

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه برق - قدرت

## برنامه ریزی توسعه چندمرحله‌ای پست‌های فوق توزیع با استفاده از روش خوشه‌بندی بار

سروش واحدی

استاد راهنما:

دکتر مهدی با نژاد

استاد مشاور:

دکتر محسن اصیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد

شهریورماه ۱۳۹۴

ب



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

شماره: ۷۱۴۰۹.ت.ب  
تاریخ: ۹۴/۰۶/۲۹  
ویرایش: -----

بسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای:

سروش واحدی رشته: مهندسی برق - قدرت گرایش: سیستمهای قدرت

تحت عنوان: برنامه ریزی توسعه چند مرحله ای پست های توزیع با استفاده از روش خوشه بندی بار

که در تاریخ ۹۴/۰۶/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: عالی) امتیاز: ۱۹/۵۶  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	مهدی بانزاد	دانشیار	
۲- استاد مشاور	محمّد اصلی	استاد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	محمد صفریان	استاد دیار	
۴- استاد منتحن	رحمت اله هردستمه	استاد	
۵- استاد منتحن	مرتضی رصینی	استاد	

رئیس دانشکده:

## تقدیم به پدر، مادر و خانواده ی عزیزم:

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه  
درخت پر بار وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا که  
این دو وجود پس از پروردگار مایه ی هستی ام بوده اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را  
در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

سروش واحدی

شهریور هزار و سیصد و نود و چهار - مشهد

### حمد سپاس ایزد منان که آفرینش را با

### تعلیم و تعلم همراه ساخت

ابتدا بر خودم وظیفه می‌دانم که از استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر مهدی بانژاد که صبورانه پشتیبان و راهنمای من در طی تحصیل در دانشکده‌ی مهندسی برق و رباتیک دانشگاه شاهرود بودند، تشکر کنم.

همچنین از کمک‌ها و راهنمایی بی‌دریغ جناب دکتر محسن اصیلی در طول انجام این پایان‌نامه کمال تشکر را دارم.

بعلاوه از همراهی همیشگی پسر دایی نازنینم جناب مهندس معین چوبینه صمیمانه تشکر می‌کنم.

در آخر، بر خود لازم می‌دانم که از همکاری شرکت برق منطقه‌ی خراسان و شرکت توزیع برق مشهد بخاطر در اختیار گذاشتن داده‌های مربوط به شبکه‌ی فوق توزیع و توزیع تشکر ویژه عرض نمایم. به ویژه از آقای مهندس وهاب رجایی و مهندس روح بخش که در این راستا صمیمانه همکاری نمودند.

سروش واحدی

شهریور هزار و سیصد و نود و چهار – مشهد

# تعهد نامه

اینجانب ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته .....

دانشکده ..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه .....

..... تحت راهنمایی ..... متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## چکیده

برنامه‌ریزی توسعه‌ی پست‌فوق توزیع یک مسئله بسیار پیچیده‌ای است، که هدف از حل آن، تعیین تعداد، مکان، ظرفیت، و حوزه‌ی سرویس‌دهی بهینه‌ی پست‌ها با در نظر گرفتن انواع قیود فنی از جمله، افت ولتاژ، ظرفیت بارگیری پست‌ها، حد حرارتی فیدرها و شعاعی بودن شبکه‌ی فشار متوسط در کمترین هزینه‌ی ممکن است. در این پایان‌نامه دو روش ابتکاری ترکیبی جدیدی بر مبنای خوشه‌بندی برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع ارائه شده است، بطوریکه مسئله برنامه‌ریزی در دو مرحله: (۱) مکان‌یابی بهینه‌ی پست و (۲) تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی بهینه، حل می‌کنند. در روش اول، الگوریتم خوشه‌ی بندی k-means توسط وارد کردن توان مصرفی بارها بصورت یک ضریب وزنی در محاسبه میانگین هر خوشه، توسعه داده شده است، تا مکان پست‌ها بدون نیاز به مکان‌های کاندید از پیش تعیین شده جایی نزدیک به بارها بزرگتر قرار گیرند. در مرحله‌ی بعد، برنامه‌ریزی دینامیکی جهت تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی بهینه‌ی پست‌ها بر مبنای اولویت اتصال بارها بکار گرفته شده است. در این راستا، تابع هزینه‌ی اتصال جدیدی که شامل هزینه‌ی توسعه ظرفیت پست علاوه بر هزینه‌های شبکه فشار متوسط است، تعریف شده است، تا در یک رویکرد جدید بارها به پست‌هایی متصل شوند که نیاز به توسعه ظرفیت خود نداشته باشند، و بدین ترتیب، از حداکثر پتانسیل موجود شبکه در روند تخصیص بارها استفاده شود و به‌نوعی مدیریت‌داری انجام گیرد. در روش دوم، شیوه‌ای برای برنامه‌ریزی توسعه پست برای شبکه‌های واقعی بزرگ توسط تجزیه کردن هدفمند منطقه‌ی برنامه‌ریزی به نواحی مجزای کوچک ارائه شده است، بطوریکه مکان‌یابی بهینه‌ی پست‌ها برای هر ناحیه بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، توسط الگوریتم توسعه یافته‌ی رقابت استعماری مبتنی بر خوشه‌بندی k-means (ICA-KCT) انجام می‌شود. با توسعه و تطبیق عملگرهای اصلی الگوریتم رقابت استعماری (عملگرهای جذب و انقلاب)، مسئله گسسته بهترین ترتیب اولویت اتصال بارها، توسط الگوریتم رقابت استعماری گسسته برای تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها حل شده است. در این راستا، برای مقاوم‌سازی الگوریتم، از روش ابتکاری اولویت‌بندی تقریبی جهت اعمال عملگر انقلاب در روند حل مسئله استفاده شده است. در نهایت، روش‌های پیشنهادی برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه‌ی پست فوق توزیع برای یک شبکه تست نمونه و شبکه فوق توزیع مشهد اعمال می‌شود. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، کارایی و توانمندی روش‌های پیشنهادی را تأیید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم رقابت استعماری، برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع، خوشه بندی k-means.

مقالات مستخرج از پایان نامه :

پذیرفته شده:

1. Optimal location, sizing and allocation of sub-transmission substation using k-means algorithm S.Vahedi, M. Banejad, M. Assili, Accepted in IEEE Power and Energy Society General meeting (PES GM), 2015.

2. Pseudo-dynamic substation expansion planning using hybrid heuristic and genetic algorithm, S.Vahedi, M. Banejad, M. Assili, Accepted in Fourth International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), in 2015.

۳. برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع توسط یک روش ابتکاری بر مبنای خوشه‌بندی، سروش واحدی، مهدی بانژاد و

محسن اصیلی، پذیرفته‌شده در بیست و سومین کنفرانس مهندسی برق ایران دانشگاه شریف.

در دست انجام:

5. A hybrid constructive heuristic and dynamic programming method serving pseudo-dynamic HV/MV substation expansion planning problem, S. Vahedi, M. Banejad, M. Assili, submitted to Electric Power Systems Research - Journal – Elsevier.

4. A new approach for multi-stage substation expansion planning in large scale network based on GIS analysis, S. Vahedi, M. Banejad, M. Assili, Under writing.



## فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۲-۱-۱	مقدمه
۲-۱-۲	اهداف پروژه
۳-۱-۳	ساختار گزارش

## فصل دوم: مقدمه‌ای بر برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع و مروری بر کارهای

۷	انجام‌شده
۲-۱-۱	مقدمه
۲-۲-۲	سیستم فوق توزیع قدرت
۳-۲-۳	برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع
۲-۳-۱	مشخصه‌ها و معیارهای برنامه‌ریزی
۲-۳-۲	اهداف برنامه‌ریزی توسعه پست فوق‌توزیع
۴-۲-۴	پیشینه تحقیق
۲-۴-۱	روش برنامه‌ریزی ریاضی
۲-۴-۲	روش‌های ابتکاری و فوق-ابتکاری
۵-۲-۵	مروری بر کارهای انجام‌شده در زمینه برنامه‌ریزی سیستم توزیع
۲-۵-۱	مدل‌های برنامه‌ریزی بدون در نظر داشتن مشخصه قابلیت اطمینان
۲-۵-۲	مدل‌های برنامه‌ریزی با در نظر داشتن قابلیت اطمینان
۳-۵-۳	رویکردهای جدید در برنامه‌ریزی توسعه پست و سیستم توزیع
۶-۲-۶	چالش‌های پیشروی حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع
۷-۲-۷	نتیجه‌گیری

## فصل سوم: برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع توسط روش ترکیبی k-

۳۷	means و برنامه‌ریزی دینامیکی
۳-۱-۱	مقدمه
۳-۲-۲	روش بهینه‌سازی
۳-۳-۳	تشریح تابع هدف و قیود مسئله
۳-۳-۱	قیود مسئله
۴-۳-۴	مکان‌یابی بهینه پست‌ها توسط الگوریتم k-means
۳-۴-۱	تشریح الگوریتم استاندارد k-means
۳-۴-۲	توسعه الگوریتم استاندارد k-means برای مکان‌یابی بهینه پست‌ها
۵-۳-۵	تعیین حوزه سرویس‌دهی و ظرفیت پست
۳-۵-۱	روش حل مسئله تخصیص بارها توسط برنامه‌ریزی دینامیکی

- ۶۳-۶- روند انتخاب نوع فیدر در طول بهینه‌سازی ..... ۶۵
- ۳-۷- نتیجه‌گیری ..... ۶۶

### فصل چهارم: یک روش جدید برای برنامه‌ریزی چند-مرحله‌ای توسعه

- ۶۹ پست‌فوق توزیع در یک شبکه بزرگ واقعی، تحت آنالیز GIS
- ۴-۱- مقدمه ..... ۷۰
- ۴-۲- روش بهینه‌سازی ..... ۷۲
- ۴-۳- ایجاد بخش‌های الکتریکی نامنظم کوچک ..... ۷۴
- ۴-۴- مکان‌یابی بهینه پست‌های فوق توزیع توسط الگوریتم توسعه‌یافته ICA-KCT ..... ۷۶
- ۴-۴-۱- الگوریتم رقابت استعماری (ICA) ..... ۷۹
- ۴-۴-۲- الگوریتم ترکیبی ICA-KCT برای مکان‌یابی ..... ۸۳
- ۴-۴-۳- آماده‌سازی نقشه رستری و ارزیابی مکان پست‌ها ..... ۸۶
- ۴-۵- تعیین حوزه‌سرویس دهی توسط الگوریتم گسسته ICA ..... ۸۸
- ۴-۶- تجزیه منطقه برنامه‌ریزی به نواحی مجزا ..... ۹۱
- ۴-۶-۱- ترتیب حل نواحی و تعیین پست‌های مشترک بین ناحیه‌ای ..... ۹۵
- ۴-۷- نتیجه‌گیری ..... ۹۸

### فصل پنجم: شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

- ۵-۱- مقدمه ..... ۱۰۲
- ۵-۲- برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای سیستم نمونه ..... ۱۰۳
- ۵-۲-۱- نتایج شبیه‌سازی برای روش اول: K-means و برنامه‌ریزی دینامیکی ..... ۱۰۵
- الف. حالت اول: هیچ پست موجودی در شبکه وجود ندارد ..... ۱۰۶
- ب. حالت دوم: هیچ کدام از پست‌های موجود قابلیت توسعه ظرفیت ندارند ..... ۱۱۴
- ج. حالت سوم: پست‌های موجود قابلیت توسعه ظرفیت دارند ..... ۱۱۸
- ۵-۲-۲- برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای حالت سوم از سیستم نمونه توسط روش دوم: ICA-KCT و DICA ..... ۱۲۳
- ۵-۳- برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای شبکه مشهد توسط روش دوم: ICA-KCT و DICA ..... ۱۲۸
- ۵-۳-۱- تهیه نقشه رستری ..... ۱۳۱
- ۵-۳-۲- ایجاد بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۳۳
- ۵-۳-۳- تجزیه منطقه برنامه‌ریزی به نواحی کوچک ..... ۱۳۴
- ۵-۳-۴- مکان‌یابی بهینه و تعیین حوزه سرویس‌دهی برای نواحی مجزا ..... ۱۳۶

### فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۶-۱- نتیجه‌گیری ..... ۱۵۴
- ۶-۲- پیشنهادات ..... ۱۵۶

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) هزینه‌های سیستم قدرت [۱] ..... ۲
- شکل (۱-۲) ساختار کلی یک سیستم قدرت ..... ۹
- شکل (۲-۲) دسته‌بندی مدل‌های و روش‌های مختلف بکار گرفته‌شده در برنامه‌ریزی سیستم توزیع به‌صورت یک ساختار درختی [۳۸] ..... ۲۵
- شکل (۱-۳) فلوچارت حل مسئله توسعه پست‌فوق توزیع توسط روش ترکیبی پیشنهادی اول ..... ۴۳
- شکل (۲-۳) روند کلی الگوریتم k-means استاندارد ..... ۵۱
- شکل (۳-۳) ماتریس شاخص تلفات ..... ۵۵
- شکل (۴-۳) روند تخصیص بارها به پست‌ها بدون در نظر داشتن اولویت اتصال ..... ۵۸
- شکل (۵-۳) حداکثر برد مجاز تغذیه بار زام با پست‌ها ممکن جهت تخصیص آن بار ..... ۶۱
- شکل (۶-۳) نمای کلی از مراحل و حالت‌ها در برنامه‌ریزی دینامیکی تخصیص باربر مبنی اولویت اتصال ..... ۶۲
- شکل (۷-۳) تعیین حوزه ی سرویس‌دهی بارها بر مبنای اولویت اتصال با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی ..... ۶۴
- شکل (۸-۳) منحنی هزینه- جریان برای چهار نوع فیدر مختلف [۵۳] ..... ۶۶
- شکل (۱-۴) مجموعه عملیات مقدماتی واصلی حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای یک شبکه بزرگ، به روش پیشنهادی دوم ..... ۷۴
- شکل (۲-۴) ایجاد بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم ..... ۷۶
- شکل (۳-۴) نمایش حرکت یک کشور مستعمره به سمت استعمارگر طی عمل جذب [۱۱] .. ۸۱
- شکل (۴-۴) فلوچارت روند کلی الگوریتم رقابت استعماری [۱۱, ۳۵] ..... ۸۲
- شکل (۵-۴) ساختار یک کشور نمونه در الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری با الگوریتم k-means (ICA-KCT) ..... ۸۴
- شکل (۶-۴) تقسیم‌بندی شبه‌منظم برای نقشه رستری ..... ۸۷
- شکل (۷-۴) ساختار یک کشور نمونه برای الگوریتم رقابت استعماری گسسته برای تعیین بهترین ترتیب توالی ..... ۸۹
- شکل (۸-۴) روند انجام عمل جذب برای کشورهای شامل ۸ بار ..... ۹۰
- شکل (۹-۴) روند تجزیه کردن منطقه برنامه‌ریزی به نواحی مجزا ..... ۹۵
- شکل (۱۰-۴) نمایی از تقسیم‌بندی منطقه مطالعاتی به نواحی مجزا و پست‌ها مشترک بین ناحیه‌ای ..... ۹۸
- شکل (۱-۵) سیستم نمونه در سال مبنا و سال افق ..... ۱۰۴
- شکل (۲-۵) روند شبیه‌سازی برای روش اول (k-means و برنامه‌ریزی دینامیکی) ..... ۱۰۶

- شکل (۳-۵) هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۰۷
- شکل (۴-۵) هزینه‌های کل طرح برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۰۷
- شکل (۵-۵) تعداد پست‌ها برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۰۷
- شکل (۶-۵) بخش‌های الکتریکی شبه منظم کوچک برای منطقه برنامه‌ریزی سیستم نمونه ۱۰۹
- شکل (۷-۵) هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۰۹
- شکل (۸-۵) مقادیر مختلف هزینه‌های کل طرح برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۰۹
- شکل (۹-۵) تعداد پست‌های برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۱۰
- شکل (۱۰-۵) هزینه‌های کل طرح به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم و شبه منظم ..... ۱۱۰
- شکل (۱۱-۵) مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۱۲
- شکل (۱۲-۵) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۱۲
- شکل (۱۳-۵) مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۱۳
- شکل (۱۴-۵) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۱۴
- شکل (۱۵-۵) مقادیر مختلف هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۱۵
- شکل (۱۶-۵) مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع به روش اول برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم و شبه منظم ..... ۱۱۷
- شکل (۱۷-۵) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی به روش اول برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۱۷
- شکل (۱۸-۵) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی برای روش اول و برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۱۸

- شکل (۱۹-۵) مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها، حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم و شبه‌منظم ..... ۱۱۹
- شکل (۲۰-۵) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی برای روش اول و برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۱۹
- شکل (۲۱-۵) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی برای روش اول و برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۲۰
- شکل (۲۲-۵) مقایسه‌هزینه‌های حالت دوم و سوم از سیستم نمونه (با روش حل اول) ..... ۱۲۰
- شکل (۲۳-۵) هزینه‌های سرمایه‌گذاری پست در دو حالت در نظر گرفتن و در نظر نگرفتن مدیریت دارایی ..... ۱۲۱
- شکل (۲۴-۵) مکان و حوزه سرویس‌دهی پست‌ها، حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع به صورت شبه‌دینامیکی به روش اول برای حالت سوم از سیستم نمونه ..... ۱۲۳
- شکل (۲۵-۵) روند شبیه‌سازی به روش دوم (ICA-KCT و DICA) ..... ۱۲۴
- شکل (۲۶-۵) مکان و حوزه سرویس‌دهی پست‌ها، حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع به روش اول برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۲۵
- شکل (۲۷-۵) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی برای روش دوم و برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۲۵
- شکل (۲۸-۵) هزینه‌های مختلف طرح پیشنهادی توسط روش اول و دوم برای حالت سوم از سیستم نمونه ..... ۱۲۶
- شکل (۲۹-۵) روند همگرایی تابع هزینه در مکان‌یابی پست‌ها به روش ICA-KCT ..... ۱۲۷
- شکل (۳۰-۵) روند همگرایی تابع هزینه برای تعیین حوزه سرویس‌دهی بهینه به روش DICA ..... ۱۲۷
- شکل (۳۱-۵) حوزه‌ی شبکه فوق توزیع مشهود در یک نمای کلی با تفکیک حومه‌ها مختلف آن [۱۲] ..... ۱۲۹
- شکل (۳۲-۵) پست‌های فوق توزیع و توزیع موجود در شبکه فوق توزیع مشهود ..... ۱۲۹
- شکل (۳۳-۵) روند برنامه‌ریزی توسعه چندمرحله‌ای پست فوق توزیع برای شبکه فوق توزیع مشهود ..... ۱۳۰
- شکل (۳۴-۵) نقشه‌ی رستری برای منطقه برنامه‌ریزی ..... ۱۳۳
- شکل (۳۵-۵) بخش‌های الکتریکی شبه منظم برای سال افق ..... ۱۳۴
- شکل (۳۶-۵) مجموع حداقل تعداد تئوری پست‌ها تمام نواحی برای تعدادهای مختلف نواحی مجزا ..... ۱۳۵
- شکل (۳۷-۵) نواحی هفتگانه حاصل از تجزیه منطقه برنامه‌ریزی به نواحی مجزا توسط ICA-KCT ..... ۱۳۵

- شکل (۳۸-۵) روند همگرایی الگوریتم ICA-KCT در تجزیه کردن منطقه برنامه ریزی به نواحی  
مجزا ..... ۱۳۵
- شکل (۳۹-۵) حداقل تعداد تئوری پست برای نواحی مختلف ..... ۱۳۷
- شکل (۴۰-۵) خروجی نتیجه‌ی مکان‌یابی برای پنج ناحیه توسط الگوریتم ICA-KCT ..... ۱۳۷
- شکل (۴۱-۵) خروجی نتیجه‌ی مکان‌یابی برای ناحیه چهارم ..... ۱۳۸
- شکل (۴۲-۵) خروجی نتیجه‌ی مکان‌یابی پست‌های جدید توسط الگوریتم ICA-KCT برای  
سال افق (شبکه مشهد) ..... ۱۳۸
- شکل (۴۳-۵) منطقه برنامه‌ریزی به تفکیک هفت ناحیه همراه با مکان پست‌های جدید ..... ۱۴۱
- شکل (۴۴-۵) نتیجه تعیین حوزه سرویس‌دهی برای نواحی هفت‌گانه توسط الگوریتم DICA  
..... ۱۴۲
- شکل (۴۵-۵) درصد افت ولتاژ بخش‌های الکتریکی شبه منظم برای شبکه مشهد ..... ۱۴۳
- شکل (۴۶-۵) درصد بارگیری پست‌ها برای برنامه ریزی توسعه پست فوق توزیع برای شبکه  
مشهد در یک مرحله ..... ۱۴۵
- شکل (۴۷-۵) نتیجه برنامه‌ریزی برای شبکه مشهد در دوره اول ..... ۱۴۵
- شکل (۴۸-۵) نتیجه برنامه‌ریزی برای شبکه مشهد در دوره دوم ..... ۱۴۹
- شکل (۴۹-۵) نتیجه برنامه‌ریزی برای شبکه مشهد در دوره سوم ..... ۱۵۱

## فهرست جداول

- جدول (۱-۵) اطلاعات فنی و اقتصادی فیدرها [۱۲] ..... ۱۰۴
- جدول (۲-۵) اطلاعات فنی و اقتصادی ترانسفورماتور و پست‌ها [۱۲]، [۸] ..... ۱۰۴
- جدول (۳-۵) اطلاعات بارهای سیستم نمونه ..... ۱۰۵
- جدول (۴-۵) اطلاعات پست‌های فوق توزیع موجود برای سیستم نمونه ..... ۱۰۵
- جدول (۵-۵) نتایج نهایی برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به‌صورت استاتیک به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۱۲
- جدول (۶-۵) نتایج نهایی برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به‌صورت استاتیک به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۱۴
- جدول (۷-۵) نتایج نهایی برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به‌صورت استاتیک به روش اول برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های منظم ..... ۱۱۷
- جدول (۸-۵) نتایج نهایی برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع بصورت استاتیک به روش اول برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۱۸
- جدول (۹-۵) نتایج نهایی برنامه‌ریزی تک مرحله‌ای توسعه پست فوق توزیع به روش اول برای سیستم نمونه در حالت سوم با بخش‌های الکتریکی منظم ..... ۱۱۹
- جدول (۱۰-۵) نتایج نهایی برنامه‌ریزی تک مرحله‌ای توسعه پست فوق توزیع برای سیستم نمونه در حالت سوم با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۲۰
- جدول (۱۱-۵) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به روش اول برای سیستم نمونه برای حالت سوم در دوره اول ..... ۱۲۲
- جدول (۱۲-۵) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به روش اول برای سیستم نمونه برای حالت سوم در دوره دوم ..... ۱۲۲
- جدول (۱۳-۵) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به روش اول برای سیستم نمونه برای حالت سوم در دوره سوم ..... ۱۲۲
- جدول (۱۴-۵) نتایج نهایی برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای توسعه پست‌فوق توزیع به روش دوم برای سیستم نمونه در حالت سوم با بخش‌های الکتریکی شبه منظم ..... ۱۲۶
- جدول (۱۵-۵) پارامترهای الگوریتم ICA-KCT و DICA ..... ۱۲۷
- جدول (۱۶-۵) اطلاعات فنی پست‌های فوق توزیع موجود شبکه مشهد [۱۲] ..... ۱۳۱
- جدول (۱۷-۵) اطلاعات فنی و اقتصادی حاصل از برنامه‌ریزی توسعه تک‌مرحله‌ای برای شبکه مشهد ..... ۱۴۳
- جدول (۱۸-۵) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع مشهد در دوره اول ..... ۱۴۶
- جدول (۱۹-۵) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع مشهد در دوره دوم ..... ۱۴۷

جدول (۲۰-۵) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع مشهد در دوره سوم ..... ۱۴۹

جدول (۲۱-۵) هزینه‌های کل برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای توسعه پست فوق توزیع مشهد .... ۱۵۱



## فهرست علائم اختصاری

### مجموعه‌ها:

مجموعه‌ای شامل تمامی بارهای دوره زمانی $p$ برای منطقه ی برنامه‌ریزی.	$\Psi_p^{ln}$
مجموعه‌ای شامل شماره پست‌ها موجود و جدید در دوره ی $p$ ام از برنامه‌ریزی.	$\Psi_p^{sn}$
مجموعه‌ای شامل سال‌های $p$ امین دوره ی برنامه‌ریزی.	$\Psi_p^{yn}$
مجموعه‌ای شامل تمامی بارهای متعلق به پست $i$ ام در $p$ امین دوره از برنامه‌ریزی.	$\Psi_{p,i}^{sl}$
مجموعه‌ای از داده‌ها یا نقاط بار متعلق به خوشه ی $i$ ام.	$\Psi_i^{cl}$
مجموعه‌ای از داده‌ها متعلق به خوشه ی $i$ ام در تکرار $t$ ام.	$\Psi_i^{cl(t)}$
مجموعه‌ای از پست‌ها ممکن برای تغذیه ی بار $j$ ام در دوره ی $p$ ام.	$\Psi_{p,j}^{SS}$
مجموعه‌ای شامل زیر توالی بارها حالت $i$ ام در مرحله ی $n-1$ .	$\Psi_{(n-1),i}^{psln}$
تمامی بارهای متعلق به ناحیه $j$ ام از منطقه برنامه‌ریزی برای دوره زمانی $p$ .	$\Psi_{p,j}^{lnz}$

### متغیرها:

حداقل تعداد تئوری پست‌های منطقه‌ی برنامه‌ریزی در دوره‌ی $p$ .	$TMNS_p$
کل بار مصرفی مورد انتظار منطقه ی برنامه‌ریزی (برحسب MVA).	$TP_p$
مجموع ظرفیت‌های آزاد بارگیری تمامی پست‌های موجود (برحسب MVA).	$AEC_p$
توان مصرفی بار $j$ ام در $p$ امین دوره برنامه‌ریزی (برحسب MVA).	$S_{p,j}$

حداکثر ظرفیت ممکن $i$ امین پست موجود (برحسب MVA).	$S_i^{mc}$
ضریب ارزش کنونی	$PW^y$
کل هزینه طرح (برحسب \$).	$OF^{SSEP}$
هزینه کل رسیدن به حالت $z$ ام در مرحله $y$ ام، از حالت $i$ ام مرحله قبلی، در دوره $y$ ام از برنامه‌ریزی (برحسب \$).	$F_{p,n,j,i}^{cost}$
حداقل هزینه $y$ کل حالت $i$ ام مرحله $y-1$ در دوره $y$ ام از برنامه‌ریزی (برحسب \$).	$F_{p,n-1,i}^{Ump}$
مجموع هزینه‌های تمامی خوشه‌ها در دوره $y$ ام (برحسب \$).	$OF_p^{OSSP}$
مجموع فواصل اقلیدسی بین مراکز خوشه و داده‌ها متعلق به آنها برای $k$ خوشه (برحسب Km)	$OF_k^{km}$
مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای $i$ امین پست در $p$ امین دوره از برنامه‌ریزی (برحسب \$).	$InC_{p,i}^s$
مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای شبکه فشار متوسط یا پایین دست $i$ امین پست در $p$ امین دوره از برنامه‌ریزی (برحسب \$).	$InC_{p,i}^{dg}$
هزینه بهره‌برداری از $i$ امین پست در سال $y$ ام و $p$ امین دوره از برنامه‌ریزی (برحسب \$).	$OpC_{p,y,i}^s$
هزینه بهره‌برداری از شبکه فشار متوسط یا پایین دست $i$ امین پست در سال $y$ ام و $p$ امین دوره از برنامه‌ریزی (برحسب \$).	$OpC_{p,y,i}^{dg}$
مجموع هزینه‌های توسعه ظرفیت پست $i$ ام در دوره $y$ ام است (برحسب \$).	$ExC_{p,i}^s$
مجموع هزینه خرید و احداث فیدری که برای تغذیه $y$ بار $z$ انتخاب	$C_j^{Fcon}$

شده (برحسب \$).

هزینه‌ی اتصال بار $j$ ام به پست $i$ ام در دوره $p$ ام است (برحسب \$).	$CC_{p,ij}$
هزینه‌ی اتصال بار $j$ ام به مناسبترین پستش برای حالت $i$ ام در مرحله‌ی $n$ ام ( $s(j,i,n)$ ) در دوره‌ی $p$ ام از برنامه‌ریزی (برحسب \$).	$CC_{p,j,s(j,i,n)}$
مجموع هزینه‌ی خرید زمین برای پست‌های جدید $n$ ام در دوره‌ی $p$ ام (برحسب \$).	$LNP_{p,i}$
هزینه کل امپراطوری $n$ ام.	$T.C.n$
هزینه‌ی استعمارگر امپراطوری $n$ ام.	$C_n^{lm}$
میانگین مجموع هزینه‌های کشورهای مستعمره‌ی امپراطوریه $n$ ام.	$mean\{C_n^C\}$
مقدار مثبت کوچک.	$\xi$
تلفات آهنی ژامین ترانسفورماتور $i$ امین پست در $p$ امین دوره برنامه‌ریزی (برحسب KW).	$LP_{p,ij}^{ir}$
تلفات مسی نامی ژامین ترانسفورماتور $i$ امین پست در $p$ امین دوره برنامه‌ریزی (برحسب KW).	$LP_{p,ij}^{cu}$
مقدار توان اکتیوی که باید توسط پست $i$ ام به شبکه پایین دست یا فشار متوسط در $p$ امین دوره‌ی برنامه‌ریزی تزریق شود (برحسب MW).	$P_{p,i}^l$
ظرفیت $i$ امین پست در $p$ امین دوره‌ی برنامه‌ریزی (برحسب MVA).	$S_{p,i}^{Cap}$
توان مصرفی بار $j$ ام در $p$ امین دوره برنامه‌ریزی (برحسب MVA).	$S_{p,j}$
تلفات فیدر بین $n$ امین پست و $j$ امین بار در $p$ امین دوره‌ی برنامه‌ریزی	$PL_{p,ij}^f$

(برحسب MW).

