳- ضرورت تحقیق

هزینه اصلی در شبکه‌های لوله‌ای از جمله شبکه‌های توزیع آب و شبکه‌های آبیاری، شامل ۱- هزینه انرژی و ۲-هزینه اجزاء شبکه شامل هزینه لوله‌ها می‌باشد. کاهش این هزینه‌ها سهم بسزایی در کاهش هزینه‌های تحمیل‌شده بر پروژه خواهد داشت.

جزء اصلی و پرهزینه در شبکه‌های توزیع، لوله‌ها می‌باشند. کاهش در هزینه لوله ها از دو طریق ممکن است: ۱- کاهش در طول لوله‌ها (بوسیله تغییر جانمایی لوله‌ها)، ۲- کاهش در قطر لوله‌ها و ۳- تغییر در جنس لوله‌ها. در این پایان‌نامه، تاثیر جنس لوله‌ها در هزینه‌های وارد بر طرح در نظر گرفته نشده و قطر و جانمایی لوله‌ها بطور همزمان کمینه

[1] Pressure management
[2] Leakage
[3] Pressure regulation
[4] PBV: pressure breaking valve
[5] PBT: pressure breaking tank

می‌شوند. طول و قطر لوله‌ها در شرایطی کمینه می‌شوند که شرایط هیدرولیکی مجاز در شبکه برقرار باشد. از شرایط هیدرولیکی که باید در شبکه‌ها در حد مجاز قرار داشته‌باشد فشار، سرعت و دبی است.

انتقال آب در شبکه‌های لوله‌ای بر اثر اختلاف انرژی (هد فشاری[6]) صورت می‌گیرد و هر چه این اختلاف بیشتر باشد قدرت انتقال و توزیع آب بیشتر خواهد بود. اما با افزایش ابعاد شبکه، این اضافه فشار افزایش یافته و پدیده نشت که ارتباط مستقیم با فشار دارد نیز تشدید می‌شود. نشت باعث کمبود در منابع آب شده بگونه‌ایکه پرداخت هزینه‌های اضافی پمپاژ، تصفیه و انتقال آب را بر تولیدکننده تحمیل و آب را از چرخه مصرف خارج می‌نماید. کاهش نوسانات فشار در شبکه‌های آبرسانی با نزدیک کردن فشار گره‌ها به فشار متوسط، باعث افزایش فشار در گره‌های دوردست و کاهش فشار در گره‌های با فشار بالا شده، نشت از سیستم کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به تاثیر قطرها و پلان شبکه (محل قرارگیری لوله‌ها) بر توزیع فشار و میزان فشار در شبکه، ارائه طرح بهینه (طرحی از قطرها و جانمایی لوله‌ها)، به منظور حداقل کردن هزینه و نوسانات فشار ضرورت می‌یابد. اهمیت این روش در این است که برخلاف سایر تکنیک‌های مدیریت فشار، در اینجا کاهش نشت تنها بوسیله تغییر محل قرارگیری لوله‌ها با قطرهای مختلف در شبکه (نه بوسیله تجهیزات جانبی) صورت می‌پذیرد.

۱-٤- هدف تحقیق

هدف از این تحقیق، ارائه مدل بهینه شبکه توزیع آب می‌باشد بطوریکه علاوه بر بهینه‌سازی اقتصادی[7]، اختلاف فشار بین گره‌ها نیز حداقل شود. حداقل شدن نوسانات فشار، از دو روش ۱- نزدیک کردن فشار گره‌ها به فشار میانگین و ۲- نزدیک کردن فشار گره‌ها به فشار حداقل مجاز می‌باشد. با نزدیک کردن فشار گره‌ها به فشار میانگین، احتمال ترک‌خوردگی و شکست در لوله‌ها در اثر نوسان فشار بالا و فشار بالا کم شده و در نتیجه تلفات آب در شبکه کاهش می‌یابد. همچنین فشار در گره‌های دور از مخزن افزایش یافته و مشکل کم بودن فشار در بعضی نقاط مصرف از بین خواهد رفت. همچنین با نزدیک کردن فشار در شبکه به فشار حداقل مجاز، با تامین حداقل فشار در گره‌های مصرف، علاوه بر کمینه شدن فشار درگره‌ها، نوسانات فشار در شبکه نیز کاهش یافته و نشت از سیستم به شدت کاهش و اطمینان‌پذیری شبکه افزایش می‌یابد.

