

فصل سوم

مدل ریاضی مسئله

۳-۱- مقدمه

در این فصل مدل ریاضی مسئله جایابی بهینه کلیدهای اتوماتیک به منظور بهبود تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث طبیعی شامل طوفان و سیلاب توسعه داده شده است. تاب‌آوری را می‌توان به صورت توانایی سیستم برای حفظ یک سطح قابل قبول از عملکرد در برابر یک اغتشاش شدید و بازگشت در یک دوره‌ی زمانی مناسب تعریف کرد. این مفهوم کاملاً مجزا از مفهوم قابلیت اطمینان است. قابلیت اطمینان یک سنجه‌ی احتمالی برای توانایی سیستم در انجام عملکرد مورد انتظار تحت شرایط و دوره‌های زمانی مشخص است. در این فصل مدل‌سازی، روش تحقیق و روش پیشنهادی ارائه می‌گردد.

۳-۲- اصول پایه

بلاایای طبیعی معمولاً رویدادهای بسیار نامطمئن هستند. بنابراین تخمین، مدل‌سازی و پیش‌بینی آنها دشوار است. بسیاری از تلاش‌ها برای افزایش آگاهی ما از بلاایای طبیعی بر اساس داده‌های تاریخی و آموزش‌هایی که یاد گرفته ایم پایه‌گذاری شده است. پیش‌بینی یک فاجعه‌ی طبیعی اغلب بر اساس مدل‌های آماری یا مدل‌های شبیه‌سازی شده بررسی می‌شود.

برای ارزیابی خسارت ناشی از رویدادهای آب و هوایی بر روی شبکه توزیع، باید تاثیر این رویدادها بر روی تجهیزات شبکه توزیع تخمین زده شود. برای نشان دادن احتمال شکست تجهیزات شبکه توزیع در مقابل رویداد‌های آب و هوایی، می‌توان از سیستم‌های هوشمند استفاده کرد.

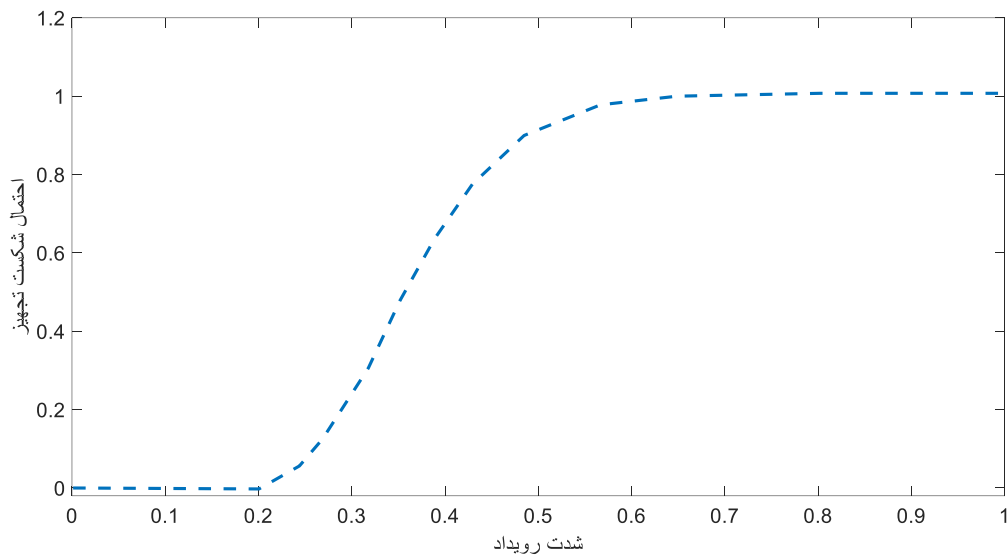
با داشتن مشخصات آب و هوایی منطقه مورد مطالعه (برای مثال سرعت باد و شدت سیلاب) و همچنین وابستگی احتمال شکست تجهیزات شبکه با شدت رویداد آب و هوایی که می‌توان از روی سوابق آماری استخراج کرد، منحنی‌های شکنندگی برای اجزای شبکه به دست می‌آیند. این منحنی‌ها به ما کمک می‌کنند که اجزایی از شبکه که در معرض خطرات بالایی ناشی از رویداد‌های آب و هوایی هستند، شناسایی شده و در ارزیابی تاب‌آوری

مورد توجه قرار گیرند. با پیروی از این رویکرد، می توان تاثیر رویداد آب و هوایی در وضعیت عملیاتی هر یک اجزای شبکه را مدل سازی کرد.

بلاپای طبیعی معمولاً رویدادهای بسیار نامطمئن هستند. بنابراین تخمین، مدلسازی و پیشبینی آنها دشوار است. بسیاری از تلاشها برای افزایش آگاهی ما از بلاپای طبیعی بر اساس داده های تاریخی و آموزشهایی که یاد گرفته ایم پایه گذاری شده است. پیش بینی یک فاجعه طبیعی اغلب بر اساس مدل های آماری یا مدل های شبیه سازی شده بررسی میشود. جهت ارزیابی خسارت ناشی از رویدادهای آب و هوایی بر روی شبکه توزیع، باید تأثیر این رویدادها بر روی تجهیزات شبکه توزیع تخمین زده شود. برای نشان دادن احتمال شکست تجهیزات شبکه توزیع در مقابل رویدادهای آب و هوایی، میتوان از مدل های مختلف مانند مدل توزیع دوتایی منفی خطی شده [28] مدل در دسترس بودن تجهیز در سطوح مختلف رویداد [29] و مدل توزیع لگاریتمی نرمال استفاده کرد. در این تحقیق از منحنی توزیع لگاریتمی نرمال که یکی از مرسومترین روشهای مدلسازی میباشد، احتمال شکست تجهیزات شبکه توزیع در مقابل رویدادهای آب و هوایی (طوفان و سیلاب) محاسبه میگردد. از روی این منحنی که به منحنی شکنندگی معروف است، احتمال شکست تجهیز در قبال یک سطح مشخصی از رویداد (سرعت باد یا سیلاب) بدست می آید. رابطه (۱-۳) نشان دهنده شکل کلی منحنی شکنندگی میباشد.

$$P\left(\frac{damage}{x}\right) = \int_x^{-\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \exp\left(\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (1-3)$$

در رابطه ی (۱-۳)، $P\left(\frac{damage}{x}\right)$ احتمال شکست تجهیز در قبال سطح مشخص رویداد x و پارامترهای μ و σ نشان دهنده میانگین لگاریتمی و انحراف استاندارد منحنی شکنندگی می باشند که از روی اطلاعات آماری در طول یک دوره مشخص محاسبه می گردند. یک نمونه منحنی شکنندگی عمومی به صورت احتمال شکست تجهیز شبکه بسته به شدت رویداد آب و هوایی، در شکل ۱-۳ آورده شده است.



شکل ۳-۱ منحنی شکنندگی تجهیز

منحنیهای شکنندگی در مطالعاتی مورد استفاده قرار میگیرند که هدف ارزیابی تأثیر یک رویداد آب و هوایی یا یک خطر طبیعی بر روی تاب آوری شبکه های انتقال یا توزیع میباشد. با داشتن مشخصات آب و هوایی منطقه مورد مطالعه (به عنوان مثال سرعت باد و شدت سیلاب) و همچنین وابستگی احتمال شکست تجهیزات شبکه با شدت رویداد آب و هوایی که میتوان از روی سوابق آماری استخراج کرد، منحنیهای شکنندگی برای اجزای شبکه بدست میآیند. این منحنیها به ما کمک میکنند که اجزایی از شبکه که در معرض خطرات بالایی ناشی از رویدادهای آب و هوایی میباشدند، شناسایی گردیده و در ارزیابی تاب آوری مورد توجه قرار گیرند. با پیروی از این رویکرد، میتوان تأثیر رویداد آب و هوایی در وضعیت عملیاتی هر یک از اجزای شبکه را مدلسازی کرد.

در این تحقیق حوادث طبیعی متداول بر روی شبکه های توزیع، یعنی طوفان و سیلاب مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور خلاصه مراحل مدلسازی تأثیرات طوفان و سیلاب بر روی تجهیزات شبکه توزیع را میتوان به صورت زیر بیان کرد:

- استفاده از اطلاعات آماری جهت پیشبینی مسیر طوفان و سیلاب، زیرا این رویدادها اغلب دنبال مسیری هستند که از آن تشکیل شده اند.
- تقسیم بندی شبکه ی توزیع به چند منطقه آب و هوایی بر اساس مسیر طوفان و سیلاب و با توجه به مشخص بون سرعت باد و سیلاب در هر ناحیه
- استفاده از منحنی های شکنندگی برای محاسبه احتمال شکست تجهیزات در نواحی مختلف آب و هوایی
فوق

۳-۳- مولفه های پایه مدل

در این بخش مولفه های مختلف موجود جهت مدلسازی کامل مسئله ارائه شده و در نهایت مدل دقیق ریاضی مسئله توسعه داده خواهد شد. مولفه های این مدل شامل مدل تاب آوری، احتمالاتی سیلاب و طوفان و مسئله جایابی کلید است.

۳-۳-۱- مدل تاب آوری

هدف ارزیابی تاب آوری این است که تصمیمات و اقدامات آگاهانه برای کاهش خطر اتخاذ شود. در این مطالعه این خطر توسط رویدادهای شدید آب و هوایی از جمله طوفان و سیلاب معرفی شده است که به شبکه ی توزیع مورد مطالعه اعمال خواهند شد. در این بخش دو شاخص تاب آوری برای سیستم معرفی شده که در نهایت به عنوان توابع هدفی مجزا در یک چارچوب چند هدفه مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

شاخص DRI به عنوان یکی از شاخص ها، برای ارزیابی تاب آوری در شبکه های توزیع ارائه شده است. مقدار این شاخص که از دو قسمت تشکیل شده ، با رابطه ی (۲-۳) قابل محاسبه می باشد. ضرورت استفاده از این معیار در نظرگرفتن شاخص های تاب آوری شبکه در قبال تامین بار و شاخص تاب آوری منابع تولید پراکنده در کنار یکدیگر برای به دست آوردن تاب آوری کل شبکه است .

$$DRI = DRI_{load} - GRI_{DG} \quad (2-3)$$

در رابطه فوق:

DRI_{load} : نشان دهنده ی تاب آوری شبکه در قبال تامین بار

GRI_{DG} : مقدار تولید در دسترس منابع تولید پراکنده

شاخص DRI_{load} بیان کننده ی مقدار انرژی از دست رفته در شبکه ی توزیع در هنگام وقوع حوادث غیر مترقبه می باشد. در واقع هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، تاب آوری شبکه در قبال تامین بار بیشتر خواهد بود. با توجه به حضور منابع تولید پراکنده در شبکه ی توزیع و با توجه به اینکه این منابع به عنوان جایگزین منبع تغذیه ی اصلی در هنگام وقوع حوادث از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و بر روی تاب آوری شبکه تاثیر گذار خواهد بود. در بسیاری از موارد، در هنگام وقوع حادثه ی غیر مترقبه ممکن است بخشی از شبکه سالم مانده باشد و بتوان بارهایی را تغذیه کرد اما به دلیل عدم در دسترس بودن تولید منابع تولید پراکنده امکان تغذیه بار فراهم نمی شود. شاخص GRI_{DG} که نشان دهنده ی مقدار تولید در دسترس منابع تولید پراکنده است (که در مدت زمان جزیره شدن ضرب می گردد تا انرژی بدست آید)، به عنوان شاخص تاب آوری منابع تولید پراکنده در هنگام وقوع حوادث غیر مترقبه مورد استفاده قرار میگیرد. در واقع هرچه مقدار این شاخص بزرگ تر باشد، تاب آوری شبکه بیشتر است. بنابراین به منظور بررسی تاثیر منابع تولید پراکنده بر روی تاب آوری شبکه توزیع، باید تاب آوری شبکه در قبال تامین بار و تاب آوری منابع تولید پراکنده به صورت مستقل از هم محاسبه و در نهایت شاخص تاب آوری کل شبکه در حضور این منابع به دست می آید. با توجه به اینکه شاخص DRI_{load} متناسب با مقدار از دست رفته و شاخص GRI_{DG} متناسب با مقدار تولید در دسترس در هنگام وقوع حوادث می باشند و هر چه مقدار شاخص تاب آوری تولید بیشتر و شاخص ریسک شبکه در قبال تامین بار کمتر باشد، تاب آوری کل شبکه بهبود می یابد، این دو شاخص در جهت عکس یکدیگر عمل کرده و برای محاسبه ی تاب آوری شبکه باید این دو شاخص را از یک دیگر تفریق نمود. در رابطه ی (2-3) هرچه مقدار شاخص DRI کمتر باشد، تاب آوری شبکه بیشتر

خواهد بود. در ادامه به نحوه ی محاسبه ی این شاخص ها پرداخته شده است. برای محاسبه ی شاخص DRI_{load} از رابطه ی (۳-۳)، استفاده می شود.

$$DRI_{load} = \sum_{sec=1}^k P_{sec} \times LS_{sec} \times S_{sec} \quad (3-3)$$

در این رابطه:

P_{sec} : احتمال شکست سکشن (نقاطی از شبکه توزیع هستند که هادی در آن محل برش خورده باشد) در اثر وقوع طوفان یا سیلاب

LS_{sec} : مقدار انرژی از دست داده شده در صورت شکست سکشن

با بروز هر اتفاق و از دست رفتن سکشنهای مشخصی از شبکه با توجه به کلیدهای در دسترس آرایشهای ممکن در شبکه بررسی می شوند و مقدار قطع بار هر یک در نظر گرفتن ضریب اهمیت بار در هر آرایش ممکن (آرایی که شعاعی باشد) به سادگی قابل محاسبه است. به عنوان مثال شینهایی که اتصال به هیچ منبعی ندارند بارشان از دست میرود. سپس روند بهینه سازی بهترین آرایش را که کمترین هزینه (مقدار قطع بار ضرب در ضریب حساسیت بار) داشته باشد انتخاب می کند همچنین شینهایی که قابلیت تامین توان دارند با توجه به مدت زمان کلید زنی اندکی بار از دست رفته خواهند داشت. همچنین توجه شود که بارهایی که از دست می روند بعد از رفع خرابی های ناشی از حادثه امکان تامین دارند مدت زمانی که شبکه به حالت عادی بازگردد در مقدار بار هر شینی که بارش از دست رفته است ضرب می شود تا انرژی از دست رفته بدست آید.