فاصله اقلیدسی بین پست i ام و بار زام (برحسب km).	$d_{ij}$
مختصات جغرافیایی بار زام (برحسب km).	$xy_j^l$
مختصات جغرافیایی پست i ام (برحسب km).	$xy_i^c$
طول جغرافیایی بار زام (برحسب km).	$x_j^l$
عرض جغرافیایی بار زام (برحسب km).	$y_j^l$
طول جغرافیایی پست i ام (برحسب km).	$x_i^c$
عرض جغرافیایی پست i ام (برحسب km).	$y_i^c$
داده ورودی زام.	$X_j$
مرکز ثقل خوشه ی i ام.	$Y_i$
مرکز ثقل خوشه n ام در تکرار t ام.	$Y_n^{(t)}$
مرکز ثقل خوشه m ام در تکرار t ام.	$Y_m^{(t)}$
راکتانس فیدر بین زامین بار و i امین پست در دوره p از برنامه ریزی (برحسب $\frac{\Omega}{km}$ ).	$x_{p,ij}$
مقاومت فیدر تغذیه کننده ی بار زام در p امین دوره ی برنامه ریزی (برحسب $\frac{\Omega}{km}$ ).	$r_{p,ij}^f$
حداکثر برد مجاز برای بار زام در دوری p ام. (برحسب km)	$R_{p,j}^{\max}$
حداکثر جریان مجازی که می تواند از فیدر نوع $typ_j$ عبور کند که برای بار زام انتخاب شده است.	$I_{typ_j}^{\max}$
تعداد پست های جدید در دوره ی p ام.	$n_p^{ns}$

تعداد پست‌های موجود در دوره ی p ام.	$n_p^{es}$
تعداد کل پست‌ها یا خوشه‌ها در دوره ی p ام.	$k_p$
تلفات حاصل از اتصال بار زام به پست i ام است.	$IL_{ij}$
حداقل تعداد تئوری پست ناحیه ی زام در دوره ی p .	$TMNSz_{p,j}$
کل بار مصرفی مورد انتظار ناحیه زام (برحسب MVA).	$TPz_{p,j}$
مجموع ظرفیت‌های آزاد بارگیری ممکن تمامی پست‌های موجود ناحیه زام (بر حسب MVA)	$AEC_{p,j}$

## ثابت‌ها:

تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی.	$n^p$
حداکثر ظرفیت ممکن پست‌های جدید (برحسب MVA).	$S_{sub}^{max}$
حداکثر مقدار بارگیری پست است (برحسب درصد).	$\lambda^{max}$
درصد تلفات در شبکه فشار متوسط.	$\tau$
نرخ تورم.	$\eta^{Inf}$
نرخ بهره.	$\eta^{Int}$
هزینه تلفات انرژی در سال y ام (بر حسب \$/kwh).	$C_y^{EL}$
ضریب تلفات در p امین دوره از برنامه‌ریزی.	$lf_p$
ضریب قدرت.	$\cos \varphi$
کل ساعت‌های یک سال که برابر است با ۸۷۶۰ ساعت.	$T$
ضریب تصحیح فاصله.	$\kappa$
حداکثر مقدار بارگیری پست است (برحسب درصد).	$\lambda^{max}$

$\lambda^{\min}$  حداقل مقدار بارگیری پست است (برحسب درصد).

$\Delta V_{\max}$  حداکثر افت ولتاژ مجاز (برحسب درصد).

$r^{\max}$  مقاومت فیدری با حداکثر سطح مقطع ممکن ( $\frac{\Omega}{km}$ ).

$x^{\max}$  راکتانس فیدری با حداکثر سطح مقطع ممکن ( $\frac{\Omega}{km}$ ).

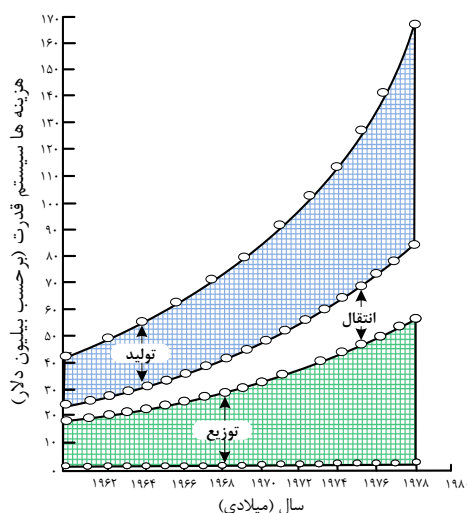
# فصل اول:

## مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

صنعت برق در سال ۱۸۸۲، هنگامی که اولین نیروگاه قدرت در شهر نیویورک بهره‌برداری شد، متولد گردید. با رشد بار، صنعت برق با سرعت خیلی زیادی رشد کرد و سیستم قدرت الکتریکی در کل آمریکا گسترش یافت. به‌طور کلی، یک سیستم قدرت الکتریکی از سه بخش تشکیل شده است: تولید، انتقال، توزیع که با توجه به شکل (۱-۱) ابتدا بیشترین سرمایه‌گذاری در بخش تولید است و بافاصله کمی از آن بخش توزیع قرار دارد. بنابراین، برنامه‌ریزی سیستم توزیع<sup>۱</sup> از اهمیت بالایی برخوردار است چراکه، بخش عمده‌ای از هزینه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد [۱].

با رشد بارهای الکتریکی، سیستم توزیع نیازمند توسعه خود جهت تأمین انرژی موردنیاز مصرف‌کننده در اقتصادی‌ترین شکل ممکن و باکیفیت و قابلیت اطمینان بالا است. این موضوع در کشورهای در حال توسعه از اهمیت دوچندان برخوردار است، زیرا که بارها به دلیل گسترش و توسعه سریع شهرها، با سرعت بیشتری در



شکل (۱-۱) هزینه‌های سیستم قدرت [۱]

<sup>1</sup> -Distribution system planning



حال رشد هستند. بنابراین نیاز به یک ابزار دقیق و کارآمد جهت انجام برنامه‌ریزی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بطوریکه بتواند بهترین ساختار از شبکه را در کم‌ترین هزینه طراحی نماید.

هدف از برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع، توسعه پست‌های موجود و اضافه کردن پست‌های جدید جهت تأمین بار موردنیاز آینده با کمترین هزینه می‌مکن است. این کار باید با در نظر گرفتن تمامی قیود فنی و عملی، ملاحظات اقتصادی متناسب با شرایط مسئله انجام گیرد، تا طرحی را فراهم آورد که بتواند در یک سطح مناسبی از قابلیت اطمینان و نوع سرویس‌دهی، توان مورد تقاضای آینده را تضمین نماید.

مجهولات مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع تعداد، مکان، ظرفیت پست‌های جدیدی، به‌علاوه ی مقدار توسعه ظرفیت پست‌های موجود و همچنین حوزه‌ی سرویس‌دهی<sup>۱</sup> مناسب برای تمامی پست‌ها است. از این‌رو، به دلیل وجود متغیرهای تصمیم‌گیری فراوان تحت قیود متنوع فنی همچون حداکثر ظرفیت بارگیری پست‌ها، افت ولتاژ، محدودیت‌های حرارتی فیدرها و شعاعی بودن شبکه فشار متوسط، برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع، یک مسئله بسیار پیچیده و مشکل است.

هزینه‌های برنامه‌ریزی توسعه‌ی پست‌فوق توزیع به‌طور عمده از دو بخش اصلی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و هزینه‌های بهره‌برداری تشکیل شده است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری شامل هزینه‌های احداث، خرید تجهیزات است، درحالی‌که هزینه‌های بهره‌برداری ناشی از تلفاتی است که در ترانسفورماتورها و خطوط فشار متوسط رخ می‌دهد. بنابراین طرحی قابل قبول است که درعین‌حالی که قیود مسئله را ارضا می‌کند دارای کمترین هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری باشد [۲].

تاکنون، روش‌های گوناگونی جهت حل این مسئله توسط محققین پیشنهاد شده است. این روش‌ها به‌طورکلی به دو روش ریاضی و ابتکاری تقسیم می‌شوند. روش‌های ریاضی، روش‌هایی مطمئن و دارای جواب قطعی هستند. اما از آنجاکه، برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها یک مسئله غیرخطی و غیر محدب است، استفاده از این روش‌ها مستلزم خطی‌سازی و به‌کارگیری تقریب‌هایی است که در بعضی موارد نمی‌توانند به‌اندازه‌ی کافی، دقیق و صحیح باشند؛ بنابراین، جواب‌های آنها منتهی به بهینه‌های محلی می‌شوند. از این

<sup>1</sup> - Associated service area

گذشته، مدل کردن ریاضی بعضی از محدودیت‌های فنی و به‌ویژه ملاحظات عملی، بسیار سخت و در بعضی مواقع ناممکن است. از این‌رو، در سال‌های اخیر روش‌های ابتکاری و فوق-ابتکاری بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است.

روش‌های ابتکاری نسبتاً نزدیک به آن چیزی هستند که مهندسين فکر می‌کنند و می‌توانند طرحی برمبنای تجربه و تحلیل را در اختیار برنامه‌ریزان قرار دهند. این روش‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری، سرعت بالا در محاسبات و هم‌چنین صریح بودنشان، توانایی رسیدن به جواب نسبتاً بهینه را دارند، اگرچه ممکن است به دلیل نادیده گرفتن بخش عمده‌ای از فضای جستجو به جواب بهینه نرسند. بدین‌سان، الگوریتم‌های فوق-ابتکاری یا شیوه‌های بهینه‌سازی تکاملی که توانایی در نظر گرفتن محدوده‌ی وسیع‌تری از جواب‌های ممکن را دارند مورد توجه قرار گرفتند. این روش‌ها می‌توانند در یک جستجوی هدفمند، در تکرارهای مختلف به سمت جواب بهینه حرکت کنند. بنابراین می‌توانند جواب‌های بهتری، نسبت به روش ابتکاری به دست بیاورند.

## ۱-۲- اهداف پروژه

اهداف اصلی این پروژه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ارائه یک روش ابتکاری ساده و سریع، برمبنای خوشه‌بندی در برنامه‌ریزی توسعه پست بدون نیاز به مکان‌های کاندید از پیش تعیین شده برای پست‌های جدید.
- به کارگیری الگوریتم رقابت استعماری مبتنی بر شیوه‌ی خوشه‌بندی k-means برای مکان‌یابی بهینه‌ی پست‌های فوق توزیع.
- به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی منطقه‌ی برنامه‌ریزی در ارزیابی محدودیت‌های جغرافیایی، مشخصه‌های اقتصادی برای احداث پست‌های جدید به صورت خودکار.
- انجام برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای یک شبکه‌ی واقعی بزرگ توسط تجزیه کردن

هدفمند منطقه‌ی برنامه‌ریزی به چندین ناحیه کوچک و حل هر ناحیه‌ی به صورت مجزا.

## ۱-۳- ساختار گزارش

این پایان‌نامه مشتمل بر شش فصل است، که فصل جاری به معرفی اجمالی مسئله برنامه‌ریزی سیستم توزیع پست‌فوق توزیع پرداخته است. علاوه بر آن، ضروریات و اهمیت انجام کار و درنهایت اهداف کلی انجام این تحقیق را بیان می‌کند. محتوای فصل‌های بعدی به شرح زیر است:

فصل دوم: مقدمه‌ای بر برنامه‌ریزی پست‌های فوق توزیع است؛ بطوریکه، به معرفی مشخصه‌ها، معیارها و اهداف مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع می‌پردازد. در نهایت، پیشینه مسئله برنامه‌ریزی سیستم توزیع، راهکارهای حل آن و کارهایی که تاکنون انجام شده است، معرفی می‌شود.

فصل سوم: در این فصل برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع در دو مرحله، بدون نیاز به مکان‌های کاندید از پیش تعیین شده، روشی ابتکاری که ترکیبی از روش خوشه‌بندی  $k$ -means و برنامه‌ریزی دینامیکی است، ارائه می‌شود.

فصل چهارم: در این فصل، رویکرد جدیدی در برنامه‌ریزی توسعه‌ی پست‌فوق توزیع برای یک شبکه بزرگ واقعی توسط الگوریتم توسعه‌یافته ترکیبی رقابت استعماری و خوشه‌بندی  $k$ -means، بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی منطقه در قالب نقشه‌ی رستری<sup>۱</sup> معرفی می‌شود. همچنین، برای تسهیل در روند بهینه‌سازی، روشی برای تقسیم منطقه‌ی برنامه‌ریزی به نواحی کوچک ارائه شده است.

فصل پنجم: در این فصل ابتدا، نتایج حاصل از اعمال روش‌های پیشنهادی ارائه‌شده در دو فصل سوم و چهارم برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع بر روی یک سیستم نمونه‌ی کوچک بررسی و تحلیل می‌شود. سپس، برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای (شبه‌دینامیکی) توسعه پست‌فوق توزیع، برای شبکه‌ی فوق توزیع و فشار متوسط مشهد و حومه‌های اطرافش انجام می‌گیرد.

<sup>1</sup> - Rastery map

---

فصل ششم: در این فصل، نتیجه‌گیری کلی بر تمام فصل‌های ارائه شده در این پایان‌نامه انجام می‌شود و در نهایت، برای توسعه‌ی تحقیق در زمینه‌ی برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع، راه‌کارهایی پیشنهاد می‌شود.

## **فصل دوم:**

**مقدمه‌ای بر برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق**

**توزیع و مروری بر کارهای انجام‌شده**

## ۲-۱- مقدمه

سیستم توزیع به‌طور کلی از چهار قسمت: پست‌های فوق توزیع<sup>۱</sup>، فیدرهای فشار متوسط یا اولیه<sup>۲</sup>، پست‌های توزیع<sup>۳</sup>، فیدرهای فشار ضعیف یا ثانویه<sup>۴</sup>، تشکیل شده است. اگر برنامه‌ریزی توسعه برای پست‌های فوق توزیع انجام گیرد، به آن برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع (SSEP)<sup>۵</sup> گویند، که هدف آن تعیین تعداد، مکان، زمان، ظرفیت، و حوزه ی سرویس‌دهی پست‌ها، در حالی است که تمامی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری تحت قیود مختلف فنی از قبیل افت ولتاژ، حد بارپذیری پست‌ها، حد حرارتی فیدرها، و شعاعی بودن شبکه فشار متوسط کمینه گردد. از آنجایی که پست‌های فوق توزیع، نقش واسط را میان سیستم انتقال و توزیع بازی می‌کنند، نتایج برنامه‌ریزی آن‌ها تأثیر قابل توجهی در برنامه‌ریزی دیگر بخش‌ها، مانند مسیریابی بهینه فیدرها و توسعه پست‌های انتقال دارد. این موضوع در کنار عوامل دیگر باعث شده تا محققین نگاه ویژه‌ای به حل این مسئله داشته باشند و برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع را به‌صورت مجزا از برنامه‌ریزی سیستم توزیع<sup>۶</sup> در نظر گرفته و انجام دهند.

## ۲-۲- سیستم فوق توزیع قدرت

در اصل، یک سیستم قدرت الکتریکی شامل سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع است، که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، سیستم توزیع به‌طور نوعی با پست‌های فوق

<sup>1</sup> - Subtransmission substation

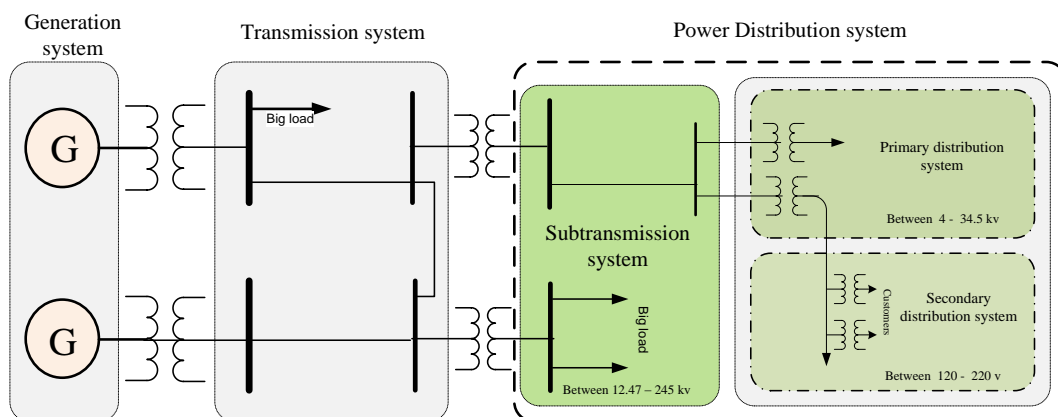
<sup>2</sup> - Primary feeders

<sup>3</sup> - Distribution substation

<sup>4</sup> - Secondary feeder

<sup>5</sup> - Subtransmission substation expansion planning (SSEP)

<sup>6</sup> - Distribution system planning (DSP)



شکل (۱-۲) ساختار کلی یک سیستم قدرت

توزیع شروع می‌گردد. پست‌های فوق توزیع<sup>۱</sup> توسط یک یا چند خط انتقال تغذیه می‌شود و از طریق یک یا چند فیدراولیه یا فشار متوسط، ترانسفورماتورهای توزیع<sup>۲</sup> (پست‌های توزیع<sup>۳</sup>) را تغذیه می‌کنند، که در نهایت این ترانسفورماتورها به وسیله فیدرهای ثانویه<sup>۴</sup> یا فشار ضعیف، مصرف‌کنندگان را تغذیه می‌کنند. در واقع، یک سیستم فوق توزیع، وظیفه دریافت انرژی الکتریکی از سیستم انتقال و توزیع این انرژی بین پست‌ها یا ترانسفورماتور توزیع را به عهده دارد.

سیستم فوق توزیع یک بخش مهم از سیستم قدرت الکتریکی است، زیرا این سیستم در نزدیکی به مصرف‌کننده نهایی قرار دارد و خطاها و خرابی‌های آن به طور مستقیم بر سرویس مصرف‌کنندگان اثر می‌گذارد. از اینرو، تأثیر این خطاها نسبت به خطاهای سیستم تولید و انتقال بر مصرف‌کننده بیشتر است. علاوه بر آن، سیستم فوق توزیع نیازمند هزینه سرمایه‌گذاری بسیار زیادی است، بطوریکه که بیش از ۶۰٪ از بودجه سرمایه‌گذاری و ۲۰٪ از هزینه بهره‌برداری کل سیستم قدرت را به خود اختصاص می‌دهد [۳]. به علت وجود مشخصه‌های خاص سیستم توزیع، این بخش نقش مهمی را در سیستم قدرت بازی می‌کند. سه هدف اصلی در عملکرد یک سیستم فوق توزیع وجود دارد [۴]:

<sup>1</sup> -Subtransmission substation

<sup>2</sup> -Distribution transformers

<sup>3</sup> -Distribution substation

<sup>4</sup> - Secondary feeders

(۱) تحویل توان به مصرف‌کنندگان در محل مصرف.

(۲) دستیابی به هدف اصلی اول با کمترین هزینه‌ی ممکن.

(۳) تضمین سطوح قابل قبول قابلیت اطمینان.

بنابراین، پست‌های فوق توزیع باید بوسیله فیدرهای اولیه توان را به ترانسفورماتورهای توزیع برای تأمین توان تقاضای مصرف‌کنندگان تحویل دهند لذا، این فیدرها باید دارای ظرفیت لازم و کافی جهت تأمین انرژی موردتقاضای مصرف‌کنندگان در تمام طول عمر خود باشند. از اینرو، برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع، یک کار بسیار دشوار برای برنامه‌ریزهاست، چراکه ترکیبی از چندین متغیر تصمیم‌گیری است که در سراسر حوزه‌ی سرویس‌دهی گسترده شده‌اند. این متغیرها باید به‌درستی انتخاب شوند تا سیستم فوق توزیع بتواند به‌درستی در سطح مناسبی از قابلیت اطمینان، پاسخگوی توان مورد تقاضای حوزه‌ی سرویس‌دهی خود باشد. بنابراین، با یک سیستمی بسیار به‌هم‌پیوسته و یکپارچه سروکار داریم. تصمیمات گوناگون در مورد انتخاب تجهیزات، محل نصب، ظرفیت، اندازه و حوزه سرویس‌دهی و غیره، به‌شدت به یکدیگر وابسته هستند. به این جهت، برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع یکی از چالش‌برانگیزترین مسئله در بحث برنامه‌ریزی شبکه قدرت است.

## ۲-۳- برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع

برنامه‌ریزی توسعه‌ی پست فوق توزیع برای تأمین و تضمین توان موردنیاز در حال رشد مصرف‌کنندگان یک امر الزامی است، که با توسعه ظرفیت پست‌های موجود و یا اضافه کردن پست‌ها و خطوط جدید تحت ملاحظات فنی و اقتصادی برای بهبود سطح سرویس‌دهی و کیفیت توان انجام می‌شود. به دلیل سخت بودن حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه برای شبکه‌های بزرگ واقعی در دوره‌های برنامه‌ریزی بلندمدت، برنامه‌ریزی توسعه سیستم توزیع معمولاً، به دو مسئله تقسیم می‌شود: برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع و مسیریابی



بهینه‌ی فیدرها<sup>۱</sup> [۲, ۳, ۵-۸]. اما در این میان برخی مطالعات به‌طور همزمان دو مسئله را حل کرده‌اند [۹-۱۱].

با توجه به افق برنامه‌ریزی، دو دوره‌ی زمانی [۴]: برنامه‌ریزی کوتاه-مدت<sup>۲</sup> و برنامه‌ریزی بلند-مدت<sup>۳</sup>، در برنامه‌ریزی سیستم‌های توزیع وجود دارد. هدف از برنامه‌ریزی کوتاه-مدت، توسعه سیستم موجود در یک بازه‌ی زمانی کوتاه برای دستیابی به سطحی قابل قبول از اطمینان، جهت تغذیه‌ی بارها در آینده‌ی نزدیک است، درحالی‌که هدف از برنامه‌ریزی بلند-مدت، تضمین تمامی اهداف و احتیاجات برنامه‌های کوتاه-مدت، در کمترین هزینه به ارزش کنونی و متناسب با الزامات و احتیاجات بلند-مدت است.

دو حالت کلی در اهداف برنامه‌ریزی وجود دارد [۲]: در حالت اول برنامه‌ریزی باهدف تعیین تمامی احتیاجات به‌صورت جزء به جزء و دقیق برای پست‌های توزیع و خطوط انجام می‌شود. این برنامه‌ریزی به دلیل در نظر گرفتن متغیرهای تصمیم‌گیری متنوع و زیاد، اساساً برای یک دوره‌ی کوتاه-مدت (بین ۱ تا ۵ سال) عملی است. در مقابل، حالت دیگر برنامه‌ریزی شامل تعیین مکان، ظرفیت، و حوزه‌ی سرویس‌دهی بدون در نظر گرفتن دقیق جزئیات شبکه پایین‌دستی یا فشار متوسط است، که این نوع برنامه‌ریزی معمولاً، برای یک دوره‌ی بلند-مدت (بین ۵ تا ۳۰ سال) انجام می‌شود. هدف این پایان‌نامه ارائه روشی برای برنامه‌ریزی بلند-مدت برای توسعه پست‌های فوق توزیع است.

در ادامه به معرفی مفصل مشخصه‌ها و معیارهای مختلف اهداف اصلی در برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع می‌پردازیم.

---

<sup>1</sup> - Optimal feeder routing

<sup>2</sup> - Short-term planning

<sup>3</sup> - Long-term planning

## ۲-۳-۱- مشخصه‌ها و معیارهای برنامه‌ریزی

بطور کلی، روند برنامه‌ریزی یک سیستم توزیع شامل سه گام کلی به شرح زیر است [۴]:

- شناسایی و تعیین راه‌حل‌های ممکن
- ارزیابی معیارها و مشخصه‌های مطلوب
- انتخاب بهترین راه‌حل

به دلیل وجود انواع متغیرهای تصمیم‌گیری مختلف (پیوسته و گسسته)، تعداد راه‌حل‌های ممکن که می‌بایست در روند بهینه‌سازی برای رسیدن به بهترین جواب بررسی شود، محدوده‌ی وسیعی از فضای جستجو را می‌طلبد. هر راه‌حل بر اساس معیارها و مشخصه‌های مختلف ( ادوات و تجهیزات لازم، استانداردها و قیود) ارزیابی می‌شود. معیارها، الزامات و یا قیود برنامه‌ریزی هستند که باید ارضا شوند، درحالی‌که مشخصه‌های مسئله، هزینه‌ها و سطوح قابلیت اطمینانی هستند که باید به ترتیب حداقل و حداکثر شوند. تمامی هزینه‌های برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع را می‌توان به‌طور کلی به سه گروه تقسیم کرد [۲]:

(۱) گروه اول، هزینه‌های مرتبط با پست‌های فوق توزیع است: این هزینه‌ها برابر با مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری پست‌فوق توزیع است بطوریکه شامل موارد زیر است:

- هزینه زمین و احداث: هزینه‌ی خرید زمین و احداث پست جزء هزینه‌های سرمایه‌گذاری طرح به حساب می‌آیند. هزینه‌ی زمین، بخش عمده‌ای از هزینه‌ی برنامه‌ریزی را به خود اختصاص می‌دهد، چراکه ابعاد زمین موردنیاز برای احداث یک پست‌فوق توزیع<sup>۱</sup> AIS و<sup>۲</sup> GIS به ترتیب تقریباً ۱۰,۰۰۰ مترمربع و ۶۴۰۰ مترمربع است که به سرمایه‌گذاری قابل توجهی نیاز دارد [۱۲]. بنابراین انتخاب مکان بهینه برای احداث پست جدید در فرایند برنامه‌ریزی علاوه بر معیار نزدیک

<sup>۱</sup> - Air insulated substation (AIS)

<sup>۲</sup> - Gas-insulated substation (GIS)

بودن به مرکز بارها به قیمت زمین نیز وابسته است. لازم به ذکر است که معمولاً قیمت زمین‌های نزدیک به نقاط بار بیشتر است. روش متداول در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع، انتخاب چندین مکان کاندید توسط مهندسين یا برنامه‌ریزهای خبره است، که در نهایت این مکان‌ها در فرایند برنامه‌ریزی مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین مکان از میان آنها انتخاب می‌شود.

- هزینه‌ی تجهیزات: این هزینه‌ها ناشی از خرید و نصب ترانسفورماتورها، سوئیچ‌ها و دیگر تجهیزات برای هر پست است که با ظرفیت پست، رابطه‌ی خطی ندارد؛ به عبارت دیگر، یک پست  $1 \times 30$  MVA هزینه‌ی تجهیزاتی که با ظرفیت پست  $2 \times 30$  MVA، هزینه‌ی تجهیزاتی که لزوماً دو برابر پست  $1 \times 30$  MVA نیست. از آنجاکه این هزینه‌ها نیز تنها یک مرتبه در طول برنامه‌ریزی اتفاق می‌افتد (تنها یک مرتبه تجهیزات نصب می‌شوند)، این هزینه‌ها نیز جزء هزینه‌های سرمایه‌گذاری به حساب می‌آید.

- هزینه‌ی تلفات: این هزینه‌ها ناشی از تلفات آهنی و مسی حاصل از کارکرد ترانسفورماتورهایی است که در داخل پست وجود دارد. این هزینه‌ها رابطه‌ای غیرخطی با ظرفیت ترانسفورماتور دارند و به عنوان هزینه‌های بهره‌برداری یاد می‌شوند.

۲) گروه دوم، هزینه‌های شبکه‌ی پایین‌دستی یا فشار متوسط: باینکه مسیریابی فیدرهای فشار متوسط جزء اهداف برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع نیست، ولی برای برآوردی از هزینه‌های این شبکه، فرض می‌شود که هر بار به‌طور مستقیم به وسیله یک فیدر از پست مربوطش تغذیه می‌گردد. از اینرو، هر چه پست به بارهای تحت پوشش نزدیک باشد، این هزینه‌ها کاهش می‌یابد. این هزینه‌ها نیز شامل:

- هزینه‌ی خرید و نصب فیدرها: این هزینه که جزء هزینه‌های سرمایه‌گذاری شبکه‌ی پایین‌دستی است وابسته به نوع فیدر (سطح مقطع) و طول فیدر است که باید نصب شود. یکی از مجهولات مسئله برنامه‌ریزی انتخاب و تعیین مناسب‌ترین نوع فیدر برای تغذیه هر بار است، که

<sup>۱</sup> - دارای ۲ ترانسفورماتور ۳۰ مگاوات آمپری است.

باید جهت ارزیابی هزینه‌های شبکه فشار متوسط، در فرایند بهینه‌سازی لحاظ شود. در بخش‌های بعدی روش چگونگی انتخاب نوع فیدر مناسب، توضیح داده می‌شود.

- هزینه‌ی تلفات: این هزینه نیز که ناشی از تلفات مسی در فیدرهای فشار متوسط است، به‌عنوان هزینه‌های بهره‌برداری یاد می‌شود. این هزینه نسبتی غیرخطی با جریان عبوری از فیدر و نسبتی خطی با مقاومت فیدر دارد. از این‌رو، نوع فیدر در مقدار این هزینه‌ها نقش بسزایی دارد. (۳) گروه سوم، هزینه‌های شبکه‌بالادستی یا خطوط انتقال: این هزینه‌ها که در بعضی از برنامه‌ریزی‌ها در نظر گرفته می‌شود همانند هزینه‌های شبکه فشار متوسط، دارای هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری است.

هزینه‌های سرمایه‌گذاری به خاطر اینکه تابعی از المان‌های متغیر سیستم نیستند، به‌عنوان هزینه‌های ثابت نیز شناخته می‌شوند. در مقابل، از آنجاکه هزینه‌های بهره‌برداری با تغییر المان‌های سیستم مانند بارگیری ترانسفورماتورها و فیدرها تغییر می‌کنند، به آن‌ها هزینه‌های متغیر نیز می‌گویند. تا اینجای بحث، حتی اگر فرض شود که برنامه‌ریزی تنها با معیار حداقل کردن هزینه‌ها انجام شود، بازهم فرایند انجام تصمیمات جهت تعیین بهینه‌ی مجهولات مسئله، آسان نیست. ولی از آنجاکه این تصمیمات باید قیود مسئله برنامه‌ریزی را نیز ارضا سازند، حل مسئله برنامه‌ریزی به‌مراتب پیچیده‌تر خواهد بود. قیود فنی که باید در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع در نظر گرفته شود عبارت‌است از:

(۱) افت ولتاژ<sup>۱</sup>: افت ولتاژ در طول یک فیدر باید کمتر از مقداری باشد که شرکت‌های برق برای فراهم‌آوردن یک سرویس مناسب و حفظ شرایط بهره‌برداری در محدوده‌ی مورد انتظار تعیین می‌کنند. این مقدار معمولاً ۰.۵٪ درصد است [۱۳]. در نظر گرفتن قید افت ولتاژ در برنامه‌ریزی پست‌فوق توزیع بسیار اهمیت دارد، چراکه آگاهی از مقدار افت ولتاژ در نقاط مختلف سیستم، به شناسایی قسمت‌های ضعیف و قوی شبکه کمک می‌کند. اگرچه هزینه خرید فیدری با سطح مقطع بزرگ‌تر، بیشتر است، ولی سبب کاهش افت ولتاژ می‌شود.

<sup>1</sup> - Voltage drop

۲) ظرفیت بارگیری پست‌ها<sup>۱</sup>: بر مبنای ضروریات فنی، بارگیری پست‌ها باید در محدوده‌ی قابل قبولی انجام شود. محدودیت‌های حرارتی ترانسفورماتورهای پست، محدودیت‌های خطوط انتقال، پدیده‌ی تشدید زیر سنکرون ناحیه‌ای برخی از این ضروریات و قیود فنی هستند. علاوه بر این‌ها، برای در نظر گرفتن قابلیت اطمینان، پست‌های فوق توزیع باید کمتر از ظرفیت نامی خود بارگیری شوند [۷].

۳) محدودیت حرارتی فیدرها<sup>۲</sup>: ظرفیت نامی هر دستگاه الکتریکی نشان‌دهنده‌ی مقدار توانی است که می‌تواند تحمل کند. از این رو، توان عبوری از هر فیدر نباید از محدوده‌ی ظرفیت حرارتی آن عبور کند. یک انتخاب ساده برای نوع فیدر تغذیه‌کننده‌ی یک‌بار مشخص، فیدری است که دارای نزدیک‌ترین ظرفیت حرارتی به توان آن بار باشد.