[6] Compressive head
[7] Economic optimization

۱-۵- روش تحقیق

بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب در ۳ حالت بررسی می‌شود که عبارتند از:

۱- بهینه‌سازی قطر و جانمایی لوله‌ها با هدف کاهش هزینه با استفاده از GA

۲- بهینه‌سازی دو هدفه قطر و جانمایی لوله‌ها با اهداف کاهش هزینه و کاهش نوسانات فشار با استفاده از NSGA2

بهینه‌سازی در حالت دوم به دو روش صورت می‌پذیرد:

۱- نزدیک کردن فشار در گره‌ها به فشار متوسط: در این حالت، دومین تابع هدف، مجموع قدر مطلق اختلاف فشار گره‌های مصرف نسبت به فشار متوسط می‌باشد.

۲- نزدیک کردن فشار در گره‌ها به فشار حداقل مجاز: در این حالت، دومین تابع هدف، مجموع قدر مطلق اختلاف فشار گره‌های مصرف نسبت به فشار حداقل مجاز) می‌باشد. فشار حداقل مجاز در این پایان‌نامه ۳۰ متر آب در نظر گرفته شده است.

کدنویسی در محیط متلب انجام شده و به منظور تحلیل شبکه‌ها، متلب با کاربرد ToolKitهایی به نرم‌افزار EPANET2 لینک می‌شود. مراحل کلی الگوریتم ژنتیک تنظیم شده در ادامه بیان شده است:

- ایجاد جمعیت اولیه
- مقایسه جواب‌ها و رتبه‌بندی
- انتخاب اعضای والدین، ترکیب و ایجاد جمعیت فرزندان
- انتخاب اعضای جهش‌یافتگان و اعمال جهش
- ادغام جمعیت اصلی، فرزندان و جهش‌یافتگان و ایجاد جمعیت نسل جدید
- اگر شرایط خاتمه محقق نشده باشد از مرحله ۲ تکرار می‌کنیم.
- پایان

۱-٦- مبانی نظری

۱-٦-۱- معادلات شبکه‌های توزیع آب

شبکه‌های توزیع آب شامل لوله‌ها، مخازن، پمپ‌ها و شیرها می‌باشد. در یک شبکه توزیع آب مجهولات شامل دبی، افت هد در لوله‌ها و مقادیر فشار در گره‌ها می‌باشد. در صورتیکه فرض شود شبکه مورد نظر دارای M لوله و N گره است، تعداد ۲M+N مجهول وجود دارد، بنابراین به همین تعداد معادله احتیاج می‌باشد. معادلات موجود در شبکه‌های توزیع آب شامل معادلات پیوستگی و جریان می‌باشد. بر اساس معادله پیوستگی جمع جبری جریان‌های ورودی و خروجی به یک گره صفر می‌باشد [۱].

۱- معادله پیوستگی در گره‌ها

$$\sum_k Q_k = \sum_k \left(\frac{H_i - H_j}{R_k}\right)^{1/n} = q \qquad (۱-۱)$$

با فرض داشتن یک گره مخزن، تعداد k-۱ رابطه خطی خواهیم داشت. K: تعداد لوله‌های متصل به هر گره است. Q_k دبی در لوله kام متصل به گره، q میزان برداشت از گره، H_i هد گرهی در گره ابتدای لوله، H_j هد گرهی در گره انتهای لوله، R_k ثابت مقاومت لوله kام و n توانی است که در روابط افت هد متفاوت تغییر می‌کند.