S_{sec} : ضریب اهمیت که براساس ارزش یا اولویت بار به سکشن مربوطه داده می شود

مفهوم ضریب اهمیت درجه اهمیت بار است. مثلاً بار صنعتی نسبت به خانگی از اهمیت بیشتری برخوردار است لذا در صورتی که بتوان بار خانگی را قطع کرد و بار صنعتی را حفظ نمود به دلیل اهمیت بیشتر بار صنعتی این

کار انجام خواهد شد. این ضریب اهمیت چیزی نیست که ما حساب کنیم در واقع متغیر مسئله نیست. بلکه پارامتر است که مراجع مختلف عددهایی را برای آن ارائه می‌دهند و ما هم در بخش شبیه سازی از آن استفاده خواهیم کرد.

k : تعداد کل سکشن های شبکه توزیع مورد مطالعه می باشد .

با توجه به در نظر گیری میانگین عمر زیرساختها وقوع یک یا چند رویداد مخرب در طول عمر آنها به دفعات محتمل خواهد بود. در نتیجه تصمیم گیران میبایست تکرار وقوع خطرات را در به کارگیری استراتژیهای افزایش تاب آوری در نظر گیرند. رابطه ی (۳-۴) که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است اثر این پارامتر را در نظر گرفته و برای حالات یک مخاطره ای یا چند مخاطره ای قابل کاربرد است.

$$AR = E \left[\frac{\int_0^T P(t)dt}{\int_0^T TP(t)dt} \right] = E \left[\frac{\int_0^T TP(t)dt - \sum_{n=1}^{N(T)} AIA_n(t_n)}{\int_0^T TP(t)dt} \right] \quad (۴-۳)$$

که در این رابطه :

$E[*]$: بیانگر تابع امید ریاضی، T بازه زمانی معادل یک سال یا ۳۶۵ روز،

$P(t)$: منحنی عملکرد واقعی که یک فرآیند تصادفی در نظر گرفته می شود،

$TP(t)$: منحنی عملکرد هدف که یک فرآیند تصادفی یا یک خط صاف در نظر گرفته میشود،

n : عدد متناظر با وقوع رویداد (شامل رخداد همزمان دو رویداد متفاوت)،

$N(T)$: کلیه ی رویدادهایی که در بازه ی زمانی T رخ داده اند،

t_n : زمان وقوع رویداد n ام که متغیری تصادفی در نظر گرفته می شود

$AIA_n(t_n)$: سطح بین نمودار عملکرد واقعی و نمودار عملکرد هدف برای n آمین رویداد رخ داده در زمان t_n که مساحت تأثیر نامیده می شود، میباشد.

با فرض اینکه سیستم پس از گذر از فرایند احیا به شرایط اولیه ی خود برسد یعنی منحنی عملکرد هدف یک خط صاف در نظر گرفته شود.

در این حالت شاخص تاب آوری بصورت زیر ساده خواهد شد. بنابراین تابع هدف اصلی این تحقیق ماکزیمم کردن این شاخص می باشد.

$$AR = \frac{TP - E \left[\frac{1}{T} \sum_{n=1}^{N(T)} AIA_n(t_n) \right]}{TP} \quad (5-3)$$

از آنجایی که AIA_n در این رابطه متغیری تصادفی با عدم قطعیت بالا میباشد. این عدم قطعیت به نوع مخاطره ی وارد به سیستم، سطح آسیب اولیه، تکرار رخداد مخاطره، زمان و هزینه ی بازسازی بستگی دارد.

۳-۳-۲- مدل احتمالاتی طوفان و سیلاب

در این بخش مدل احتمالاتی حوادث مربوطه شامل طوفان و سیلاب ارائه شده است. احتمال شکست یک سکشن در اثر وقوع این حوادث، از رابطه (۳-۶)، به دست می آید.

$$P(W, F)_{sec} = P(W)_{sec} + P(F)_{sec} - P(W)_{sec}P(F)_{sec} \quad (6-3)$$

که در آن:

$P(F)_{sec}$: احتمال شکست سکشن بر اثر وقوع سیلاب

$P(W)_{sec}$: احتمال شکست ناشی از وقوع طوفان

تأثیر عمده ی خطر سیلاب مربوط به پایه های شبکه ی توزیع است. در واقع برخورد سیلاب به پایه های شبکه توزیع می تواند منجر به شکست پایه ها و در نتیجه شکست سکشن مربوطه شود. برای پایه هایی از شبکه توزیع که

در مجاورت نواحی ساحلی یا در مسیر رودخانه ها قرار دارند، یکی از مهم ترین عوامل شکست سکشن خطر وقوع سیلاب است .

بنابراین برای پایه های قرار گرفته در این نواحی برای ارزیابی تاب آوری باید از مدل مناسبی برای وقوع سیلاب استفاده کرد . برای این کار ابتدا با استفاده از اطلاعات آماری از سوابق گذشته منحنی شکنندگی مربوط به سیلاب، که بیانگر احتمال شکست پایه بر حسب سرعت سیلاب است ، برای منطقه مورد مطالعه استخراج گردیده و سپس برای پایه هایی که در معرض خطر سیلاب قرار دارند، از روی منحنی شکنندگی مربوطه احتمال شکست پایه در اثر وقوع سیلاب به دست می آید. و در نهایت با استفاده از رابطه (۳-۶) می توان احتمال شکست سکشن بر اثر وقوع سیلاب را به صورت تابعی از سرعت سیلاب محاسبه کرد .

$$P(F)_{sec} = 1 - (1 - P(F)_{Tsingle})^{NTF} \quad (۳-۷)$$

که در آن:

$P(F)_{Tsingle}$: احتمال شکست هر پایه در اثر وقوع سیلاب به صورت تابعی از سرعت سیلاب

NTF : تعداد پایه هایی از سکشن مورد نظر است که در معرض خطر سیلاب قرار دارند..

حدود ۹۰ درصد خروج تجهیزات در شبکه ی مربوط به حوادث ناشی از بادهای شدید و طوفان می باشد. تاثیرات ناشی از بادهای شدید و طوفان بر روی دو قسمت عمده یعنی هادی ها و پایه های شبکه توزیع تمرکز دارد و شکست هر سکشن در اثر وقوع حوادث مربوط به باد و طوفان به دو عامل شکست پایه و شکست هادی در اثر وقوع این حوادث بستگی دارد.

از آنجایی که در هر سکشن از شبکه توزیع چندین پایه می تواند حضور داشته باشد که به صورت سری به هم وصل میباشند، بنابراین شکست هر پایه به تنهایی منجر به شکست سکشن مربوطه خواهد شد. با توجه به مستقل

بودن شکست پایه ها از یکدیگر و با فرض یکسان بودن احتمال شکست پایه ها در یک سکشن، از رابطه (۸-۳) میتوان برای محاسبه احتمال شکست سکشن ناشی از شکست پایه استفاده کرد.

$$P(W)_{secT} = 1 - (1 - P(W)_{Tsingle})^{NT} \quad (۸-۳)$$

که در آن :

$P(W)_{secT}$: احتمال شکست سکشن در اثر وقوع طوفان ، ناشی از شکست پایه به صورت تابعی از سرعت باد می باشد.

۳-۳-۳- جایابی کلید

استفاده از کلید کنترل از راه دور در شبکه یک از روشها برای دادن انعطاف بیشتر به شبکههای توزیع مطرح است. بر اساس ساختار سنتی با توجه به موقعیت جغرافیایی فیدها، بهطور تجربی و یا با استفاده از روشهای سنتی تعدادی کلید کنترل از راه دور در شبکههای توزیع قرار داده می شود. در بسیاری از مواقع تعداد کلید کنترل از راه دور به کاررفته در شبکه و نیز محل آنها بهینه نبوده و لذا طرح کار آبی لازم را ندارد. در این بخش مساله جایابی و تعیین وضعیت (باز/بست) کلیدها و نقاط مانور در شبکههای توزیع شعاعی بهطور ریاضی تعریف می شود. هدف اصلی از این مساله بهبود تاب آوری شبکه است.

طراحی شبکههای توزیع یکی از قدیمیترین مسائل پیش روی صنعت برق بوده است و در حال حاضر نیز یکی از چالشهای کشورهای دنیا در حوزه توزیع برق محسوب می شود. بهره برداری شعاعی از شبکههای توزیع موجب بالا رفتن تلفات شبکه و کاهش ولتاژ در نقاط انتهایی شبکه می شود. از طرفی به دلیل مسائل حفاظتی بهره برداری شعاعی شرایط بهتری نسبت به بهره برداری حلقوی دارد. در این میان برای انعطاف دادن به شبکههای توزیع از نقاط مانور استفاده می شود.

انتخاب نقاط مانور در شبکه‌های توزیع باید باهدف مشخصی صورت گیرد. معمولاً مهم‌ترین اهداف در تعیین نقاط مانور شامل موارد زیر است :

- امکان تغییر آرایش شبکه
 - امکان بازیابی بهتر شبکه پس از خاموشی
 - امکان قرار دادن بخشی از مصرف‌کنندگان یک فیدر روی فیدر دیگر در زمان تعمیرات
- مجموعه این موارد به بهره‌برداران شبکه‌های توزیع این امکان را می‌دهد که بتوانند در شرایط مختلف بهره‌برداری از شبکه را در بهترین شرایط نگاه‌دارند. در این تحقیق جایابی و تعیین وضعیت کلید کنترل از راه دور در شبکه توزیع باهدف بهبود تاب آوری شبکه انجام می‌شود. برای این منظور از این نوع کلید قابل قطع زیر بار استفاده می‌شود که بتوان در صورت لزوم بخشی از شبکه را خاموش یا برق‌دار کرد.

۱-۳-۳- تعاریف

• عملیات مانور

عملیات مانور عبارت است از باز و بسته نمودن تعدادی از کلیدهای خاص شبکه توزیع به منظور انجام هدفی معین مانند: باز سازی شبکه، رفع عیب، تعدیل بار، کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ و .. می باشد که منجر به تغییر در آرایش سیستم و با تغییر در مسیر تغذیه می گردد.

• نقاط مانور

نقاط مانور به نقاطی گفته می شود که عملیات مانور توسط آن ها صورت می پذیرد و عموماً شامل بریکر، سکسیونر، فیوزهای کات اوت و چمپرهای می باشد.

• وضعیت نقاط مانور

هر کدام از نقاط مانور می توانند دارای دو وضعیت باز یا بسته باشند که به آن ، وضعیت یا حالت نقطه مانور گفته می شود. در حالت کلی وضعیت نقاط مانور را می توان از لحاظ کار کرد در شبکه توزیع به دو دسته کلی تقسیم نمود:

- ۱- نقاط مانور با کلید های متصل کننده: کلید هایی هستند که در حالت عادی باز می باشند، و در حقیقت نقطه جدا کننده دو شبکه به حساب می آیند و با بستن آن ها در شبکه حلقه ایجاد می شود.
- ۲- نقاط مانور با کلیدهای مجزا کننده: کلیدهایی هستند که در حالت عادی بسته بوده و در صورت باز شدن همه یا بخشی از شبکه بی برق می شود.

• آرایش شبکه توزیع

به نحوه اتصال گره ها و شاخه های شبکه که بواسطه باز و بسته بودن کلیدها ایجاد میشود آرایش شبکه گفته می شود.

• تغییر آرایش در شبکه توزیع

بازآرایی یا تغییر آرایش شبکه عبارت است از باز و بسته کردن سوئیچ ها (کلیدهای قدرت، سکسیونر های قابل قطع و غیر قابل قطع زیر بار) به منظور تغییر توپولوژی می باشد. به عبارت دیگر بازآرایی شامل تغییر حالت نقاط مانور شبکه که در پی آن آرایش جدیدی از شبکه بدست می آید، می باشد.

• بازیابی بار

شاید از نظر بهره برداری شبکه توزیع، بازیابی بار مهم ترین و کارآمد ترین نتیجه جایابی کلید در شبکه باشد. با وقوع خطا در بخشی از شبکه توزیع ممکن است تعداد زیادی از مصرف کنندگان آن فیدر دچار خاموشی شوند که گاهی مدت زمان خاموشی تا زمان رفع خطا بسیار طولانی شده و خسارات زیادی را به شرکت های توزیع و مصرف کنندگان تحمیل می نمایند. در حالیکه با تغییر آرایش شبکه می توان بسیاری از بخش هایی را که دچار خطا نیستند با توجه به توپولوژی شبکه بازیابی نمود.

۲-۳-۳-۳- مفهوم جایابی کلید برای باز آرای

بهره برداری از شبکه های توزیع در شرایط عادی به علت سادگی هماهنگی حفاظتی، محدود نمودن سطح اتصال کوتاه و مشکلات بهره برداری شبکه های به هم پیوسته، به صورت شعاعی بوده و برق رسانی از طریق کلید های حالت عادی بسته انجام می گیرد. اما به منظور افزایش تاب آوری و تداوم برق رسانی پس از وقوع خاموشی تعداد کلید در حالت عادی باز نیز در شبکه موجود است که در صورت لزوم می توان آن ها را به کار گرفت که این کلیدهای جدا کننده موجود در شبکه، نقش بازی در مدیریت ساختار شبکه برای دستیابی به شکل بهینه آن ایفا می نمایند. در یک سیستم توزیع سعی می شود تا شبکه به گونه ای طراحی شود تا در حین رساندن توان به کلیه مشترکین دارای کم ترین حذف بار در شرایط حاد باشد. اما در عمل به دلیل توسعه تدریجی شبکه های توزیع ممکن است آرایش در آینده یک آرایش بهینه در سیستم نباشد. لذا در هر مقطع زمانی جهت بهره وری انرژی بیشتر از شبکه باید ساختار شبکه را توسط روش مناسب بازآرایی شناسایی نمود. این تغییر ساختار در شبکه مستلزم وجود یکسری خطوط مانور و سوئیچ های قابل مانور است. به عبارت دیگر در هر شبکه ممکن است تعدادی خطوط ارتباطی جهت تغییر آرایش شبکه و انتقال بارهای از دست رفته شبکه از یک پست به پستی دیگر وجود داشته باشد که در مرحله طراحی شبکه چنین تمهیداتی لحاظ می گردد.