۴) ساختار شعاعی شبکه<sup>۳</sup>: بیشتر سیستم‌های توزیع به صورت شعاعی بهره‌برداری می‌شوند. زیرا که نسبت به ساختارهای دیگر ارزان‌تر هستند و از طرفی دیگر، برنامه‌ریزی و تحلیل آن‌ها به مراتب ساده‌تر است. از آنجاکه مسیریابی بهینه فیدرها در دستور برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع قرار ندارد، بنابراین برای ارضا شدن این قید می‌بایست هر بار تنها از یک پست تغذیه شود.

فرایند برنامه‌ریزی اگر توسط روش‌های سنتی انجام گیرد، می‌تواند زمان‌گیر و بیش‌ازحد سخت و هزینه‌بر باشد، زیرا تعداد حالات و جواب‌های ممکن که می‌بایست توسط معیارها و مشخصه‌های برنامه‌ریزی مورد ارزیابی قرار بگیرند، بسیار زیاد هستند. بنابراین، برنامه‌ریزها نیازمند روش‌های بهینه‌سازی کارآمد و دقیقی برای حل مسئله برنامه‌ریزی در زمان معقول و با در نظر گرفتن تمامی ملاحظات ضروری هستند.

## ۲-۳-۲- اهداف برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع

مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود که در آن باید

<sup>1</sup> - Loading capacity of substations

<sup>2</sup> - Thermal limits of feeders

<sup>3</sup> - Radial network

تمامی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری با در نظر گرفتن قیود مختلف فنی، حداقل گردد. جواب نهایی باید اهداف زیر را مشخص کند:

- مقدار توسعه ظرفیت پست‌های موجود و حوزه‌ی سرویس‌دهی آن‌ها.
- تعداد و مکان پست‌های جدید.
- ظرفیت و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌های جدید.
- زمان احداث پست‌ها و نصب تجهیزات جدید.
- هزینه‌ی سرمایه‌گذاری طرح پیشنهادی.

## ۲-۴- پیشینه تحقیق

در مقایسه با برنامه‌ریزی تولید، برنامه‌ریزی سیستم توزیع به مراتب پیچیده‌تر است، چراکه شامل: (۱) انواع متغیرهای تصمیم‌گیری مختلف پیوسته و گسسته (۲) انتخاب همزمان نوع فیدر و تخصیص آن به مناسب‌ترین پست (۳) در نظر داشتن هزینه‌های خطی و غیرخطی، (۴) در نظر گرفتن محدودیت‌های جغرافیایی و محیطی سیستم تحت مطالعه (۵) در نظر گرفتن شبکه‌ی موجود (۶) قیود فنی و عملی غیرخطی و متنوع است. بنابراین به دست آوردن مدل ریاضی کامل و دقیقی برای آن بسیار مشکل و یا حتی غیرممکن است [۱۴]. از این رو، تحقیقات بسیار گسترده‌ای جهت تسهیل بخشیدن به فرایند بهینه‌سازی، توسط روش‌های مختلف برنامه‌ریزی ارائه شده است. از نقطه نظر روش‌شناسی حل مسئله بهینه‌سازی، این روش‌ها به‌طور کلی، به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود:

- روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی<sup>۱</sup>
- روش‌های ابتکاری و فوق-ابتکاری<sup>۲</sup>

<sup>1</sup> - Mathematical programming methods

<sup>2</sup> - Heuristic and meta-heuristic methods

از آنجاکه، توسعه سیستم توزیع زمان بر بوده و اساساً به صورت برنامه‌ریزی بلند-مدت انجام می‌شود، حل مسئله برنامه‌ریزی توسط روش‌های ریاضی یا ابتکاری می‌تواند به یکی از سه روش زیر از نقطه نظر دوره‌ی برنامه‌ریزی صورت گیرد [۷]:

- برنامه‌ریزی ایستا یا تک‌مرحله‌ای<sup>۱</sup>: یک برنامه‌ریزی تک-مرحله‌ای است، که در آن برنامه‌ریزی توسعه باهدف تغذیه بار در سال افق<sup>۲</sup> و با در نظر گرفتن ساختار شبکه موجود در سال مبنا، بهینه می‌گردد.
- برنامه‌ریزی شبه‌دینامیکی یا چندمرحله‌ای<sup>۳</sup>: در این روش، کل مسئله برنامه‌ریزی به دو مرحله تقسیم می‌شود. در مرحله اول یک برنامه‌ریزی تک مرحله ایست، که جواب بهینه را برای سال افق به دست می‌آورد. در مرحله دوم، با در نظر گرفتن رشد سالانه‌ی بارها در هر دوره (دوره‌های دوساله یا سه‌ساله)، توسعه شبکه، با توجه به نتایج به دست آمده از مرحله اول، انجام می‌شود.
- برنامه‌ریزی پویا<sup>۴</sup>: در این روش برنامه‌ریزی توسعه پست برای کل دوره‌های زمانی به صورت هم‌زمان بهینه‌شده و تمام مجهولات مسئله به دست می‌آید. اگرچه، فرایند برنامه‌ریزی پویا می‌تواند به جواب و راه‌حل بهینه منجر شود، ولی پیچیدگی مسئله در کنار زمان اجرا بیشتر می‌شود. از این رو، الگوریتم بهینه‌سازی ممکن است در مینیمم محلی گیر کند [۷].

## ۲-۴-۱- روش برنامه‌ریزی ریاضی

روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی در واقع به دنبال تعریف مدل ریاضی دقیقی برای شبکه‌ی تحت مطالعه می‌باشند. تاکنون، روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی گوناگونی ارائه گردیده است که می‌توان به موارد زیر اشاره

<sup>1</sup> - Static or single-stage

<sup>2</sup> - Horizon years

<sup>3</sup> - Pseudo-dynamic or multi-stage planing or multi-stage

<sup>4</sup> - Dyanamic planning

کرد:

- برنامه‌ریزی خطی (LP) <sup>۱</sup> [۱۵]
- برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) <sup>۲</sup> [۱۳]: از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول با استفاده از روش سیمپلیکس <sup>۳</sup> (روش غیر مرکب) تمامی متغیرها به صورت متغیرهای پیوسته در نظر گرفته شده تا برخی راه‌حل‌های اولیه به دست بیایند. سپس، در مرحله دوم، با انجام جستجوهای متوالی راه‌حل بهتر برای متغیرهای عدد صحیح به دست می‌آید.
- برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) <sup>۴</sup> [۱۶]: روش‌های غیرخطی برمبنای معادله کوئن-تاکر <sup>۵</sup>، به عنوان شرایط بهینگی لازم استفاده می‌شوند. آن‌ها بعد از چندین بار اجرا برای برخی از متغیرهای بهینگی که به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند، می‌توانند به سمت جواب سراسری همگرا شوند؛ البته در صورتی که تابع هدف محدب باشد.
- برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) <sup>۶</sup> [۱۷]: در شرایطی که با یک معادله درجه دوم سروکار داشته باشیم، همانند برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول توسط برنامه‌ریزی درجه دوم مسئله با فرض پیوسته بودن تمامی متغیرهای حل می‌شود. سپس با استفاده از برخی روش‌های مناسب، مقادیر به دست آمده برای متغیرهای صحیح از مرحله اول، به مقادیر صحیح تبدیل می‌شوند.
- برنامه‌ریزی دینامیکی (DP) <sup>۷</sup> [۱۸-۲۰]: این روش، کل مسئله را به صورت بازگشتی به چندین زیر مسئله (گام)، شامل چندین حالت ممکن تقسیم می‌کنند. با حل هر زیر مسئله، فضای

---

<sup>1</sup> - Linear programming

<sup>2</sup> - Minxed-integer linear programming (MILP)

<sup>3</sup> - Simplex method

<sup>4</sup> -Nonlinear programming

<sup>5</sup> - Kuhn-Tucker (KT)

<sup>6</sup> - Mixed-integer nonlinear programming (MINLP)

<sup>7</sup> - Dynamic Programming



جستجو کاهش یافته و به جواب بهینه نزدیک می‌شود.

- روش شاخه و کران<sup>۱</sup> [۲۱]: این روش یک نوع دیگر از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است، بطوریکه کران پایین هزینه‌ی تمامی شاخه‌ها محاسبه می‌شود. اگر هزینه هر شاخه بزرگ‌تر از کران پایین<sup>۲</sup> آن باشد، آن را به‌عنوان جواب در نظر نمی‌گیرد. از این‌رو، موفقیت این روش به محاسبه کارآمد "کران پایین" وابسته است.
- برنامه‌ریزی شبکه<sup>۳</sup> [۲۲]: در این روش، سیستم توزیع به‌عنوان یک گراف شبکه‌ای جهت‌دار در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که کل شبکه دارای تنها یک گره ی منبع (پست) و چندین گره به‌عنوان مصرف‌کننده است که توسط فیدرهای ممکن فرضی با حداکثر ظرفیت به یکدیگر متصل شده است. مسیر بهینه برای اتصال پست و گره‌های مصرفی از بین مسیرهای فرضی توسط شیوه‌ی کوتاه‌ترین مسیر پیدا می‌شود. کل هزینه‌های مربوط به ساخت مسیرها به‌عنوان هزینه‌های پست در نظر گرفته می‌شود. شارش توان از مقدار صفر برای هر مسیر شروع می‌شود و مقدار آن به تدریج تا رسیدن به یک تعادل افزایش می‌یابد. در طول این روند، تابع قابلیت اطمینان به‌وسیله‌ی حداقل سازی کل هزینه‌ی مسیرها، بهینه می‌شود. این در حالی است که، مکان کلیدهای قدرت توسط روش آزمون و خطا از دورترین نقطه به نزدیک‌ترین نقطه از پست مورد ارزیابی قرار گرفته و مکان بهینه‌ی آن‌ها به دست می‌آید.
- تجزیه‌ی بندرز<sup>۴</sup> [۲۳]: این روش، مدل عدد صحیح مختلط را به "یک مسئله اصلی راحت"<sup>۵</sup> (مسئله‌ای که محدودیت‌های کمتری داشته باشد) با استفاده از تعاریف صفر – یک برای مدل، و یک "زیرمسئله" درجه‌ی دوم تقسیم می‌کند. با حل مسئله اصلی، اولین تصمیمات در مورد

<sup>1</sup> - Branch and Bound

<sup>2</sup> - Lower bound

<sup>3</sup> - Network flows programming

<sup>4</sup> - Benders' decomposition

<sup>5</sup> - Relaxed problem

احداث فیدرها و پست‌های جدید گرفته می‌شود. سپس، برای بهینه‌سازی بخش بار جهت حداقل سازی هزینه‌های بهره‌برداری، زیر مسئله درجه‌ی دوم حل می‌شود.

به‌طور کلی، روش‌های ریاضی توانایی در نظر گرفتن برهم کنش بین تمامی متغیرها را دارند، از این رو نتایجشان از نظر تئوری دقیق‌تر است. ولی از آنجاکه تعداد متغیرهای مسئله‌ی برنامه‌ریزی بسیار زیاد و قیود آن بسیار سخت است، از این رو، این روش‌ها به‌سختی می‌توانند به جواب برسند. از این جهت به دنبال به دست آوردن مدل بسیار ساده‌شده‌ای از مسئله هستند. در مجموع، نکات زیر را می‌توان از بررسی آن‌ها استنتاج نمود:

- این روش‌ها بر پایه تقریب‌های مختلفی مسئله را حل می‌کنند. از آنجاکه، مدل‌های غیرخطی در مسائل کوچک و در مدت‌زمان طولانی به نتیجه می‌رسند، آن‌ها سعی می‌کنند با تقریب‌های گوناگون مسئله را خطی سازی کنند، که خطی سازی هزینه‌های ثابت و متغیر برنامه‌ریزی، تأثیر منفی بر صحت نتایج می‌گذارد.
- برخی از این روش‌ها، قید حداکثر افت ولتاژ در باس بارها را در نظر نگرفته‌اند. زیرا، آنها یا از مدل تقریبی فیدرها استفاده می‌کنند و یا بر مبنای ملاحظات اقتصادی با چشم‌پوشی از پارامترهای الکتریکی سیستم بخش بار را محاسبه می‌نمایند [24].
- از آنجاکه، در نظر گرفتن قید شعاعی بودن شبکه، در فرایند بهینه‌سازی بسیار مشکل است، معمولاً الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر ریاضی این محدودیت را در نظر نگرفته‌اند و تنها به دنبال ساختار حلقوی شبکه بوده‌اند، که کمترین هزینه را داشته باشد.
- این روش‌ها تنها یک هدف، که کمینه کردن هزینه‌های مربوط به خرید تجهیزات، نصب، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری است را در نظر می‌گیرند و قادر نیستند جنبه‌های اجتماعی، محیطی و قابلیت اطمینان را در فرایند بهینه‌سازی در خود جای دهند.
- از آنجاکه، تعریف برخی از فاکتورهای تصمیم‌گیری به‌وسیله مدل‌های ریاضی بسیار مشکل است، در این روش‌ها از بسیاری از این فاکتورها چشم‌پوشی شده است.

با توجه به نکات ذکر شده، روش‌های ریاضی نمی‌توانند جواب معقولی را در حل مسائل واقعی مهیا سازند. از این رو، روش‌های ابتکاری و فوق-ابتکاری مورد توجه محققین، طراحان، برنامه‌ریزان قرار گرفت.

## ۲-۴-۲- روش‌های ابتکاری و فوق-ابتکاری

با توجه به کمبودهای روش‌های ریاضی در برابر پیچیدگی و سخت بودن مسائل برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها و سیستم‌های توزیع، روش‌های ابتکاری و فوق-ابتکاری مورد توجه و توسعه قرار گرفت. روش‌های ابتکاری بر مبنای آنالیز مبتنی بر شهود می‌باشند، بطوریکه آن‌ها توسط راهکارهایی بنا می‌شوند که مهندسین برنامه‌ریز فکر می‌کنند، و می‌توانند طرحی نسبتاً نزدیک به جواب بهینه را در زمان کوتاه و با حجم محاسبات کم، در اختیار طراحان قرار دهند. این روش‌ها سعی دارند بر پایه استدلال‌های منطقی، فضای جستجو را با محدود کردن آن به سمت جواب بهینه، کاهش دهند. این روش‌ها صریح، منعطف و سریع الحساب هستند و به آسانی می‌توانند تصمیمات برنامه‌ریز را در روند برنامه‌ریزی لحاظ کنند و یک جواب بهینه را با توجه به ملاحظات فنی و عملی در اختیار برنامه‌ریزان قرار دهند [۱۴]. برخی از روش‌های ابتکاری عبارتند از:

- سیستم‌های خبره<sup>۱</sup>: این روش‌ها بر پایه یک پایگاه داده از بارها، مکان‌های شدنی و ناشدنی، و مجموعه‌ای از قوانین ابتکاری که توسط مهندس برنامه‌ریز تعریف می‌شود، کار می‌کند. آن‌ها مشابه یک ابزاری که توانایی استدلال دارد، عمل می‌کنند و می‌توانند بر پایه پایگاه‌های اطلاعاتی و ساختار قوانین تعریف شده، برنامه‌ریزی بهینه‌ی توسعه پست‌فوق توزیع و سیستم توزیع را انجام دهند [۲۵].
- الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری ترکیبی<sup>۲</sup> [۵، ۶، ۸-۱۰، ۲۶]: این روش‌ها بر پایه تجزیه‌ی

<sup>1</sup> - Expert system

<sup>2</sup> - Heuristic combination optimization algorithm

مسئله عمل می‌کنند، یعنی جهت کاهش دادن به فضای جستجو، مسئله برنامه‌ریزی را به چند زیر مسئله تقسیم می‌کنند، بطوریکه نتایج هر زیر مسئله به‌عنوان ورودی برای حل زیر مسئله بعدی بکار می‌رود. مزیت قابل توجه این روش، حذف بخش عمده‌ای از جواب‌های غیرممکن در طول روند بهینه‌سازی است. از این‌رو، پیچیدگی مسئله کاهش می‌یابد و الگوریتم بهینه‌سازی به سرعت به سمت جواب بهینه همگرا می‌شود. با این حال، در برخی الگوریتم‌های مبنی بر این شیوه، ممکن است جواب بهینه سراسری به دلیل عدم توجه و دقت به بخشی از فضای جستجو، دست‌نیافتنی شود. به این شیوه تقسیم مسئله اصلی به چند زیر مسئله اصطلاحاً شیوه‌ی تجزیه<sup>۱</sup> یا چندبخشی<sup>۲</sup> گویند. بر اساس این شیوه، برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به دو زیر مسئله تقسیم می‌شود، مکان‌یابی بهینه پست‌ها با حل زیر مسئله اول به دست آمده و با وارد کردن نتایج آن به عنوان ورودی به زیر مسئله دوم، حوزه سرویس‌دهی و ظرفیت بهینه پست‌ها تعیین می‌شود. این روش‌ها اغلب با ترکیب ابتکاری دو یا چند روش مختلف برای اعمال به زیر مسئله‌ها سعی در حل بهینه‌ی مسئله دارند. اکثر مسائلی که با یک شبکه بزرگ واقعی روبرو هستند، از این شیوه استفاده می‌کنند تا روند حل مسئله را تسهیل بخشیده و آن را به سمت یک جواب معقول سوق دهند [۶].

- روش جابجایی شاخه<sup>۳</sup> [۲۷]: در روش جابجایی شاخه‌ی تک مرحله‌ای، ابتدا یک حلقه توسط اضافه کردن یک شاخه به وجود می‌یابد. سپس با باز کردن یکی از شاخه‌ها که به صورت بهینه انتخاب می‌گردد، سعی در پیدا کردن ساختار شعاعی شبکه را دارد. در [۲۷]، این روش در دو مرحله انجام شده است. در مرحله‌ی اول در یک جستجو درون ناحیه‌ای حوزه‌ی سرویس‌دهی هر پست به دست می‌آید و در مرحله‌ی دوم با یک جستجوی بین ناحیه‌ای، شبکه‌ی شعاعی

<sup>1</sup> - Decomposition technique

<sup>2</sup> - Polychotomy technique

<sup>3</sup> - Branch exchanged technique

بهینه برای هر ناحیه تحت پست تعیین می‌شود.

به دلیل قابلیت در نظر داشتن مجموعه وسیعی از جواب‌های ممکن توسط روش‌های فوق-ابتکاری نسبت به روش ابتکاری، در برخی موارد این روش‌ها توانایی بیشتری برای رسیدن به یک جواب بهینه بهتر را دارند. اساس این روش‌ها، جستجوی همسایگی<sup>۱</sup> است [۲۸]. اگر فرض شود که یک جواب ممکن به وسیله  $x$ ، مجموعه‌ی تمام جواب‌های شدنی توسط  $X$ ، و هزینه‌ی جواب به وسیله  $C(x)$  مشخص شود. در این صورت، هر جواب  $x$  دارای یک مجموعه همسایه‌های وابسته  $N(x) \subset X$  که همسایگی  $x$  نامیده می‌شود. هر جواب  $x' \in N(x)$  می‌تواند به طور مستقیم از  $x$  توسط یک اپراتور بنام “move” حاصل گردد، و گفته می‌شود که  $x$  به سمت  $x'$  حرکت می‌کند وقتی که این اپراتور عمل کند. معیار انتخاب برای انتخاب حرکات، و معیار توقف برای پایان بخشیدن به جستجو به وسیله تعدادی مجموعه دستورات خارجی داده می‌شود. به وسیله مشخص نمودن این دستورات توسط راه‌های گوناگون، این روش‌ها می‌توانند به آسانی برای ایجاد شیوه‌ها و روش‌ها گوناگون تغییر کنند.

برخی از انواع روش‌های فوق-ابتکاری ارائه شده و توسعه یافته در حل مسئله برنامه‌ریزی سیستم توزیع و توسعه پست عبارتند از:

- شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)<sup>۲</sup> [۲۹]: این روش بر پایه ی قوانین یادگیری پس انتشار خطا<sup>۳</sup> مرتبط با نمونه اطلاعاتی وضعیت سویچ‌ها<sup>۴</sup>، مجموعه‌ی آموزش‌ها نمونه، و نمونه‌های گرافیکی، برای تولید جواب بهینه در برنامه‌ریزی سیستم توزیع، استفاده می‌شود. شبکه‌های عصبی برای تولید برخی راه‌حل‌های منحصربه‌فرد، طوری آموزش داده می‌شود که قادرند بار را از روی فیدرهایی که دارای اضافه بار هستند به سمت فیدرهایی که دارای ظرفیت بارگیری آزاد

<sup>1</sup> - Neighbourhood search

<sup>2</sup> - Artificial neural network (ANN)

<sup>3</sup> - Back-propagation learning rules

<sup>4</sup> - Switch status information module.

هستند منحرف کنند. جواب بهینه طوری انتخاب می‌شود که تابع هدف مقدار حداقل لازم را داشته باشد.

برخی روش‌های فوق ابتکاری که بر پایه الگوریتم‌های تکاملی هستند:

- الگوریتم ژنتیک (GA) <sup>۱</sup> [۳]، [۵]، [۹]، [۳۰-۳۳]:
- الگوریتم کلونی مورچه <sup>۲</sup> [۳۴]
- الگوریتم رقابت استعماری (ICA) <sup>۳</sup> [۱۱]، [۳۵]
- بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) <sup>۴</sup> [۳۶]، [۳۷]

## ۲-۵- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی سیستم توزیع

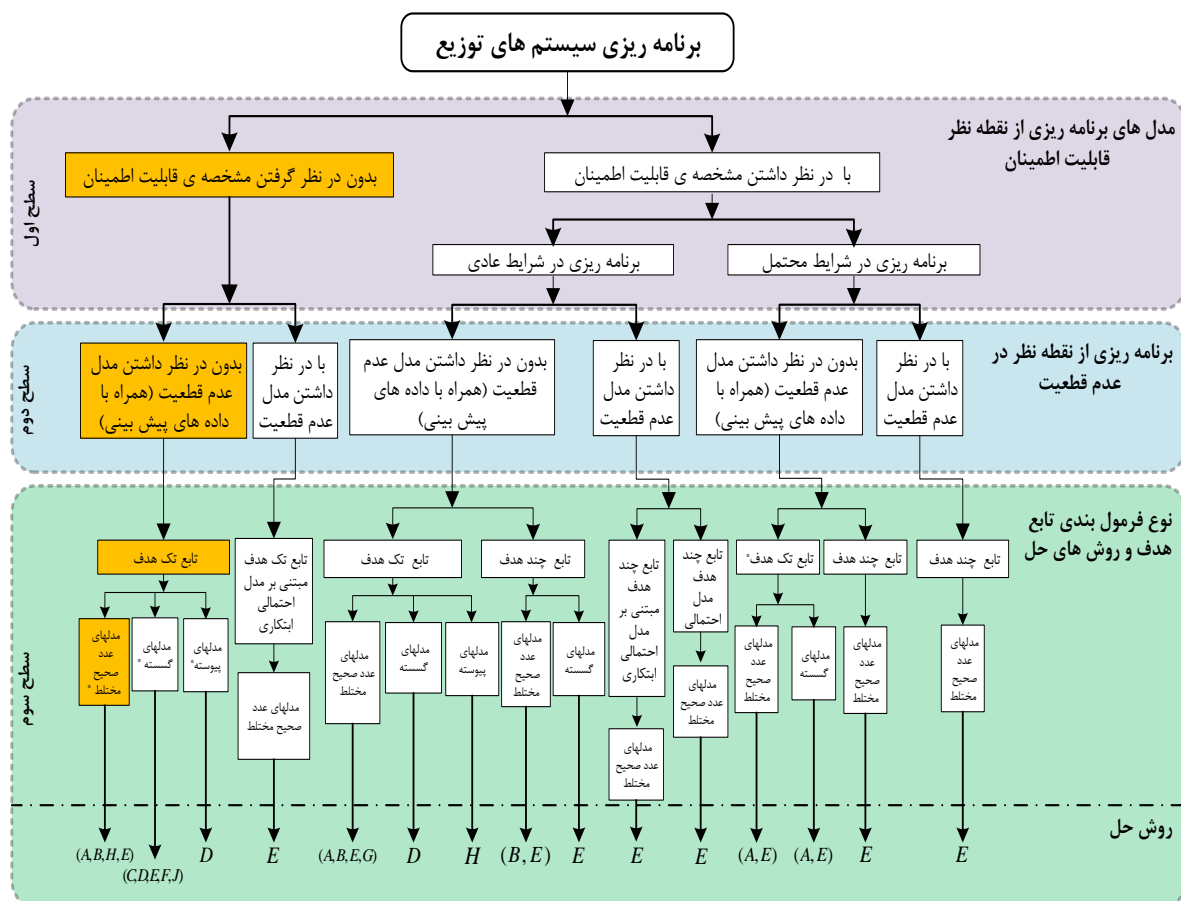
در طول چند دهه اخیر، بسیاری از مدل‌ها و روش‌های حل برای برنامه‌ریزی سیستم توزیع ارائه داده شده است، که می‌توان آنها را توسط شکل (۲-۲) در سه سطح کلی معرفی نمود [۳۸]. در سطح اول، برنامه‌ریزی به دودسته، برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان تقسیم شده است. به همین ترتیب سطح دوم، مدل‌های برنامه‌ریزی که عدم قطعیت را در نظر گرفته و یا نگرفته‌اند را تقسیم‌بندی می‌کند. در روش‌های قبلی که بر پایه روش‌های کلاسیک بوده‌اند، عدم قطعیت تنها در مورد پیش‌بینی بارها آینده در مدل برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است، درحالی‌که در مدل‌های کنونی، علاوه بر بارها، عدم قطعیت در نرخ بهره و تورم، خطا در سیستم (در مورد برنامه‌ریزی‌هایی شامل در نظر داشتن قابلیت اطمینان) در نظر گرفته شده است. دسته‌بندی سوم فرمول‌بندی‌های مختلف تابع هدف و روش حل مسئله را در هر مدل نشان داده است.

<sup>1</sup> - Genetic algorithm (GA)

<sup>2</sup> - Ant-colony algorithm

<sup>3</sup> - Imperialist competitive algorithm (ICA)

<sup>4</sup> - Partial swarm optimization (PSO)



A = برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، B = شاخه و کران، تجزیه بنروز، C = جایجایی شاخه، D = برنامه‌ریزی دینامیکی، E = روش های ابتکاری و فوق ابتکاری، F = شبکه‌های عصبی مصنوعی، G = برنامه‌ریزی شبکه، H = برنامه ریزی غیر خطی، I = الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیبی\* برخی از این مدل‌ها در دسته روش های ابتکاری و یا سیستم های خیره هستند.

شکل (۲-۲) دسته‌بندی مدل‌های و روش‌های مختلف بکار گرفته‌شده در برنامه‌ریزی سیستم توزیع به صورت یک ساختار درختی [۳۸]

## ۲-۵-۲- مدل‌های برنامه‌ریزی بدون در نظر داشتن مشخصه قابلیت اطمینان

در مدل‌های برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن مشخصه قابلیت اطمینان، روند بهینه‌سازی معمولاً با حداقل کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری ادوات سیستم (پست‌ها، فیدرها) تحت قیود فنی انجام می‌گردد. در برخی موارد هزینه‌های شبکه بالادستی، تعمیر و نگهداری شبکه نیز در تابع هدف لحاظ می‌شود. در این حالت از برنامه‌ریزی دو نوع روش ارائه‌شده، روش‌هایی که عدم قطعیت در پیش‌بینی بار آینده را در نظر می‌گیرند و روش‌هایی که در نظر نمی‌گیرند:

## □ برنامه‌ریزی بدون مدل‌سازی عدم قطعیت:

در این روش‌ها، داده‌های غیرقطعی توسط روش‌های پیش‌بینی به‌دست‌می‌آیند، مثلاً بارهای مورد تقاضای آینده توسط یک نرخ رشد معین تعیین می‌شوند. سه نوع مدل‌سازی برای تابع هدف در این روش وجود دارد:

- مدل عدد صحیح – مختلط
- مدل گسسته<sup>۱</sup>
- مدل پیوسته<sup>۲</sup>

اصولاً، ظرفیت پست‌ها، ترانسفورماتورها، فیدرها جزء متغیرهای تصمیم‌گیری گسسته یا عدد صحیح هستند (مثلاً ظرفیت‌های یک پست فوق توزیع می‌تواند ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ مگاوات آمپر باشد). بعلاوه، متغیرهای تصمیم‌گیری در مورد جابجایی یا افزایش ظرفیت پست‌های موجود و فیدرهای نیز جزء متغیرهای گسسته‌ی برنامه‌ریزی محسوب می‌شوند. در مقابل، جریان فیدرها، توان تلف‌شده در ترانسفورماتورها و شبکه‌ی فشار متوسط یا پایین‌دستی متغیرهای پیوسته هستند. در مدل‌های عدد صحیح مختلط، مقدار بهینه‌ی هر دو متغیر پیوسته و گسسته تعیین می‌شود، درحالی‌که در مدل گسسته، تنها متغیرهای گسسته تعیین می‌گردند. در ادامه به تشریح مدل‌هایی برای تعریف تابع هدف و روش‌های حل مختلف آن‌ها می‌پردازیم.

**الف) مدل عدد صحیح – مختلط:** اغلب اوقات، از این مدل برای تعریف تابع هدف استفاده می‌شود و شامل مجموعه‌ای از متغیرهای صحیح، عمدتاً باینری ("صفر" به معنی خیر و "یک" به معنی بله) و مجموعه‌ای از متغیرهای پیوسته هستند.

بر مبنای مدل‌سازی هزینه‌های ناشی از تلفات در شبکه پایین‌دستی و ترانسفورماتور پست‌ها، دو نوع مدل برای عدد صحیح مختلط وجود دارد:

<sup>1</sup> - Discrete model

<sup>2</sup> - Continuous model



• مدل‌های خطی<sup>۱</sup> [۱۳]

• مدل‌های غیرخطی یا درجه دوم<sup>۲</sup> [۵، ۹، ۱۳، ۲۳]

برای مدل‌های خطی، تابع درجه دوم هزینه‌های بهره‌برداری توسط روش خطی‌سازی چند ضابطه‌ای<sup>۳</sup>، خطی می‌شوند. بعلاوه، بعضی مواقع، مشخصه‌های اضافی دیگر نیز در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. مثلاً در [۲۳]، برای در نظر گرفتن اعوجاج هارمونیک در بارهای صنعتی، یک فاکتور اعوجاج هارمونیک را در هزینه تلفات انرژی ضرب شده است. به دلیل پیچیدگی‌های حل، راه‌های گوناگونی برای حل این نوع برنامه‌ریزی پیشنهاد شده است، که بخش عمده‌ی این روش‌ها عبارت‌اند از:

• برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)

• برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP)

• روش شاخه و کران

• تجزیه بندرز

• الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری ترکیبی

• سیستم‌های خبره

• الگوریتم ژنتیک

• الگوریتم کلونی مورچه

• الگوریتم رقابت استعماری

• بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در [۱۳] یک مدل برنامه‌ریزی شبه‌دینامیکی مقدماتی برای برنامه‌ریزی پست‌ها فوق توزیع و فیدرهای فشار متوسط برای یک شبکه کوچک توسعه داده شده است، بطوریکه مسئله را با در نظر داشتن قید افت

<sup>1</sup> - Linear model

<sup>2</sup> - Quadratic model

<sup>3</sup> - Piecewise linearization

ولتاژ توسط برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط حل می‌کند. شیوه جدیدی شامل دو مرحله بر اساس برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط در [۱۷] ارائه شده، بطوریکه ابتدا چند شبکه‌ی درختی بدون در نظر گرفتن قیود مسئله در همسایگی حداقل شبکه‌ی پوشا<sup>۱</sup> به دست می‌آید، سپس بهترین شبکه از بین آن‌ها که بتواند تمامی قیود مسئله را ارضا کند انتخاب می‌شود.