۲- معادلات افت هد در لوله (در ایپانت)

$$h_f = H_i - H_j = RQ^n \qquad (۲-۱)$$

$$(h_f)_{H-W} = 4.727C^{-1.852}d^{-4.871}LQ^{1.852} \qquad (۳-۱)$$

$$(h_f)_{D-W} = 0.0252f(\in, d, Q)d^{-5}LQ^2 \qquad (۴-۱)$$

Q نرخ جریان در لوله، h_f افت هد آب در لوله، H_i هد گرهی در گره ابتدای لوله، H_j هد گرهی در گره انتهای لوله، R ضریب مقاومت لوله، n ضریب تجربی که در معادلات افت هد متفاوت تغییر می‌کند، $(h_f)_{H-W}$ افت هد آب در لوله طبق معادله هیزن- ویلیامز، C ضریب هیزن- ویلیامز در لوله، d قطر لوله، L طول لوله، $(h_f)_{D-W}$ افت هد آب در لوله طبق معادله دارسی- ویسباخ و $\in$: ضریب زبری دارسی-ویسباخ می‌باشد [۱].

۳- در هر حلقه باید جمع جبری افت هد لوله‌های تشکیل دهنده برابر صفر باشد، یعنی:

$$\sum_{k\epsilon c} R_l Q_l^n = 0 \quad , c = I, \Pi, \dots, C \qquad (۵-۱)$$

c حلقه مورد نظر، l تعداد لوله‌های تشکیل‌دهنده حلقه، C تعداد کل حلقه‌های موجود در شبکه، R ضریب مقاومت لوله و n ضریب تجربی است که در معادلات افت هد متفاوت تغییر می‌کند [۱].

در طراحی هیدرولیکی[8]شبکه‌های آبرسانی، هدف طراح آنست که با توجه به خصوصیات شبکه، از میزان فشار، دبی، سرعت و سایر مجهولات شبکه اطلاع یابد. در بسیاری از طرح‌های ارائه شده برای بهینه‌سازی شبکه، میزان تقاضا در هر گره بدون توجه به میزان فشار در آن گره تامین فرض شده و بر مبنای آن شبکه تحلیل می‌شود.

۱-۶-۲- انواع بهینه‌سازی

بهینه‌سازی یک فعالیت مهم و تعیین‌کننده در طراحی ساختاری است. طراحان زمانی قادر خواهند بود طرح‌های بهتری تولید کنند که بتوانند با روش‌های بهینه‌سازی، در صرف زمان و هزینه طراحی صرفه‌جویی نمایند. بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در مهندسی، طبیعتاً پیچیده‌تر و مشکل‌تر از آن هستند که با روش‌های مرسوم بهینه‌سازی نظیر روش برنامه‌ریزی ریاضی[9]و نظایر آن قابل حل باشند. بهینه‌سازی ترکیبی[10]، جستجو برای یافتن نقطه بهینه توابع با متغیرهای گسسته[11]می‌باشد. امروزه بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی که اغلب از جمله مسائل با درجه غیرچندجمله‌ای[12]هستند، به صورت تقریبی با کامپیوترهای موجود قابل حل می‌باشند. از جمله راه‌حل‌های موجود در برخورد با این گونه مسائل، استفاده از الگوریتم‌های تقریبی یا ابتکاری است. این الگوریتم‌ها تضمینی نمی‌دهند که جواب به دست آمده بهینه‌ترین جواب باشد، اما حتما یکی از بهترین جواب‌ها را ارئه خواهد داد. تنها با صرف زمان بسیار می‌توان جواب نسبتاً دقیقی به دست آورد و در حقیقت بسته به زمان صرف شده، دقت جواب تغییر می‌کند [۲].

مسائل بهینه‌سازی به دو دسته مقید[13]و غیرمقید[14]تقسیم می‌شوند: الف) مسائل بهینه‌سازی مقید: بهینه‌سازی در اغلب مسائل کاربردی، با توجه به محدودیت‌هایی صورت می‌گیرد؛ محدودیت‌هایی که در زمینه رفتار و عملکرد یک سیستم

[8] Hydraulic designing
[9] Mathematical programming
[10] Combinational Optimization
[11] Discrete Variables
[12] NP-Hard
[13] Constrained
[14] Unconstrained

می‌باشد، محدودیت‌های رفتاری، و محدودیت‌هایی که در فیزیک و هندسه مسأله وجود دارد، محدودیت‌های هندسی یا جانبی نامیده می‌شوند. معادلات معرف محدودیت‌ها ممکن است به صورت مساوی یا نامساوی باشند که در هر مورد، روش بهینه‌سازی متفاوت می‌باشد. به هر حال محدودیت‌ها، ناحیه قابل قبول در طراحی را معین می‌کنند.