قابل ذکر است این خطوط ارتباط معمولاً توسط سکسیونرها^۱ (خشک، روغنی و گازی) که اغلب آن‌ها قابل قطع زیر بار می‌باشند و در شبکه‌های فشار متوسط می‌توانند هم‌زمان کار دژنکتور و سکسیونر را انجام دهند وصل می‌شوند که به چنین نقاطی، نقاط مانور عرضی گفته می‌شود.

همچنین در یک سیستم توزیع جهت حفاظت بیشتر فیدرها از یکسری سوئیچ‌های حفاظتی شامل سکشنالایزرها^۲ و ریکلوزرها^۳ نیز استفاده می‌شود که به این نقاط، نقاط مانور طولی یا بین فیدری نیز گفته می‌شود. در عمل بسیاری از این سوئیچ‌ها در حالت عادی بسته در پاسخ به خطا منطقه دارای خطا را از شبکه ایزوله می‌کنند اما در مواقع لزوم می‌توان از آن‌ها به عنوان نقاط مانور استفاده کرد. لذا با داشتن چنین خطوطی و سوئیچهایی در شبکه می‌توان با توجه به الگوی جدید بار شبکه، ساختار شبکه را به گونه‌ای تغییر داد که تاب‌آوری بهینه باشد که به این عمل بازآرایی گفته می‌شود.

۳-۳-۳-۳- محدودیت‌های بازآرایی

با تغییر نقاط مانور در شبکه توزیع آرایش جدیدی به وجود می‌آید. ولی نمی‌توان گفت هر آرایش جدید به دست آمده حتماً مورد قبول است از این آرایش شبکه‌ای که در هر تغییر بدست می‌آید باید محدودیت‌های ذیل را رعایت کند:

- هیچ حلقه‌ای در شبکه ایجاد نگردد.
- تمام نقاط (شین‌ها) شبکه باید برقرار باشند.
- ولتاژ شین‌ها در حد مجاز قرار گیرد.
- جریان خطوط از حد مجاز تجاوز نگردد.

^۱Sectionner

^۲Sectionalizer

^۳Recloser

- پست های فوق توزیع دچار اضافه بار نشوند.

۳-۴- مدل بهینه سازی مسئله

تابع هدف مسئله برای مسئله جاییابی کلید شامل سود حاصل از نصب این تجهیزات منهای هزینه خرید و نصب آن هاست. سود حاصل در این پژوهش همان تاب آوری است. بنابراین تابع هدف به صورت زیر قابل بیان است.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } f &= (R_{R1} + R_{R2}) - (C_{SR} + T_{MC}) \quad \text{---} \quad (3-9) \\ &= \text{Revenue} - \text{Expenditure} \end{aligned}$$

مولفه های مختلف موجود در رابطه (۳-۹) به شرح زیر هستند:

- R_{R1} : تابع هدف اول تاب آوری که در بخش های قبلی تشریح شد (رابطه (۳-۳)).

$$R_{R1} = DRI \quad (3-10)$$

- R_{R2} : تابع هدف دوم تاب آوری که آن هم در بخش های قبلی تشریح شد (رابطه (۳-۴)).

$$R_{R2} = AR \quad (3-11)$$

- C_{SR} : هزینه کلید است که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$C_{SR} = N_{SW} * Cost_{SW} \quad (3-12)$$

N_{SW} تعداد کلیدهای جدید

$Cost_{SW}$ هزینه خرید و نصب هر کلید

- T_{MC} : هزینه کل تعمیرات کلیدها در طول عمر مفیدشان است. بنابراین هزینه تعمیرات به صورت کسری از هزینه کل این کلیدها در نظر گرفته می‌شود. ارزش فعلی این هزینه طبق رابطه (۳-۱۳) قابل محاسبه است.

$$T_{MC} = C_{SR} \frac{C_m}{100} F_1 \quad (3-13)$$

که در آن:

$$F_1 = \frac{1 - a_1^{ns}}{1 - a_1}, a_1 = \frac{(1 + (r_m/100))}{(1 + (r_i/100))} \quad (3-14)$$

در رابطه فوق r_m مقدار سالانه افزایش هزینه تعمیرات است.

قیود این مسئله شامل حداکثر تعداد کلیدهای قابل نصب است.

$$\sum_{i=1}^{nbr} (1 - X_{R,i}) \leq N_{ar} \quad (3-15)$$

سایر محدودیت‌های مسئله، قیود فنی شبکه است که شامل:

قید شعاعی بودن،

قید ولتاژ و

قید بارگذاری خطوط است.

قید شعاعی بودن از طریق دو محاسبه ساده از وضعیت شبکه قابل تشخیص است:

۱- تعداد خطوط موجود در مدار باید یک عدد کمتر از تعداد گره‌ها باشد. (شرط لازم)

۲- جهت جلوگیری از ایزوله شدن باسها پس از ارزیابی مورد ۱ باید از ماتریس تلاقی شاخه و گره کاهش

یافته دترمینان گرفته شود. ماتریس تلاقی شاخه و گره کاهش یافته همان ماتریس تلاقی شاخه و گره با حذف

سطر مربوط به باس پست (گره ریشه در گراف شبکه) است. اگر این دترمینان ۱ یا -۱ باشد شبکه شعاعی

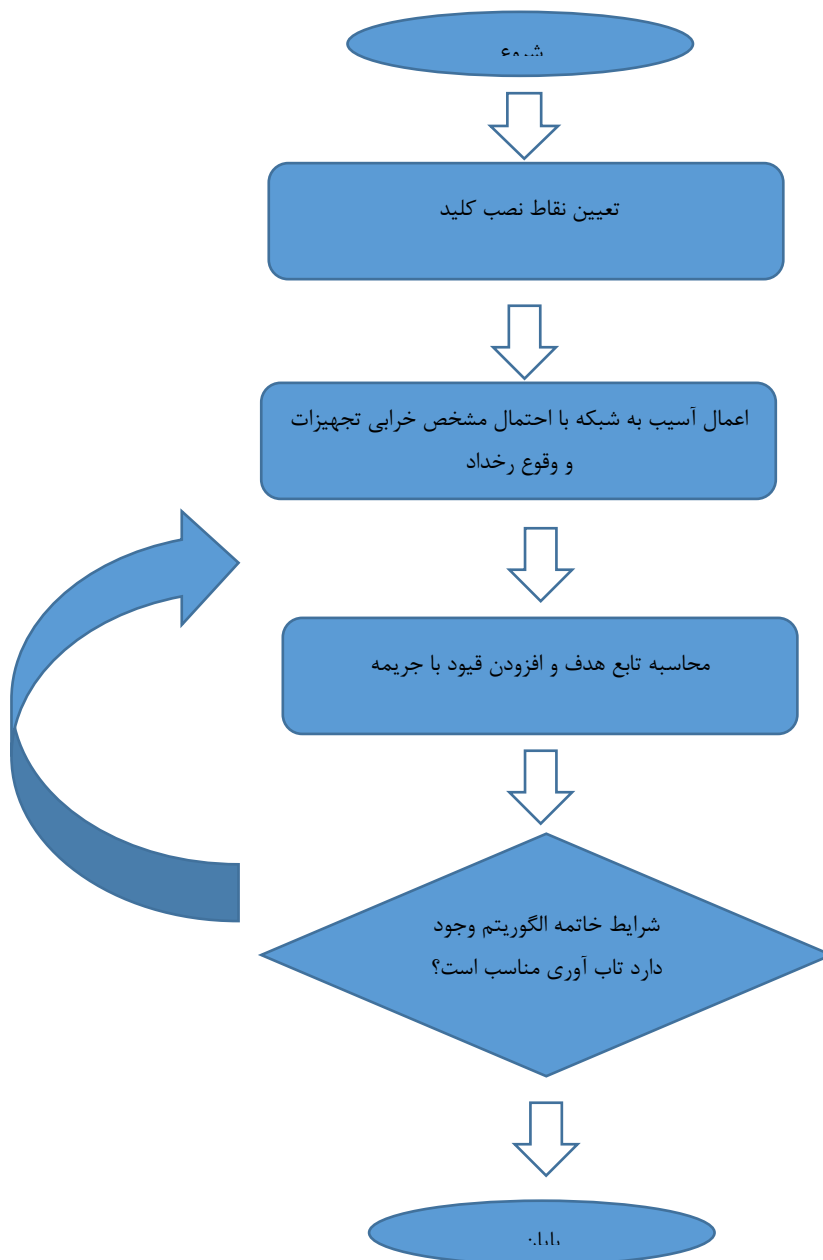
است و اگر ۰ باشد شبکه دارای باس ایزوله است. (شرط کافی).

معادلات بیان کننده سایر قیود عبارتند از:

$$0.95 < V_i < 1.05, i = 1, \dots, N_b \quad (3-16)$$

$$I_j \leq I_{jmax} \quad (3-17)$$

شکل ۳-۲ فلوچارت استراتژی کلی حل مسئله را جهت درک بهتر ارائه می دهد. زمینه این فلوچارت برای بهینه سازی الگوریتم ژنتیک است که در ادامه تشریح خواهد شد.



شکل ۳-۲: فلوجارت الگوریتم حل مسئله

۵-۳- الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نا مغلوب^۴ نسخه ۲ (NSGA II) [30]

الگوریتم پیشنهادی در این پایان نامه الگوریتم ژنتیک اختصاص با عنوان NSGA-II است. در این بخش به معرفی الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نا مغلوب می پردازیم. اکثر مسائل مربوط به بهینه سازی چند هدفه، با اختصاص دادن یک وزن به هر تابع هدف و استفاده از مجموع توابع به عنوان یک تابع هدف مجزا، که به روش مجموع وزن دار^۵ معروف است، حل میشوند. این روش کلاسیک دارای سه نقطه ضعف اساسی میباشد. اولاً، این روش قادر به جستجوی تمام فضای مجاز مربوط به مسئله نیست. ثانیاً، این روش به تنهایی یک روش هوشمند به حساب نمی آید و در نهایت، توابع هدف مربوط به این روش برای جمع شدن با هم نیازمند نرمالیزه شدن میباشند. از طرفی دیگر، الگوریتم های چند هدفه هوشمندی معرفی شده اند که فاقد این نقطه ضعفها میباشند. این الگوریتمهای چند هدفه، به جای یافتن یک جواب منفرد، دسته ای از جوابها تحت عنوان پارتو فرانت^۶ را شناسایی می کنند که هیچ کدام برتری مطلق بر دیگری ندارد.

این الگوریتم جدید چند هدفه به نام الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نا مغلوب نسخه ۲ (NSGA II) برای حل مسئله بازآرایی پیشنهاد شده است که در سال ۲۰۰۲ توسط پروفیسور کالیانموی دب^۷ معرفی شده است.

۱-۵-۳- معرفی الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نا مغلوب نسخه دوم (NSGA II)

^۱-non-dominated sorting genetic algorithm

^۲-weighted sum

^۳-pareto front

^۴- Kalyanmoy Deb

این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک هدفه معمولی، به یک الگوریتم چند هدفه تبدیل شده است که به جای یافتن بهترین جواب، دسته ای از بهترین جوابها را میدهد که با نام پارتو فرانت شناخته میشوند. این دو عملگر عبارتند از

(۱) عملگری که یک معیار برتری (رتبه) بر اساس مرتب سازی نا مغلوب به اعضای جمعیت اختصاص میدهد

(۲) عملگری که تنوع جواب را در میان جوابهای با رتبه برابر حفظ نگه میدارد.

قبل از شرح کامل این الگوریتم، لازم است که مفهوم غلبه، مرتب سازی نا مغلوب و مفهوم حفظ تنوع در جوابها، توضیح داده شود.

۲-۵-۳- مفهوم غلبه

در یک مسئله کمینه سازی با بیش از یک تابع هدف، میگوییم نقطه X بر نقطه Y غلبه میکند اگر و تنها اگر، Y از هیچ نظر بهتر از X نباشد و X حداقل از یک نظر اکیدا بهتر از Y باشد. این مفهوم به صورت ریاضی به شکل زیر بیان می شود.

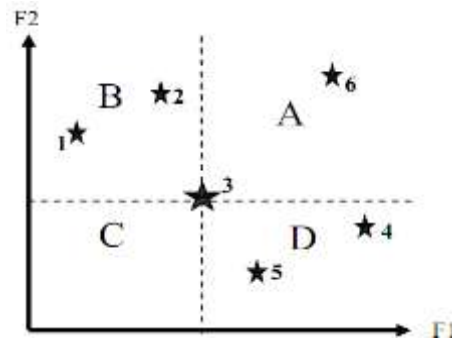
$$X \leq Y (X \text{ dom } Y) \Leftrightarrow \forall i : X_i \leq Y_i \wedge \exists i_0 : X_{i_0} < Y_{i_0} \quad (3-18)$$

۳-۵-۳- مفهوم مرتب سازی نا مغلوب

زمانی که بحث از یک الگوریتم تک هدفه مطرح است، معیار برتری جوابها نسبت به هم بسیار ساده و بدیهی است. زیرا تنها یک تابع هدف مد نظر میباشد و در صورتی که مسئله مورد بحث یک مسئله کمینه سازی باشد، جوابی که کمترین مقدار تابع هدف را دارا باشد مطلوب است و بر سایر جوابها برتری دارد. اما زمانی که برای حل مسئله ای از یک الگوریتم چند هدفه^۱ استفاده میشود، به این معناست که حداقل دو تابع هدف مد نظر میباشد و دیگر

¹ multi-objective

به آسانی نمیتوان در مورد بعضی از جوابها نظر قطعی داد. در اکثر موارد، نقاطی یافت میشود که هیچ کدام بر دیگری برتری کامل ندارد و نمیتوان با مفهوم غلبه، دو به دو بین آنها مقایسه ای انجام داد. لذا برای بدست آوردن بهترین جوابها باید آنها را بر اساس یک معیاری مرتب کرد. در این الگوریتم به هر جواب یک رتبه^۹ اختصاص داده می شود که بر اساس تعداد مغلوب شدن آنها نسبت به سایر نقاط انجام می شود. در پایان الگوریتم، نقاطی که بهترین رتبه یعنی رتبه ۱ را دارا باشند به عنوان مجموعه جواب یا نقاط پارتو فرانت انتخاب میشوند. این موضوع را با توجه به شکل (۳-۳) که مثالی برای یک مسئله کمینه سازی با دو تابع هدف میباشد شرح می دهیم.