بسیاری از روش‌هایی که برای حل شبکه‌هایی با ابعاد واقعی پیشنهاد شده بر پایه روش‌های ابتکاری، فوق-ابتکاری بنا شده‌اند. اغلب آن‌ها بر مبنای الگوریتم‌های ابتکاری بهینه‌سازی ترکیبی روند بهینه‌سازی خود را طراحی کرده‌اند. بر این اساس، آن‌ها مسئله را در چند مرحله و با ترکیب الگوریتم‌های ابتکاری و فوق‌ابتکاری و گاهی روش‌های ریاضی حل کرده‌اند [۵-۷، ۹-۱۱]. به‌عنوان مثال در [۷] توسط الگوریتم اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر<sup>۲</sup> برنامه‌ریزی دینامیکی برای یک افق بلندمدت انجام داده شده است. در [۵، ۹] الگوریتم ژنتیک برای حل شبکه‌ی بزرگ واقعی توسعه داده شده است، بطوریکه در [۵] با آماده‌سازی عامل‌های ویژه‌ی آمیزش<sup>۳</sup> و جهش<sup>۴</sup> الگوریتم ژنتیک جهت تطبیق برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست، توسعه داده شده است. علاوه بر آن، برای اصلاح معایب احتمالی استفاده از مکان‌های کاندید در برنامه‌ریزی و هم‌چنین کم کردن فضای جستجو، از یک روش خوشه‌بندی بنام الگوریتم k-means استفاده شده است بطوریکه بوسیله‌ی آن فهرستی از مکان‌های اولیه مناسب برای احداث پست تهیه می‌شود. در نهایت از بین این مکان‌ها، مکان بهینه مناسب برای پست‌ها انتقال<sup>۵</sup>، توسط در نظر گرفتن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شبکه‌ی بالادستی و پایین‌دستی به دست آمده است. در [۹]، با آماده‌سازی الگوریتم ژنتیک، حل برنامه‌ریزی توسعه برای یک سیستم توزیع بزرگ واقعی انجام شده است. بر اساس روند بهینه‌سازی پیشنهادی، ابتدا مکان پست‌های توزیع بر مبنای حداقل سازی ماتریس مشخصه تلفات شبکه

<sup>1</sup> - Minimum spanning network

<sup>2</sup> - A variable structure learning automata

<sup>3</sup> - Crossover

<sup>4</sup> - Mutation

<sup>5</sup> - Transmission Substation

توسط الگوریتم ژنتیک مشخص می‌شود، و سپس در مرحله دوم برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع برمبنای درخت پوشای مینیمم<sup>۱</sup>، با در نظر گرفتن تمامی قیود فنی انجام می‌شود.

**(ب) مدل‌های گسسته:** در این مدل‌ها، تابع هدف شامل متغیرهای گسسته (باینری) است. متغیرهای باینری نشان‌دهنده تصمیم در مورد احداث پست‌ها و فیدرها و دیگر ادوات سیستم هستند. روش‌های حل آن‌ها عمدتاً توسط جابجایی شاخه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری ترکیبی، الگوریتم‌های فوق - ابتکاری، شبکه‌های عصبی مصنوعی است [۲۷]. مدل‌های گسسته خود به چندین مدل تقسیم می‌شوند که در اینجا تنها به ذکر مورد به مورد آن‌ها می‌پردازیم:

- مدل گسسته ی ساده
- مدل گسسته ی چند معیاره<sup>۲</sup>
- مدل گسسته ی چند ماژول<sup>۳</sup>
- مدل گسسته ی چند ساختاره<sup>۴</sup>

**(ج) مدل پیوسته:** در [۱۹]، یک مدل پیوسته‌ی غیرخطی برای برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای سیستم توزیع ارائه شده، بطوریکه تابع هدف تنها شامل متغیرهای پیوسته است. از این رو، بسیاری از متغیرهای تصمیم‌گیری گسسته در روند بهینه‌سازی در نظر گرفته نشده اند. بعلاوه، برنامه‌ریزی دینامیکی برای حل این مدل پیوسته در چند گام، بکار گرفته شده است: (۱) مجموعه جواب‌های اولیه از فعالیت‌های توسعه‌ای تعیین می‌شوند. (۲) بارها، برای دوره ی موردنظر از برنامه‌ریزی مشخص می‌شوند. (۳) تابع هدف غیرخطی برای پیدا کردن ساختار بهینه‌ی شبکه، حل می‌گردد. (۴) گام‌های دوم و سوم، برای تمامی دوره‌های برنامه‌ریزی تکرار می‌شوند.

<sup>1</sup> - Minimum spanning tree

<sup>2</sup> - Multiple policies based discrete model

<sup>3</sup> - Multiple modules-based discrete model

<sup>4</sup> - Multiple construction-based discrete model

## □ برنامه‌ریزی با در نظر داشتن عدم قطعیت:

در [۳]، یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت بارها آینده توسعه داده شده است. تابع هدف شامل تمامی هزینه‌های مرتبط با نصب تجهیزات و تلفات فیدهای فشار متوسط است. از یک مدل فازی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت بارها استفاده شده است، به این صورت که، هر بار توسط یک مدل LR نرمال<sup>۱</sup> و یک مدل فازی مثلثی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است. الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع تحت این شرایط و در نظر گرفتن قیود افت ولتاژ برای حل یک شبکه واقعی توسعه داده شده است.

## ۲-۵-۳- مدل‌های برنامه‌ریزی با در نظر داشتن قابلیت اطمینان

یکی از چالش‌های جدی مهندسی سیستم قدرت، تغذیه کردن بی‌وقفه بارها است. از این رو، ملاحظات قابلیت اطمینان در برخی از مدل‌ها برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود [۸، ۲۲، ۲۶، ۳۰، ۳۹]. به‌طور کلی، دو حالت برای در نظر گرفتن مشخصه قابلیت اطمینان در مدل برنامه‌ریزی وجود دارد:

- برنامه‌ریزی تحت شرایط عادی<sup>۳</sup>
- برنامه‌ریزی تحت شرایط محتمل<sup>۴</sup>

در حالت اول، یک تابع هدف که مرتبط به هزینه‌های افزایش قابلیت اطمینان است به مدل برنامه‌ریزی اضافه می‌شود. هزینه‌ی مربوط به قطع برق مورد انتظار<sup>۵</sup> و مقدار انرژی غیر تحویلی سالانه مورد انتظار<sup>۶</sup> از جمله توابع هدف معمول برای قابلیت اطمینان هستند، که در برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها در نظر گرفته

<sup>1</sup> - Normal LR model

<sup>2</sup> - Fuzzy triangular model

<sup>3</sup> - Planning under normal conditions

<sup>4</sup> - Planning under contingency conditions

<sup>5</sup> - Expected outage cost

<sup>6</sup> - Expected annual non-delivered energy

می‌شوند. در حالت دوم، برنامه‌ریزی توسعه تحت یک سری از شرایط محتمل و خطاهای از پیش تعریف‌شده انجام می‌شود.

## □ برنامه‌ریزی بدون مدل‌سازی عدم قطعیت

دو نوع مدل‌سازی برای این دسته از مدل برنامه‌ریزی وجود دارد:

- مدل‌های تک-هدف : در این حالت تمامی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری طرح بعلاوه کل هزینه ناشی از عدم تغذیه بارها به علت خرابی تجهیزات شبکه در تابع هدف لحاظ می‌شود. مثلاً در [۸, ۲۶] هزینه ناشی از قطع فیدهای شبکه‌ی فشار متوسط و خاموشی پست به دلیل خرابی تجهیزات آن در کنار هزینه‌های برنامه‌ریزی در تابع هدف، در نظر گرفته شده است. که در نهایت برنامه‌ریزی باهدف حداقل سازی کل هزینه‌ها برای شبکه نسبتاً بزرگی توسط ترکیب الگوریتم اتوماتای یادگیر و یک روش ابتکاری برای تعیین حوزه سرویس‌دهی بر مبنای ماتریس تعلق فازی حل می‌شود. توابع تک هدفه در این حالت، عمدتاً به صورت عدد صحیح مختلط برای حل برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع، مدل شده‌اند.
- مدل‌های چند-هدفه : از آنجاکه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری در تضاد با هزینه‌ی مربوط به قابلیت اطمینان است (چراکه هزینه‌های طرح می‌بایست کاهش یابد درحالی‌که برای افزایش قابلیت اطمینان هزینه‌ها افزایش می‌یابد)، در این حالت برنامه‌ریزی تحت یک تابع هدف چندهدفه، باهدف یافتن مجموعه جواب‌های پارتو<sup>۱</sup> حل می‌گردد [۳۰, ۳۹]. مجموعه جواب‌های پارتو، جواب‌هایی هستند که توسط جواب‌های دیگر مغلوب نمی‌شوند. یعنی در واقع آن‌ها حداقل بر یک جواب غالب هستند، بدون اینکه توسط دیگر جواب‌ها مغلوب شوند. برنامه‌ریزی سیستم توزیع در [۳۰]، توسط الگوریتم ژنتیک به صورت یک مسئله چند هدفه حل شده است؛ بطوریکه،

<sup>1</sup> - Set of Pareto solution

جواب‌ها، برمبنای تابع هدف و راه‌حل‌های غیر مغلوب<sup>۱</sup> در هر تکرار ارزیابی شده و به هر کدام، یک مقدار برازندگی تخصیص داده شده است. بر اساس برازندگی‌های به دست آمده؛ جواب‌ها مرتب شده و برای اعمال اپراتورهای آمیزش و جهش انتخاب می‌شوند. روند بهینه‌سازی تا هنگامی که تعداد مطلوبی از جواب‌های بهینه پارتو بدست آید، تکرار شده است.

### □ برنامه‌ریزی با مدل‌سازی عدم قطعیت

در این حالت عدم قطعیت بارها، هزینه‌ها، و خرابی فیدرها و تجهیزات سیستم توسط دو روش مدل شده است: روش‌های ممکن (فازی مبنا)<sup>۲</sup> و روش‌های احتمالی<sup>۳</sup>. روش‌های ممکن، نامعلوم بودن و یا ابهام یک رخداد را مدل می‌کنند، در حالی که روش احتمالی، احتمال بروز رخدادها را مدل می‌نمایند. در روش اول، عدم قطعیت مربوط به خرابی و یا بار توسط مجموعه نظریه فازی<sup>۴</sup> مدل می‌شود و بهینه‌سازی در نواحی فازی انجام می‌گیرد. در مقابل، روش‌های احتمالی با پارامترهای غیرقطعی که از یک تابع توزیع احتمالی استنتاج شده است، سروکار دارند.

در [۳۱]، برمبنای روش‌های ممکن، رویکردی برای کاهش اثرات زیان‌بار عدم قطعیت مربوط مکان و توان بارهای آینده در نتایج برنامه‌ریزی بلندمدت معرفی شده است، بطوریکه قابلیت اطمینان نیز در روند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده، و مسئله به صورت یک مسئله تک هدف بویسله الگوریتم ژنتیک حل شده است. روش پیشنهادی برمبنای تعیین نقاطی در شبکه است که از اهمیت بالایی برخوردار بوده و احتمال قطعیت وجودشان در آینده بالاست، که آن‌ها را نقاط انشعاب نامیده است. در واقع، فرایند برنامه‌ریزی تنها بر اساس این نقاط انجام می‌شود.

<sup>1</sup> - Non-dominated solution

<sup>2</sup> - Possibilistic (fuzzy based) approach

<sup>3</sup> - Probabilistic approach

<sup>4</sup> - Fuzzy set theory

## ۲-۵-۴- رویکردهای جدید در برنامه‌ریزی توسعه پست و سیستم توزیع

اغلب رویکردهای جدید در برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع و سیستم‌توزیع، شامل در نظر گرفتن

تولیدات پراکنده در روند بهینه‌سازی بوده است که می‌توان به‌طور اجمالی به موارد زیر اشاره کرد:

- در تمامی کارهای ارائه‌شده هدف، تعیین بهینه‌ی تعداد، مکان، ظرفیت واحدهای تولید پراکنده در میان دیگر پارامترهای سیستم می‌باشد، که با بهینه‌سازی کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری انجام می‌شود. در برخی مدل‌ها هزینه‌های مرتبط با قابلیت اطمینان مانند هزینه‌های ناشی از مقدار انرژی غیر تحویلی مورد انتظار و مقدار مورد انتظار از قطع برق مصرف‌کنندگان، در تابع هدف مسئله در نظر گرفته‌شده است [۲۰، ۳۲، ۳۷، ۴۰، ۴۱].
- روش‌های مختلفی از جمله برنامه‌ریزی دینامیکی [۲۰]، شاخه و کران، الگوریتم ژنتیک [۳۲]، و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات [۳۷]، برای حل توسعه داده‌شده است.
- برخی از مدل‌های فرمول‌بندی در محیط مقررات زدایی<sup>۱</sup> انجام شده است. مثلاً در [۲۰]، این مدل شامل دو مجموعه بهینه‌سازی ترتیبی است؛ بطوریکه در مرحله اول، دوره‌ی و مکان بهینه‌ی منابع تولید تعیین می‌شوند و سپس در مرحله‌ی دوم ظرفیت منابع، مقدار تولید / قرارداد DISCO مشخص می‌شود.
- در برخی مدل‌ها عدم قطعیت بارها و تولید توسط سناریوهای احتمالی مختلفی، مدل شده است [۳۲، ۳۷].
- در [۳۷]، منابع تولید پراکنده‌ی مختلفی مانند: بادی<sup>۲</sup>، خورشیدی<sup>۳</sup>، بیوماس<sup>۴</sup> در فرایند برنامه‌ریزی در نظر گرفته‌شده است. محدودیت ظرفیت راکتیو منابع تولید پراکنده و همچنین

<sup>1</sup> - Deregulation environment

<sup>2</sup> - Wind

<sup>3</sup> - Solar photovoltaic

<sup>4</sup> -Biomass

عدم قطعیت بارهای، سرعت باد، شدت تابش خورشید در تابع هدف مدل شده است. در این میان برخی از مقالات با رویکردی متفاوت‌تر، مسئله برنامه‌ریزی را حل کرده‌اند. مثلاً در [۳۳]، مدلی برمبنای حداکثرسازی سود برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، برخی از قابلیت‌های سیستم اتوماسیون توزیع برای دستیابی به یک طرح سازگارتر با راهبردهای زیر بنایی برای یک شبکه توزیع هوشمند، در نظر گرفته شده است. در مرجع مذکور، تابع هدف تنها شامل سود شرکت‌ها است و مسئله توسط الگوریتم ژنتیک حل شده است.

## ۲-۶- چالش‌های پیشروی حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع

در بخش‌های قبلی روش‌های بهینه‌سازی مختلفی را به صورت اجمالی بررسی نمودیم. اما بسیاری از این روش‌ها با چالشی جدی در حل مسئله برنامه‌ریزی روبرو هستند:

(۱) بزرگی سیستم: یک سیستم فوق توزیع واقعی در ناحیه جغرافیایی وسیعی گسترده شده است و دارای هزاران نقاط بار، فیدرها و چندین پست فوق توزیع موجود است. بنابراین تحلیل چنین شبکه‌ای به مراتب سخت‌تر و پیچیده‌تر است. از این رو، برخی از روش‌های بهینه‌سازی قادر به حل شبکه‌های واقعی نیستند ولی در این میان، بعضی روش‌ها توانایی حل سریع و نسبتاً دقیقی از مسئله را برای شبکه‌های بزرگ و واقعی دارند. آن‌ها معمولاً از روش‌های چند بخشی استفاده می‌کنند، بطوریکه مسئله برنامه‌ریزی در چند مرحله توسط ترکیب روش‌های ابتکاری، فوق-ابتکاری و ریاضی حل می‌کنند.

(۲) مسئله ترکیبی<sup>۱</sup>: برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع جزء مسائل ترکیبی دسته‌بندی می‌شود، چراکه، حجم حالت‌ها، جواب‌ها و متغیرهای سیستم چنان بزرگ است که بررسی کردن تمامی آن‌ها پیش از حد زمان بر بوده و نیازمند حافظه زیادی جهت ذخیره، پردازش و محاسبه آن‌هاست.

<sup>1</sup> - Combinatorial problem



۳) هزینه‌های غیرخطی: به دلیل وجود هزینه‌های غیرخطی (هزینه تلفات) روش‌های خطی با اینکه سریع و ساده هستند در نهایت جواب آن‌ها فاصله‌ی زیادی با جواب بهینه واقعی خواهد داشت.

۴) قیود: یک طرح قابل قبول نه تنها باید دارای کمترین هزینه باشد، بلکه باید قیود مسئله را ارضا نماید. علاوه بر قیود فنی که باعث سخت‌تر شدن حل مسئله برنامه‌ریزی شده است، در حل شبکه‌های واقعی باید بعضی از قیود عملی را نیز در نظر گرفت. اکثر اغلب روش‌های پیشنهادی این قیود را در نظر نمی‌گیرند.

## ۲-۷- نتیجه‌گیری

در این فصل به معرفی مفصل برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع پرداختیم، بطوریکه این برنامه‌ریزی شامل مجموعه‌ی وسیعی از متغیرهای تصمیم‌گیری از قبیل تعیین مقدار بهینه برای توسعه ظرفیت پست‌ها موجود، تعداد بهینه‌ی پست جدید، مقدار بهینه‌ی توسعه و یا نصب تجهیزات و فیدرهای فشار متوسط است. این تصمیمات باید طوری در نظر گرفته شوند که اولاً تمامی قیود مسئله را برآورده کنند و ثانیاً از نقطه‌نظر اقتصادی به صرفه باشند. موضوع، زمانی پیچیده‌تر می‌شود که با یک شبکه بزرگ سروکار داریم، چراکه در این حالت مجموعه وسیعی از حالات و راه‌حل‌های ممکن وجود دارد که تعیین جواب بهینه از میان آن‌ها مستلزم داشتن ابزارهای بهینه‌سازی کارآمد و دقیق است.

از این رو، تاکنون محققین راه‌کارهای مختلفی را برای حل مسئله برنامه‌ریزی سیستم توزیع ارائه داده‌اند، که آن‌ها را از طریق یک دسته‌بندی جامع به‌طور اجمالی بررسی و معرفی نمودیم. روش‌های ریاضی به دلیل محدودیت‌هایی که در مدل‌سازی مسئله دارند، سعی در استفاده از تقریب‌هایی برای مدل‌سازی مشخصه‌های غیرخطی مسئله دارند و در بعضی موارد از بسیاری از مشخصه‌ها و معیار صرف‌نظر می‌کنند. اگرچه نتایج این روش‌ها از نظر تئوری دقیق‌تر است، ولی به دلیل نادیده گرفتن برخی پارامترها و قیود، به دلیل محدودیت‌هایی که دارند، نمی‌توانند جواب دقیقی را از نظر عملی ارائه دهند. از این گذشته، این روش‌ها به دلیل حجم بالای محاسبات، نیاز به حافظه‌ی ذخیره‌سازی و زمان اجرا زیادی دارند. در مقابل، روش‌های

مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری و فوق ابتکاری، به دلیل قابلیت انعطاف‌پذیری و در نظر گرفتن مشخصه‌ها و معیارهای بیشتری در برنامه‌ریزی، بسیار کارآمدتر عمل می‌کنند و در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از میان این روش‌ها، الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری ترکیبی در رویارویی با مسئله برنامه‌ریزی، بسیار موفق‌تر عمل کرده‌اند، چراکه، این روش‌ها تا حد ممکن از پیچیدگی حل مسئله و بزرگی فضای جستجو کاسته و می‌توانند در حل شبکه‌های بزرگ کارآمدتر باشند.

## **فصل سوم:**

**برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع**

**توسط روش ترکیبی k-means و برنامه‌ریزی**

**دینامیکی**

## ۳-۱- مقدمه

از آنجاکه مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع را می‌توان به‌عنوان یک مسئله NP-hard (یا همان مسئله ترکیبی) در نظر گرفت، بنابراین برخی مقالات برای تسهیل بخشیدن به حل مسئله برنامه‌ریزی برای شبکه‌های بزرگ، سعی در استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیبی داشته‌اند، بطوریکه این روش‌ها تا جای ممکن سریع و ساده هستند [۵]، [۱۰]-[۶]، یکی از این شیوه‌ها، به‌کارگیری روش خوشه‌بندی بارها است. به‌عنوان مثال در [۵]، به‌وسیله الگوریتم k-means بارها خوشه‌بندی شده و بر اساس آن‌ها لیستی از مکان‌های کاندید و مناسب برای احداث پست‌های جدید تهیه شده است، که درنهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌ترین آن‌ها برای احداث پست‌های جدید برای یک شبکه بزرگ واقعی تعیین شده است. در [۱۰] و [۶] در مرحله‌ی اول به کمک الگوریتم k-means بارهای منطقه برنامه‌ریزی خوشه‌بندی شده است. در مرحله‌ی دوم، برای هر خوشه که معرف نواحی مجزای کوچک است، مکان پست‌های توزیع توسط به‌کارگیری دوباره‌ی k-means در مرکز ثقل بارها تنظیم شده است.

با توجه به اینکه بخش عمده و قابل توجهی از هزینه‌های طرح برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع وابسته به احداث فیدرهای فشار متوسط و تلفات مرتبط با آن‌هاست و از طرفی افت ولتاژ نیز وابسته به فاصله پست از باری است که تغذیه می‌کند، بنابراین به‌کارگیری شیوه‌ی خوشه‌بندی بارها (الگوریتم k-means) در فرایند مکان‌یابی پست‌های فوق توزیع می‌تواند مؤثر واقع شود. این انتخاب می‌تواند به سه دلیل مفید باشد:

- مکان پست‌های جدید در مراکز ثقل بارهایشان تنظیم می‌شود، یعنی جایی که کمترین فاصله ممکن بین بارها و پست وجود دارد. (بهبود هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری شبکه‌پایین دستی).
- روش متداول حل مسئله برنامه‌ریزی، در نظر گرفتن تعدادی مکان کاندید برای احداث پست‌ها

جدید است، ولی انتخاب این مکان‌های کاندید تأثیر بسزایی در جواب نهایی می‌گذارد بطوریکه، با تغییر آن‌ها ممکن است جواب به کلی تغییر کند. با به‌کارگیری این الگوریتم می‌توان بدون نیاز به مکان‌های کاندید مسئله برنامه‌ریزی را حل نمود.

- الگوریتم k-means بسیار ساده است و به سرعت به جواب مناسب می‌رسد.

ولی به دلیل اینکه الگوریتم k-means تنها بر اساس معیار فاصله، مراکز ثقل بارها را مشخص می‌کند بنابراین ممکن است، پست‌ها در مکان‌هایی قرار بگیرند که از بارهای بزرگ دور باشند، که منجر به افزایش تلفات و افت ولتاژ می‌شود. از این گذشته، الگوریتم k-means نمی‌تواند ثابت بودن مکان پست‌های موجود را در روند مکان‌یابی در نظر بگیرند. بدین منظور، روشی برای توسعه الگوریتم k-means بکار گرفته شده است، که مکان پست‌های موجود در طول روند مکان‌یابی ثابت بماند. همچنین، در محاسبه مراکز ثقل خوشه‌ها توان بارها به صورت یک ضریب وزنی (با خاصیت تنظیم سهم مشارکت در تعیین مراکز ثقل) در نظر گرفته می‌شود، بطوریکه مکان پست‌های جدید جایی قرار بگیرند که نزدیک به بارهای بزرگ‌تر باشد. در ادامه، با معرفی شیوه‌ای در تخصیص بارها بر اساس اولویت اتصال، حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها توسط برنامه‌ریزی دینامیکی مشخص می‌شود. در این مرحله برای تعیین مناسب‌ترین پست جهت تغذیه‌ی بارها، در یک رویکرد جدید، تابع هزینه‌ای تعریف می‌شود که علاوه بر هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری فیدرهای فشار متوسط، شامل هزینه‌ی توسعه ظرفیت پست نیز است (تاکنون توابع هزینه تعریف شده برای اتصال بارها تنها شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری فیدر بوده است) که می‌تواند دو ویژگی داشته باشد:

- هزینه‌های ثابت طرح مربوط به خرید ترانسفورماتور جدید برای پست‌ها به نسبت کاهش می‌یابد.

- از حداکثر پتانسیل موجود شبکه استفاده می‌شود (به نوعی در نظر گرفتن مدیریت دارایی<sup>1</sup>).
- ظرفیت بهینه پست‌ها بدون نیاز به مدل‌سازی آن‌ها به عنوان متغیر تصمیم‌گیری، به دست می‌آید.

<sup>1</sup> - Asset management

هدف از این فصل برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه پست‌ها فوق توزیع توسط یک روش ابتکاری ترکیبی

است. مزایای روش پیشنهادی :

- رفع وابستگی جواب بهینه‌ی مکان‌یابی پست‌ها به مکان‌های کاندید از پیش تعریف‌شده.
- محدود کردن فضای جستجوی در روند تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی بارها توسط پیدا کردن بهترین توالی اتصال برای آن‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی.
- معرفی رویکردی جدید در تعریف تابع هزینه اتصال بارها با در نظر گرفتن هزینه‌ی توسعه ظرفیت پست‌ها (مدیریت دارایی حفظ می‌شود و تعیین بهینه ظرفیت پست‌ها به‌طور همزمان با روند تخصیص بارها انجام می‌گیرد)

در این فصل، ابتدا در بخش ۲-۳ به تشریح روش بهینه‌سازی، فرمول‌بندی تابع هدف و قیود مسئله برنامه‌ریزی می‌پردازیم، سپس در بخش ۳-۳، چگونگی توسعه دادن الگوریتم  $k$ -means، برای مکان‌یابی پست‌های جدید توضیح داده می‌شود. در بخش ۴-۳، تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها را توسط برنامه‌ریزی دینامیکی تشریح می‌کنیم. در بخش آخر چگونگی حل مسئله برنامه‌ریزی توسط الگوریتم پیشنهادی توصیف شده است.

## ۲-۳- روش بهینه‌سازی

برمبنای روش‌های چندبخشی جهت تسهیل در فرایند بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع با استفاده از یک روش ابتکاری ترکیبی  $k$ -means و برنامه‌ریزی دینامیکی، در دو مرحله انجام می‌شود:

- مکان‌یابی پست‌های جدید با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی توسعه‌یافته  $k$ -means.
  - تعیین حوزه سرویس‌دهی پست‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی.
- بطوریکه جواب‌های مرحله‌اول که تنها مکان پست‌های فوق توزیع جدید است، به‌عنوان ورودی در مرحله

دوم استفاده‌شده تا حوزه ی سرویس‌دهی و ظرفیت بهینه پست‌ها مشخص گردد. در نهایت این جواب‌ها جهت محاسبه‌ی هزینه‌های طرح پیشنهادی توسط تابع هدف ارزیابی می‌شود.

در [۵]، [۱۰]-[۶] از الگوریتم  $k$ -means برای مکان‌یابی پست و ترانسفورماتورهای توزیع استفاده‌شده است اما، هیچ‌کدام از آن‌ها توان بارها و مکان ثابت پست‌های موجود و ترانسفورماتورها را در فرایند مکان‌یابی در نظر نگرفته‌اند. در نظر نداشتن توان بارها ممکن است، منجر به‌قرار گرفتن پست‌ها در نقاطی دور از بارهای سنگین و مهم شود، که در نهایت باعث افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شبکه پایین دست و افزایش افت ولتاژ می‌گردد. از این‌رو در این فصل با توجه به روش ارائه‌شده در [۲۵، ۴۲]، الگوریتم  $k$ -means جهت در نظر گرفتن توان بارها و مکان ثابت پست‌های موجود در روند مکان‌یابی پست‌ها توسعه داده‌شده است.

بر اساس ایده ارائه‌شده در [۱۰]، [۶] وجود پست‌های توزیع بیشتر، در عین حالی که باعث کاهش تلفات شبکه‌ی پایین دستی می‌شود، سبب افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیز می‌گردد. از آنجاکه هزینه‌ی احداث پست فوق توزیع مقدار قابل توجهی خیلی بیشتر از هزینه‌ی سرمایه‌گذاری پست توزیع است، بنابراین در روش پیشنهادی به دنبال حداقل تعداد ممکن پست فوق توزیع هستیم. از این‌رو، ابتدا حداقل تعداد تئوری پست‌های جدید<sup>۱</sup> ( $TMNS_p$ ) مورد نیاز برای تأمین بار در سال آفق به دست می‌آید. این مقدار توسط رابطه‌ی (۱-۳) با تقسیم مجموع کل بار مورد تقاضای به حداکثر توان پست‌های موجود (با احتساب حداکثر توان قابل توسعه برای آن‌ها) برای شبکه تحت مطالعه برآورد می‌شود. سپس، مکان‌یابی برای مجموع حداقل تعداد تئوری پست جدید موجود با استفاده از الگوریتم توسعه‌یافته  $k$ -means انجام می‌گردد و نتایج به دست آمده از آن برای تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی و ظرفیت پست‌ها، بویسه برنامه‌ریزی دینامیکی استفاده می‌شود (اگر مقدار  $TMNS_p$  منفی شود، یعنی حداکثر ظرفیت آزاد بارگیری پست موجود بیشتر از توان مورد تقاضا است، در این حالت تنها حوزه‌ی سرویس‌دهی تعیین می‌شود). در نهایت اگر تمامی بارها به

<sup>1</sup> - Theoretical minimum number of substation (TMNS)

پست‌ها مناسب خود بدون تجاوز از قیود فنی متصل بودند، هزینه‌ی طرح پیشنهادی توسط تابع هدف محاسبه می‌گردد. فلوچارت نشان داده‌شده در شکل (۳-۱) روند کلی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

$$TMNS_p \cong \frac{TP_p - AEC_p}{\lambda^{\max} S_{sub}^{\max}} \quad (۳-۱)$$

که در آن،

$TMNS_p$	حداقل تعداد تئوری پست‌های منطقه‌ی برنامه‌ریزی در دوره‌ی $p$ .
$TP_p$	کل بار مصرفی مورد انتظار منطقه‌ی برنامه‌ریزی (برحسب MVA).
$AEC_p$	مجموع ظرفیت‌های آزاد بارگیری تمامی پست‌های موجود (برحسب MVA).
$S_{sub}^{\max}$	حداکثر ظرفیت ممکن پست‌های جدید (برحسب MVA).
$\lambda^{\max}$	حداکثر مقدار بارگیری پست است (برحسب درصد).