به طور کلی مسائل بهینه‌سازی بامحدودیت را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\text{Minimize or Maximize: } F(X) \qquad (۶-۱)$$

$$\text{Subject to } g_i(x) \le 0 \qquad I=1,2,3,\ldots,p \qquad (۷-۱)$$

$$h_j(x) = 0 \qquad j=1,2,3,\ldots, \qquad (۸-۱)$$

$$X_k^{min} < X_k < X_k^{max} \qquad k=1,2,3,\ldots,n \qquad (۹-۱)$$

که در آن $X=\{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n\}$ بردار طراحی، و رابطه‌های (۱-۶)، (۱-۷)، (۱-۸) و (۱-۹) به ترتیب محدودیت‌های نامساوی، مساوی و محدوده قابل قبول برای متغیرهای طراحی می‌باشند.

ب) مسائل بهینه‌سازی نامقید: در این مسائل، هدف بیشینه یا کمینه کردن تابع هدف بدون هر گونه محدودیتی بر روی متغیرهای طراحی می‌باشد [۲].

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق[۱۵] و الگوریتم‌های تقریبی[۱۶] تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مسائل سخت[۱۷] کارایی ندارند و زمان حل آنها در این مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. مسائل NP سخت‌ترین مسائل برای پاسخ‌گویی هستند از آن جهت که برای آنها هیچ الگوریتم شناخته شده قابل اجرا در زمان چندجمله‌ای وجود ندارد. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت هستند. الگوریتم‌های تقریبی نیز به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری[۱۸]، فراابتکاری[۱۹] و ماوراء ابتکاری[۲۰] تقسیم می‌شوند [۳].

دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، قرار گرفتن آنها در بهینه‌های محلی[۲۱]، و ناتوانی آنها برای کاربرد در مسائل گوناگون است. الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مشکلات الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده‌اند. در واقع الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راه‌کارهای برون‌رفت از بهینه محلی می‌باشند

[15] exact
[16] approximate algorithms
[17] NP
[18] heuristic
[19] meta-heuristic
[20] hyper heuristic
[21] Local optimize

و قابل کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل هستند. رده‌های گوناگونی از این نوع الگوریتم در ده‌های اخیر توسعه یافته است.

الگوریتم‌های فراابتکاری خود به چهار نوع الگوریتم‌های مبتنی بر یک جواب و مبتنی بر جمعیت، الهام گرفته شده از طبیعت و بدون الهام از طبیعت، با حافظه و بدون حافظه، قطعی و غیرقطعی تقسیم می‌شوند. در ادامه به اختصار راجع به الگوریتم‌های مذکور توضیح داده می‌شود.

- الگوریتم‌های مبتنی بر یک جواب و مبتنی بر جمعیت: در حین فرآیند جستجو یک جواب را تغییر می‌دهند، در حالی که در الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت در حین جستجو، مجموعه‌ای از جواب‌ها در نظر گرفته می‌شود.
- الهام گرفته شده از طبیعت و بدون الهام از طبیعت: بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری از طبیعت الهام گرفته شده‌اند، در این میان برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری نیز از طبیعت الهام گرفته نشده‌اند.
- با حافظه و بدون حافظه: برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری فاقد حافظه می‌باشند، به این معنا که این نوع الگوریتم‌ها مانند الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده از اطلاعات بدست آمده در حین جستجو استفاده نمی‌کنند. این در حالی است که در برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر جستجوی ممنوعه از حافظه استفاده می‌شود. این حافظه اطلاعات بدست آمده در حین جستجو را در خود ذخیره می‌کند.
- قطعی و احتمالی: یک الگوریتم فراابتکاری قطعی نظیر جستجوی ممنوعه، مسئله را با استفاده از تصمیمات قطعی حل می‌کند. اما در الگوریتم‌های فراابتکاری احتمالی نظیر تبرید شبیه‌سازی‌شده، یک سری قوانین احتمالی در حین جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

در جدول زیر تعدادی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری و ویژگی‌های مختلف آنها نشان داده شده است.