شکل ۳-۳: چند نقطه از فضای جوابهای یک مسئله فرضی

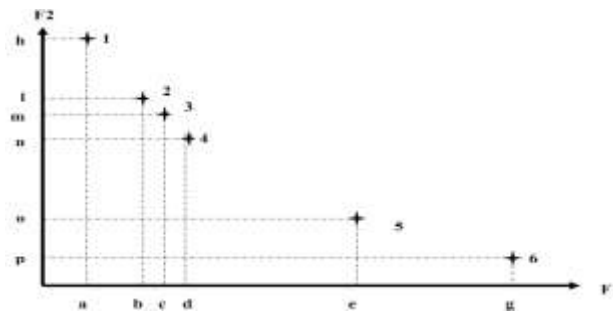
همانطور که در شکل (۳-۳) مشاهده میشود، تعدادی نقاط در فضای مربوط به کلیه جوابهای ممکن مسئله مشخص شده اند که هر کدام دارای دو مقدار از تابع هدفهای f^1 و f^2 هستند. می خواهیم وضعیت نقطه ۳ را نسبت به سایر نقاط صفحه بررسی کنیم. نقطه ۳ بر تمامی نقاط موجود در فضای A برتری دارد. یعنی مقدار توابع هدف f^1 و f^2 برای این نقطه نسبت به مقدار توابع هدف f^1 و f^2 ، برای تمامی نقاط موجود در صفحه A، کمتر

میباشند. لذا این نقطه بر نقاط موجود در صفحه A همیشه غلبه میکند. همچنین همه نقاط موجود در فضای C بر نقطه ۳ برتری دارند. یعنی مقدار توابع هدف f^1 و f^2 ، برای این نقاط نسبت به مقدار توابع هدف f^1 و f^2 برای نقطه ۳، کمتر میباشند. لذا نقطه ۳ همیشه توسط نقاط موجود در فضای C ، مغلوب میشود. به عنوان نمونه، نقطه ۳ نقطه ۶ را مغلوب میکند و نسبت به نقاط فضای A مغلوب میشود. اما در مورد وضعیت برتری یا عدم برتری نقاط موجود در فضای B و D نسبت به نقطه ۳ نمیتوان مستقیماً قضاوت کرد. چون نقاط موجود در صفحه B ، در مورد تابع f^1 ، نسبت به ۳ بهتر و در مورد تابع f^2 نسبت به ۳ بدتر هستند و همچنین نقاط موجود در فضای D ، در مورد تابع f^2 ، نسبت به ۳ بهتر و در مورد تابع f^1 ، نسبت به ۳ بدتر هستند. پس با این مقایسه مستقیم، نمیتوان گفت کدام نقطه بر دیگری غلبه میکند. در چنین مواردی، از حضور سایر اعضای جمعیت برای قضاوت استفاده میشود. در ابتدا فرض می‌کنیم نقطه ای در فضای C وجود ندارد. میخواهیم مقایسه ای در مورد نقطه ۳ و نقطه ۲ که در فضای B قرار دارد انجام دهیم. همانطور که اشاره شد، هر کدام یک وضعیت بهتر و یک وضعیت بدتر نسبت به همدیگر دارند. در این شرایط باید بینیم آیا نقطه دیگری وجود دارد که از هر دو نظر از این نقاط بهتر باشد یا خیر. نقطه ۱ از هر دو نظر نسبت به نقطه ۲ بهتر است، پس نقطه ۱ نقطه ۲ را مغلوب می‌کند، اما نقطه ای وجود ندارد که از هر دو نظر از نقطه ۳ بهتر باشد. لذا نقطه ۲ توسط سایر اعضای جمعیت یکبار مغلوب شده ولی نقطه ۳ هرگز مغلوب نشده. در نتیجه، نقطه ۳ در بین این دو نقطه وضعیت بهتری برای انتخاب دارد. در مورد نقطه ۴ و نقطه ۳ نیز وضع چنین است. یعنی نقطه ۴ توسط نقطه ۵ مغلوب می‌شود ولی نقطه ۳ توسط هیچ نقطه ای مغلوب نمی‌شود. پس نقطه ۳ در برابر نقطه ۴ هم وضعیت بهتری دارد. اما در مورد نقاط ۱ و ۵ نسبت به ۳ نمیتوان اظهار نظر کرد، زیرا این نقاط توسط هیچ نقطه ای مغلوب نشده‌اند و هر کدام نسبت به هم یک برتری و یک عدم برتری دارند. لذا نقاط ۱ و ۵ و ۳ که هرگز مغلوب نشده‌اند و رتبه ۱ را دارند، جزو نقاط پارتو فرانت می‌باشند.

۴-۵-۳- مفهوم حفظ تنوع پاسخ ها (فاصله ازدحامی^۱)

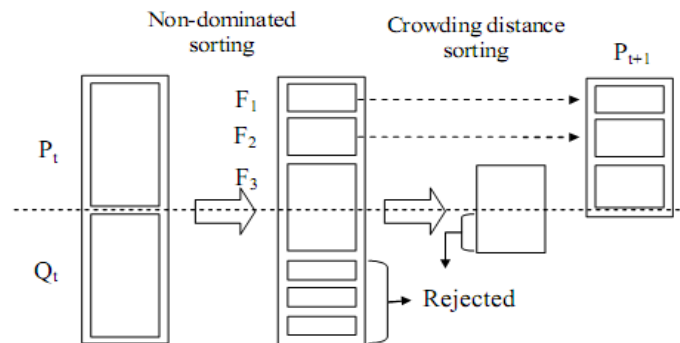
همانطور که در ادامه بیان خواهد شد، گاهی مجبور میشویم در بین اعضای یک مجموعه که رتبه یکسان دارند، مقایسه انجام بدهیم و برخی را حذف کنیم. این کار با استفاده از مفهوم حفظ تنوع پاسخ ها انجام میشود. به این معنی که، در حذف کردن چند عضو از یک مجموعه سعی میشود طوری عمل شود که در آن مجموعه، از هر بازه ای به طور منظم پاسخ وجود داشته باشد. این مسئله را با مثالی شرح می‌دهیم. فرض کنیم نقاط موجود در شکل (۳-۴)، مربوط به مجموعه ای با رتبه یکسان هستند. از بین این نقاط ما مجبوریم که یک نقطه را حذف کنیم. لذا سعی میشود که آن نقطه جوری انتخاب شود که تنوع پاسخ های ما را تا حدودی حفظ نگه دارد. مثلا بین نقاط ۳ و ۵، نقطه ۳ انتخاب بهتری برای حذف شدن میباشد. زیرا با حذف نقطه ۵، در محدوده زیادی از محور f_1 و f_2 یعنی به ترتیب بین d و g و بین n و p نماینده ای از جواب حضور نخواهد داشت. اما اگر نقطه ۳ برای حذف شدن انتخاب شود، تنوع جواب از بین نمی‌رود، زیرا در مجاورت این نقطه، پاسخ های دیگری نیز وجود دارد.

علت ایجاد این دو اپراتور در الگوریتم ژنتیک چند هدفه، به مرحله انتخاب بر میگردد که از بین کروموزوم های والدین و فرزندان باید تعدادی را برای آغاز مرحله بعد انتخاب و تعدادی از جواب ها را حذف کرد. ادامه روند این الگوریتم با توجه به شکل (۳-۵) قابل توصیف است.



شکل ۳-۴: نقاط فرضی مربوط به یک مجموعه با رتبه برابر

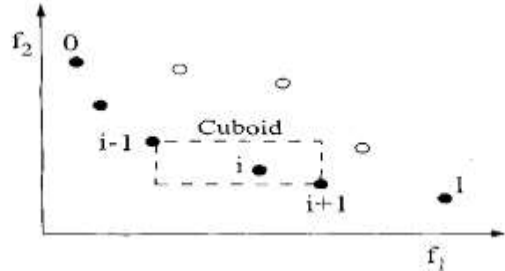
¹crowding distance



شکل ۵-۳: عملکرد اپراتورها در مرحله انتخاب جوابها در الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نا مغلوب

همانطور که ملاحظه میشود، از شروع سیکل دوم به بعد، دو دسته جواب وجود دارد. یک دسته جمعیت والدین از مرحله قبل که در شکل با P_t مشخص شده و دسته دیگر جمعیت فرزندان حاصل از عملکرد دو عملگر ادغام و جهش بر روی والدین که با Q_t مشخص شده است. حال باید از بین این دو جمعیت، عده ای را جهت ثابت نگه داشتن تعداد جمعیت اولیه برای آغاز سیکل بعدی حذف کرد. همانطور که در شکل دیده میشود، ابتدا باید اعضای $P_t \cup Q_t$ را رتبه بندی کرد. بر اساس مرتب سازی نا مغلوب، ابتدا آن دسته از اعضای جمعیت را که هرگز مغلوب نشده اند را مشخص کرده و به آنها رتبه ۱ اختصاص میدهیم $Rank=1$. سپس برای بقیه اعضا، با نادیده گرفتن اثر اعضای با رتبه ۱ بر جمعیت، مجدداً مرتب سازی نا مغلوب را انجام میدهیم و اعضای که در این مرحله هرگز مغلوب نشده اند را با رتبه ۲ مشخص میکنیم. برای بقیه اعضا، با نادیده گرفتن اثر اعضای با رتبه ۱ و ۲ بر جمعیت، بار دیگر مرتب سازی نا مغلوب را انجام داده و اعضای که در این مرحله هرگز مغلوب نشدند را با رتبه ۳ مشخص میکنیم و این روند را تا جایی ادامه می دهیم که رتبه همه اعضای جمعیت مشخص شود. همانطور که در شکل دیده می شود، باید به تعداد P_{t+1} از اعضای $P_t \cup Q_t$ بر اساس رتبه شان انتخاب و بقیه حذف شوند. مطابق شکل، اعضای با رتبه ۱ و ۲ همگی انتخاب می شوند اما برای اعضای با رتبه ۳ باید تعدادی حذف و بقیه انتخاب شوند. همانطور که می دانیم، همگی آنها رتبه برابر دارند و باید معیار دیگری جهت انتخاب اعمال شود که همان معیار

حفظ تنوع پاسخ هاست. عملگر این مرحله به نام فاصله ازدحامی شناخته میشود. مفهوم این عملگر در بالا شرح داده شد و بیان ریاضی آن برای نقطه i در مسئله ای دو هدفه با توجه به شکل (۳-۶) به صورت زیر می باشد.



شکل ۳-۶: مفهوم فاصله ازدحامی برای نقطه i

$$d_i^1 = \frac{|f_1^{i+1} - f_1^{i-1}|}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \quad (3-19)$$

$$d_i^2 = \frac{|f_2^{i+1} - f_2^{i-1}|}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (3-20)$$

$$D = d_i^1 + d_i^2 \quad (3-21)$$

در فرمول های بالا مقادیر مربوط به f_1^{i+1} ، f_1^{i-1} ، f_1^{\max} ، f_1^{\min} ، f_2^{i+1} ، f_2^{i-1} ، f_2^{\max} ، f_2^{\min} در شکل مشخص است و d_i^1 ، نسبت ناحیه مربوط به قلمرو نقطه i ، به کل ناحیه از تابع هدف f_1 و d_i^2 ، نسبت ناحیه مربوط به قلمرو همین نقطه به کل ناحیه از تابع هدف f_2 میباشد و D که مجموع این دو نسبت است، شاخصی از قلمرو کلی مربوط به این نقطه را بیان میکند، که فاصله ازدحامی نامیده میشود. لذا هر نقطه ای مقدار فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد، به این معنی است که محدوده بیشتری را پوشش میدهد و حذف آن منجر به از دست رفتن تنوع جواب در محدوده وسیعی از پاسخ ها میشود. لذا نقاطی از مجموعه جواب با رتبه ۳ که دارای فاصله ازدحامی کمتر هستند، به میزانی که جمعیت اولیه ثابت بماند باید حذف شوند. همچنین نقاط ابتدایی و انتهایی مربوط به این مجموعه، نقاط مهمی هستند که باید حتما در بین جوابها وجود داشته باشند و حذف نشوند. فرمول بالا برای هر مسئله با چندین تابع هدف نیز قابل تعمیم می باشد.

۵-۳-۵- نحوه اعمال الگوریتم به مسئله

در این بخش نحوه اعمال الگوریتم ژنتیک به مسئله تشریح شده است. برای این منظور به عنوان اصلی ترین بخش اعمال الگوریتم، شکل کروموزمها و مفهوم هر یک از ژن ها ارائه شده است.

هر کروموزم در این پایان نامه به صورت یک آرایه باینری با تعداد ژن های معادل تعداد خطوط شبکه (نقاط کاندید برای نصب کلید) است که در آن ۱ به معنای نصب کلید در سکشن مربوطه و ۰ به معنای عدم نصب کلید در سکشن مربوطه است. بنابراین مراحل الگوریتم به صورت در پی آمده خواهد بود.

- **مرحله اول:** تولید تعداد N_{pop} آرایه باینری تصادفی به صورت بردارهایی با طول تعداد سکشن های شبکه.
 - **مرحله دوم:** برای هر کروموزم، رخدادهای خطای محتمل اعمال شده و امکان بازیابی بارها با وجود کلیدهای کنترل از راه دور در شرایط بعد از رخداد حادثه از طریق بررسی آرایش های ممکن (آرایش هایی که شعاعی باشند) تجزیه و تحلیل گشته و لذا توابع هدف تاب آوری محاسبه می گردند. سپس از شبکه بعد از حادثه پخشبار گرفته شده و وضعیت ولتاژ و جریان خطوط ارزیابی می گردد اگر این قیود نقض شده باشند به مقدار تابع هدف مربوطه جریمه اضافه می شود.
 - **مرحله سوم:** در این مرحله عملیات ادغام به صورت شکست ۲ نقطه ای به کروموزومها اعمال خواهد شد.
 - **مرحله چهارم:** این مرحله شامل عملیات جهش است که به درصد مشخصی از جمعیت اعمال می گردد.
 - **مرحله پنجم:** انتخاب بین جمعیت موجود و نسل جدید از طریق چرخ رولت انجام می گردد.
 - **مرحله ششم:** اگر شرط پایان برقرار بود نتایج ارائه شده در غیر این صورت به مرحله ۲ بروید.
- منظور از شرط پایان در الگوریتم های فراابتکاری انجام تعداد تکرار مشخص یا عدم یافتن پاسخ بهتر در درصد مشخص (بین ۲۰ الی ۳۰ درصد) از کل تکرارهاست.