برای محاسبه کل بار مورد تقاضای منطقه برنامه‌ریزی در هر دوره، باید تلفات شبکه فشار متوسط، علاوه بر مقدار توان بارها در محاسبات در نظر گرفته شود. تلفات شبکه فشار متوسط به‌طور تقریبی درصدی از توان مصرفی هر سیستم توزیع هستند که مقدار آن بسته به سیستم‌های مختلف متفاوت است. این مقدار معمولاً بین ۱٪ تا ۵٪ درصد است. از این‌رو، کل توان مورد تقاضای منطقه برنامه‌ریزی را می‌توان توسط رابطه‌ی (۳-۲) محاسبه کرد.

$$TP_p = \sum_{i \in \Psi_p^{\text{In}}} S_{p,i} + \tau \sum_{i \in \Psi_p^{\text{In}}} S_{p,i} \quad (۳-۲)$$

که در آن،

$S_{p,j}$	توان مصرفی بار $j$ امین در $p$ امین دوره برنامه‌ریزی (برحسب MVA).
$\tau$	درصد تلفات در شبکه فشار متوسط.
$\Psi_p^{\text{In}}$	مجموعه‌ای شامل تمامی بارهای دوره زمانی $p$ برای منطقه‌ی برنامه‌ریزی.



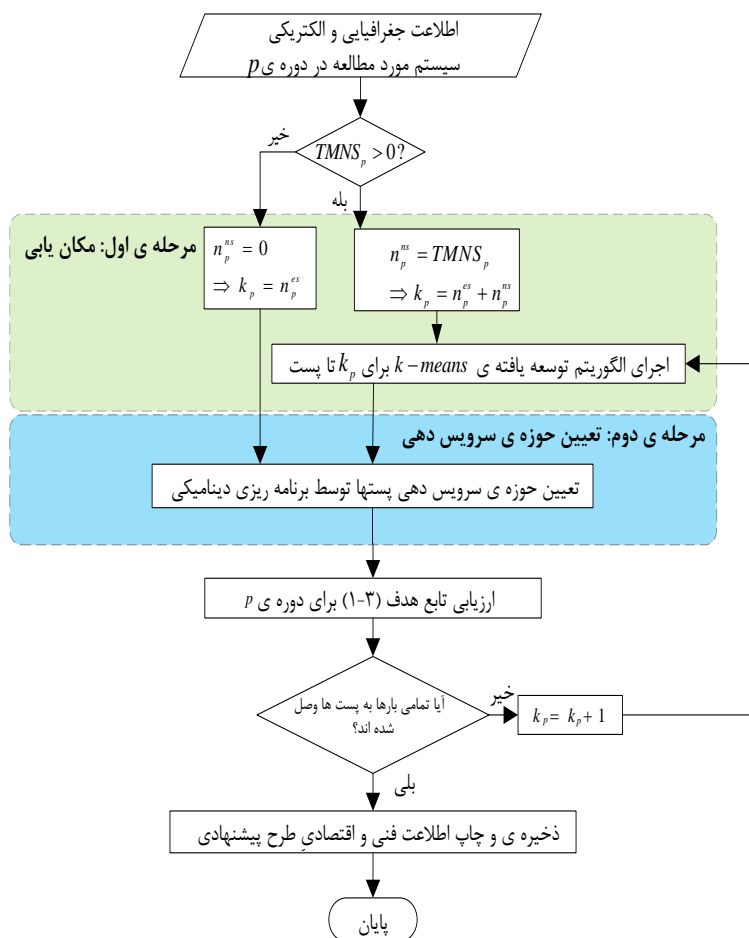
کل ظرفیت آزاد بارگیری پست‌های موجود برابر است با مجموع کل حداکثر ظرفیت قابل توسعه‌ی برای

آن‌ها که از رابطه‌ی (۳-۳)، محاسبه می‌شود

$$AEC_p = \lambda^{\max} \sum_{i \in \Psi_p^{sm}} S_i^{mc} \quad (3-3)$$

که در آن،

$S_i^{mc}$  حداکثر ظرفیت ممکن  $i$  امین پست موجود (برحسب MVA).



شکل (۱-۳) فلوچارت حل مسئله توسعه پست‌فوق توزیع توسط روش ترکیبی پیشنهادی اول

### ۳-۳- تشریح تابع هدف و قیود مسئله

هدف از برنامه‌ریزی توسعه‌ی پست‌های فوق توزیع تعیین مکان، ظرفیت، و حوزه‌ی سرویس‌دهی بهینه‌ی پست‌ها تحت قیود مختلف فنی و در حداقل هزینه‌ی ممکن است. با توجه به توابع هدف معرفی‌شده در [۷]، [۲۶]، [۳]، [۵]، فرمول‌بندی عدد صحیح مختلط مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها به صورت رابطه‌ی (۳-۳) اصلاح‌شده است. به‌طور کلی، تابع هدف شامل: هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های بهره‌برداری پست‌ها و شبکه‌ی فشار متوسط یا پایین‌دستی است [۲]، که به صورت زیر تعریف‌شده است:

$$OF^{SSEP} = \sum_{p=1}^{n^p} \sum_{i \in \Psi_p^{in}} InC_{p,i}^s + InC_{p,i}^{dg} + \sum_{p=1}^{n^p} \sum_{y \in \Psi_p^{in}} PW^y \cdot \sum_{i \in \Psi_p^{in}} (OpC_{p,y,i}^s + OpC_{p,y,i}^{dg}) \quad (۳-۴)$$

$$PW^y = \left( \frac{1 + \eta^{Inf}}{1 + \eta^{Int}} \right)^y \quad (۳-۵)$$

که در آن،

$OF^{SSEP}$  کل هزینه طرح (برحسب \$)

$InC_{p,i}^s$  مجموع هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برای  $i$  امین پست در  $p$  امین دوره از برنامه‌ریزی (برحسب \$).

$InC_{p,i}^{dg}$  مجموع هزینه سرمایه‌گذاری برای شبکه فشار متوسط یا پایین‌دستی  $i$  امین پست در  $p$  امین دوره از برنامه‌ریزی (برحسب \$).

$OpC_{p,y,i}^s$  هزینه بهره‌برداری از  $i$  امین پست در سال  $y$  ام و  $p$  امین دوره از برنامه‌ریزی (برحسب \$).

$OpC_{p,y,i}^{dg}$  هزینه بهره‌برداری از شبکه فشار متوسط یا پایین‌دستی  $i$  امین پست در سال  $y$  ام و  $p$  امین دوره از برنامه‌ریزی (برحسب \$).

$PW^y$  ضریب ارزش کنونی

نرخ تورم.	$\eta^{Inf}$
نرخ بهره.	$\eta^{Int}$
مجموعه‌ای شامل شماره‌ی پست‌های موجود و جدید در دوره‌ی $p$ ام از برنامه‌ریزی.	$\Psi_p^{sn}$
مجموعه‌ای شامل سال‌های $p$ امین دوره‌ی برنامه‌ریزی.	$\Psi_p^{yn}$
تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی.	$n^p$

همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه‌ی (۳-۴) از چهار بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول و سوم به ترتیب هزینه‌های سرمایه‌گذاری ( $Inc_{p,i}^s$ ) و بهره‌برداری پست ( $OpC_{p,y,i}^s$ ) را نشان می‌دهد. هزینه‌های سرمایه‌گذاری پست شامل هزینه‌ی احداث، توسعه، خرید و نصب تجهیزات است. هزینه‌های بهره‌برداری پست ناشی از تلفات آهنی و تلفات مسی ترانسفورماتور پست‌ها است. هزینه‌های ناشی از تلفات آهنی ترانسفورماتورهای پست جزء هزینه‌های ثابت پست است، چراکه این تلفات به تغییرات بار وابسته نیستند و در صورت برق‌دار شدن ترانسفورماتور ایجاد می‌شوند [۴۳]-[۴۴]. هزینه‌ی بهره‌برداری پست توسط رابطه‌ی (۳-۶). محاسبه می‌شود [۷]، [۹].

$$OpC_{p,y,i}^s = C_y^{EL} \cdot T \sum_{j \in \Psi_{p,i}^{st}} \left( LP_{p,ij}^{ir} + lf_p \cdot LP_{p,ij}^{cu} \cdot \left( \frac{P_{p,i}^l}{S_{p,i}^{Cap}} \right)^2 \right) \quad (3-6)$$

که در آن،

تلفات آهنی زامین ترانسفورماتور  $i$  امین پست در  $p$  امین دوره برنامه‌ریزی (برحسب kw).  $LP_{p,ij}^{ir}$

تلفات مسی نامی زامین ترانسفورماتور  $i$  امین پست در  $p$  امین دوره برنامه‌ریزی (برحسب kw).  $LP_{p,ij}^{cu}$

(kw).

مقدار توان اکتیوی که باید توسط پست  $i$  ام به شبکه پایین‌دستی یا فشار متوسط در  $p$   $P_{p,i}^l$

امین دوره‌ی برنامه‌ریزی تزریق شود (برحسب MW).

ظرفیت $i$ امین پست در $p$ امین دوره ی برنامه‌ریزی (برحسب MVA).	$S_{p,i}^{Cap}$
هزینه تلفات انرژی در سال $y$ ام (برحسب \$/kwh).	$C_y^{EL}$
ضریب تلفات در $p$ امین دوره از برنامه‌ریزی.	$lf_p$
کل ساعات‌های یک سال که برابر است با ۸۷۶۰ ساعت.	$T$
مجموعه‌ای شامل ترانسفورماتورهای $i$ امین پست در $p$ امین دوره از برنامه‌ریزی.	$\Psi_{p,i}^{st}$

تلفات مسی هر ترانسفورماتور از ضرب تلفات مسی نامی‌اش در درصد بارگیری‌اش، که نسبت مقدار بارگیری پست به ظرفیتش است، حاصل می‌شود. مقدار بارگیری هر پست برابر است با مجموع توانی که توسط آن پست جهت تغذیه شبکه پایین‌دستی یا فشار متوسط آماده شود. این توان از رابطه ی (۷-۳) که جمع توان اکتیو تمامی بارها تحت پوشش پست مربوطه و کل تلفات ناشی از فیدرها فشار متوسطه شبکه پایین‌دستی محاسبه می‌شود [۹]، [۵]. از آنجاکه مسیریابی بهینه‌ی فیدرها جزء اهداف برنامه‌ریزی نیست، برای تخمین این تلفات، فرض شده که هر بار به‌صورت شعاعی و مستقیم به پستش وصل می‌شود.

$$P_{p,i}^l = \sum_{j \in \Psi_{p,i}^{st}} S_{p,j} \cdot \cos \varphi + PL_{p,ij}^f \quad (7-3)$$

$$PL_{p,ij}^f = \frac{S_{p,j}^2 \cdot \kappa \cdot d_{ij} \cdot r_{p,ij}^f}{|V_n|^2} \quad (8-3)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j^l - x_i^c)^2 + (y_j^l - y_i^c)^2} \quad (9-3)$$

که در آن،

توان مصرفی بار  $z$  ام در  $p$  امین دوره برنامه‌ریزی (برحسب MVA).  $S_{p,j}$

تلفات فیدر بین  $i$  امین پست و  $j$  امین بار در  $p$  امین دوره ی برنامه‌ریزی (برحسب MW).  $PL_{p,ij}^f$

فاصله اقلیدسی بین پست  $i$  ام و بار  $z$  ام (برحسب km).  $d_{ij}$

$r_{p,ij}^f$	مقاومت فیدر تغذیه‌کننده ی بار $j$ ام در $p$ امین دوره ی برنامه‌ریزی (برحسب $\frac{\Omega}{km}$ ).
$V_n$	ولتاژ نامی خط (۲۰ kv).
$\cos \varphi$	ضریب قدرت.
$xy_j^l$	مختصات جغرافیایی بار $j$ ام (برحسب km).
$xy_i^c$	مختصات جغرافیایی پست $i$ ام (برحسب km).
$x_j^l$	طول جغرافیایی بار $j$ ام (برحسب km).
$y_j^l$	عرض جغرافیایی بار $j$ ام (برحسب km).
$x_i^c$	طول جغرافیایی پست $i$ ام (برحسب km).
$y_i^c$	عرض جغرافیایی پست $i$ ام (برحسب km).
$\kappa$	ضریب تصحیح فاصله.
$\Psi_{p,i}^{sl}$	مجموعه‌ای شامل تمامی بارهای متعلق به پست $i$ ام در $p$ امین دوره از برنامه‌ریزی.

رابطه ی (۳-۹) فاصله اقلیدسی را بین بار و پست محاسبه می‌کند، زیرا فرض بر این است که هر بار به‌طور مستقیم به پست مربوطش وصل شده است. از آنجاکه، در حالت واقعی بار به‌طور مستقیم به پست وصل نمی‌شود، برای مدل کردن فاصله ی واقعی بین بار و پست بر اساس روش ارائه‌شده در [۹]، از ضریب تصحیح فاصله  $\kappa$  استفاده می‌کنیم. این ضریب توسط یک نمونه‌گیری آماری از فیدرهای فشار متوسط موجود به دست می‌آید.

بخش دوم و چهارم رابطه ی (۳-۴) به ترتیب بیانگر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از شبکه فشار متوسط یا پایین‌دستی است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری شامل هزینه احداث و خرید فیدر است که از رابطه ی (۳-۱۰) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

$$InC_{p,i}^{dg} = \kappa \cdot \sum_{j \in \Psi_{p,i}^{sl}} d_{ij} \cdot C_{p,j}^{Fcon} \quad (۳-۱۰)$$

که در آن،

$$C_j^{Fcon} \text{ هزینه خرید و احداث فیدری که برای تغذیه ی بار زام انتخاب شده (برحسب \$)}$$

هزینه‌های بهره‌برداری شبکه پایین‌دستی ناشی انرژی تلف‌شده در فیدرهای فشار متوسط تغذیه‌کننده ی

بارها است، که از رابطه (۱۱-۳) محاسبه می‌گردد :

$$OpC_{p,y,i}^{dg} = T.C_y^{EL}.Lf_p \cdot \sum_{j \in \Psi_{p,i}^{sl}} PL_{p,ij}^f \quad (11-3)$$

### ۳-۳-۱- قیود مسئله

(۱) قید حد ظرفیت بارگیری مجاز پست‌ها [۲]:

$$\lambda^{\min} S_{p,i}^{cap} \leq S_{p,i}^{sl} \leq \lambda^{\max} S_{p,i}^{cap} \quad p=1,2,\dots,n^p \quad i \in \Psi_p^{sn} \quad (12-3)$$

که در آن،

$\lambda^{\max}$  حداکثر مقدار بارگیری پست است (برحسب درصد).

$\lambda^{\min}$  حداقل مقدار بارگیری پست است (برحسب درصد).

(۲) قید حداکثر افت ولتاژ مجاز [۷]، [۱۳]:

$$\frac{S_{p,j}}{|V_n|^2} \kappa.d_{ij} (r_{p,ij} \cos \varphi + x_{p,ij} \sin \varphi) \cdot 100 \leq \Delta V_{\max} \quad p=1,2,\dots,n^p \quad i \in \Psi_p^{sn}, j \in \Psi_{p,i}^{sl} \quad (13-3)$$

که در آن،

$x_{p,ij}$  راکتانس فیدر بین زمین بار و i امین پست در دوره p از برنامه‌ریزی (برحسب  $\frac{\Omega}{km}$ ).

$\Delta V_{\max}$  حداکثر افت ولتاژ مجاز (برحسب درصد).

(۳) قید حداکثر ظرفیت حرارتی فیدر [۹]، [۸]:

$$\left( \frac{S_{p,j}}{\sqrt{3}V_n} \right) < I_{typ_j}^{Max} \quad (3-14)$$

که در آن،

حداکثر جریان مجازی که می‌تواند از فیدر نوع  $typ_j$  عبور کند که برای بار زام انتخاب شده  $I_{typ_j}^{Max}$  است.

### ۳-۴- مکان‌یابی بهینه پست‌ها توسط الگوریتم k-means

برای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، و همچنین بهبود افت ولتاژ باید پست‌ها تا جایی که ممکن است به بارها نزدیک باشند. بنابراین الگوریتم خوشه‌بندی k-means روش مناسبی برای برآوردن این اهداف می‌تواند باشد، چراکه این الگوریتم می‌تواند در کوتاه‌ترین زمان و در طی یک فرایند تکراری ساده، خوشه‌هایی را بر اساس معیار فاصله اقلیدسی تشکیل دهد، که مراکز آن در نزدیک‌ترین فاصله به داده‌های آن خوشه و در دورترین فاصله نسبت به مراکز دیگر هستند. ولی از آنجایی که باید مقدار توان بارها و ثابت بودن مکان پست‌های موجود در طول روند مکان‌یابی در نظر گرفته شود، باید الگوریتم k-means در جهت راهبرد این هدف توسعه داده شود. تاکنون روش‌های مختلفی از شیوه‌ی خوشه‌بندی برای مکان‌یابی پست‌ها (توزیع و فوق‌توزیع) استفاده کرده‌اند، ولی اکثر آن‌ها تنها با معیار فاصله برای دستیابی به جواب اکتفا کرده‌اند [۵، ۶، ۱۰] و در برخی از آنها [۲۵، ۴۲] توان بارها در محاسبه مراکز ثقل در نظر گرفته شده است. توان بارها نقش بسزایی به‌طور مستقیم بر هزینه‌های بهره‌برداری و به‌طور غیرمستقیم بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری دارد. بطوریکه اگر پست از بارهای بزرگ دور باشد به دلیل افزایش تلفات هزینه‌های بهره‌برداری افزایش می‌یابد، و در برخی موارد ممکن است برای کاهش تلفات (بهبود افت ولتاژ) لازم باشد سطح مقطع فیدر تغذیه‌کننده افزایش یابد که این باعث افزایش هزینه‌ی سرمایه‌گذاری می‌شود. در این بخش ابتدا به تشریح الگوریتم k-means استاندارد و سپس به توصیف چگونگی توسعه آن در حل مسئله

مکان‌یابی بهینه‌ی پست‌های فوق توزیع می‌پردازیم.

### ۳-۴-۱- تشریح الگوریتم k-means استاندارد

در سال ۱۹۶۷ برای اولین بار مک کوئین الگوریتمی بنام k-means را برای خوشه‌بندی داده‌ها به تعداد معلومی خوشه ارائه داد [۴۵]. این الگوریتم یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری بدون نظارت است که در یک روند تکراری بسیار ساده، مجموعه‌ای از داده‌ها n بعدی را به تعدادی مشخص و از قبل تعیین شده k خوشه، دسته‌بندی می‌کند. هدف اصلی این الگوریتم تعیین تعداد k مرکز ثقل می‌باشد بطوریکه این مراکز تا حد ممکن در دورترین فاصله از هم قرار بگیرند. سپس هر داده بر مبنای فاصله اقلیدسی به نزدیکترین مرکز خوشه تخصیص داده شده و خوشه‌ها شکل می‌گیرد. در این مرحله با محاسبه مجدد مرکز هر خوشه‌ی شکل گرفته، مراکز ثقل جدیدی حاصل می‌گردد و مجدداً روند تخصیص داده‌ها انجام شده و فرآیند تا هنگامی که مراکز خوشه دیگر تغییری نکنند یا تغییراتشان از یک مقدار معین کمتر باشد، تکرار می‌گردد [۴۶]. روند کلی الگوریتم استاندارد k-means در شکل (۳-۲) آورده شده است. هدف کلی الگوریتم k-means حداقل سازی مجموع فواصل بین خوشه‌ها و داده‌ها متعلق به آن‌هاست، از این رو تابع هدف k-means به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$OF_{k_p}^{km} = \sum_{i=1}^k \sum_{j \in \Psi_i^d} \|X_j - Y_i\|^2 \quad (۳-۱۵)$$

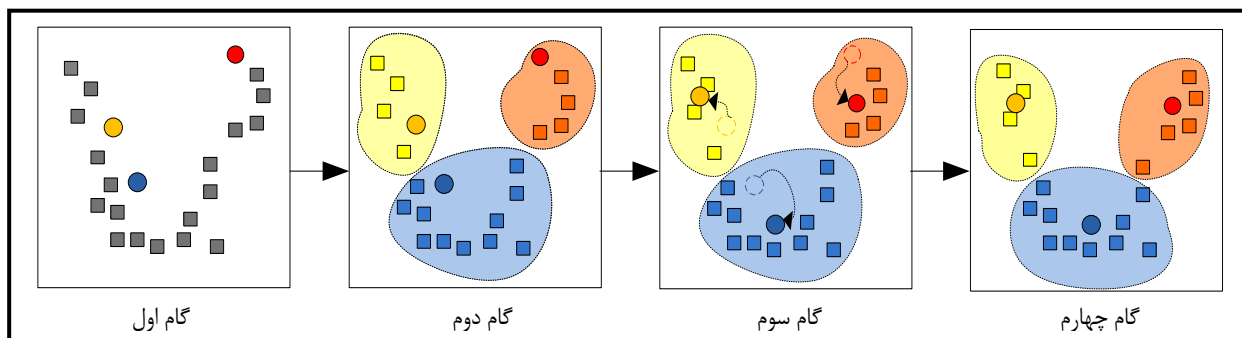
که در آن،

$OF_k^{km}$  مجموع فواصل اقلیدسی بین مراکز خوشه و داده‌ها متعلق به آن‌ها برای k خوشه.

$X_j$  داده ورودی j ام.

$Y_i$  مرکز ثقل خوشه‌ی i ام.





شکل (۲-۳) روند کلی الگوریتم k-means استاندارد

$\Psi_i^{cl}$  مجموعه‌ای از داده‌ها یا نقاط بار متعلق به خوشه ی  $i$  ام.

با توجه به شکل (۲-۳)، روند الگوریتم k-means استاندارد برای  $k_p$  تا خوشه، در چهار گام اصلی به

شرح زیر است [۴۵]:

گام اول) انتخاب تصادفی  $k$  تا مرکز ثقل (این کار معمولاً با انتخاب داده‌ها از بین مجموعه داده‌هایی که

باید خوشه‌بندی شوند انجام می‌گردد).

گام دوم) تخصیص داده‌ها به نزدیک‌ترین مرکز ثقل بر مبنای فاصله اقلیدسی، بنابراین:

$$\Psi_i^{cl(t)} = \left\{ X_j : \|X_j - Y_m^{(t)}\|^2 \leq \|X_j - Y_n^{(t)}\|^2 \forall n, 1 \leq n \leq k \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad j = 1, 2, \dots, nL \quad (۱۶-۳)$$

که در آن،

$\Psi_i^{cl(t)}$  مجموعه‌ای از داده‌های متعلق به خوشه ی  $i$  ام در تکرار  $t$  ام.

$Y_n^{(t)}$  مرکز ثقل خوشه  $n$  ام در تکرار  $t$  ام.

$Y_m^{(t)}$  مرکز ثقل خوشه  $m$  ام در تکرار  $t$  ام.

گام سوم) محاسبه مراکز ثقل خوشه‌های تشکیل‌شده‌ی حاصل از گام قبلی.

$$Y_i^{(t+1)} = \frac{1}{|\Psi_i^{cl(t)}|} \sum_{j \in \Psi_i^{cl(t)}} X_j \quad (۱۷-۳)$$

گام چهارم) تکرار گام‌های ۲ و ۳ تا زمانی که مراکز خوشه‌ها تغییری نکنند.

### ۳-۴-۲- توسعه الگوریتم k-means استاندارد برای مکان‌یابی بهینه پست‌ها

الگوریتم k-means استاندارد تنها بر مبنای فاصله اقلیدسی پست‌ها را مکان‌یابی می‌کند در حالی که، مبنای فاصله به‌تنهایی نمی‌تواند در مکان‌یابی پست‌های فوق توزیع معیار دقیقی باشد چراکه، توان بارها نقش مهمی در هزینه‌ی شبکه فشار متوسط و افت ولتاژ روی خطوط دارند. از این رو، باید پست‌های فوق توزیع تا حد امکان به بارهای سنگین‌تر نزدیک باشند تا تلفات و افت ولتاژ کاهش یابد. بعلاوه، در فرایند مکان‌یابی پست‌های فوق توزیع، پست‌های موجود نیز باید در نظر گرفته شوند بطوریکه، باید مکان آن‌ها در طول روند مکان‌یابی ثابت باشد. از این رو گام‌های اول و سوم الگوریتم استاندارد k-means به صورت زیر تغییر می‌نماید.

گام اول ( تنها به تعداد  $n_p^{ns}$  که تعداد پست‌های جدید است، مرکز خوشه به‌طور تصادفی تولید می‌شود. این مراکز به‌علاوه‌ی مختصات پست‌های موجود به‌عنوان ورودی به الگوریتم k-means داده می‌شود بنابراین:

$$n_p^{ns} = k_p - n_p^{es} \quad (۳-۱۸)$$

که در آن،

$n_p^{ns}$  تعداد پست‌های جدید در دوره ی p ام.

$n_p^{es}$  تعداد پست‌های موجود در دوره ی p ام.

$k_p$  تعداد کل پست‌ها یا خوشه‌ها در دوره ی p ام.

گام سوم) برای در نظر داشتن توان بارها در محاسبه مراکز ثقل، رابطه ی (۳-۱۷) به صورت زیر اصلاح

می‌گردد.

$$Y_{p,i}^{(t+1)} = \left( \frac{1}{\sum_{j \in \Psi_i^{st(t)}} S_{p,j}^\alpha} \right) \sum_{j \in \Psi_i^{st(t)}} S_{p,j}^\alpha \cdot X_j \quad i = n_p^{es} + 1, \dots, k_p \quad (19-3)$$

در رابطه‌ی (۱۹-۳) توان بارهای هر خوشه به صورت یک ضریب وزنی در محاسبه متوسط یا مرکز ثقل آن در نظر گرفته شده است. اما برای تنظیم سهم تأثیر این ضریب وزنی در محاسبه‌ی میانگین خوشه‌ها، آن را به توان  $\alpha$  رساندیم، بطوریکه هرچه  $\alpha$  را افزایش دهیم، سهم بارهای بزرگ‌تر در محاسبه‌ی مرکز ثقل هر خوشه بیشتر خواهد شد و مکان پست‌ها به بارها بزرگ‌تر نزدیک‌تر می‌شود. در نتیجه، تلفات و به همان نسبت، هزینه‌های مربوط به آن‌ها به‌علاوه‌ی افت و لتاژ کاهش می‌یابد. دو حالت کلی را می‌تواند برای  $\alpha$  در رابطه‌ی (۱۹-۳) در نظر داشت:

(۱) اگر  $\alpha = 0$  باشد، مراکز ثقل مشابه حالت استاندارد تنها با معیار فاصله انجام می‌گیرد.

(۲) اگر  $\alpha \rightarrow \infty$  باشد، مرکز ثقل هر خوشه به سمت نقطه‌ی باری میل می‌کند که بیشترین توان مصرفی را دارد.

برای ثابت نگه داشتن مکان پست‌های موجود در این گام، مراکز ثقل تنها برای پست‌ها جدید محاسبه شده

و تغییر می‌کنند (یعنی  $i = n_p^{es} + 1, \dots, k_p$ ).

گام‌های دیگر الگوریتم k-means توسعه یافته، مشابه حالت استاندارد آن است. با اجرای الگوریتم

معرفی شده، مکان بهینه‌ی پست‌های جدید تعیین می‌شود.

### ۳-۵- تعیین حوزه سرویس دهی و ظرفیت پست

تعیین بهینه‌ی حوزه‌ی سرویس دهی تأثیر قابل توجهی بر جواب مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق

توزیع دارد. با تعیین حوزه‌ی سرویس دهی، مشخص می‌شود که هر بار باید توسط کدام پست تغذیه گردد که

این عمل، باید تحت در نظر داشتن قیود فنی حاکم بر مسئله برنامه‌ریزی انجام گیرد.

بر مبنای تئوری ریاضیات، یک جواب بهینه‌ی سراسری، در حل هر مسئله بهینه‌سازی با یک جستجوی کلی بر تمام  $m$  فضای جستجوی مسئله به دست می‌آید [۸]. با توجه به تئوری ترکیبات<sup>۱</sup>، تعداد حالات و راه‌های تخصیص هر یک از  $m$  مورد به هر  $n$  گزینه برابر با  $m^n$  است. از این‌رو، کل حالت‌های فضای جستجو برای تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌های یک شبکه که دارای  $nL$  نقاط بار و  $k$  پست باشد، برابر  $k^{nL}$  است. حال فرض کنیم که ارزیابی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و قیود فنی برای هر حالت، تنها  $10^{-10}$  ثانیه وقت بگیرد، در این صورت تقریباً ۳۱۷ سال لازم است تا تمامی حالت‌ها برای رسیدن به یک جواب بهینه‌ی سراسری برای شبکه‌ای شامل ۱۰ پست و ۲۰ نقطه بار، بررسی شود. از آنجاکه:

$$\frac{10^{20} \times 10^{-10}}{365 \times 24 \times 3600} \sim 317$$

بنابراین، بررسی کل فضای جستجو نمی‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای حل این مسئله باشد. از این‌رو، تاکنون روش‌های مختلفی برای حل این مسئله ارائه شده است برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از:

#### (۱) روش فاصله: این روش مشابه الگوریتم $k$ -means عمل می‌کند، یعنی ابتدا هر بار بر اساس معیار

فاصله به نزدیک‌ترین پست اش وصل می‌شود. پس از اتصال تمامی بارها، پست‌هایی که دچار اضافه‌بار شده‌اند شناسایی شده و برخی از بارهای آن‌ها به صورت تصادفی از آن‌ها جدا شده و به پست‌های دیگر که دارای ظرفیت آزاد هستند متصل می‌گردند. این عمل تا زمانی انجام می‌شود که تمامی پست‌ها در وضعیت مجاز بارگیری قرار گیرند. از آنجاکه ترتیب اولیتهی درج‌سازی بارها از پست‌های دچار اضافه‌بار و اتصال آن‌ها به پست‌های بعدی وجود ندارد، و بعلاوه تنها این عمل بر اساس معیار فاصله انجام می‌گیرد، ممکن است به جواب بهینه منتهی نشود. بعلاوه این روش تنها می‌تواند در شرایط معلوم بودن ظرفیت بهینه پست‌ها<sup>۲</sup> اجرا شود. این روش می‌تواند تأثیر بسزایی در رسیدن به جواب بهینه‌ی داشته باشد اگر به‌عنوان جواب‌های اولیه توسط الگوریتم‌های تکاملی استفاده شود [۴۷]، [۴۸].

<sup>۱</sup> - Combinatorics theory

<sup>۲</sup> - به این شرایط اصطلاحاً Greenfield گویند.

**(۲) روش شاخص تلفات:** هدف از این روش، حداقل کردن تلفات شبکه است، و بر این اساس نقاط بار به پستی وصل می‌شوند که تلفات روی فیدر تغذیه‌ی کننده‌ی آنها کمترین مقدار باشد. در این روش برای تخصیص بارها یک ماتریس شاخص تلفات که توسط رابطه‌ی (۳-۲۰) به دست می‌آید، تعریف می‌شود [۹].

$$IL_{ij} = (S_i \cdot \cos \varphi)^2 d_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad , \quad j = 1, 2, \dots, nL \quad (۲۰-۳)$$

که در آن،

$IL_{ij}$  تلفات حاصل از اتصال بار  $j$  ام به پست  $i$  ام است.