جدول ۱-۱ الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری و ویژگی‌های آنها

نام الگوریتم	مبتنی بر یک جواب	مبتنی بر جمعیت	الهام گرفته از طبیعت	قطعی	تکاملی
ژنتیک		√	√		√
کلونی مورچگان		√	√		
ازدحام ذرات		√	√		√

رقابت استعماری		√			√
چکه آب‌های هوشمند		√	√		√
جستجوی ممنوعه	√				√
تبرید شبیه‌سازی	√			√	√
تپه‌نوردی				√	

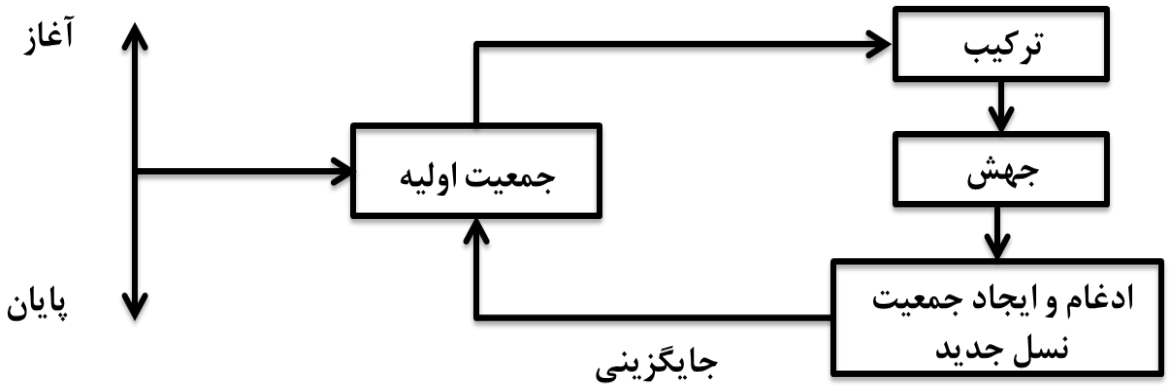
هدف از حل مسائل بهینه‌سازی، بدست آوردن بهترین جواب و به بیانی دیگر انجام حلی بهینه از بین حل‌های ممکن است. بنابراین جواب بدست آمده قطعا بهترین جواب نیست بلکه یکی از بهترین جواب‌های ممکن می‌باشد. در علوم کامپیوتر و ریاضیات، الگوریتم جستجو الگوریتمی است که یک مسأله را به عنوان ورودی می‌گیرد و بعد از ارزیابی راه حل‌های ممکن، بهترین راه حل را ارائه می‌دهد. فضای جستجو محدوده‌ای از جواب‌های قابل‌قبول مساله می‌باشد به‌طوری که جواب بهینه نیز یکی از زیرمجموعه‌های این محدوده است. هرنقطه از فضای جستجو نشان دهندهٔ یکی از جواب‌های مسأله می‌باشد.

۱-٦-۲-۱- الگوریتم‌های تکاملی

تکنیک‌های محاسبات تکاملی برخلاف الگوریتم‌های جستجوی متداول، روی مجموعه‌ای از جواب‌ها در فضای جستجو عمل می‌کنند و با استفاده از همکاری و رقابتی که بین جواب‌ها ایجاد می‌کنند، می‌توانند خیلی سریع جواب بهینه را برای مسائل بهینه‌سازی پیچیده پیدا کنند. این تکنیک‌ها به طور عمده از فرآیند تکامل در طبیعت الهام گرفته شده‌اند که چهار مورد معروف آن، الگوریتم ژنتیک، برنامه نویسی‌تکاملی، استراتژی‌های تکاملی و برنامه‌نویسی ژنتیکی می‌باشند. به غیر از این تکنیک‌های محاسبات تکاملی الهام گرفته از فرآیند تکامل در طبیعت، یک سری تکنیک‌های محاسباتی جدید ابداع شده است که رفتار اجتماعی را شبیه‌سازی می‌کند که الگوریتم‌های ژنتیک، اجتماع مورچگان و ازدحام ذرات مثال‌هایی از الگوریتم‌های تکاملی می‌باشند. عمده دلیلی که می‌توان برای الگوپذیری از رفتار اجتماعی موجودات زنده آورد، بهینگی آن می‌باشد. به این ترتیب منطقی به نظر می‌رسد که برای حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی، این رفتارهای اجتماعی را شبیه‌سازی کنیم [۳و۴]. سه ویژگی الگوریتم‌های تکاملی در ادامه به اختصار آورده شده است:

۱-الگوریتم تکاملی مبتنی بر جمعیت است. ۲- الگوریتم تکاملی از ترکیب استفاده می‌کند تا اطلاعات گونه‌های بیشتری را در یک گونه خلاصه کند. ۳- الگوریتم تکاملی اتفاقی است [۴].

شکل زیر نحوه سازوکار کلی الگوریتم‌های تکاملی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ مکانیسم کلی الگوریتم‌های تکاملی

الگوریتم‌های تکاملی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی برتری‌هایی دارند که موجب شده است به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گیرند. این الگوریتم‌ها، نیاز به معرفی کامل مسئله ندارند و تنها با داشتن اطلاعات محدودی در مورد تعریف مسئله می توانند کار کنند. همچنین محدودیتی درمورد تابع برازش یا هزینه ندارند و لزومی ندارد که این تابع مثلاً مشتق‌پذیر باشد. علاوه‌براین موارد، چون الگوریتم‌های تکاملی دارای جمعیتی از متغیرها هستند و روی بخش‌های مختلفی از جمعیت به طور موازی کار می‌کنند، احتمال کمتری برای قرارگرفتن در بهینه‌های محلی[۲۲] دارند [۴].

۱-۷- الگوریتم ژنتیک

۱-۷-۱- مکانیسم الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی، با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی، به نحو موثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می‌کند. در مکانیسم جستجو، گرچه مقدار تابع هدف در تمام فضای جواب محاسبه نمی‌شود، ولی مقدار محاسبه شده تابع هدف برای هر نقطه، در متوسط‌گیری آماری تابع هدف در کلیه زیرفضاهایی که آن نقطه به آنها وابسته بوده است دخالت داده می‌شود و این زیرفضاها بطور موازی از نظر تابع هدف، متوسط‌گیری آماری می‌شوند؛ این مکانیسم را توازی ضمنی گویند. این روند باعث می‌شود که

[22] Local optima

جستجوی فضا به نواحی که متوسط آماری تابع هدف در آن‌ها زیاد بوده و امکان وجود نقطه بهینه مطلق در آنها بیشتر است سوق پیدا کند. چون در این روش بر خلاف روش‌های تک‌مسیری، فضای جواب بطور همه‌جانبه جستجو می‌شود، امکان کمتری برای همگرایی به یک نقطه بهینه محلی وجود خواهد داشت. همچنین این الگوریتم، هیچ محدودیتی مانند پیوستگی یا مشتق‌پذیری تابع هدف را لازم ندارد و لذا می‌تواند در مسائل مختلف اعم از خطی، پیوسته یا گسسته استفاده شود [۳].

در الگوریتم ژنتیک، جمعیتی از پاسخ‌های قابل قبول بصورت تصادفی و یا توسط کاربر به عنوان جمعیت اولیه تولید می‌شود. نسل‌های بعدی با استفاده از عملگرهای ترکیب و جهش بوجود می‌آیند و در انتها توسط تابع هدف، هزینه یا برازندگی آنها کنترل می‌شود. این چرخه آنقدر تکرار می‌شود تا یکی از معیارهای پایان بهینه‌سازی ارضاء شود. در واقع جمعیت‌های مختلف در طی رقابتی برای بقاء خود تلاش می‌کنند و جمعیتی به عنوان جمعیت بهینه انتخاب می‌شود که احتمال بقاء آن بیش‌تر از سایر جمعیت‌هاست. با پیشروی در نسل‌های جدید تابع هدف بهینه‌تر شده و به پاسخ بهینه نزدیکتر می‌شود [۷]. در ادامه مراحل کلی الگوریتم ژنتیک بیان شده است:

۱- ایجاد جمعیت اولیه

جمعیت اولیه را می‌توان به روش‌های متفاوتی ایجاد نمود. یک روش متداول ایجاد جمعیت بطور تصادفی است. در این روش، افراد جمعیت بطور تصادفی از بازه‌ای معین یا از مجموعه‌ای خاص انتخاب می‌شوند. روش دیگر، استفاده از یک تابع اکتشافی است. البته در این روش، تعیین جمعیت با توجه به راه حل بهینه سراسری انجام نمی‌پذیرد، زیرا این کار باعث کاهش گوناگونی جمعیت می‌شود.

۲- مقایسه جواب‌ها و رتبه‌بندی

در هر تکرار الگوریتم، هر یک از رشته‌های موجود در جمعیت رشته‌ها رمزگشایی شده و مقدار تابع هدف برای آن بدست می‌آید. بر اساس مقادیر بدست آمده تابع هدف در جمعیت رشته‌ها (کروموزوم‌ها)، به هر رشته، یک عدد برازندگی یا هزینه نسبت داده می‌شود که نشان‌دهنده کیفیت و مطلوبیت رشته مورد نظر از جمعیت می‌باشد؛ این عدد، احتمال انتخاب برای تولید مثل را برای هر رشته تعیین خواهد کرد، بطوریکه هر چه مقدار تابع هزینه (برازندگی) برای کروموزومی خاص، کمتر (یا بیشتر) باشد، احتمال انتخاب آن کروموزوم برای شرکت در عملیات تولیدمثل و در نتیجه،

تاثیر در جواب بهینه بیشتر خواهد بود. این گام در الگوریتم ژنتیک، بوسیله عملگر ارزیابی و انتخاب صورت می‌پذیرد [۴].

۳- انتخاب والدین و تولیدمثل

مکانیسم‌های تصادفی که روی انتخاب و حذف رشته‌ها عمل می‌کنند، بگونه‌ای هستند که رشته‌هایی که عدد برازندگی بیشتر یا عدد هزینه کمتری دارند، احتمال بیشتری برای ترکیب و تولید رشته‌های جدید داشته و در مرحله جایگزینی نسبت به دیگر رشته‌ها مقاوم‌تر هستند. بدین لحاظ، جمعیت دنباله‌ها در یک رقابت، بر اساس تابع هدف در طی نسل‌های مختلف، کامل شده و متوسط مقدار تابع هدف در جمعیت رشته‌ها افزایش یا کاهش می‌یابد. تعداد والدین در مسائل مختلف بسته به انتخاب کاربر می‌باشد [۳].

٤- انتخاب اعضای جهش‌یافتگان و اعمال جهش

جهش باعث ایجاد تغییرات ناخواسته در جمعیت شده، و باعث بوجود آمدن موجودات جدید می‌شود. در واقع برتری جهش نسبت به بازترکیبی نیز همین مطلب می‌باشد. در صورتی که فقط از جهش استفاده کنیم، ممکن است که بتوانیم جواب بهینه را پیدا کنیم، اما استفاده از بازترکیبی به تنهایی پیدا شدن جواب بهینه را تضمین نمی‌کند. عملگر جهش برای بوجود آوردن فرزند فقط از یک والد استفاده می‌کند. این‌کار با انجام تغییرات کوچکی در رشته اولیه به‌وقوع می‌پیوندد. معمولا جهش بعد از انجام ترکیب اعمال می‌شود. این عملیات، ویژگی تصادفی بودن را افزایش داده و امکان فرار از نقاط بهینه محلی را فراهم می‌آورد.

٥- ادغام جمعیت اصلی، فرزندان و جهش‌یافتگان و ایجاد جمعیت نسل جدید

تعداد جمعیت در هر نسل، برابر با تعداد جمعیت اولیه می‌باشد. برای ایجاد جمعیت نسل جدید، چندین روش پیشنهاد شده است که در این جا به اختصار تعدادی از آنها بیان می‌شود [۶]:

- مخلوط کردن، مرتب کردن، و انتخاب بر اساس شایستگی به تعداد جمعیت اولیه
- ضرایب از پیش تعیین شده
- مخلوط کردن و انتخاب تصادفی به تعداد جمعیت اولیه

در این پایان‌نامه از روش اول برای ایجاد جمعیت نسل جدید استفاده شده است.