۶-۳- ابزار حل

ابزار حل این مسئله، نرم افزار MATLAB می باشد. این نرم افزار دارای محیط برنامه نویسی و شبیه سازی است. در این پایان نامه از محیط کدنویسی برای آن استفاده شده است. لذا الگوریتم پیشنهادی که همان ژنتیک است در این نرم افزار به صورت کد نوشته شده است. همچنین کدهای کمکی شامل محاسبه پخش بار، محاسبه تابع هدف و محاسبات شعاعی بودن شبکه نیز در محیط mfile کدنویسی میشود.

۷-۳- جمع بندی فصل

در این فصل ابزارهای محاسباتی و الگوریتم پیشنهادی پایان نامه ارائه گردید. ابزارهای محاسباتی شامل: شاخص تاب آوری. مدل احتمالاتی طوفان و سیلاب، مشخصات فنی شبکه توزیع و در نهایت مدل دقیق بهینه سازی با ارائه توابع هدف و قیود شبکه است. در ادامه الگوریتم پیشنهادی این پایان نامه که الگوریتم ژنتیک چند هدفه می باشد به صورتی که در شبیه سازی ها از آن استفاده خواهد شد ارائه گردید.

فصل ۴ نتایج شبیه سازی

۴-۱ مقدمه

به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، باید مدل ارائه شده به یک سیستم واقعی اعمال گردد. در این فصل مدل پیشنهادی به یک شبکه توزیع مطالعاتی اعمال شده است. مراحل مطالعه طبق مراحل الگوریتم پیشنهادی گام به گام پیش رفته است. نتایج هر مرحله ارائه و آنالیز بر روی آن‌ها انجام شده است. در نهایت با توجه به اینکه مسئله پایان نامه حاضر یک مسئله چند هدفه می‌باشد فضای پارتوی بدست آمده برای اهداف مختلف تحلیل شده و با روش بهینه سازی چند هدفه به کمک رتبه‌بندی گزینه بهینه انتخاب شده است.

۴-۲ مطالعات عددی پایه

همانطور که اشاره شد مطالعات عددی در این پایان‌نامه بر روی یک سیستم استاندارد انجام شده است. شبکه مطالعاتی مذکور، سیستم ۳۳ شینه IEEE می‌باشد که در ادامه ضمن معرفی این شبکه نتایج پخش بار عادی و سپس نتایج روش پیشنهادی ارائه خواهد شد. که نتایج حاصله حاکی از موفقیت آمیز بودن روش پیشنهادی در یافتن نقاط بهینه با در نظر گرفتن اهداف مختلف مسئله می‌باشد. لازم به ذکر است کلیه محاسبات پخش بار و برنامه الگوریتم پیشنهادی، جهت اجرا در شبکه توزیع استاندارد ۳۳ باسه با استفاده از نرم افزار تهیه شده در محیط متلب صورت پذیرفته است. جهت اجرای این برنامه از کامپیوتر شخصی با سرعت ۴ گیگابایت رم استفاده شده است.

۴-۲-۱ معرفی شبکه مطالعاتی ۳۳ شینه IEEE

انتخاب شبکه پایه از نظر ساختار خطوط و اتصالات و کلید NC این شبکه بعنوان مبنا و پایه باری یافتن نقاط مانور بهینه انتخاب میشود. شبکه ۳۳ باسه در این پایان نامه دارای ۱ فیدر اصلی (پست فوق توزیع) و ۳۳

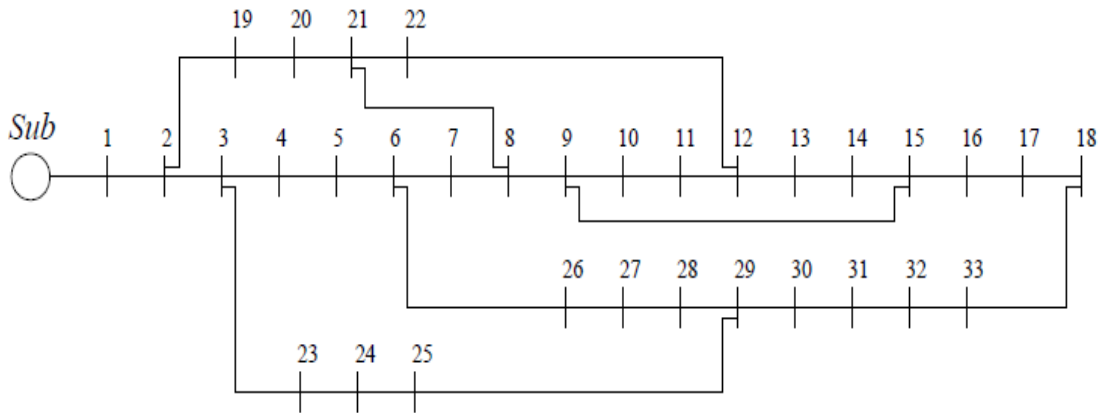
گره (پست توزیع) می‌باشد. این شبکه در واقع شامل ۵ خط باز (کلید عادی باز) و ۳۲ خط بسته (کلید عادی بسته) می‌باشد، که در حالت عادی و قبل از انجام بازیابی شبکه، با قرار دادن فیدهای ۳۳ الی ۳۷ در حالت قطع، یک ساختار شعاعی برای شبکه حاصل می‌شود. در این شبکه فرض شده است که بین هر دو باس یک کلید وجود دارد یا به عبارتی دیگر، فرض شده است که تمام خطوط شبکه دارای قابلیت باز و بستن می‌باشند.

ولتاژ نامی در این شبکه ۱۲/۳۸ کیلوولت، مجموع توان‌های اکتیو و راکتیو متصل به شبکه به ترتیب ۳۷۱۵ کیلووات و ۲۳۰۰ کیلووار می‌باشد. همچنین مقدار امیدانس هر شاخه و بارهای هر شین در مرجع [31] آورده شده است. این شبکه پنج کلید حالت عادی باز داشته و روی هر شاخه یک کلید حالت عادی بسته در نظر گرفته شده است.

بر روی گره‌های ۶، ۷، ۲۳، ۲۴، ۲۹، ۳۰ و ۳۱ منابع انرژی گازسوز در نظر گرفته شده است از طرفی دیگر، با توجه به اینکه میزان بار شبکه در هر ساعت از ۲۴ ساعت شبانه روز با یکدیگر متفاوت می‌باشد، که این امر ناشی از تغییرات تقاضا در ساعات مختلف شبانه روز می‌باشد، لذا برای بار شبکه هم یک پروفیل مصرف ۲۴ قسمت، که هر قسمت دارای مصرف متفاوت نسبت به قسمت‌های دیگر می‌باشد، تعریف شده که حداکثر بار شبکه در ساعت ۲۰ شب بوده و مقدار آن برابر بار پایه شبکه می‌باشد. قابل ذکر است که در بازیابی در حضور تولید پراکنده، فرض می‌کنیم شبکه دارای منابع تولید پراکنده در باس‌های مشخص می‌باشد، حال با تغییر آرایش کلیدهای باز و بسته شبکه، سعی در یافتن آرایشی از شبکه هستیم که بیشترین بارهای حساس را بتواند در حوادث شدید تامین نماید.

به عنوان یک نتیجه کلی می‌توان گفت که میزان بار شبکه در هر ساعت با ساعت دیگر تفاوت داشته که در این پایان نامه برای وارد کردن این تفاوت به مسئله بهبود تاب آوری شبکه توزیع، با توجه به منحنی بار شبکه و به صورت فرضی، به ازای هر ساعت شبانه روز، یک مقدار بار مشخص، به صورت دستی وارد شده است.

جهت درک بهتر سیستم مطالعاتی، شکل ۴-۱ نمایشی از این شبکه و فیدرهای ارتباطی کاندید را ارائه می‌دهد.



شکل ۴-۱: شبکه ۳۳ شینه IEEE

جدول ۴-۱ کلیه اطلاعات مربوط به این شبکه را ارائه می‌دهد، این اطلاعات شامل شماره و امیدانس خطوط، باس ابتدا و باس انتهای هر خط و بار شین انتهایی هر خط می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌گردد این جدول شامل دو بخش مجزا از هم می‌باشد که ابتدا خطوط اصلی و سپس خطوط ارتباطی در آن نمایش داده شده‌اند. شماره‌های خطوط اصلی ۱ تا ۳۲ می‌باشد که بدیهی است طبق نظریه گراف درختی یک شماره از تعداد گره‌ها کمتر است. خطوط ارتباطی با شماره‌های بالاتر از ۳۲ شماره گذاری شده‌اند. با دقت در توپولوژی این شبکه ملاحظه می‌گردد که با ورود هر خط ارتباطی یک حلقه ایجاد می‌گردد. لذا در روند باید این نکته مد نظر قرار گرفته و شعاعی بودن بررسی گردد.

از طرف دیگر برخی از خطوط در حلقه‌های ایجاد شده توسط فیدرهای ارتباطی مشترک هستند که باید جهت جلوگیری از ایجاد حلقه و یا ایزوله شدن یک باس چاره‌ای اندیشید. جهت تشخیص شعاعی بودن کافی است دو

شرط اساسی چک شود. شرط اول اینست که تعداد شاخه‌های موجود شمارش شود، اگر این تعداد برابر ۳۲ نباشد، حالت شعاعی نخواهیم داشت. شرط دوم به منظور جلوگیری از جزیره شدن در شبکه (عدم اتصال یک یا چند شین به شین پست) باید بررسی گردد که می‌توان ماتریس تلاقی شاخه و گره را استخراج نموده و دترمینان آن را محاسبه کنیم. در صورتی که دترمینان مساوی صفر باشد به معنای وجود حداقل یک باس ایزوله در سیستم است.

جدول ۴-۱: اطلاعات خطوط شبکه ۳۳ باسه IEEE

Br	Snd.	Rcv.	R (Ohm)	X (Ohm)	PRcv (kW)	QRcv (kVAr)
1	1	2	0.0922	0.047	100	60
2	2	3	0.493	0.2511	90	40
3	3	4	0.366	0.1864	120	80
4	4	5	0.3811	0.1941	60	30
5	5	6	0.819	0.707	60	20
6	6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	7	8	0.7114	0.2351	200	100
8	8	9	1.03	0.74	60	20
9	9	10	1.044	0.74	60	20
10	10	11	0.1966	0.065	45	30
11	11	12	0.3744	0.1238	60	35
12	12	13	1.468	1.155	60	35
13	13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	14	15	0.591	0.526	60	10
15	15	16	0.7463	0.545	60	20
16	16	17	1.289	1.721	60	20
17	17	18	0.732	0.574	90	40
18	2	19	0.164	0.1565	90	40
19	19	20	1.5042	1.3554	90	40
20	20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	21	22	0.7089	0.9373	90	40
22	3	23	0.4512	0.3083	90	50
23	23	24	0.898	0.7091	420	200
24	24	25	0.896	0.7011	420	200
25	6	26	0.203	0.1034	60	25
26	26	27	0.2842	0.1447	60	25
27	27	28	1.059	0.9337	60	20
28	28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	30	31	0.9744	0.963	150	70

31	31	32	0.3105	0.3619	210	100
32	32	33	0.341	0.5302	60	40
Tie lines						
33	8	21	2	2		
34	9	15	2	2		
35	12	22	2	2		
36	18	33	0.5	0.5		
37	25	29	0.5	0.5		

همانطور که در فصل سوم به تفصیل اشاره شد، تجدید آرایش با اهداف مشخص شده در فصل سوم طی عملیات

مانور در زمان بروز حوادث انجام خواهد شد. از طرفی به دلیل تغییرات بار در طول شبانه روز باید الگوی بار

ساعتی در اختیار باشد، برای این منظور ضرایب بار در (جدول ۴-۲) طی مطالعه برای دوره زمانی ۲۴ ساعته در

نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۴-۲: ضرایب بار در ۲۴ ساعت شبانه‌روز

ضریب ساعت	ضریب بار	ضریب ساعت	ضریب بار	ضریب ساعت	ضریب بار
۱	۰,۱	۹	۰,۶۳	۱۷	۰,۵۷
۲	۰,۱۲	۱۰	۰,۶۵	۱۸	۰,۶۵
۳	۰,۱۳	۱۱	۰,۷	۱۹	۰,۸۵
۴	۰,۱۴	۱۲	۰,۷۵	۲۰	۱
۵	۰,۱۵	۱۳	۰,۸	۲۱	۰,۹۵
۶	۰,۲۵	۱۴	۰,۶	۲۲	۰,۹
۷	۰,۴	۱۵	۰,۵۳	۲۳	۰,۴۹
۸	۰,۶	۱۶	۰,۴۵	۲۴	۰,۲

همانطور که مشاهده می‌شود بار ساعت ۲۰، بار پایه شبکه و در عین حال بار پیک شبکه است و میزان بار در سایر ساعات ضریبی از بار این ساعت است.

نتایج پخش بار عادی بر روی این شبکه در تحلیل تابع هدف مسئله مورد نیاز است لذا قبل از ورود به بدنه اصلی مطالعات، نتایج پخش بار عادی بر روی این شبکه ارائه شده و سپس به تحلیل مسئله جایابی کلید خواهیم پرداخت.

۴-۲-۲ نتایج پخش بار عادی بر روی شبکه ۳۳ باسه

به منظور داشتن شاخصی از وضعیت فنی شبکه شامل ظرفیت خطوط و پروفیل ولتاژ شبکه نیاز به محاسبه پخش بار از شبکه ۳۳ باس با اطلاعات استاندارد آن هستیم. بنابراین در این قسمت نتایج پخش بار شامل ولتاژ باسها و جریان خطوط در این قسمت ارائه می‌گردد. شایان ذکر است $1/5$ برابر جریان هر خط در این محاسبات به عنوان ظرفیت خطوط در پخش بار جهت محاسبه ریسک فنی (جریان) مورد استفاده قرار گرفته است.