یک ماتریس شاخص تلفات نمونه در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها به وسیله‌ی یک روش شبه تکراری<sup>۱</sup> تعیین می‌شود. به این صورت که ابتدا، ماتریس شاخص تلفات محاسبه شده؛ سپس بوسیله‌ی مرتب نمودن هر سطر از ماتریس به ترتیب صعودی بهترین نقطه بار مناسب جهت اتصال برای هر پست مشخص می‌گردد. پس از آن، برای تشخیص بهترین پست مناسب برای هر بار، تمامی

	Load 1	...	Load nL
Substaion 1	$IL_{11}$	$\dots$	$IL_{1nL}$
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
Substaion k	$IL_{k1}$	$\dots$	$IL_{knL}$

شکل (۳-۳) ماتریس شاخص تلفات

<sup>1</sup> - Pseudo-repetitive

ستون‌ها به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند. در نهایت، با توجه به اولویت‌بندی به دست آمده، تخصیص بارها با در نظر داشتن حد ظرفیت بارگیری پست‌ها انجام می‌گیرد [۴۹].

روش شاخص تلفات جواب بهتری نسبت به روش قبلی به دست می‌آورد، ولی باز هم نمی‌تواند ظرفیت بهینه‌ی پست‌ها را همزمان با تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی مشخص کند و این مستلزم آن است که تخصیص بارها به پست‌ها در چندین مرحله با در نظر داشتن ظرفیت‌ها مختلف برای پست‌ها انجام گیرد. با این حال در [۹]، این روش با الگوریتم ژنتیک جهت تعیین طرح بهینه‌ی برای سیستم توزیع، ترکیب شده است.

### ۳) روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی: برخی از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک [۳]،

[۹]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۳۶]، الگوریتم رقابت استعماری [۱۱، ۳۵]، الگوریتم کلونی مورچه [۳۴] با هدف جستجوی کلی بر فضای جستجوی مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست بکار گرفته شده‌اند. اغلب این روش‌ها مسئله را در حالتی حل نموده‌اند که تمامی متغیرهای تصمیم‌گیری مجهول بوده‌اند (یعنی به جای اینکه مسئله را با تقسیم آن به زیر مسئله‌های مختلف حل کنند، سعی در تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری به صورت یکجا را داشته‌اند). این کار باعث افزایش فضای جستجو و از طرفی زمان اجرا حل مسئله می‌شود، بعلاوه احتمال گیر افتادن الگوریتم در مینیمم‌های محلی افزایش می‌یابد.

### ۴) روش‌های ترکیبی: این روش‌ها با ترکیب روش‌های ابتکاری با الگوریتم‌های تکاملی توانسته بهتر از

سه روش قبلی عمل کنند، چراکه از یک جهت با به‌کارگیری روش‌های ابتکاری مقدار قابل توجهی از جواب‌های ناممکن را از چرخه‌ی محاسبات حذف کرده‌اند که در نتیجه باعث کاهش فضای جستجو در محدوده‌ی جواب بهینه شده‌اند، و از جهت دیگر با به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی، محیطی را جهت یک جستجوی کامل برای تعیین همزمان حوزه‌ی سرویس و ظرفیت بهینه فراهم کرده‌اند [۸، ۲۶، ۴۲]. مثلاً در [۸]، ابتدا توسط یک روش ابتکاری ترتیب اولویت اولیه برای بارها در یک‌روند تکراری تعیین می‌شود، اما از آنجاکه مقدار بهینه‌ی ظرفیت پست‌ها نامعلوم است، برای یافتن همزمان حوزه‌ی سرویس‌دهی و ظرفیت بهینه‌ی پست‌ها از الگوریتم تکاملی استفاده کرده است، بدین صورت که، نسبتی معینی، از جمعیت اولیه

توسط روش ابتکاری تولید می‌شود.

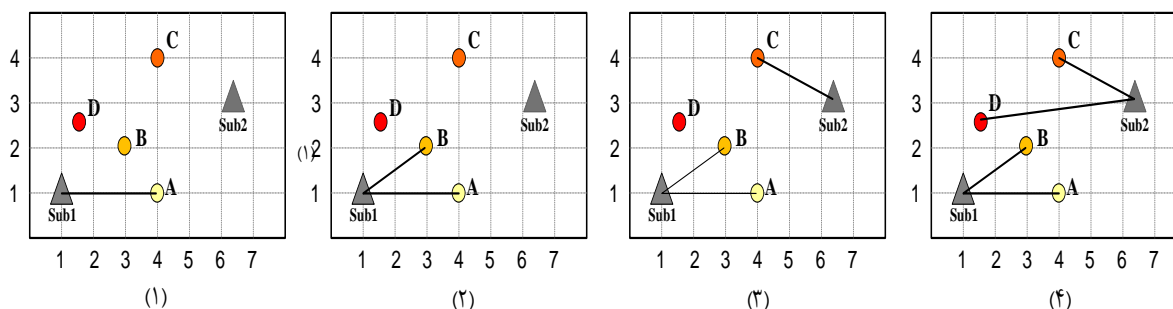
در تمامی روش‌های ارائه‌شده [۵, ۸, ۹, ۲۶, ۴۲]، در تابع هزینه‌ی اتصال بارها به پست‌ها، هزینه‌ی توسعه ظرفیت پست‌ها در نظر گرفته نشده است، که این باعث شده است تا آن‌ها برای پیدا کردن ظرفیت بهینه‌ی پست‌ها:

- در دو روش اول، مجبور به اجرای الگوریتم برای حالات مختلف ممکن ظرفیت پست‌ها شوند و درنهایت با مقایسه آن‌ها، طرحی با کمترین هزینه را به‌عنوان جواب برگزینند (اجرای مکرر الگوریتم)

- در روش‌های سوم و چهارم با مدل کردن ظرفیت پست‌ها به‌عنوان متغیر مجهول در کنار متغیرهای مجهول دیگر، سعی در پیدا کردن جواب بهینه در تکرارها متوالی (توسط الگوریتم‌های تکاملی) برمی‌آیند، که این باعث سخت‌تر شدن روند حل مسئله و افزایش فضای جستجو شده، که درنهایت ممکن است الگوریتم در مینیمم محلی گیر بیافتد.

از این‌رو در روش پیشنهادی، با اضافه کردن هزینه‌ی توسعه ظرفیت پست‌ها به تابع هزینه‌ی اتصال بارها (که شامل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری است)، شرایطی ایجاد می‌شود، که ظرفیت بهینه‌ی پست به‌طور همزمان با حوزه‌ی سرویس‌دهی آن‌ها، بدون نیاز به مدل‌سازی آن به‌عنوان متغیر مجهول دیگر تعیین گردد. علاوه بر آن، به‌نوعی مدیریت دارایی در روند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است.

برای محدود کردن فضای جستجو، اتصال بارها را بر مبنای اولویت اتصالشان به مناسب‌ترین پست انجام می‌دهد. یعنی در حقیقت با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی بهترین ترتیب تقدم بارها (که کمترین هزینه را به شبکه تحمیل می‌کند) برای اتصال به پست مناسبشان پیدا می‌شود. مناسب‌ترین پست برای هر بار با ارزیابی تابع هزینه اتصال که شامل هزینه‌های فیدر بعلاوه توسعه ظرفیت پست است به دست می‌آید. اتصال بار بر اساس اولویت‌بندی بسیار پراهمیت است، ولی در روش‌های ذکرشده، به‌جز در [۸, ۲۶, ۴۲] از آن چشم‌پوشی شده است. برای پی بردن به اهمیت این موضوع فرض کنید که در شکل (۳-۴) بخواهیم بارها را بدون حق تقدم تنها با در نظر داشتن معیار فاصله و قید ظرفیت بارگیری پست‌ها، به پست تخصیص



شکل (۳-۴) روند تخصیص بارها به پست‌ها بدون در نظر داشتن اولویت اتصال

دهیم. در این شکل، بزرگی هر بار توسط درجه‌ی رنگ آن نمایش داده شده است (یعنی  $S_A < S_B < S_C < S_D$ ). حال فرض شود ابتدا بار A به نزدیک‌ترین پست یعنی Sub1، به همین ترتیب بار B به Sub1 و C به Sub2 وصل شود. باین‌حال چون با اتصال بار D، به Sub1، این پست دچار اضافه‌بار می‌شود مجبوریم آن را به پست دورترش یعنی Sub2 وصل کنیم. اگرچه، کاملاً مشخص است که یک تخصیص بهینه برای آن‌ها، اتصال بارهای B و D به پست اول (Sub1) و بارهای A، C به پست دوم (Sub2) است. بنابراین، اگر حق تقدم در اتصال بارها رعایت می‌شد، پست اول قبل از اینکه ظرفیت آزاد بارگیری خود را از دست بدهد بار سنگین‌تر را دریافت می‌کرد.

### ۳-۵-۱- روش حل مسئله تخصیص بارها توسط برنامه‌ریزی دینامیکی

در این بخش هدف، مدل کردن چگونگی تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها بر مبنای اولویت اتصال بارها توسط برنامه‌ریزی دینامیکی است. برنامه‌ریزی دینامیکی، روشی کارآمد در حل مسائل بهینه‌سازی با استفاده از دو خصیصه‌ی خط‌مشی بهینه<sup>۱</sup> و زیرخط‌مشی<sup>۲</sup> است [۵۰]. تاکنون از این روش در حل مسائل گوناگون برنامه‌ریزی‌های سیستم‌ها قدرت استفاده شده است، که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

<sup>1</sup> - Optimal policy

<sup>2</sup> - Subpolicy



- توزیع اقتصادی بار در سیستم‌ها با واحدهای حرارتی.
- حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها.
- حل مسائل برنامه‌ریزی توسعه پست‌های توزیع [۱۸-۲۰].
- حل مسائل برنامه‌ریزی توسعه فیدرهای اولیه و ثانویه [۵۱].

از این رو، در این بخش با به‌کارگیری آن به‌عنوان ابزاری قدرتمند و سریع برای رسیدن به بهترین اولویت‌بندی اتصال بارها که باعث ایجاد طرحی با کمترین هزینه می‌شود استفاده شده است. برای معرفی روش پیشنهادی ابتدا به تشریح تابع هدف و تابع هزینه‌ی اتصال هر بار می‌پردازیم. سپس، روش تعیین مناسب‌ترین پست برای هر بار از میان پست‌های ممکن در شعاع مجاز تغذیه آن بار، معرفی می‌شود. در نهایت الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی جهت پیدا نمودن بهترین حوزه‌ی سرویس‌دهی با توجه به اولویت اتصال بارها تشریح می‌شود.

### □ تابع هدف مسئله و تابع هزینه اتصال:

با توجه به رابطه (۳-۴) و روابط (۳-۱۰) و (۳-۱۱)، تابع هدف در تعیین حوزه‌ی سرویس را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۳-۲۱) تعریف نمود، که شامل مجموع تمام هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری شبکه فشار متوسط، بعلاوه هزینه‌ی توسعه ظرفیت پست‌ها است.

$$OF^{OSA} = \sum_{i \in \Psi_p^{sn}} ExC_{p,i}^s + InC_{p,i}^{dg} + \sum_{y \in \Psi_p^{yn}} PW^y \cdot \sum_{i \in \Psi_p^{sn}} OpC_{p,y,i}^{dg} \quad (۳-۲۱)$$

که در آن،

$$ExC_{p,i}^s \quad \text{مجموع هزینه‌ی سالیانه توسعه ظرفیت پست } i \text{م در دوره } p \text{ ام است.}$$

تابع هدف از سه بخش اصلی تقسیم‌شده، بخش اول به هزینه‌های توسعه ظرفیت برای پست‌ها مربوط است، و بخش دوم و سوم به ترتیب هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری فیدرها را محاسبه می‌کند. از این رو، تابع هزینه‌ی اتصال هر بار به پست نیز شامل سه قسمت اصلی فوق‌الذکر است که به صورت زیر

تعریف می‌شود:

$$CC_{p,ij} = ExC_{p,i}^s + \kappa.d_{ij}.C_{p,j}^{Fcon} + T.C_y^{EL}.Lf_p.PL_{p,ij}^f \quad i \in \Psi_{p,j}^{SS} \quad (22-3)$$

که در آن،

$CC_{p,ij}$  هزینه‌ی اتصال بار  $j$  ام به پست  $i$  ام در دوره  $p$  ام (برحسب دلار \$).

$\Psi_{p,j}^{SS}$  مجموعه‌ای از پست‌های ممکن برای تغذیه‌ی بار  $j$  ام در دوره  $p$  ام.

### □ روند تعیین مناسب‌ترین پست در هر مرحله از برنامه‌ریزی دینامیکی برای یک‌بار مشخص

جهت تعیین مناسب‌ترین پست برای تغذیه یک‌بار مشخص، ابتدا مجموعه‌ای از پست‌های ممکن توسط بررسی قیود افت ولتاژ و حداکثر ظرفیت بارگیری پست تعیین می‌گردد. برای اینکار ابتدا از نقطه نظر افت ولتاژ، حداکثر برد مجاز تغذیه برای آن بار توسط رابطه‌ی (۳-۲۳) به دست می‌آید [۵۲] (برای محاسبه این برد باید مقاومت و راکتانس نوع فیدری با حداکثر سطح مقطع ممکن در نظر گرفته شود، تا امکان ارزیابی دورترین پست‌ها نیز برای بارها فراهم شود)، سپس برای تمامی پست‌هایی که در شعاع برد مجاز آن بار قرار گرفته‌اند قید حد ظرفیت بارگیری (رابطه‌ی (۳-۱۲)) بررسی می‌شود.

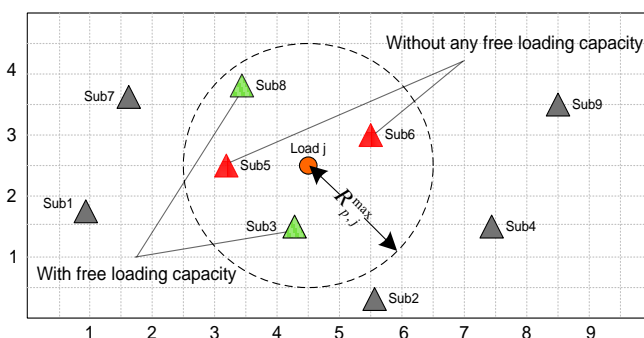
$$R_{p,j}^{\max} = \frac{(V_n)^2 \cdot \Delta V_{\max}}{S_{p,j} (r^{\max} \cos \varphi + x^{\max} \sin \varphi) \cdot 100} \quad (23-3)$$

که در آن،

$R_{p,j}^{\max}$  حداکثر برد مجاز برای بار  $j$  ام در دوری  $p$  ام. (برحسب km).

$r^{\max}$  مقاومت فیدری با حداکثر سطح مقطع ممکن  $(\frac{\Omega}{km})$ .

$x^{\max}$  راکتانس فیدری با حداکثر سطح مقطع ممکن  $(\frac{\Omega}{km})$ .



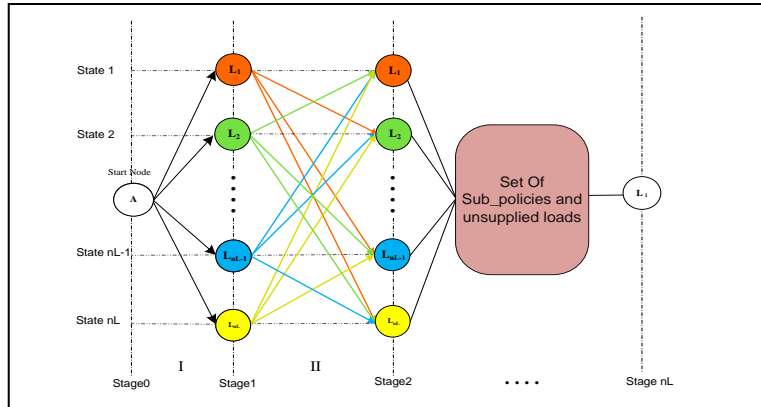
شکل (۳-۵) حداکثر برد مجاز تغذیه بار زام با پست‌ها ممکن جهت تخصیص آن بار

پست‌هایی که با دریافت آن بار، دچار اضافه‌بار نشوند به‌عنوان پست‌های ممکن برای تغذیه آن بار شناخته می‌شوند. در شکل (۳-۵) این عمل برای یک‌بار نمونه نشان داده شده است. در این شکل، پست‌های Sub5 و Sub6 که در شعاع مجاز تغذیه بار زام قرار گرفته‌اند، دارای ظرفیت آزاد بارگیری جهت تغذیه بار مورد نظر نیستند، و تنها پست‌های Sub3 و Sub8 به‌عنوان پست‌ها ممکن برای تغذیه بار زام مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. با به دست آمدن مجموعه‌ی پست‌های ممکن برای بار زام، تابع هزینه‌ی اتصال (۳-۲۳) برای تمامی آن پست‌ها محاسبه می‌شود، و آن پستی به‌عنوان مناسب‌ترین پست انتخاب می‌گردد که دارای کمترین هزینه‌ی اتصال باشد.

### □ حوزه سرویس دهی بر مبنای اولویت اتصال توسط برنامه‌ریزی دینامیکی:

حل مسئله تعیین حوزه سرویس‌دهی بر اساس اولویت‌بندی بارها مشابه مسئله فروشنده دوره‌گرد است. یعنی شروع تخصیص از کدام بار باشد، به کدام بارها برود و به کدام بار پایان گیرد. بر طبق اصل بهینگی<sup>۱</sup> در برنامه‌ریزی دینامیکی، یک خط مشی بهینه است اگر، در یک مرحله بخصوص از مسئله، علی‌رغم هر تصمیمی در مرحله‌ی قبل، تصمیمات لازم اتخاذ شده، درحالی‌که تصمیمات قبل را در نظر می‌گیریم منجر به یک خط‌مشی بهینه شود [۵۰]. خط‌مشی بهینه، ترتیب و توالی اتصال بارها به پست مناسبشان است. و هر خط‌مشی از زیرخط مشی بهینه تشکیل شده است، یعنی تصمیماتی که در هر مرحله اتخاذ می‌گردد

<sup>1</sup> - Principle of optimal



شکل (۳-۶) نمای کلی از مراحل و حالت‌ها در برنامه‌ریزی دینامیکی تخصیص بار بر مبنای اولویت اتصال

است. این تصمیمات همان، انتخاب بار در هر مرحله، برای اتصال به پست مناسب است که توالی را تکمیل می‌سازد. با توجه به شکل (۳-۶) در مورد مسئله تخصیص بارها، هر مرحله ( $Stage_i$ ) تشکیل شده است از نقاط باری که از نگاه زیرخط مشی (زیر توالی‌ها) طی شده تا آن مرحله، این بارها هنوز به هیچ پستی تعلق نگرفته‌اند. در هر مرحله باید یک سری محاسبات موازی برای خط‌مشی‌های گوناگون ذخیره‌شده تا آن مرحله انجام گیرد. در واقع هر مرحله باید به اندازه‌ی تعداد بارهای باقی‌مانده اطلاعات لازم را ذخیره نماید.

فرضیات زیر در اجرای برنامه‌ریزی دینامیکی در نظر گرفته شده است:

- (۱) نقطه‌ی شروع، نقطه‌ای است که هیچ باری به پستی متصل نشده است (مرحله  $Stage_0$ ).
- (۲) حالت‌ها، نماینده‌ی بارهای تغذیه نشده هستند، و هر مرحله شامل حالت‌هایی است که، تا آن زمان توسط پستی، تغذیه نشده‌اند.
- (۳) ظرفیت اولیه‌ی پست‌های جدید باید برابر با حداقل ظرفیت ممکن برای آن‌ها باشد، و برای پست‌های موجود برابر با ظرفیت موجودشان است.
- (۴) هزینه‌ی رسیدن به هر حالت، برابر با هزینه‌ی اتصال آن بار مشخص به پست مناسب است.
- (۵) هر حالت که نماینده باری مشخص در مرحله  $i$  است، تنها می‌تواند به حالت‌هایی از مرحله‌ی  $i-1$  وصل گردد، که زیرخط مشی‌ها یا زیرتوالی‌های مرتبط با آن حالت‌ها تا آن لحظه، آن بار را در برنگرفته باشند.

۶) در صورت توسعه ظرفیت پست در هر مرحله برای هر حالت، ظرفیت جدید آن پست به‌عنوان ظرفیت موجود در مرحله‌ی بعدی، برای حالت‌های مرتبط با آن حالت (مرحله قبلی) شناخته می‌شود.

از آنجا که هزینه‌ی هر حالت (بار) برابر با هزینه اتصال آن بار مشخص به پست مناسب است و از جهت دیگر چون هزینه توسعه و قید حداکثر ظرفیت بارگیری پست‌ها در فرایند تخصیص بارها در نظر گرفته شده است، بنابراین هزینه‌ی رسیدن به هر حالت به‌شدت وابسته به زیرخط مشی یا زیرتوالی حالت مرحله قبل است. بنابراین الگوریتم بازگشتی جهت محاسبه هزینه‌ی کل رسیدن به حالت زام (نماینده‌ی بار زام) در مرحله n از حالت i ام از مرحله قبل در دوره‌ی p ام از برنامه‌ریزی، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{p,n,j,i}^{cost} = CC_{p,j,s(j,i,n)} + F_{p,n-1,i}^{Unp} \quad \forall i: j \notin \Psi_{(n-1),i}^{psln} \quad (24-3)$$

$$F_{p,n-1,i}^{Unp} = \sum_{z \in \Psi_{n-1,i}^{psln}} CC_{p,j,s(j,i,n)} \quad (25-3)$$

که در آن،

هزینه کل رسیدن به حالت زام در مرحله‌ی n ام، از حالت i ام مرحله قبلی، در دوره‌ی p ام از برنامه‌ریزی.

حداقل هزینه‌ی کل حالت i ام مرحله‌ی n-1 در دوره‌ی p ام از برنامه‌ریزی.

هزینه‌ی اتصال بار زام به مناسب‌ترین پستش برای حالت i ام در مرحله‌ی n ام  $(s(j,i,n))$  در دوره‌ی p ام از برنامه‌ریزی.

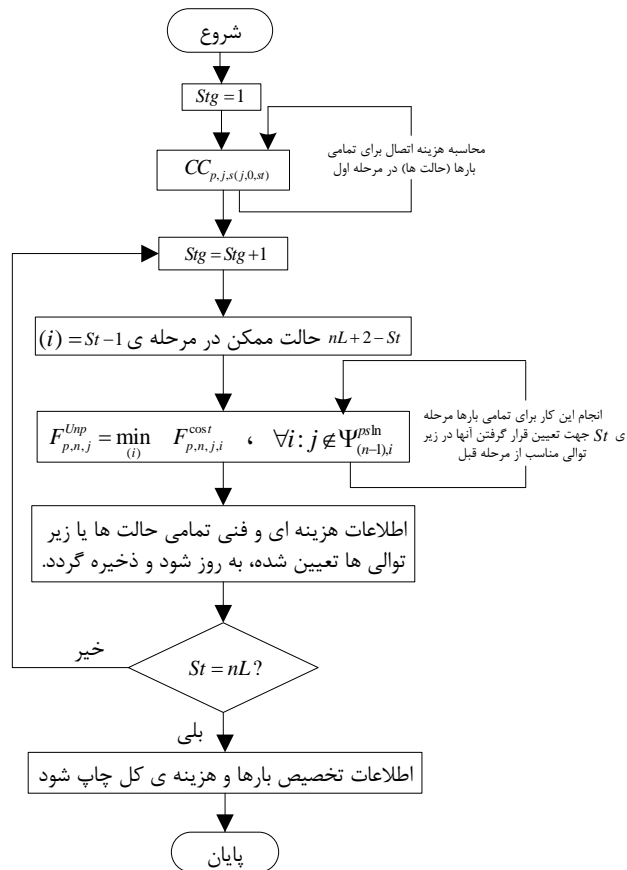
مجموعه‌ای شامل زیر توالی بارها حالت i ام در مرحله‌ی n-1.

همان‌طور که از رابطه‌ی (۲۴-۳) پیداست هزینه‌ی کل رسیدن به حالت زام وابسته به زیر توالی بارهای حالت n ام در مرحله قبل است، چراکه هزینه‌ی ایجاد حالت زام  $(CC_{p,j,s(j,i,n)})$  که برابر است با هزینه‌ی اتصال بار زام به پست منتخبش  $(s(j,i,n))$  تحت تأثیر زیرتوالی اتصالات بارهای حالت n ام است. و از طرف

دیگر وابسته به هزینه کل مربوط به اتصالات بارهای حالت  $i$  ام به پست‌های مناسبشان تا آن مرحله است. بنابراین بر اساس برنامه‌ریزی دینامیکی حداقل هزینه کل برای حالت زام، از مقایسه هزینه‌های کل رسیدن به حالت زام در مرحله  $n$  ام، از حالت‌های ممکن مرحله  $n-1$  ( $\forall i: j \notin \Psi_{(n-1),i}^{psIn}$ ) و انتخاب کمترین آن‌ها به دست می‌آید. پس از انتخاب حداقل‌ترین، بار زام در زیر توالی حالت منتخب مرحله قبلی قرار گرفته (به‌روز شدن مجموعه  $\Psi_{(n-1),i}^{psIn}$ ) و تمام اطلاعات مربوط به بارگیری و توسعه ظرفیت پست‌ها برای آن زیر توالی به‌روز شده و ذخیره می‌گردد. یعنی:

$$F_{p,n,j}^{Unp} = \min_{(i)} F_{p,n,j,i}^{cost} \quad \forall i: j \notin \Psi_{(n-1),i}^{psIn} \quad (3-26)$$

فلوچارت ارائه‌شده در شکل (۷-۳) روند کلی تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی بارها توسط برنامه‌ریزی دینامیکی را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۳) تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی بارها بر مبنای اولویت اتصال با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی

### ۳-۶- روند انتخاب نوع فیدر در طول بهینه‌سازی

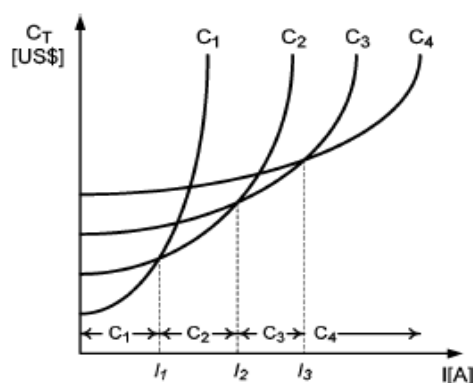
برای برنامه‌ریزی دقیق‌تر مسئله توسعه پست فوق توزیع می‌بایست برآوردی صحیح از هزینه‌های شبکه فشار متوسط انجام شود، این موضوع به انتخاب درست نوع فیدر بر مبنای حداقل کردن هزینه‌ها و در نظر گرفتن قید افت ولتاژ و حد حرارتی فیدرها در طول برنامه‌ریزی خیلی وابسته است. با توجه به ایده‌ی ارائه‌شده در [۵۳] این انتخاب می‌بایست بر مبنای حداقل سازی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری فیدرها انجام شود. اگر فرض شود  $C_j^{imvf}$  و  $C_j^{oprf}$  به ترتیب هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری برای فیدر نوع  $j$  باشد، هزینه کل برای این نوع فیدر به صورت:

$$C_j = C_j^{imvf} + C_j^{oprf} \quad (۳-۲۷)$$

از آنجاکه این هزینه برای انواع مختلف فیدرها، متفاوت است بنابراین اگر منحنی آن بر مبنای جریان و هزینه، برای انواع مختلف فیدر رسم شود، منحنی شکل (۳-۸) حاصل می‌گردد. در شکل (۳-۸) منحنی تغییرات هزینه‌ی فیدر بر حسب جریان برای چهار نوع فیدر ( $C_1$ ،  $C_2$ ،  $C_3$ ،  $C_4$ ) مختلف رسم شده است، از آنجاکه هزینه‌های بهره‌برداری فیدرها با مربع جریان متناسب است، برای چهار نوع مختلف فیدر منحنی‌های درجه دوم حاصل شده است.

مطابق با شکل (۳-۸) برای محدوده‌های مختلف جریان باید فیدر مناسب انتخاب شود. برای مثال، اگر جریان باری بین  $I_1$ ،  $I_2$  باشد، مناسب‌ترین فیدر بدون در نظر گرفتن قید افت ولتاژ، فیدر نوع  $C_2$  است، که هزینه‌ی کمتری نسبت به  $C_1$  دارد.

اما از آنجاکه باید قید افت ولتاژ را نیز در روند انتخاب نوع فیدر مناسب در نظر گرفت، بنابراین با توجه به رابطه‌ی (۳-۲۳)، ابتدا حداقل امیدانس مجاز برای یک‌بار نمونه‌ی  $Z$  ام (دارای توان مصرفی  $S_{p,j}$  و به فاصله  $d_j$  از پستش قرار دارد) توسط رابطه‌ی (۳-۲۸) به دست می‌آید:



شکل (۳-۸) منحنی هزینه- جریان برای چهار نوع فیدر مختلف [۵۳].

$$|Z_j^{amin}| = \frac{(V_n)^2 \cdot \Delta V_{max}}{\kappa \cdot d_j \cdot S_{p,j} \cdot 100} \quad (3-28)$$

سپس رابطه‌ی (۳-۲۷) تنها برای فیدرهایی که دارای اندازه‌ی امپدانسی کوچک‌تر از مقدار حداقل امپدانس مجاز هستند محاسبه می‌شود، در نهایت با مقایسه هزینه‌ها، آن فیدری انتخاب می‌شود، که دارای کمترین هزینه باشد.

### ۳-۷- نتیجه‌گیری

در این فصل یک روش جدید ابتکاری توسط ترکیب الگوریتم توسعه داده‌شده‌ی k-means و برنامه‌ریزی دینامیکی برای برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع، ارائه داده شد؛ بطوریکه بتواند مکان، تعداد، ظرفیت و حوزه سرویس‌دهی بهینه‌ی پست‌ها را تحت قیود رایج فنی و اقتصادی، بدون نیاز به مکان‌های کاندید تعیین کند. برمبنای روش‌های چندبخشی، برای کاهش بهینه فضای جستجو، مسئله برنامه‌ریزی به دو زیر مسئله تقسیم شد. با حل زیر مسئله اول، مکان بهینه‌ی پست‌های فوق توزیع توسط الگوریتم توسعه‌یافته‌ی kmeans مشخص می‌شود، و سپس، با توجه به نتایج بدست‌آمده از آن حوزه سرویس‌دهی بهینه‌ی پست‌ها توسط برنامه‌ریزی دینامیکی برمبنای حق تقدم اتصال بارها تعیین می‌گردد.



الگوریتم k-means در جهت راهبرد حل مسئله، توسعه و تطبیق داده شد تا بتواند مکان‌یابی پست‌ها را با در نظر گرفتن توان مصرفی بارها بسیار سریع و مطمئن انجام دهد بطوریکه، آنها جایی که به بارهای بزرگ نزدیک‌تر قرار گیرند. این در حالی است که مکان پست‌های موجود در طول فرایند مکان‌یابی، ثابت می‌ماند. برای در نظر داشتن سهم توان بارها در فرایند الگوریتم توسعه‌یافته k-means، توان بارها را به صورت یک ضریب وزنی در محاسبه مرکز ثقل هر خوشه لحاظ نمودیم تا هزینه‌های بهره‌برداری و افت ولتاژ، تا حد ممکن کاهش یابد. برای تنظیم سهم ضرایب وزنی در محاسبه میانگین خوشه‌ها، آن را به توان یک پارامتر رساندیم تا به نوعی الگوریتم خوشه‌بندی در جهت در نظر داشتن میزان توان مصرفی در تعیین مراکز خوشه‌ها منعطف شود.