٦- اگر شرایط خاتمه محقق نشده باشد از مرحله ۲ تکرار می‌کنیم.

شرایط خاتمه در الگوریتم ژنتیک می‌تواند یکی از چهار مورد زیر باشد:

- رسیدن به حد قابل قبولی از پاسخ
- سپری شدن زمان/ تکرار معین
- سپری شدن زمان/تعداد تکرار معین بدون مشاهده بهبود خاصی در نتیجه
- رسیدن به تعداد مشخصی از NFE

$$NFE = n_{POP} + (n_c + n_m) \times n_{iteration} \quad (۱۰-۱)$$

NFE تعداد دفعات فراخوانی تابع هدف، n_{POP_1} تعداد جمعیت اولیه، n_c تعداد فرزندان، n_m تعداد جهش یافتگان و $n_{iteration}$ تعداد تکرار می‌باشد [۶].

۷- پایان

۱-۷-۲- عملگرهای الگوریتم ژنتیک [۳]

- **رمزگذاری**[۲۳]

این مرحله شاید مشکل‌ترین مرحله حل مساله به روش الگوریتم ژنتیک باشد. الگوریتم بطور مستقیم با پارامترها یا متغیرهای مساله کار نمی‌کند بلکه با شکل کد شده آنها سروکار دارد.

- **انتخاب**[۲۴]

این عملگر به انتخاب اعضای جمعیت می‌پردازد و مشخص می‌کند که کدامیک از افراد برای ترکیب تعیین می‌گردند و هر کدام از آنها چند فرزند تولید می‌کند. اولین گام در این راه، تخصیص شایستگی به افراد حاضر در جمعیت می‌باشد که به دو روش انجام می‌پذیرد [۷].

  - تخصیص شایستگی یا رتبه‌بندی
  - رتبه‌بندی چند هدفه

[23] Encoding
[24] Selecting

در روش تخصیص شایستگی، جمعیت بر اساس مقادیر تابع هدف مرتب می‌شوند. روش‌های زیر در انتخاب والدین با توجه به این نوع ارزیابی ارائه شده‌اند [۷].

- انتخاب تصادفی
- انتخاب تمام جمعیت به عنوان والد
- انتخاب نخبه‌گرایانه[۲۵]
- انتخاب رولت‌ویل[۲۶]
- انتخاب بر اساس رتبه‌بندی[۲۷]
- انتخاب تورنومنت[۲۸]

- **ارزیابی[۲۹]**

این تابع هر رشته را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌کند که کیفیت آنرا مشخص می‌نماید. هر چه کیفیت رشته جواب بالاتر باشد مقدار برازندگی جواب بیشتر، یا هزینه جواب کمتر است و احتمال مشارکت برای تولید نسل بعدی نیز افزایش می‌یابد.

- **ترکیب[۳۰]**

مهمترین عملگر در الگوریتم ژنتیک، عملگر ترکیب است. ترکیب، فرآیندی است که در آن نسل قدیمی کروموزوم‌ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می‌شوند تا نسل تازه‌ای از کروموزوم‌ها بوجود آید. جفت‌هایی که در قسمت انتخاب به عنوان والد در نظر گرفته شدند ژن‌هایشان را با هم مبادله می‌کنند و اعضایی جدید بوجود می‌آورند. ترکیب در الگوریتم ژنتیک باعث از بین رفتن پراکندگی یا تنوع ژنتیکی جمعیت می‌شود، زیرا اجازه می‌دهد ژن‌های خوب همدیگر را بیابند. روش‌های ترکیبی با توجه به نوع ساختار عبارتند از [۷]:

- ترکیب ساختارها با مقادیر حقیقی
- ترکیب ساختارهای دودویی
- ترکیب گسسته

[25] Elitism selection
[26] Rollet wheel selection
[27] Rank selection
[28] Tournament selection
[29] Evaluation
[30] Crossover