در این حالت، حداقل پروفیل ولتاژ $0/9088$ پریونیت در گره شماره ۱۷ بوده، دامنه ولتاژ شین‌ها در جدول ۴-۳ و دامنه جریان شاخه‌ها در جدول ۴-۴ ارائه شده است. جهت درک بهتر وضعیت پروفیل ولتاژ، شکل ۴-۲ پروفیل ولتاژ را در این وضعیت نمایش می‌دهد.

جدول ۳-۴: دامنه ولتاژ شین‌ها

ولتاژ (V)	شماره باس	ولتاژ (V)	شماره باس	ولتاژ (V)	شماره باس	ولتاژ (V)	شماره باس
11700.79	26	11250.37	18	11460.47	10	12341.47	2
11667.46	27	12334.63	19	11449.29	11	12158.43	3
11518.72	28	12288.29	20	11429.79	12	12061.20	4
11411.86	29	12279.17	21	11350.28	13	11965.06	5
11365.70	30	12270.91	22	11320.80	14	11725.88	6
11311.59	31	12111.94	23	11302.43	15	11680.57	7
11299.68	32	12025.45	24	11284.64	16	11617.60	8
11295.99	33	11982.34	25	11258.27	17	11536.09	9

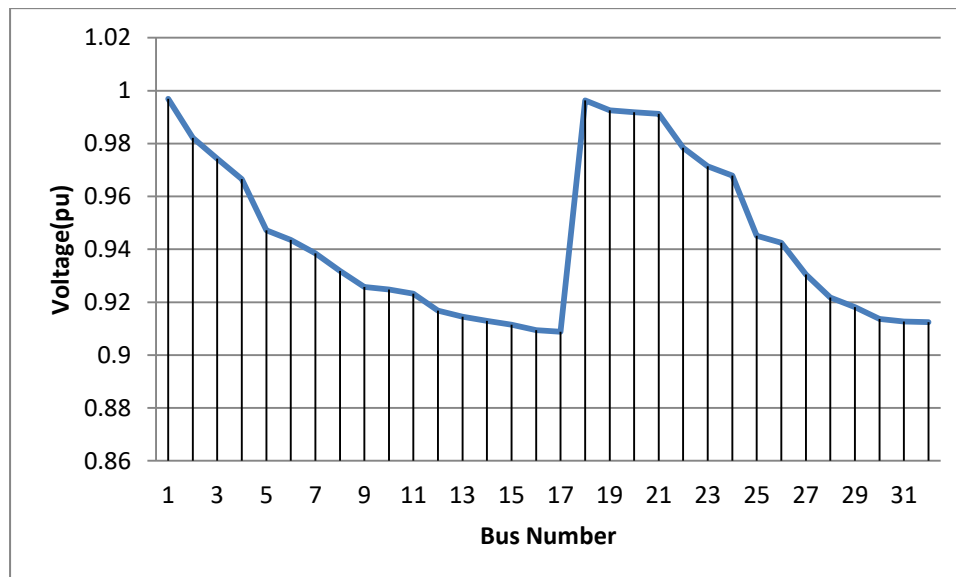
جدول ۴-۴: دامنه جریان شاخه‌ها

جریان (A)	شماره شاخه	جریان (A)	شماره شاخه	جریان (A)	شماره شاخه	جریان (A)	شماره شاخه
116.2351	25	8.754252	17	59.98469	9	373.6512	1
111.1463	26	32.04651	18	54.51071	10	332.4871	2
106.0924	27	24.06179	19	49.83239	11	239.3652	3
101.3636	28	16.04697	20	43.78008	12	227.4144	4
89.98665	29	8.026181	21	37.69468	13	221.8811	5
41.54279	30	85.99274	22	25.25006	14	103.8103	6
26.91761	31	77.50644	23	19.95321	15	84.67076	7
6.383771	32	38.82281	24	14.35597	16	65.42951	8

ظرفیت فرض شده برای هر یک از خطوط شبکه ۱,۵ برابر جریان ارائه شده در جدول ۴-۴ می‌باشد و در مواردی که ظرفیت جریان بدست آمده کمتر از ۷۵ آمپر باشد، ظرفیت آن را معادل ۷۵ آمپر فرض کرده‌ایم. به منظور دسترسی ساده‌تر ظرفیت خطوط بر حسب جریان در جدول ۴-۵ ارائه شده است.

جدول ۴-۵: ظرفیت جریان شاخه‌ها

شماره شاخه	ظرفیت (A)	شماره شاخه	ظرفیت (A)	شماره شاخه	ظرفیت (A)	شماره شاخه	ظرفیت (A)
1	560	9	90	17	75	25	174
2	499	10	82	18	75	26	167
3	359	11	75	19	75	27	159
4	341	12	75	20	75	28	152
5	333	13	75	21	75	29	135
6	156	14	75	22	129	30	75
7	127	15	75	23	116	31	75
8	98	16	75	24	75	32	75



شکل ۴-۲: پروفیل ولتاژ شین‌ها در وضعیت عادی برای بار پایه

در نهایت الگوی بار فصلی هر شین از شبکه مطابق جدول ۴-۶ ارائه شده است. تا در ارزیابی تابع هدف در بلند مدت بدانیم هر آرایش از شبکه چه تاثیری بر شاخص‌های تابع هدف در هر سطح بار خواهد داشت.

جدول ۴-۶: ضرایب بار اکتیو و راکتیو در سه فصل اول

شماره شین بار	فصل اول		فصل دوم		فصل سوم	
	اکتیو	راکتیو	اکتیو	راکتیو	اکتیو	راکتیو
1	1.0260	1.0780	0.9487	0.9905	0.9858	1.0111
2	1.0800	1.0390	0.9436	0.9980	0.9291	0.9653
3	1.0431	1.0242	0.9447	0.9439	0.9235	0.8866
4	1.0911	1.0404	0.9306	0.9111	1.0476	0.8980
5	1.0182	1.0096	0.9509	0.9258	0.8575	1.0273
6	1.0264	1.0132	0.9511	0.9409	1.0270	0.8557
7	1.0146	1.0942	0.9818	0.9595	1.0327	0.9480
8	1.0136	1.0956	0.9795	0.9262	1.0092	0.8836
9	1.0869	1.0575	0.9644	0.9603	0.8697	1.0457
10	1.0580	1.0060	0.9379	0.9711	0.9024	0.9925
11	1.0550	1.0235	0.9812	0.9222	0.9171	0.9501
12	1.0145	1.0353	0.9533	0.9117	0.9859	0.9442
13	1.0853	1.0821	0.9351	0.9297	0.8773	0.8619
14	1.0622	1.0015	0.9939	0.9319	0.9942	0.9864
15	1.0351	1.0043	0.9876	0.9424	0.8714	0.8585
16	1.0513	1.0169	0.9550	0.9508	0.9808	0.8643
17	1.0402	1.0649	0.9622	0.9086	0.9488	0.9543
18	1.0076	1.0732	0.9587	0.9262	1.0058	0.8693
19	1.0240	1.0648	0.9208	0.9801	0.9930	1.0136
20	1.0123	1.0451	0.9301	0.9029	1.0307	1.0135
21	1.0184	1.0547	0.9471	0.9929	1.0282	0.9945
22	1.0240	1.0296	0.9230	0.9730	0.9168	0.8800
23	1.0417	1.0745	0.9844	0.9489	0.9897	0.9819
24	1.0050	1.0189	0.9195	0.9579	0.8896	0.9537
25	1.0903	1.0687	0.9226	0.9237	0.8561	1.0446
26	1.0945	1.0184	0.9171	0.9459	0.9988	0.9798
27	1.0491	1.0368	0.9228	0.9963	0.9500	1.0101
28	1.0489	1.0626	0.9436	0.9547	0.9460	0.9408
29	1.0338	1.0780	0.9311	0.9521	1.0309	0.9365
30	1.0900	1.0081	0.9923	0.9232	0.9720	1.0151
31	1.0369	1.0929	0.9430	0.9489	0.9735	0.8667
32	1.0111	1.0776	0.9185	0.9624	1.0219	0.8766

۴-۱ نتایج مطالعه بر روی شبکه ۳۳ باسه

قبل از ورود به بخش بهینه‌سازی توجه شود که مدل احتمالاتی وقوع طوفان و سیل از یک طرف و منحنی شکنندگی تجهیز از طرف دیگر، دلیل و محرک اصلی جایابی کلید هستند تا بتوان در صورت بروز این حوادث با تغییر آرایش شبکه، توابع هدف بهتری حاصل گردد.

همانطور که عنوان شد، هر آرایش از شبکه توزیع، با مشخص شدن وضعیت تمام کلیدهای شبکه در صورت برآورده شدن قیود شبکه بدست می‌آید. برای شبیه‌سازی نرم افزاری روش ارائه شده در پایان نامه، به جای بررسی وضعیت تمامی کلیدهای کاندید شبکه، از روشی به نام حذف حلقه استفاده شده است که تنها کلیدهای باز را در هر آرایش به عنوان متغیرهای الگوریتم در نظر می‌گیرد. دلیل این امر اینست که تعداد فیدرهای ارتباطی در شبکه‌ها معمولاً خیلی کمتر از تعداد شاخه‌های اصلی است، لذا با توجه به اینکه به منظور حفظ آرایش شعاعی، به تعداد فیدرهای ارتباطی کلید باز در هر آرایش خواهیم داشت، لذا بهتر است کلیدهای باز که تعدادشان کمتر است، متغیر مسئله باشند.

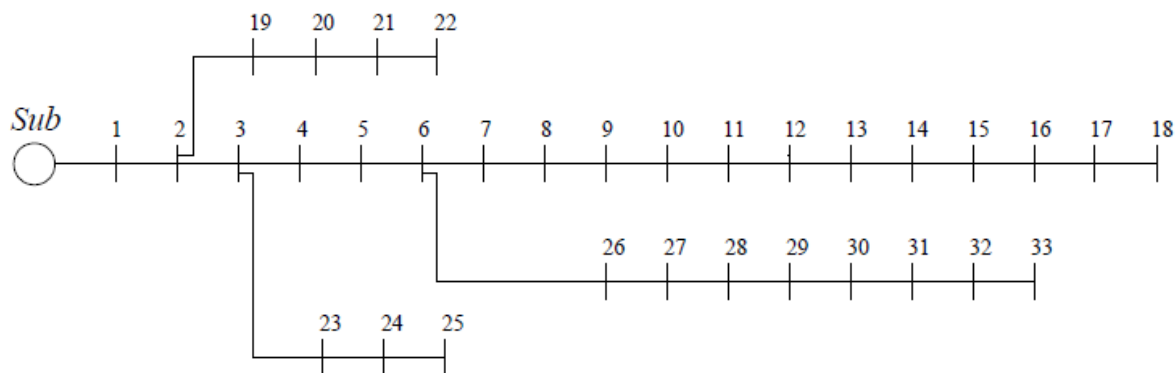
مطابق با این روش، ابتدا تمام کلیدهای شبکه بسته در نظر گرفته می‌شوند. در این وضعیت تعدادی حلقه خواهیم داشت. همانطور که می‌دانیم، برای برقراری شرط شعاعی بودن شبکه در هنگام بهره‌برداری، هیچ حلقه‌ای نباید در شبکه وجود داشته باشد، لذا از هر حلقه یک کلید باز می‌شود تا این شرط برقرار گردد. پس در مجموع، به تعداد n کلید از شبکه، جهت برقراری شرط شعاعی بودن باید باز شوند که n ، تعداد حلقه‌های شبکه در حالت بسته بودن تمام کلیدها می‌باشد. همچنین این کلیدها باید طوری انتخاب شوند که هیچ گره بدون برقی در شبکه نباشد و همچنین حلقه دیگری از ترکیب این حلقه‌ها ایجاد نشود. حسن این روش (روش حذف حلقه) در این است که به علت کم کردن تعداد متغیرهای الگوریتم، سرعت انجام الگوریتم و حجم محاسبات کاهش می‌یابد.

آرایش اولیه شبکه تست ۳۳ باسه که در این پایان نامه استفاده شده است، با ۳۲ کلید بسته و ۵ کلید باز (۳۳) ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷)، در شکل ۴-۳، نشان داده شده است. با بسته شدن تمام کلیدها، ۵ حلقه در شبکه (مطابق

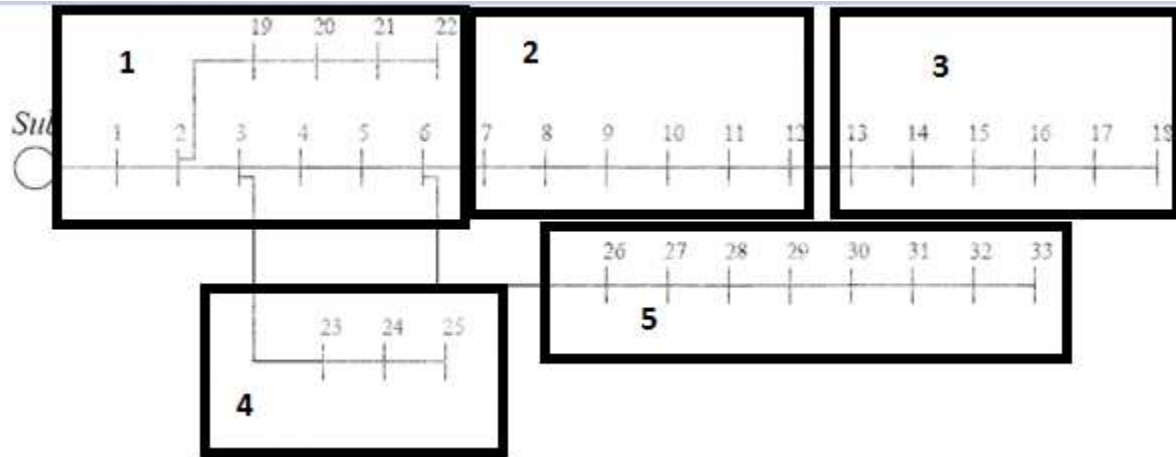
شکل ۴-۱) ایجاد می‌شود. در نتیجه، برای دستیابی به هر آرایش مجاز، ۵ کلید از این شبکه باید باز شوند، لذا تعداد متغیرهای الگوریتم بهینه‌سازی برای این شبکه، ۵ می‌باشد.