به دلیل پیچیدگی مسئله تخصیص بارها و وجود پیش از حد حالات و ترکیبات ممکن، از اولویت اتصال بارها برای محدود کردن فضای جستجوی حل مسئله‌ی تعیین حوزه‌ی سرویس دهی پست‌ها تخصیص بارها استفاده شد. در این راستا، برای تعیین مناسب‌ترین پست جهت تغذیه هر بار، تابع هزینه‌ی اتصال جدیدی تعریف گردید که شامل، هزینه‌ی توسعه ظرفیت پست‌ها، علاوه بر هزینه‌های شبکه فشار متوسط و بهره‌برداری است. مزیت این روش بدین صورت است که:

- (۱) مدیریت دارایی در طول فرایندی تعیین حوزه‌ی سرویس دهی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، حداکثر استفاده از ظرفیت موجود شبکه صورت می‌گیرد.
- (۲) ظرفیت بهینه‌ی پست‌ها به طور همزمان با تخصیص بارها بدون نیاز به تعریف آن به صورت یک متغیر مجهول اضافی دیگر، تعیین می‌شود. از این رو، پیچیدگی حل مسئله کاهش می‌یابد.
- (۳) تسهیل در فرایند تعیین حوزه‌ی سرویس دهی پست‌ها نسبت به دیگر روش‌ها.



## **فصل چهارم:**

**یک روش جدید برای برنامه‌ریزی چند-**

**مرحله‌ای توسعه پست‌فوق توزیع در یک**

**شبکه بزرگ واقعی، تحت آنالیز GIS**

## ۴-۱- مقدمه

برنامه‌ریزی پست‌فوق توزیع به دلیل داشتن متغیرها و معیارهای مختلف تحت قیود فنی متنوع گوناگون، یک کار بسیار سخت و درعین حال ضروری برای تأمین و تضمین بار مورد تقاضای آینده با بهترین کیفیت از نظر نوع سرویس و سطح قابلیت اطمینان قابل قبول است. روند بهینه‌سازی باید تمامی ملاحظات فنی و اقتصادی را در برگیرد تا طرح پیشنهادی بتواند جواب‌گوی بار در بهترین حالت فنی با کم‌ترین قیمت باشد. از این رو، رویارویی با شبکه واقعی با ابعاد خیلی بزرگ به مراتب سخت‌تر و پیچیده‌تر است و نیاز به ابزاری قدرتمند و درعین حال دقیق، ضروری است. در فصل پیش، روشی بسیار ساده، سریع و کاربردی برای برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع ارائه گردید، که بتواند یک ساختار مقدماتی از توسعه شبکه در یک برنامه‌ریزی بلند-مدت در اختیار مهندسين برنامه‌ریز قرار دهد. اما، به دلیل عدم انعطاف‌پذیری الگوریتم  $k$ -means، جهت در نظر داشتن تمامی ملاحظات و محدودیت فنی و عملی، این الگوریتم نمی‌تواند یک ابزار بسیار دقیق در حل مسائل عملی باشد. از این رو در این فصل، راهکاری جدیدی جهت توسعه‌ی پست‌فوق توزیع برای یک شبکه واقعی بزرگ تحت محدودیت‌های فنی و عملی ارائه می‌شود.

همان‌طور که در فصل دوم و سوم اشاره شد، روش معمول در برنامه‌ریزی توسعه‌ی پست‌فوق توزیع، تعیین مکان‌های کاندید برای احداث پست‌ها است. این مکان‌ها توسط برنامه‌ریزها و مهندسين خبره بر اساس معیارهای گوناگون از قبیل نزدیکی به مرکز بار، قیمت زمین، امکان ساخت پست در آن مکان، و غیره، انتخاب می‌شود. مشکل اساسی در این روش، وابستگی زیاد نتایج برنامه‌ریزی به مکان‌های کاندید انتخاب‌شده است، بطوریکه با تغییر آن‌ها، جواب‌ها برنامه‌ریزی تغییر می‌کنند. از آن گذشته، انتخاب این مکان‌ها در سیستم‌های فوق توزیع بزرگ مربوط به کلان‌شهرها و حومه‌های اطرافشان، که وسعت آن‌ها تقریباً بیش از ۱۰ هزار کیلومتر مربع است، کار دشوار و طاقت‌فرسایی است. بنابراین، در نظر گرفتن تمامی جوانب و معیارها در تعیین درست این مکان‌ها برای دستیابی به یک برنامه‌ریزی بهینه، خارج از توان و

نیروی انسانی است و نیاز به محاسبات پیچیده دارد.

در فصل گذشته، با اعمال توان مصرفی بارها به‌عنوان ضریب وزنی در محاسبه‌ی میانگین هر خوشه و همچنین در نظر گرفتن مکان ثابت پست‌های فوق توزیع، الگوریتم  $k$ -means در جهت حل مسئله، توسعه و تطبیق داده شد، و توانست مکان پست‌ها را بدون نیاز به مکان‌های کاندید، در مرکز ثقل بارها جایی نزدیک‌تر به بارهای بزرگ‌تر تنظیم کند. این کار باعث کاهش هزینه‌های شبکه فشار متوسط و بهبود افت ولتاژ شد. اما، باید در نظر داشت که الگوریتم  $k$ -means به دلیل آنکه:

- جواب نهایی آن به‌شدت وابسته به مراکز اولیه است، که به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.
- تابع هدف آن غیر محدب است.

امکان گیر افتادن در مینیمم‌های محلی را دارد [۴۶]. علاوه بر این‌ها، الگوریتم  $k$ -means نمی‌تواند ملاحظات ضروری دیگری چون قیمت زمین و مکان‌های غیرممکن برای احداث پست را در روند حل مسئله در نظر بگیرد.

قیمت زمین برای پست‌های فوق توزیع، به دلیل بزرگی ابعاد زمین موردنیاز، بخش قابل‌توجهی از هزینه‌های طرح را شامل می‌شود، و این‌زمانی اهمیت پیدا می‌کند که با یک شبکه واقعی در کلان‌شهرها روبرو باشیم، چراکه قیمت زمین‌ها با کمی جابجایی در این کلان‌شهرها به‌شدت تغییر می‌کند. علاوه بر آن، بزرگی ابعاد پست‌فوق توزیع باعث شده که شرکت‌های برق نتوانند پست‌های فوق توزیع را، به دلیل محدودیت‌های جغرافیایی و شهری، در هر مکانی احداث کنند. با توجه به نکات ذکر شده، الگوریتم  $k$ -means نمی‌تواند ابزار دقیقی برای مکان‌یابی بهینه‌ی پست‌فوق توزیع، مخصوصاً برای شبکه‌هایی که دارای ابعاد واقعی هستند. از این‌رو، در این فصل در مرحله‌ی اول الگوریتم رقابت استعماری مبتنی بر  $k$ -means (ICA-KCT)<sup>۱</sup> در جهت در نظر داشتن تمام ملاحظات فنی و عملی مسئله برنامه‌ریزی توسعه داده می‌شود بطوریکه، مکان‌یابی بهینه‌ی پست‌ها را بدون نیاز به مکان‌های کاندید از پیش تعیین شده با بررسی

<sup>۱</sup> - Imperialist competitive algorithm based on  $k$ -means clustering technique (ICA\_KCT)

معیارهای عملی حاکم بر مسائل واقعی تحت آنالیز سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) منطقه‌ی برنامه‌ریزی، انجام دهد. برای در نظر داشتن محدودیت‌های جغرافیایی و قیمت زمین‌ها، یک نقشه رستری از منطقه برنامه‌ریزی آماده‌شده است که در روند بهینه‌سازی مکان‌یابی پست‌ها، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مرحله ی بعدی، با آماده‌سازی اپراتورهای جذب<sup>۱</sup> و انقلاب<sup>۲</sup> ویژه‌ای، برای الگوریتم رقابت استعماری (ICA)، آن را در جهت پیدا کردن بهترین ترتیب توالی اتصال بارها به پست مناسبشان، به یک ابزار قدرتمند برای تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی بهینه‌ی پست‌ها، تبدیل کرده‌ایم. بدین ترتیب، یک شیوه کد نویسی توسعه‌یافته جدیدی برای الگوریتم رقابت استعماری تعریف می‌شود، تا بتواند مسئله گسسته‌ی مناسب‌ترین ترتیب توالی بارها را در تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی، حل نماید. از آنجاکه الگوریتم رقابت استعماری برای حل مسئله گسسته توسعه داده‌شده است آن را الگوریتم رقابت استعماری گسسته (DISA)<sup>۳</sup> می‌نامیم.

در این فصل برای تسهیل در فرایندی بهینه‌سازی، با توسعه دادن روش ارائه‌شده در [۶]، جهت تجزیه‌ی منطقه‌ی برنامه‌ریزی به ناحیه‌های کوچک و حل هر ناحیه به صورت مجزا ارائه‌شده است. این در حالی است که، برخی از پست‌های مرزی در روند تخصیص بار ناحیه ی مجاور شرکت داده می‌شوند.

## ۴-۲- روش بهینه‌سازی

روند کلی بهینه‌سازی برای روش پیشنهادی جهت برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع یک شبکه بزرگ با توجه به شکل (۴-۱)، از دو مجموعه عملیات مقدماتی اصلی تشکیل شده است. عملیات مقدماتی، جهت آماده‌سازی منطقه‌ی برنامه‌ریزی انجام می‌شود، که شامل :

۱. ایجاد بخش‌های الکتریکی شبه منظم خیلی کوچک.

<sup>1</sup> - Assimilation

<sup>2</sup> - Revolution

<sup>3</sup> - Discret imperialist competitive algorithm (DICA)

## ۲. تجزیه‌ی کردن منطقه‌ی برنامه‌ریزی به چندین ناحیه کوچک مجزا.

برای سامان بخشیدن به بارهای منطقه برنامه‌ریزی، باید آن‌ها را به بخش‌های الکتریکی مربع شکل کوچکی دسته‌بندی نمود بنابراین ابتدا، بارهای منطقه‌ی برنامه‌ریزی به بخش‌های الکتریکی شبه منظم<sup>۱</sup> خیلی کوچک دسته‌بندی می‌شوند، بطوریکه مجموع بارهای هر بخش در مرکز آن بخش قرار می‌گیرند. به این دلیل آن‌ها را شبه منظم نامیدیم که دارای اندازه‌های یکسانی اما متفاوت هستند. بدین صورت که در مرحله‌ی اول، بارها به بخش‌های الکتریکی منظم خیلی کوچک<sup>۲</sup> دسته‌بندی می‌شوند. سپس با اعمال قید حداکثر بار مجاز بخش الکتریکی<sup>۳</sup>، آن بخش‌هایی که دارای باری بیشتر از مقدار مجاز تعریف شده باشند به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم می‌گردند، تا قید مربوطه ارضا گردد. این کار برای جلوگیری از امکان قرار گرفتن روند تخصیص بارها، در مسیر اشتباه، انجام می‌شود، چراکه ممکن است پست‌های اطراف یک بخش الکتریکی، با مقدار بزرگ توان مورد تقاضا، دارای مقدار کافی ظرفیت، برای دریافت آن بخش به تنهایی نباشند. هر بخش الکتریکی دارای دو مشخصه است:

۱. مشخصه‌ی الکتریکی: مقدار توان تقاضای آن بخش را نشان می‌دهد که در مرکز ثقل آن بخش

قرار دارد.

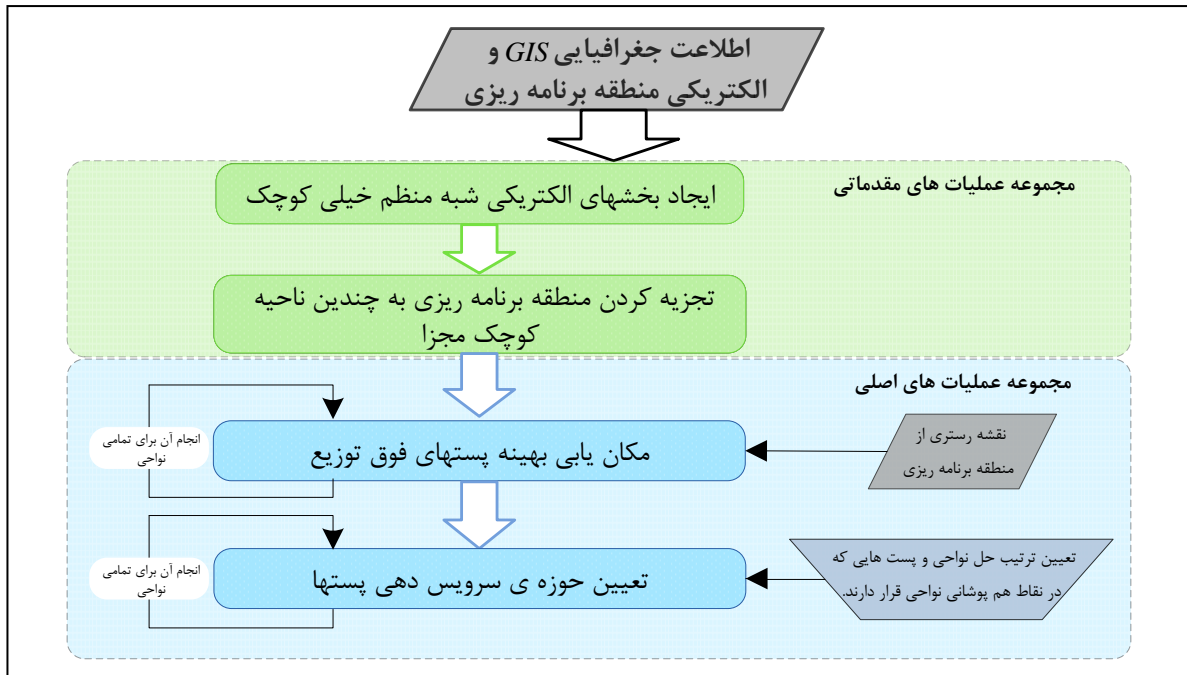
۲. مشخصه‌ی جغرافیایی: عرض و طول مرکز ثقل آن بخش را بیان می‌کند.

تا اینجا، بارهای منطقه‌ی برنامه‌ریزی به بخش‌های الکتریکی نامنظم خیلی کوچک دسته‌بندی شد. از آنجاکه هدف، برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای یک شبکه واقعی خیلی بزرگ است، حل کل منطقه‌ی برنامه‌ریزی به صورت مستقیم منجر به جواب‌های غیرمعقول و غیرمنطقی می‌گردد، زیرا در چنین شرایطی تعداد حالات و ترکیبات ممکن به قدر زیاد است، که الگوریتم بهینه‌سازی در جواب‌های محلی بهینه به‌ناچار، گیر می‌افتد. بنابراین، برای اصلاح این شرایط و تسهیل بخشیدن به روند بهینه‌سازی، باید

<sup>1</sup> - Pseudo-regular mini-electrical zones

<sup>2</sup> - Regular mini-electrical zones

<sup>3</sup> - Maximum allowable load demand of mini-electrical zones



شکل (۴-۱) مجموعه عملیات مقدماتی و اصلی حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای یک شبکه بزرگ، به روش پیشنهادی دوم

منطقه‌ی برنامه‌ریزی به چندین ناحیه کوچک تجزیه شود. بدین منظور، در این مرحله از روشی برای تجزیه دقیق منطقه‌ی برنامه‌ریزی به ناحیه‌های کوچک با الهام از ایده‌ی ارائه‌شده در [۶]، توسط الگوریتم ICA-KCT استفاده می‌شود که در بخش ۴-۶ تشریح شده است.

پس از آماده‌سازی منطقه مطالعاتی، مجموعه عملیات اصلی که شامل مراحل جهت تعیین متغیرهای تصمیمی گیری (مکان، ظرفیت، حوزه ی سرویس‌دهی) است، اجرا می‌گردد، که شامل

۱. مکان‌یابی بهینه پست‌های فوق توزیع توسط الگوریتم ICA-KCT

۲. تعیین حوزه سرویس‌دهی به‌وسیله الگوریتم گسسته ی ICA

در ادامه به تشریح مجموعه عملیات مقدماتی و اصلی می‌پردازیم.

## ۴-۳- ایجاد بخش‌های الکتریکی نامنظم کوچک

اولین قدم برنامه‌ریزی برای یک شبکه ی واقعی، سامان‌دهی بارهای منطقه ی برنامه‌ریزی است. در



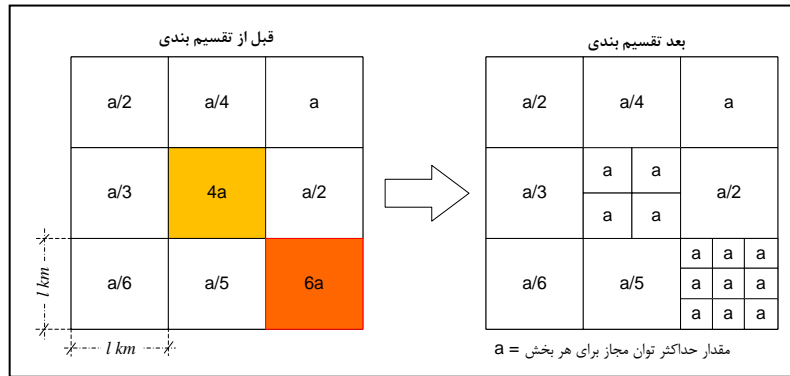
برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع، پست‌های توزیع (ترانسفورماتورهای توزیع  $400\text{V}/20\text{ kV}$ ) به‌عنوان بارهای شبکه شناخته می‌شوند، که تعداد آن‌ها در شبکه‌های بزرگ به‌پیش از ده هزارتا می‌رسد. بنابراین اگر بخواهیم این تعداد نقطه بار را در محاسبات لحاظ نماییم، حجم محاسبات و زمان حل آن پیش از حد زیاد می‌شود. علاوه بر این باعث پیچیده‌تر شدن روند بهینه‌سازی می‌گردد. بنابراین روش متداول دسته‌بندی بارهای منطقه برنامه‌ریزی به‌صورت بخش‌های مربع شکل کوچک هم‌اندازه (به طول  $l$ ) است [۳، ۹، ۱۰، ۵۴]، بطوریکه مجموع بارهای هر بخش در مرکز ثقل آن بخش قرار گرفته است.

از آنجاکه، مقدار بار هر بخش تأثیر بسزایی در روند تخصیص بارها ایجاد می‌کند، بنابراین نادیده‌گرفتن توان هر بخش می‌تواند منتهی به جواب‌های غیردقیق گردد. به‌طور خیلی ساده، اگر فرض گردد، بخشی با مقدار توان تقاضای ۲۰ مگاوات آمپر وجود داشته باشد و چهار پست اطراف این بار، به ترتیب دارای ظرفیت آزاد بارگیری ۸، ۱۲، ۶، ۱۰ مگاوات آمپر باشند، در این حالت، از آنجاکه مقدار توان تقاضای بخش موردنظر از ظرفیت آزاد بارگیری پست‌های اطرافش بیشتر است، نمی‌تواند به هیچ پستی وصل شود و الگوریتم بهینه‌سازی به شما دستور زیاد کردن تعداد پست‌ها را صادر می‌کند. در صورتی‌که اگر این بخش را به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم نماییم در آن صورت تمامی بخش‌ها به پست‌ها اطرافشان وصل می‌شوند، بدون اینکه نیازی به افزایش تعداد پست‌ها باشد. از این‌رو، در [۱۰] برای پیدا کردن اندازه درستی از بخش‌ها، زمان اجرای برنامه و هزینه‌ی نهایی جواب‌ها را برای اندازه‌های مختلفی از بخش‌ها بررسی کرده است و در نهایت اندازه‌ی درست آن را تعیین نموده است، همچنین در [۵۵]، توسط دیاگرام ورونوی<sup>۱</sup>، بخش‌های با اندازه‌ای غیرمنظم تولید شده است.

در این فصل، به معرفی روشی ساده و سریع برای تولید بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم می‌پردازیم، بطوریکه روند تولید آن‌ها به‌صورت زیر است:

۱. تعیین اندازه‌ی اصلی هر بخش الکتریکی ( $l$ ) و حداکثر توانی که هر بخش می‌تواند داشته باشد.

<sup>1</sup> - Voronoi diagram



شکل (۴-۲) ایجاد بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم

۲. تقسیم بارها به بخش‌های مربع شکل با اندازه  $l$  در منطقه  $Y$  برنامه‌ریزی.

۳. شناسایی بخش‌های الکتریکی که دارای توانی بیش از اندازه حداکثری تعیین شده است، و تقسیم آن‌ها

به بخش‌ها کوچک‌تر بطوریکه که قید حداکثر توان مجاز برآورده شود.

اندازه‌ی بخش‌های تقسیم‌شده‌ی کوچک بستگی به مقدار توان آن بخش متجاوز دارد. یعنی تعداد

بخش‌ها، از تقسیم مقدار توان آن بخش متجاوز بر مقدار حداکثر توان مجاز به دست می‌آید. شکل (۴-۲)

روند انجام تولید بخش‌های الکتریکی نامنظم را نشان می‌دهد.

## ۴-۴ مکان‌یابی بهینه پست‌های فوق توزیع توسط الگوریتم توسعه یافته ICA-KCT

هدف از مکان‌یابی بهینه‌ی پست‌های فوق توزیع، قرارگیری خودکار آن‌ها در مکان‌هایی است که

از یک طرف به مراکز بارها نزدیک باشند و از جهت دیگر، از لحاظ محدودیت‌های جغرافیایی و محیطی دارای

امکان ساخت پست بوده و همچنین تا جای ممکن قیمت آن‌ها ارزان باشد. علاوه بر تمامی این‌ها باید قیود

برنامه‌ریزی را نیز در نظر داشت. بنابراین، به‌طور کلی باید ملاحظات زیر را در روند مکان‌یابی پست‌های فوق

توزیع در نظر داشت:

- ثابت ماندن مکان پست‌های موجود در طول فرایند

- در نظر داشتن توان بارها برای کنترل تلفات و افت ولتاژ
- در نظر داشتن محدودیت‌های جغرافیایی و محیطی
- در نظر داشتن هزینه‌ی زمین‌های منطقه‌ی برنامه‌ریزی

در فصل قبلی گفتیم که شیوه‌ی خوشه‌بندی، برای مکان‌یابی پست‌ها مناسب است چراکه می‌تواند پست‌ها را در کوتاه‌ترین فاصله به بارها قرار دهد. بدین جهت الگوریتم  $k$ -means را توسعه دادیم تا بتواند توان بار و مکان ثابت پست‌های فوق توزیع را در روند مکان‌یابی در نظر بگیرد. ولی، جواب‌های نهایی الگوریتم  $k$ -means به شدت وابسته به مراکز ثقل اولیه‌ای است که به صورت تصادفی انتخاب می‌شود (مشابه مکان‌های کاندید)؛ و از طرف دیگر، چون تابع هدف آن غیر محدب است ممکن است در مینیمم‌های محلی گیر کند. از این رو، برای غلبه بر معایب اجتناب‌ناپذیر  $k$ -means، الگوریتم‌های خوشه‌بندی مختلفی بر مبنای الگوریتم‌های تکاملی ارائه شده است [۴۵, ۴۶]، بطوریکه در [۴۶]، نشان می‌دهد که با ترکیب الگوریتم رقابت استعماری و  $k$ -means می‌توان به جواب بهتری نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی بر پایه الگوریتم‌های مختلف رسید.

علاوه بر تمام مشکلات ذکر شده، الگوریتم  $k$ -means به دلیل عدم انعطاف‌پذیری جهت در نظر گرفتن ملاحظات فنی، جغرافیایی، و محیطی مسئله مکان‌یابی، نمی‌تواند ابزار کارآمد و دقیقی برای حل این مسئله باشد. بدین جهت، در این بخش بر مبنای ایده ارائه شده در [۴۶]، برای در نظر گرفتن تمامی ملاحظات ضروری ذکر شده، الگوریتم رقابت استعماری بر مبنای شیوه خوشه‌بندی  $k$ -means (ICA-KCT) برای حل مسئله مکان‌یابی پست‌ها توسعه داده شده است.

با توجه به مشخصه‌های فوق‌الذکر یعنی حداقل سازی هزینه‌ی بهره‌برداری شبکه فشار متوسط، هزینه‌ی خرید زمین، ملاحظات فنی و جغرافیایی، و محدودیت محیطی بر اساس رابطه (۳-۴) که در فصل سوم بیان شد و عناصر آن تعریف گردید، تابع هدف مسئله مکان‌یابی را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$OF_p^{OSSP} = T.C_y^{EL} . Lf_p . \sum_{i=1}^{k_p} \sum_{j \in \Psi_i^l} PL_{p,ij}^f + \sum_{i=n_p^{es}+1}^{k_p} LNP_{p,i} \quad (۱-۴)$$

با قیود:

$$x_i^c \notin \Psi^{Unx} \quad i = n_p^{es} + 1, n_p^{es} + 2, \dots, k_p \quad (۲-۴)$$

$$y_i^c \notin \Psi^{Umy} \quad i = n_p^{es} + 1, n_p^{es} + 2, \dots, k_p \quad (۳-۴)$$

$$\sum_{i=1}^{n_p^{es}} x_i^c - x_i^{ex} = 0 \quad (۴-۴)$$

$$\sum_{i=1}^{n_p^{es}} y_i^c - y_i^{ex} = 0 \quad (۵-۴)$$

که در آن،

$OF_p^{OSSP}$  مجموع هزینه‌های سالیانه تمامی خوشه‌ها در دوره ی p ام (بر حسب \$).

$LNP_{p,i}$  مجموع هزینه‌های سالیانه خرید زمین برای پست های جدید ام در دوره ی p ام (بر حسب

(\$).

$x_i^{exs}$  طول مختصات مکان آامین پست موجود (بر حسب کیلومتر).

$y_i^{exs}$  عرض مختصات مکان آامین پست موجود (بر حسب کیلومتر).

این تابع هدف از دو بخش تشکیل شده است، بخش اول مربوط هزینه‌های بهره‌برداری یعنی تلفات شبکه فشار متوسط تمامی خوشه‌هاست. با در نظر گرفتن این بخش در تابع هدف پست‌های جدید در مکان‌هایی قرار می‌گیرند که هزینه ناشی از تلفات کمتر باشد. بنابراین افت ولتاژ نیز به‌نوعی کنترل می‌شود. لازم به ذکر است، چون در این مرحله هدف تعیین حوزه ی سرویس‌دهی پست‌ها نیست بنابراین از در نظر گرفتن قید حداکثر ظرفیت بارگیری پست‌ها صرف نظر شده است (یعنی فرض شده که تمامی پست‌ها دارای ظرفیت نامحدودی هستند). بخش دوم تابع هدف مربوط به هزینه‌های خرید زمین برای پست‌های جدید است.

هزینه‌ی زمین برای یک پست با مختصات مشخص بر مبنای نقشه‌ی رستری که حاوی اطلاعات جغرافیایی و اقتصادی سیستم تحت مطالعه است به دست می‌آید. چگونگی ایجاد یک نقشه رستری از منطقه برنامه‌ریزی در بخش ۴-۴-۴ تشریح شده است.

قیود (۲-۴) و (۳-۴) برای جلوگیری از قرار گرفتن پست‌ها جدید در مکان‌هایی است که از نظر جغرافیایی یا محیطی غیرممکن و نامناسب هستند. قیود (۴-۴) و (۵-۴) مربوط به ثابت نگه‌داشتن مکان پست‌های موجود در طول روند حل مسئله مکان‌یابی است.

در ادامه ابتدا به توصیف الگوریتم رقابت استعماری می‌پردازیم و سپس الگوریتم توسعه‌یافته ی ICA-KCT را تشریح می‌کنیم.

#### ۴-۴-۱- الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

الگوریتم رقابت استعماری، یک شیوه‌ی جدید بر پایه الگوریتم‌های تکاملی، باهدف جستجوی سراسری در حل مسائل پیچیده و مشکل است [۵۶]. نرخ همگرایی مناسب و توانایی دست‌یابی به جواب بهینه‌ی سراسری بهتر باعث شده که در حوزه‌های مختلفی چون داده‌کاوی و هوش مصنوعی، مهندسی و همچنین برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع استفاده شود. مثلاً در [۱۱، ۳۵]، از این الگوریتم برای توسعه پست‌های فوق توزیع و پست‌های توزیع استفاده شده است، بطوریکه در [۱۱] برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها فوق توزیع و فیدرها را به‌طور همزمان توسط ترکیب الگوریتم رقابت استعماری و درخت پوشای مینیمم حل نموده است، برای حل درخت پوشای مینیمم از روش حریمانه استفاده کرده است. در [۳۵] نیز الگوریتم رقابت استعماری برای حل برنامه‌ریزی پست‌های توزیع بر مبنای ماتریس مشخصه تلفات، توسعه داده شده است. مشابه الگوریتم‌های تکاملی دیگر، این الگوریتم با یک جمعیت اولیه شروع می‌شود. هر فرد از جمعیت،

کشور<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، که می‌تواند توسط یک بردار دارای مشخصه‌های مختلف، تعریف گردد. با ارزیابی هر کشور توسط تابع هزینه، به هر کدام مقداری بر مبنای برازندگی آن به نام قدرت<sup>۲</sup> تعلق می‌گیرد (مشابه الگوریتم ژنتیک که این برازندگی نسبت عکس با مقدار تابع هزینه دارد، یعنی هرچه مقدار تابع هزینه کمتر باشد، برازندگی یا قدرت آن کشور بیشتر است)، که بر اساس آن کشورهایی به‌عنوان استعمارگر<sup>۳</sup> تعیین می‌شوند. هر استعمارگر بسته به میزان قدرتی که دارد می‌تواند باقی کشورها (مستعمره‌ها<sup>۴</sup>) را به استعمار خود درآورده و امپراطوری<sup>۵</sup> خود را شکل دهد. بعد از شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، طی یک روند تکراری، کلونی‌ها در هر امپراطوری تحت عملگرهای اصلی جذب<sup>۱</sup> و انقلاب قرار می‌گیرند. عملگر جذب الهام گرفته شده از سیاست همسان‌سازی است، یعنی هر کلونی با یک نرخ معین به سمت امپراطوری خود حرکت می‌کند و سعی می‌کند خودش را به بهترین جواب نزدیک کند. شکل (۳-۴) چگونگی حرکت کلونی به سمت استعمارگر خود را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در این جابجایی  $x$  و  $\theta$  مقادیر تصادفی با توزیع غیر یکنواخت می‌باشند و  $d$  فاصله‌ی بین مستعمره و استعمارگر را نشان می‌دهد.

$$x \approx U(0, \beta_1 \times d) \quad (۶-۴)$$

$$\theta \approx U(-\gamma, \gamma) \quad (۷-۴)$$

که در آنها،  $\beta_1$  ضریب جذب (معمولاً بین ۱ و ۲)،  $\gamma$  پارامتر تنظیم زاویه انحراف (معمولاً  $\pi/4$ ) هستند که به‌طور تصادفی محدوده‌ی جستجو مستعمره‌ها را در اطراف استعمارگر، اصلاح می‌نمایند. عملگر انقلاب، مشابه عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک است، یعنی هر کشور ممکن است با یک احتمال دچار تغییرات

---

<sup>1</sup> - Country

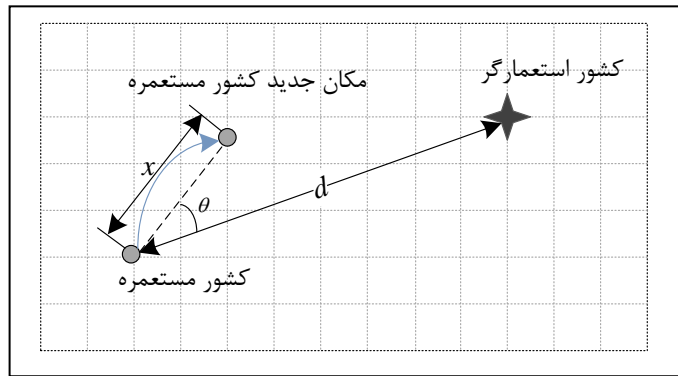
<sup>2</sup> - Power

<sup>3</sup> - Imperialist

<sup>4</sup> - Colony

<sup>5</sup> - Empire

<sup>6</sup> - Assimilation



شکل (۳-۴) نمایش حرکت یک کشور مستعمره به سمت استعمارگر طی عمل جذب [۱۱]

تصادفی و ناگهان گردد. این عملگر باعث افزایش قابلیت اکتشاف<sup>۱</sup> الگوریتم و همگرا شدن به سمت بهینه‌سراسری می‌شود، درحالی‌که نرخ بالای این عملگر باعث کاهش قابلیت استخراج<sup>۲</sup> الگوریتم و نرخ همگرایی می‌گردد. باید توجه داشت که کل قدرت هر امپراطوری به قدرت کشور استعمارگر و مستعمره‌های وابسته است بدین ترتیب که:

$$T.C._n = C_n^{lm} + \xi \cdot \text{mean}\{C_n^C\} \quad (۸-۴)$$

که در آن،

$T.C._n$  هزینه کل امپراطوری  $n$ ام.