تهیه شرایط و سناریوهای بهره برداری مختلف برای شبکه، این شرایط شامل وضعیت بارگذاری های مختلف بر روی شینها میباشد برای این بخش N1 سناریو تهیه می‌شود. توجه شود که به لحاظ سناریوهای بارگذاری مختلف در بخش اطلاعات شبکه ۴ سطح بار برای شبکه در نظر گرفته شده است.

برای مدلسازی اثرات طوفان و سیلاب، شبکه توزیع مورد مطالعه بر اساس مسیر طوفان که از روی پروفیل های باد در منطقه مورد مطالعه قابل استخراج و محل های با احتمال وقوع سیلاب با توجه به مکانهای جغرافیایی پایه های خطوط برق، به ۵ ناحیه مطابق شکل ۳-۴ تقسیم بندی شده است. با فرض یکسان بودن شرایط آب و هوایی در یک ناحیه مشخص کلیه ی اجزای شبکه توزیع درون هر ناحیه در معرض شرایط مشابه آب و هوایی قرار دارند و این بدین معنی است که شکنندگی اجزای شبکه توزیع از جمله پایه ها و هادی ها در هر ناحیه یکسان است.



(آ)



(ب)

شکل ۳-۴: آرایش پایه شبکه ۳۳ شینه: (آ) با بسته بودن تمام کلیدهای NC کاندید و باز بودن تمام کلیدهای NO

کاندید و (ب) تقسیم بندی نواحی

بر اساس این تقسیم بندی ناحیه ۱ بخشی از شبکه توزیع را پوشش می دهد که در داخل شهر قرار داشته و بدلیل محصور بودن و وجود بافت شهری و ساخت و سازهای اطراف شبکه، باد و طوفان به طور کلی تأثیر کمی بر روی هادیها و پایه های شبکه توزیع می گذارد در این ناحیه یک منبع تولید پراکنده گاز سوز در باس شماره ۲۲ با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. ناحیه ۲ مربوط به بخشی از شبکه که از یک طرف محصور بوده و تأثیر باد و طوفان نسبت به حالت قبل بیشتر می باشد. در ناحیه ۳ شبکه از هیچ سمتی محصور نبوده و کاملاً در فضای باز قرار دارد. در این ناحیه مزعه فتوولتائیک با ظرفیت ۵۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است بنابراین در این ناحیه تأثیر باد و طوفان زیاد می باشد. ناحیه ۴ مربوط به قسمتی از شبکه توزیع است که پایه های شبکه در رودخانه واقع گردیده است و برای این ناحیه تأثیر باد و طوفان ناچیز بوده اما خطر وقوع سیلاب می تواند به طور جدی بر روی پایه های شبکه تأثیر گذار باشد. در ناحیه ۵ پایه های شبکه در نواحی کوهستانی قرار گرفته بنابراین خطوط برق در این ناحیه به طور جدی از تأثیرات طوفان در طول دوره رنج خواهند برد. هر یک از نواحی مشخص شده در شکل ۳-۴ (ب) دارای مشخصه سیلاب و باد به شرح جدول ۴-۶ هستند.

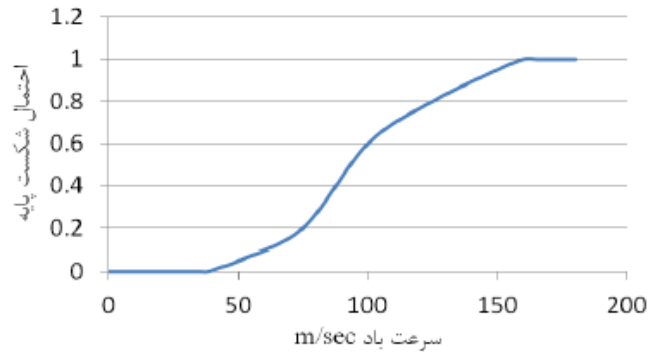
جدول ۴-۶: مشخصات آب و هوایی نرمال نواحی مورد مطالعه

شماره ناحیه	سرعت باد (m/s)	سرعت سیلاب (m/s)
۱	۲۶	-
۲	۲۸	-
۳	۳۰	-
۴	۲۸	۲۰
۵	۳۶	-

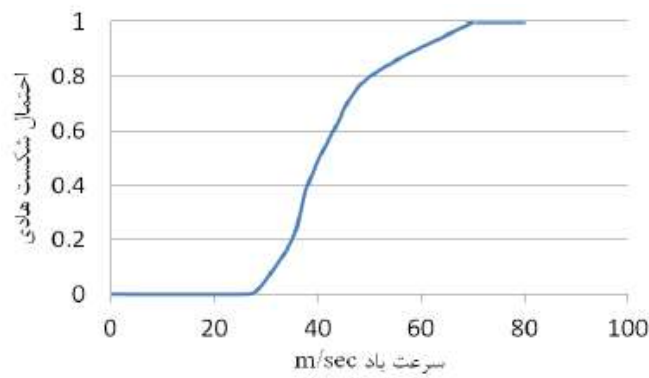
اطلاعات بدست آمده از شرایط آب و هوایی نواحی مورد مطالعه و وابستگی احتمال شکست تجهیزات شبکه با شدت رویداد آب و هوایی، که میتوان از روی سوابق و بررسی یک مطالعه آماری مربوط به احتمال شکست تجهیزات با سرعت باد و سیلاب در منطقه مورد مطالعه استخراج کرد، منحنیهای شکنندگی را می توان بدست آورد.

شکل (۳-۵) شکنندگی پایه در مقابل باد، هادی در مقابل باد و پایه در مقابل سیلاب را برای منطقه مورد مطالعه نشان می دهد. در اینجا فرض بر این است که پایه های شبکه توزیع از نوع بتنی چهارگوش بوده و به ازای هر ۶۰ متر یک پایه وجود دارد، که در طول یک سکشن به صورت سری متصل می شوند، بنابراین فروریختن یک پایه به تنهایی منجر به شکست کل سکشن خواهد گردید.

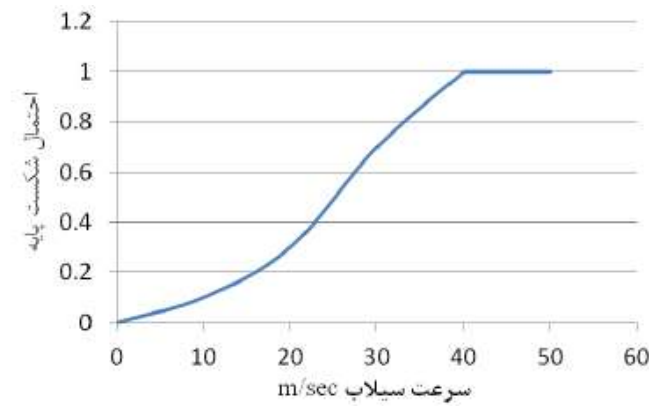
با توجه به توضیحات بالا میتوان گفت کدام خطوط آسیب پذیرتر هستند تا در نتیجه جایابی سویچ ها را متناسب با آنها انجام داد.



(آ)



(ب)



(پ)

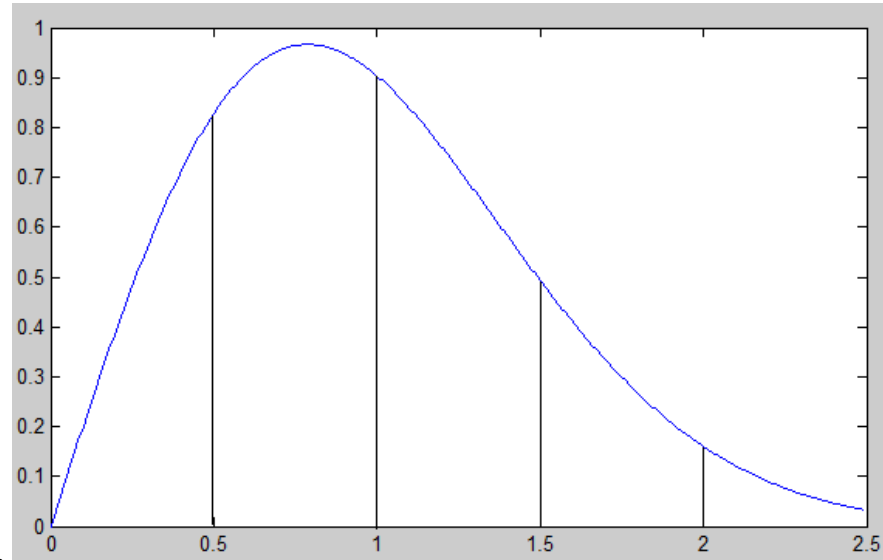
شکل ۴-۵: (آ) شکنندگی پایه در مقابل باد، (ب) هادی در مقابل باد و (پ) پایه در مقابل سیلاب

تهیه سناریوهای مختلف طوفان و سیلاب که باعث خروج خطوط می گردد. برای اختلال N2 سناریو تهیه می شود. در اینجا برای وقوع حالت‌های مختلف طوفان و سیلاب سناریوهایی تولید می گردد. برای این منظور منحنی توزیع احتمال سرعت باد و منحنی توزیع احتمال سرعت سیلاب ارائه شده و از روی این منحنی‌ها سناریوهای سرعت باد و سرعت سیلاب تولید می گردد.

در این پژوهش، پیش‌بینی سرعت متوسط باد، توسط توزیع وایبول مدل‌سازی شده است که به صورت رابطه (۴-۱) بیان می‌شود:

$$f(v) = (k/c)(v/c)^{(k-1)}e^{-(v/c)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (1-4)$$

در تابع چگالی احتمال سرعت باد که در رابطه (۴-۱) توسط توزیع وایبول شرح داده شد، v سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه و k و c مقادیر ثابت بدون واحدی هستند که که k فاکتور شکل و c فاکتور مقیاس است. به منظور سادگی، تابع توزیع احتمال سرعت باد بر حسب سرعت میانگین نرمالیزه شده است. این منحنی به ۵ قسمت مساوی تقسیم شده و هر قسمت بیان کننده یک سناریو است. بنابراین، منحنی توزیع را می‌توان در فواصل مشخص گسسته فرض کرد. تعداد نقاط انتخابی وابسته به دقت مورد نظر است. احتمال هر فاصله به کمک نرم افزارهای مربوطه به سادگی قابل محاسبه است. بنابراین در شکل ۴-۶ توزیع سرعت باد ۵ مرحله‌ای نشان داده شده است.



شکل ۴-۶: منحنی تکه‌ای توزیع احتمال سرعت باد

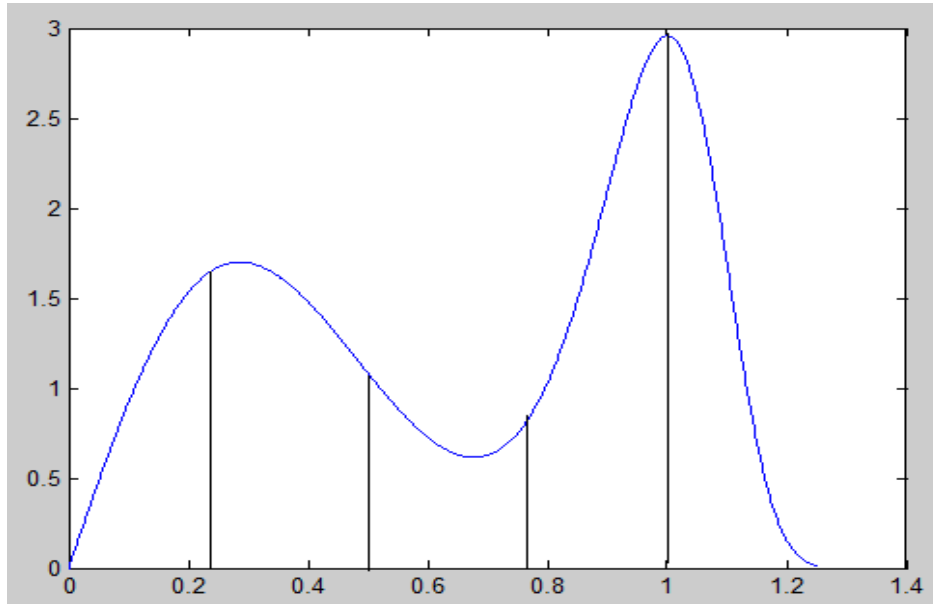
در این قسمت از توزیع وایبول دوپل طبق معادله (۳-۴) استفاده شده است.

$$f(g) = \omega(k_1/c_1)(g/c_1)^{(k_1-1)} e^{-(g/c_1)^{k_1}} + (1 - \omega)(k_2/c_2)(g/c_2)^{(k_2-1)} e^{-(g/c_2)^{k_2}} \quad (۳-۴)$$

$$; 0 < g < \infty$$

در رابطه فوق g بیانگر سرعت سیلاب بر حسب متر بر ثانیه، c_1 و c_2 فاکتور مقیاس، k_1 و k_2 فاکتور شکل و ω فاکتور وزن می‌باشند.

توزیع سرعت سیلاب نیز همانند نمودار توزیع سرعت باد، می‌تواند گسسته فرض شود. در شکل ۴-۷ نمونه‌ای از موضوع ذکر شده با توزیع سرعت سیلاب ۵ تکه نشان داده شده است.



شکل ۴-۷: منحنی تکه‌ای شده توزیع احتمال سرعت سیلاب

سناریوهای سرعت باد نیز در جدول ۴-۷ ارائه شده‌اند که احتمالات مربوطه عبارتند از: ۰/۱۸۱۷۱، ۰/۳۷۲۲۱،

۰/۲۸۵۱۲، ۰/۱۲۴۰۱ و ۰/۰۳۳۴۸.

جدول ۴-۷: سناریوهای باد

شماره سناریو	سرعت باد
1	0.00
2	17
3	43
4	75
5	110

سناریوهای سرعت سیلاب در جدول ۴-۸ ارائه شده‌اند که احتمالات مربوطه عبارتند از: ۰/۱۱۸۰۹، ۰/۲۷۸۷۵، ۰/۲۸۳۹۸، ۰/۱۹۲۶۴ و ۰/۱۱۹۷۱.

جدول ۴-۸: سناریوهای سرعت سیلاب

سناریو	سرعت سیلاب
1	0.00
2	8.80
3	23.20
4	37.60
5	40.00

بنابراین ۲۵ سناریو حادثه و ۴ سناریوی بار که در مجموع ۱۰۰ سناریو رخداد خواهیم داشت که احتمال سناریوهای بار با هم برابر و احتمال سناریوهای سرعت باد و سیلاب هم طبق آنچه ارائه شد به سادگی با ضرب شدن در هم سناریوهای ترکیبی را می‌توانند تشکیل دهند. نتایج مطالعه بر روی این شبکه شامل حالت‌های شدنی، تابع هدف هر یک، هزینه لازم برای رسیدن به هر یک (هزینه فیدر ارتباطی و کلید لازم).

برای این شبکه ۴۸ حالت شدنی (FN) داریم که آرایش باز و بسته بودن خطوط طبق جداول ۴-۱۰ تا ۴-۱۵ ارائه شده است. در واقع فرض شده است بر روی تمامی خطوط می‌توان کلید قرار داد، لذا ۳۲ نقطه کاندید برای نصب کلیدها مد نظر است.

۴۸ حالت فقط و فقط حالت‌های ممکن هستند که شبکه شعاعی باشد به عنوان حالات کاندید در نظر گرفته شده‌اند اما در مطالعه در خلال انتخاب آرایش‌های کاندید پخشبار گرفته شده است تا وضعیت ولتاژ باس و جریان خطوط چک شوند.

این جدول همانطور که ذکر شد حالت‌های ممکن برای شبکه هستند تا شبکه شعاعی باشد، و عدد صفر به معنی باز بودن آن شماره فیدر است نه خطا روی آن فیدر لازم به ذکر است که برای این جدول هنوز هیچ خطایی به شبکه اعمال نشده و این‌ها فقط حالات شبکه هستند و چند خطایی در ادامه مطالعه اعمال و نتیجه جایابی کلید طبق آن انجام شده است.

مقادیر توابع تاب‌آوری هر یک از حالات شدنی ۴۸ گانه فوق در جدول ۴-۱۵ ارائه می‌گردد..

جدول ۴-۱۵: مقادیر شاخص‌های تاب‌آوری برای هر یک از حالت‌های شدنی

شماره FN	1	2	3	4	5	6	7	8
DRI	4.25	5	5	4.25	5	5	4.5	4.5
AR	0.88	0.75	0.75	1	0.5	0.5	0.83	0.83
شماره FN	9	10	11	12	13	14	15	16
DRI	5	4.5	4.75	4	4.5	4.75	4.75	4.75
AR	1	0.158	0.916	0.679	0.032	0.950	0.490	0.655
شماره FN	17	18	19	20	21	22	23	24
DRI	4.75	4.5	4.75	4.25	4.75	4	4	4.5
AR	0.22	0.55	0.24	0.35	0.75	0.93	0.79	0.69
شماره FN	25	26	27	28	29	30	31	32
DRI	4	4.25	4	4.25	4.75	4	4.25	4.25
AR	0.83	0.00	0.80	0.87	0.51	0.42	0.90	0.10
شماره FN	33	34	35	36	37	38	39	40
DRI	4.5	4	4.5	4	4.5	4.5	4	4
AR	0.35	0.65	0.18	0.49	0.79	0.88	0.23	0.31
شماره FN	41	42	43	44	45	46	47	48
DRI	4.75	4.25	4.25	4.5	4.5	4.75	4.25	4.75
AR	0.11	0.22	0.26	0.24	0.62	0.91	0.72	0.89

مقدار DRI بر حسب انرژی (kwh) است.

همانطور که در قسمت‌های قبل عنوان شد، در این پایان نامه دو تابع هدف تاب آوری و دو تابع هدف هزینه در نظر گرفته شده است. حال برای حالت پایه شبکه بدون وجود کلیدهای مانور و امکان تغییر آرایش شبکه برای هر یک از N1 سناریو بهره برداری تمانی N2 حادثه را اعمال کرده و میزان تاب آوری شبکه را محاسبه می‌کنیم. برای ۴ سطح بار و ۲۵ سناریوی رخداد حادثه در حالت پایه شبکه تاب آوری محاسبه شده است که مطابق جدول ۴-۱۵ برای AR و DRI است.

جدول ۴-۱۶: مقدار شاخص‌های تاب آوری (AR) برای حالت پایه آرایش شبکه برای ۴ سناریوی بار و ۲۵ سناریوی

حادثه

0.8888	0.8184	0.9064	0.8800
0.7324	0.6744	0.7469	0.7251
0.4764	0.4387	0.4858	0.4717
0.2204	0.2030	0.2248	0.2182
0.1778	0.1637	0.1813	0.1760
0.7881	0.7256	0.8037	0.7803
0.6494	0.5979	0.6622	0.6429
0.4224	0.3889	0.4308	0.4182
0.1954	0.1800	0.1993	0.1935
0.1576	0.1451	0.1607	0.1561
0.6340	0.5838	0.6466	0.6277
0.5224	0.4810	0.5328	0.5173
0.3398	0.3129	0.3466	0.3365
0.1572	0.1448	0.1603	0.1557
0.1268	0.1168	0.1293	0.1255
0.4444	0.4092	0.4532	0.4400
0.3662	0.3372	0.3734	0.3626
0.2382	0.2193	0.2429	0.2358
0.1102	0.1015	0.1124	0.1091
0.0889	0.0818	0.0906	0.0880
0.2370	0.2182	0.2417	0.2347
0.1953	0.1798	0.1992	0.1934
0.1270	0.1170	0.1296	0.1258
0.0588	0.0541	0.0599	0.0582
0.0474	0.0436	0.0483	0.0469

جدول ۴-۱۷: مقدار شاخص‌های تاب آوری (DRI) برای حالت پایه آرایش شبکه برای ۴ سناریوی بار و ۲۵ سناریوی

حادثه

4.2925	3.9525	4.3775	4.2500
5.0480	4.6481	5.1479	4.9980
6.2842	5.7865	6.4087	6.2220
7.5205	6.9248	7.6694	7.4460
7.7265	7.1145	7.8795	7.6500
4.7790	4.4005	4.8736	4.7317
5.6201	5.1749	5.7314	5.5644
6.9964	6.4423	7.1350	6.9272
8.3728	7.7096	8.5386	8.2899
8.6022	7.9208	8.7725	8.5170
5.5230	5.0856	5.6324	5.4683
6.4951	5.9806	6.6237	6.4308
8.0857	7.4452	8.2458	8.0056
9.6763	8.9099	9.8679	9.5805
9.9414	9.1540	10.1383	9.8430
6.4388	5.9288	6.5663	6.3750
7.5720	6.9722	7.7219	7.4970
9.4263	8.6797	9.6130	9.3330
11.2807	10.3872	11.5041	11.1690
11.5898	10.6718	11.8193	11.4750
7.4403	6.8510	7.5877	7.3667
8.7498	8.0568	8.9231	8.6632
10.8926	10.0299	11.1083	10.7848
13.0355	12.0030	13.2936	12.9064
13.3926	12.3318	13.6578	13.2600

همانطور که به کررات ذکر شد در این پایان نامه از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مقدار هر یک از پارامترهای الگوریتم بهینه سازی به صورت جدول ۴-۱۸ انتخاب شده است.

جدول ۴-۱۸: پارامترهای الگوریتم ژنتیک

0.9	C _{Ratio}	100	N _{pop}
0.1	M _{Ratio}	50	N _{rep}
		150	Max It

در این بخش لازم است کروموزمهای طراحی شده برای جایابی کلیدها تعیین و سپس نحوه اعمال عملیات *mutation* و *crossover* مشخص گردد. با توجه به اینکه هر ۳۲ خط شبکه کاندیدای نصب کلید هستند لذا کروموزمها به صورت آرایه های برداری به طول ۳۲ در نظر گرفته شده است که هر یک از ژن های آن می تواند ۱ یا ۰ باشد که در آن ۱ به معنی نصب کلید در فیدر هم شماره ژن مربوطه و ۰ به معنی عدم نصب کلید در خط مربوطه است.

با توجه به اینکه طول آرایه ها نسبتا بلند است لذا عملیات *crossover* به صورت ۲ نقطه ای انجام شده است. فرض کنید $|X_d|$ اندازه بردار X_d (کروموزم) است. a و b بیانگر افراد انتخاب شده از جمعیت برای عمل ترکیب و C_1 و C_2 نیز نقاط تزویج را نشان می دهند. همچنین *ceil* دستوری در *MATLAB* برای تبدیل یک عدد اعشاری به کوچک ترین عدد صحیح بزرگ تر از آن و *rand* عددی تصادفی بین صفر و یک است. معادلات (۲-۴) و (۳-۴) جفت کروموزوم های والد X_2 و X_3 را به ترتیب، قبل و بعد از عمل ترکیب نشان می دهند.

$$\begin{array}{l}
 X_2 = [2, 2, 1, 3, 1 \quad 3, 2, 3, 1, 2 \quad 3, 1, 4, 3, 0] \\
 \begin{array}{ccc}
 \uparrow \text{ i } \downarrow & \text{ ii } & \uparrow \text{ iii } \downarrow \\
 \text{ iv } & \text{ v } & \text{ vi}
 \end{array} \\
 X_3 = [1, 3, 3, 1, 2 \quad 2, 1, 0, 1, 0 \quad 1, 3, 0, 0, 3]
 \end{array} \tag{۲-۴}$$

$$X'_2 = [\overbrace{1,3,3,1,2}^{\text{IV}} \underbrace{3,2,3,1,2}_{\text{II}} \overbrace{1,3,0,0,3}^{\text{VI}}] \quad (4-3)$$

$$X'_3 = [\underbrace{2,2,1,3,1}_I \overbrace{2,1,0,1,0}^{\text{V}} \underbrace{3,1,4,3,0}_{\text{III}}]$$

برای تولید فرزندان متفاوت با والدین خود و در نتیجه جلوگیری از گیر افتادن الگوریتم در نقاط بهینه محلی هر یک از افراد تولید شده توسط عملگر ترکیب (کروموزوم‌های فرزند) برای تشکیل نسل جدید در اختیار عملگر جهش قرار می‌گیرند. معمولا جهش با احتمال خیلی کوچک، تقریبا بین 0.001 تا 0.1 انتخاب می‌شود و اجرای آن در الگوریتم ژنتیک با کدینگ ده‌دهی مقداری مشکل‌تر است زیرا با مقادیر صحیح در هر بیت مواجه هستیم. بنابراین احتمال جهش بایستی بیشتر از مقادیر معمول انتخاب شود. بدین ترتیب در اینجا عملگر جهش با احتمال 0.1 ($P_m = 1/10$) کروموزوم مورد نظر را انتخاب و مقدار هر متغیر را به طور تصادفی یک واحد کاهش (در صورتی که ژن مربوطه 1 باشد) و یا یک واحد افزایش (در صورتی که ژن مربوطه 0 باشد) می‌دهد (معادلات 4-4 تا 4-5)). ضمن اجرای عملگر جهش، مقادیر هر کروموزوم بایستی از حد مجاز خود تجاوز نماید.

$$b = \text{ceil}(|N| \times \text{rand}) \quad (4-4)$$

$$c = \text{round}(2 \times \text{rand}) - 1 \quad (4-5)$$

$$X_o(a,b) = \begin{cases} X_o(a,b) + c & \text{if } (c \geq 0 \text{ and } X_o(a,b) \leq \bar{n}_i - c) \text{ or } (c < 0 \text{ and } X_o(a,b) \geq \underline{n}_i - c) \\ X_o(a,b) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{for } a = 1, 2, \dots, d \quad (4-6)$$

$$e = \text{ceil}(|L| \times \text{rand}) \quad (4-7)$$

$$X_o(a, |N| + e) = \begin{cases} X_o(a, |N| + e) + c & \text{if } (c \geq 0 \text{ and } X_o(a, |N| + e) \leq n_{ij}^{re} - c) \\ & \text{or } (c < 0 \text{ and } X_o(a, |N| + e) \geq n_{ij}^{rl} - c) \\ X_o(a, |N| + e) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{for } a = 1, 2, \dots, d \quad (4-8)$$

در روابط فوق، a بیانگر یکی از افراد جمعیت، c میزان جهش، و b و e متغیرهای انتخابی کروموزوم a برای عمل جهش هستند. round تابعی در MATLAB برای تقریب یک عدد اعشاری با یک عدد صحیح است. $|N|$ و

$|S|$ به ترتیب اندازه بردارهای N و S می‌باشند. روابط (۴-۹) و (۴-۱۰) کروموزوم فرزند X_2' را به ترتیب قبل و بعد از عمل جهش نشان می‌دهند.

$$X_2' = [1, 3, 3, 1, 2, 3, 2, 3, 1, 2, 1, 3, 0, 0, 3] \quad (۴-۹)$$

$$X_2'' = [1, 3, 2, 1, 2, 2, 2, 3, 1, 2, 2, 3, 1, 0, 3] \quad (۴-۱۰)$$

بعد از جهش و تولید نسل جدید، این روند دوباره با ارزیابی تابع هدف برای هر کروموزوم، تا زمانی که شرط پایان الگوریتم برآورده شود تکرار می‌شود.

۴-۳-۱ جایابی بهینه کلید

در این بخش بازیابی شبکه با در نظر گرفتن اتفاقات تشریح شده در بخش ۴-۲ انجام شده است. به عبارت بهتر با در نظر گرفتن ۲۵ اتفاق ممکن تحت ۴ سناریوی بار، آرایش بهینه برای هر حالت به لحاظ شاخص‌های تاب آوری و هزینه به کمک الگوریتم ژتیک تعیین شده است.

جدول ۴-۱۹: آرایش بهینه یافته شده برای هر یک از سناریوهای بار و حوادث

بار حادثه	1	2	3	4
1	4	2	5	35
2	12	11	5	19
3	17	4	16	1
4	31	34	3	2
5	5	4	16	33
6	5	4	3	17
7	33	2	33	15
8	5	36	19	5
9	4	15	32	1
10	33	16	35	15
11	5	34	4	46
12	32	33	36	15
13	1	34	17	36
14	16	14	1	34
15	5	19	15	31
16	16	2	36	11
17	13	2	12	32
18	1	20	5	20
19	3	20	3	5
20	5	12	5	12
21	15	3	15	12
22	31	17	4	14
23	13	12	1	13
24	12	2	19	19
25	31	11	34	34

برای داشتن تمام این آرایش‌های نیاز به نصب کلید در فیدرهای ۵، ۶، ۷، ۱۳، ۱۴، ۲۵، ۱۸ است.