$C_n^{lm}$  هزینه استعمارگر امپراطوری  $n$ ام.

$\text{mean}\{C_n^C\}$  میانگین مجموع هزینه‌های کشورهای مستعمره‌ی امپراطوری  $n$ ام.

$\xi$  مقدار مثبت کوچک.

برای آنکه قدرت هر امپراطوری توسط قدرت استعمارگرش تعیین گردد و مقدار آن متأثر از قدرت مستعمره‌هایش باشد در رابطه ی (۸-۴)،  $\xi$  معمولاً برابر ۰/۱ است که در متوسط مجموع هزینه‌ی

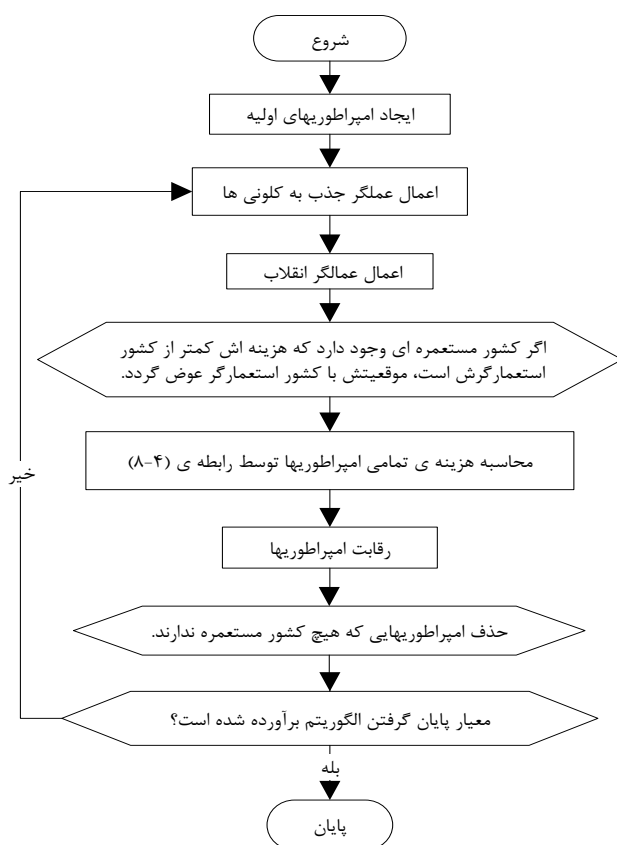
<sup>1</sup> - Exploration

<sup>2</sup> - Exploitation

مستعمره‌هایش ضرب شده است.

بر اساس فلوجارت نشان داده شده در شکل (۴-۴) مراحل مختلف آن به‌طور خلاصه:

۱. ایجاد کشورهای اولیه و محاسبه تابع هزینه برای آن‌ها جهت ایجاد امپراطوریهای اولیه.
۲. اعمال عملگر جذب به کشورهای مستعمره برای حرکت به سمت کشور استعمارگر خود.
۳. اعمال عملگر انقلاب برای ایجاد تغییر در کشورهای مستعمره و هم‌چنین استعمارگر (در خصوص کشور استعمارگر اگر تنها مقدار تابع هزینه بعد از تغییر کمتر باشد، آن تغییر حفظ می‌شود).
۴. اگر کشور مستعمری وجود دارد که هزینه‌اش کمتر از کشور استعمارگر است، موقعیت آن‌ها عوض شود.



شکل (۴-۴) فلوجارت روند کلی الگوریتم رقابت استعماری [۱۱، ۳۵]



۵. محاسبه هزینه‌ی کل رابطه‌ی (۴-۸) برای تمامی امپراطوری‌ها.
۶. برداشتن ضعیف‌ترین کشور مستعمره و قرار دادن آن‌ها در بهترین امپراطوری.
۷. حذف امپراطوری ضعیف و قرار دادن کشورهايش در امپراطوری‌های دیگر.
۸. اگر تنها یک امپراطوری باقی‌مانده، پایان روند بهینه‌سازی در غیر این صورت رفتن به مرحله ی دوم.

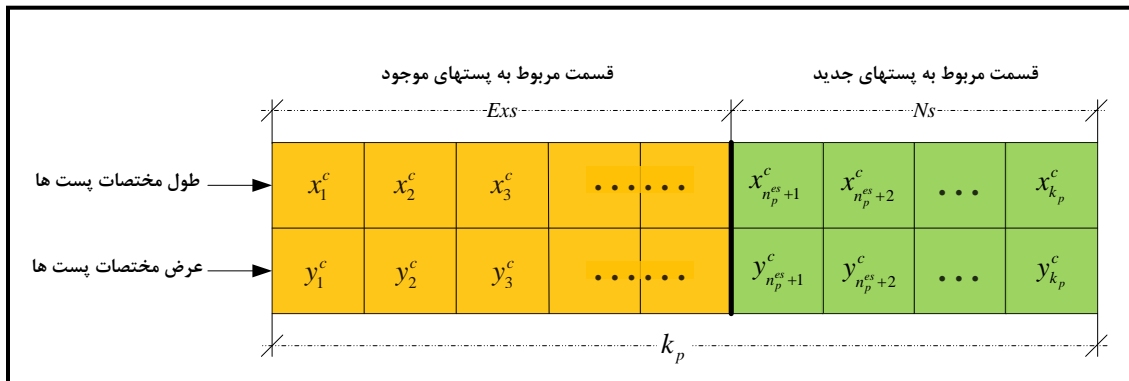
#### ۴-۲-۴- الگوریتم ترکیبی ICA-KCT برای مکان‌یابی

یکی از روش‌های ترکیب الگوریتم k-means با الگوریتم رقابت استعماری تولید جمعیت اولیه توسط k-means است، بطوریکه می‌تواند نرخ همگرایی الگوریتم ICA را به سمت جواب بهینه‌ی سراسری افزایش دهد [۴۶]. برای مسئله مکان‌یابی پست‌های فوق توزیع هر کشور نماینده‌ی مختصات تمامی پست‌ها است. از آنجاکه باید پست‌های فوق توزیع موجود در طول بهینه‌سازی ثابت باشد، بنابراین هر کشور از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول آن که داری طول  $n_p^{es}$  است دربرگیرنده‌ی مختصات پست‌های موجود و قسمت دوم که دارای طول  $n_p^{ns}$  است شامل مختصات پست‌های جدید است. بدین ترتیب قسمت اول و دوم را به ترتیب  $Exs$  و  $Ns$  می‌نامیم. با این تقسیم‌بندی مختصات پست‌های موجود در طول انجام تمامی مراحل الگوریتم ICA از تأثیر عملگرهای جذب و انقلاب در امان می‌مانند. شکل (۴-۵) نشان‌دهنده ساختار کلی هر کشور است.

با توجه به مراحل اصلی الگوریتم رقابت استعماری که در بخش قبلی ارائه شد، برای تطبیق الگوریتم ترکیبی ICA-KCA در حل مسئله ی مکان‌یابی، مراحل ۱ تا ۳ به‌صورت زیر اصلاح می‌شوند:

۱. برای ایجاد جمعیت اولیه از الگوریتم k-means استفاده شده، بطوریکه به‌صورت زیر عمل می‌گردد:

گام اول) اجرای الگوریتم استاندارد k-means برای تولید  $k_p$  مرکز ثقل.



شکل (۴-۵) ساختار یک کشور نمونه در الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری با الگوریتم k-means (ICA-KCT)

گام دوم) شناسایی مراکز ثقلی که به مختصات پست‌های موجود نزدیک است و جابجایی آن‌ها باهم (برای ثابت ماندن مکان پست‌های موجود). بقیه‌ی مراکز ثقل که نماینده مختصات پست‌های جدید هستند بدون تغییر باقی می‌مانند.

گام سوم) تکرار گام‌های اول و دوم برای تولید جمعیت.

بعد از کامل شدن جمعیت، باید کشورها ارزیابی شوند. هر کشور دربرگیرنده‌ی مختصات مکان پست‌ها (فرض بر این است که آن‌ها مراکز ثقل خوشه‌ها هستند) است، بنابراین برای این مکان‌ها خوشه‌ها تشکیل می‌شوند. از آنجاکه هدف، تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی و ظرفیت پست‌ها نیست، عمل تخصیص بخش‌های الکتریکی به مراکز ثقل، بدون در نظر داشتن اولویت اتصال و محدودیت ظرفیت بارگیری پست‌ها بر مبنای فاصله‌ی اقلیدسی انجام می‌گیرد (رابطه ی (۳-۱۶)). بعد از تشکیل خوشه‌ها، هزینه‌ی هر کشور توسط رابطه‌ی (۴-۱) محاسبه می‌شود.

با توجه به هزینه‌ی به‌دست‌آمده، تعداد معینی کشور، که دارای کمترین هزینه هستند به‌عنوان کشور استعمارگر انتخاب می‌شوند. سپس با تعیین قدرت کشورهای استعمارگر ( $Power_i$ ) توسط تابع پُلْتزمن<sup>۱</sup>، کشورهای مستعمره بین آن‌ها با استفاده از عملگر انتخاب چرخ رولت، پخش می‌شوند و امپراطوری‌ها شکل

<sup>1</sup> - Boltzman

می‌گیرد. رابطه ی (۹-۴) تابع محاسبه قدرت بر مبنای تابع بلتزمَن را نشان می‌دهد [۵۷]:

$$Power_i = e^{-\left(\frac{OF_{p,i}^{OSSP}}{\max(OF_{p,i}^{OSSP})}\right)} \quad (9-4)$$

۲. در مرحله جذب، از آنجا که فاصله بین قسمت  $Exs$  تمامی کشورها صفر است بنابراین، با توجه به رابطه ی (۶-۴) تنها قسمت  $Ns$  هر کشور مستعمره به طرف استعمارگرش حرکت می‌کند. در این مرحله به جای ایجاد زاویه انحراف ( $\theta$ )، جهت جستجوی بهتر حول محدوده کشور استعمارگر از روش ساده‌تر و کاربردی‌تر استفاده شده است. بدین ترتیب که بجای تولید  $x$  (رابطه ی (۶-۴)) به صورت اسکالر، آن را به صورت ماتریسی  $2 \times k_p$  ( $x_{(1 \times k_p)}$ ) تولید می‌کنیم، بطوریکه تمامی متغیرها با نسبت‌های مختلفی به سمت استعمارگر حرکت کنند [۴۶].

$$C_{ni}^{C(t+1)} = C_{ni}^{C(t)} + x_{(1 \times k_p)} \quad (10-4)$$

۳. برای ثابت نگه‌داشتن مکان پست‌های موجود، عمل انقلاب تنها بر روی قسمت  $Ns$  کشورها انجام می‌شود یعنی:

$$C_{ni(j)}^{C(t+1)} = C_{ni(j)}^{C(t)} + \sigma x^{rev} \quad , \quad \forall j \notin \{1, 2, \dots, 2n^{es}\} \quad (11-4)$$

$$x^{re} \approx N(0,1) \quad (12-4)$$

$$\sigma = \eta(Y^{\max} - Y^{\min}) \quad (13-4)$$

که در آن،  $x^{re}$  متغیر تصادفی با توزیع نرمال است و اندازه گام‌های جستجو در فضا را به صورت تصادفی تعیین می‌کند، هرچه مقدار آن افزایش یابد سبب کاهش نزول نرخ همگرایی الگوریتم می‌شود. مقدار آن از رابطه ی (۱۳-۴) با  $\eta$  برابر ۰/۱ و اختلاف بین حداکثر  $Y^{\max}$  و حداقل مختصات مجاز  $Y^{\min}$  برای پست‌ها

(پهنای باند فضای جستجو) به دست می‌آید.

مراحل باقیمانده الگوریتم ترکیبی ICA-KCT، مانند الگوریتم رقابت استعماری است و روند بهینه‌سازی

می‌تواند توسط معیارهای مختلفی، پایان گیرد.

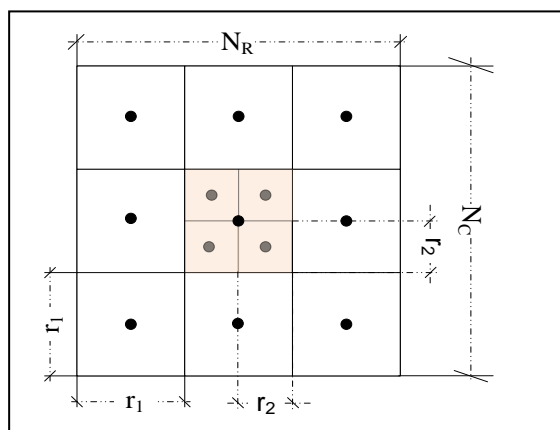
## ۴-۴-۳- آماده‌سازی نقشه رستری و ارزیابی مکان پست‌ها

استفاده از نقاط و دیاگرام‌های غیرمنظم نقشه جغرافیایی در طراحی و مسائل برنامه‌ریزی، کاری بسیار سخت و نیاز به محاسباتی پیچیده دارد، بنابراین یک‌راه ساده و کاربردی استفاده از نقشه‌ی رستری منظم سیستم اطلاعات جغرافیایی منطقه<sup>۱</sup> (GIS) است [۵۸، ۴۰]. تقسیم‌بندی نقشه GIS به  $N_R \times N_C$  سلول مربع شکل با دقت  $r^2$ ، که  $N_C$  و  $N_R$  به ترتیب تعداد سلول در هر ردیف و هر ستون است، را نقشه‌ی رستری گویند. بنابراین اگر فرض شود عرض نقشه  $W$  باشد مقدار دقت نقشه‌رستری برابر با  $W / N_R$  است. هر سلول ( $cel_i$ )، دربردارنده‌ی مشخصه‌های جغرافیایی، محیطی، اقتصادی است بطوریکه:

- مشخصه‌ی جغرافیایی: شامل مختصات مرکز ثقل سلول است (هر سلول با مرکز ثقلش شناخته می‌شود)
- مشخصه‌ی محیطی: شامل محدودیت‌های جغرافیایی و محیطی است. برخی موقعیت‌های جغرافیایی همچون وجود کوه، دریاچه، رودخانه، اتوبان‌های عریض، مکان‌های زیارتی و تاریخی از جمله مکان‌های غیرممکن برای احداث پست به حساب می‌آیند.
- مشخصه‌ی اقتصادی: شامل قیمت زمین در آن سلول مشخص است. کاربری زمین، زمین‌های نزدیک به مرکز شهر، پوشش گیاهی و اثرات شدید زیست‌محیطی از جمله جنبه‌هایی هستند که باعث افزایش قیمت زمین از مقدار واقعی می‌شوند.

<sup>1</sup> - Geographical information system

<sup>2</sup> - Resolution



شکل (۴-۶) تقسیم‌بندی شبه‌منظم برای نقشه رستری

در تولید نقشه‌ی رستری منطقه در یک رویکرد جدید از یک شبه منظم استفاده شده است، چراکه برخی از موقعیت‌های جغرافیایی نیاز به نگاه دقیق‌تری نسبت به جاهای دیگر دارد. این عمل باعث تسهیل در روند محاسبات و ارزیابی موقعیت مکان پست‌ها در فضای جغرافیایی می‌گردد. زیرا اگر دقت نقشه‌ی رستری را تنها به خاطر بخشی از منطقه برنامه‌ریزی، گسترش دهیم (حالت سلول‌های منظم) باعث افزایش بیهوده‌ی محاسبات و زمان اجرا می‌گردد.

از آنجاکه هر سلول با مختصات مرکز ثقل آن شناخته می‌شود، بنابراین برای ارزیابی مکان پست‌ها توسط نقشه‌رستری، از معیار کوتاه‌ترین فاصله‌ی اقلیدسی استفاده می‌شود. یعنی آن مکان به سلولی تخصیص داده می‌شود که کوتاه‌ترین فاصله‌ی اقلیدسی را تا آن داشته باشد. حال موقعیت مکانی آن پست توسط مشخصه‌های محیطی و اقتصادی آن سلول ارزیابی می‌شود. با توجه به وجود دو دقتی بودن نقشه‌ی رستری، به هر سلول یک مشخصه دیگر نیز اضافه می‌شود، که تعیین‌کننده‌ی آن است که آیا آن سلول خود دارای سلول‌های کوچک دیگری هست یا خیر؟ پس در روند تخصیص دادن موقعیت مکانی، به یکی از سلول‌ها با توجه به شکل (۴-۶) به صورت زیر عمل می‌شود:

مرحله (۱) پیدا کردن نزدیک‌ترین مرکز ثقل از میان تمام سلول‌ها با دقت اصلی نقشه‌ی رستری (یعنی  $r_1$ ) تا موقعیت مورد نظر.

مرحله (۲) آن سلول خود دارای سلول‌هایی با دقت  $r_2$  هست. در صورتی که دارا بودن پیدا کردن

نزدیک‌ترین آن‌ها تا موقعیت مورد نظر.

مرحله ۳) خواندن مشخصه‌های محیطی و اقتصادی آن.

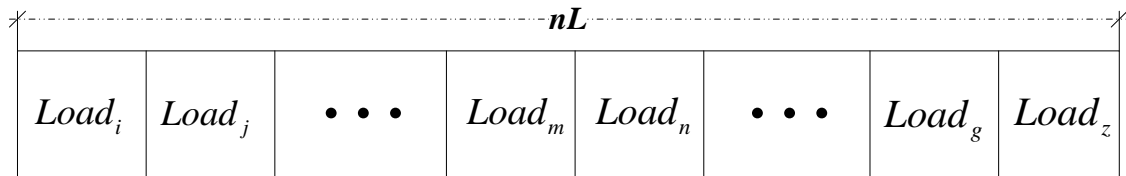
## ۴-۵- تعیین حوزه سرویس دهی توسط الگوریتم گسسته ICA

در فصل گذشته، گفتیم که به دلیل وجود ترکیبات مختلف فراوان برای تخصیص تعداد بار به تعدادی پست، فضای جستجو در مسئله تعیین حوزه سرویس دهی پیش از حد وسیع است، بطوریکه بررسی نمودن تمامی ترکیبات غیرممکن است، همچنین دریافتیم که یک‌راه مناسب برای کاهش دادن به فضای جستجو تعیین اولویت اتصال برای بارها به مناسب‌ترین پست است. بدین‌سان، برنامه‌ریزی دینامیکی را که یک روش ریاضی کارآمدی است، برای اتصال بارها بر مبنای حق تقدم بکار گرفتیم. اما از آنجاکه یک شبکه خیلی بزرگ تعداد بارها و پست‌هایش چندین برابر یک شبکه کوچک و متوسط است، برنامه‌ریزی دینامیکی ممکن است به دلیل نادیده گرفتن بخش عمده‌ای از فضای جستجو در حل مسئله، ناکارآمد باشد و به جواب‌های غیرمعقولی برسد. از این‌رو، در این فصل برای فراهم آوردن یک ابزار جستجوی سراسری، الگوریتم رقابت استعماری جهت پیدا کردن بهترین ترتیب توالی برای بارها (که یک مسئله گسسته است)، توسعه داده‌شده و عملگرهای جذب و انقلاب ویژه‌ای مهیا شده است. بنابراین تمامی روابط گفته‌شده جهت پیدا کردن مناسب‌ترین پست برای بارها و نیز تابع هدف مسئله در اینجا نیز بدون هیچ تغییری استفاده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۴-۷) نشان داده شده است، هر کشور نماینده‌ی جایگشتی از توالی بارهاست. با توجه به هدف اصلی، که پیدا کردن بهترین حق تقدم برای اتصال بارها به پست‌ها است، می‌توان با الهام از روش‌های ارائه‌شده توسط الگوریتم‌های تکاملی برای حل مسئله فروشنده دوره‌گرد [۵۹] و مسائل گسسته‌ی دیگر در حوزه برنامه‌ریزی [۶۰]، الگوریتم رقابت استعماری گسسته، برای حل تعیین حوزه سرویس‌دهی و ظرفیت پست‌ها توسعه داده شده است.

توجه گردد که قبل از بهینه‌سازی باید به هر بار، یک شماره تعلق گیرد؛ بدین‌صورت که اگر فرض شود،

تعداد کل بارهای منطقه‌ی مطالعاتی



شکل (۴-۷) ساختار یک کشور نمونه برای الگوریتم رقابت استعماری گسسته برای تعیین بهترین ترتیب توالی

$nL$  بار وجود دارد به هر باریک شماره‌ی منحصربه‌فرد از یک تا  $nL$  تعلق می‌گیرد. سپس برای اعمال

الگوریتم رقابت استعماری مراحل ۱ تا ۳ الگوریتم رقابت استعماری به صورت زیر اصلاح می‌شوند:

۱. برای ایجاد جمعیت اولیه، کشورهایی به طول  $nL$ ، که هرکدام به صورت تصافی جایگشت‌های

مختلفی از بار را شامل هستند، تولید می‌شود. از آنجاکه هر کشور یک ترتیب توالی از بارها را

نشان می‌دهد، برای ارزیابی آن‌ها، بارها بر مبنای حق تقدم ارائه‌شده توسط آن کشور به

مناسب‌ترین پست‌هایشان وصل می‌شوند، سپس یک تابع هزینه‌ی بر طبق رابطه‌ی (۳-۲۱)

تشکیل می‌شود و مقدار آن محاسبه می‌شود. برای تشکیل امپراطوری‌های اولیه مشابه روند

تشریح شده برای الگوریتم ترکیبی ICA-KCT عمل می‌شود.

۲. از آنجاکه هدف از اعمال عملگر جذب، همسان‌سازی کشورهای مستعمره با کشور

استعمارگراست یعنی به نوعی حرکت دادن تصادفی آن کشورها به سمت مینیمم‌های محلی، لذا،

بهترین روش جهت انجام این عملکرد در این مسئله، جدا کردن تصادفی قسمتی از توالی کشور

استعمارگر و وارد کردن آن به نقطه‌ای تصادفی از توالی کشور مستعمره است. برای روشن شدن

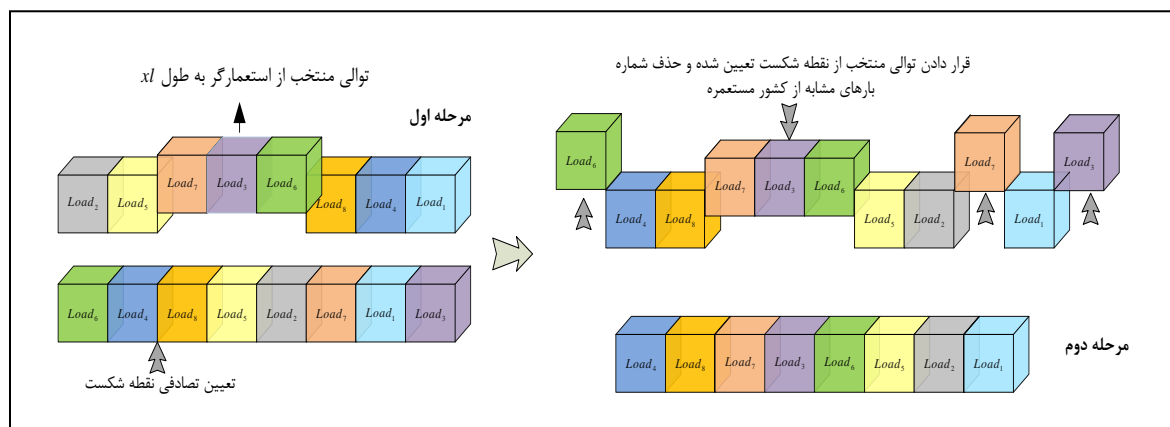
بهتر موضوع شکل (۴-۸) این عملکرد را در دو مرحله نشان داده است. طول توالی منتخب از

کشور استعمارگر ( $xl$ ) و محل برش به ترتیب به صورت تصادفی با توزیع غیریکنواخت و به صورت

تصادفی با توزیع نرمال در راستای آن انتخاب می‌گردد بدین ترتیب:

$$xl \approx U(0, nL)$$

(۴-۱۴)



شکل (۴-۸) روند انجام عمل جذب برای کشورهای شامل ۸ بار

۳. عملگر انقلاب برای افزایش اکتشاف و جستجوی سراسری در فضای مسئله لازم است. از آنجاکه در اینجا با ترتیب توالی بارها سروکار داریم، اگر قرار باشد به صورت تصادفی تعدادی از بارها را در طول توالی یک کشور جابجا کنیم ممکن است نرخ همگرایی الگوریتم به سمت جواب بهینه کاهش یابد چراکه حرکت کشورها در فضای جستجوی مسئله به شدت تصادفی می‌شود. بنابراین برای تسهیل بخشیدن به عملکرد عملگر انقلاب روش جدیدی را معرفی می‌کنیم که می‌تواند روند الگوریتم بهینه‌سازی را مقاوم سازد، بطوریکه بتواند به جواب بهینه‌ی سراسری نزدیک شود. از این‌رو، با استفاده از روش ابتکاری معرفی‌شده در [۸]، برای تمام بارهای آن کشور یک اولویت فرضی تعیین می‌شود. سپس موقعیت هر باری که برای جابجایی در راستای توالی کشور منتخب، انتخاب شده است، بر مبنای یک توزیع نرمال به صورت تصادفی در حوالی اولویت فرضی‌اش قرار می‌گیرد. از این‌رو، ابتدا برای تمامی بارهای آن کشور منتخب، یک شاخص ارزشی، توسط قدر مطلق اختلاف هزینه‌ی بین اتصال بار به پست اول و دوم مناسب تعریف می‌شود بدین صورت:

$$w_j = |CC_{p,j}(1) - CC_{p,j}(2)| \quad (۴-۱۵)$$

که در آن،  $CC_{p,j}(1)$  و  $CC_{p,j}(2)$  به ترتیب هزینه‌ی اتصال بار زام به اولین و دومین پست مناسب در



دوره  $p$  است، و مقدار شاخص ارزشی ( $w_j$ ) نشان‌دهنده اهمیت اتصال زودتر بار به پست مناسب اولش است. مقدار زیاد این شاخص بدین معناست که اگر بار به پست مناسب اولش وصل نشود، هزینه‌ی سنگین‌تری به شبکه تحمیل می‌شود. پس از محاسبه این شاخص برای تمام بارها، بارها بر مبنای مقدار شاخص ارزشی که دارند به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند و برحسب ترتیب درست‌شده هر بار دارای عددی است که نشان‌دهنده جایگاه فرضی آن در توالی است بنابراین:

$$\Psi_i^w = \left\{ \underbrace{w_n, w_x, \dots, w_z}_{w_n \geq w_x \geq \dots \geq w_z} \right\} \quad (4-16)$$

حال موقعیت آن بار منتخب، توسط توزیع نرمال با میانگین  $hn_j$  و انحراف معیار  $\delta$ ، در طول توالی بارها تعیین می‌شود یعنی:

$$pr_j^c \approx hn_j + \delta x^{re} \quad (4-17)$$

مراحل دیگر الگوریتم رقابت استعماری گسسته (DICA) به همان روال الگوریتم رقابت استعماری است.

## ۴-۶- تجزیه منطقه برنامه‌ریزی به نواحی مجزا

از آنجاکه هدف، انجام برنامه‌ریزی برای یک شبکه خیلی بزرگ واقعی به وسعت بیش از  $10^4 \text{ km}^2$  است، حل مسئله برنامه‌ریزی به صورت یکجا برای کل منطقه برنامه‌ریزی، به دلیل افزایش بیش از حد فضای جستجو و سخت شدن روند بهینه‌سازی ممکن است منجر به رسیدن به جواب‌های غیرمعقول گردد. علاوه بر این‌ها، حل مسئله نیاز به صرف زمان زیادی برای اجرا دارد. از این‌رو، در [۶]، با استفاده از الگوریتم  $k$ -means، منطقه‌ی برنامه‌ریزی به چندین ناحیه مجزا تجزیه‌شده است، بطوریکه تعداد نواحی مجزا از تقسیم حداقل

تعداد تئوری ترانسفورماتورها (TMNT)<sup>۱</sup> (مشابه حداقل تعداد تئوری پست‌ها که در فصل سوم تشریح شد) بر تعداد مقدار از پیش تعیین شده ی مشخصه ی TMNT (CTMNT)<sup>۲</sup> به دست می‌آید. ولی، به خاطر اینکه الگوریتم k-means نمی‌تواند اندازه‌ی خوشه‌ها را از نظر بار مصرفی تضمین کند، فرآیند خوشه‌بندی تا زمانی باید تکرار گردد که مقدار مجموع TMNT های تمام خوشه‌ها از مقدار CTMNT کمتر شود.

در این بخش به دلیل معایب الگوریتم k-means که در ابتدای فصل به آن اشاره شد و نیز عدم توانایی آن در نظر گرفتن توان مصرفی در روند تشکیل خوشه‌ها (نواحی مجزا)، از الگوریتم ICA-KCT برای تشکیل نواحی مجزا استفاده شده است. برخلاف روش پیشنهادی در [۶]، که بارها را هدف خوشه‌بندی قرار داده است، در اینجا چون باید پست‌های موجود را در روند بهینه‌سازی در نظر داشت، هدف خوشه‌بندی پست‌های موجود است و سپس تخصیص بارهای منطقه به نزدیک‌ترین خوشه تحت در نظر داشتن قید حداقل تعداد تئوری پست ( $TMNS_p$ ) است. بنابراین، برای هر خوشه یک شاخص حداقل تعداد تئوری پست ناحیه‌ای ( $TMNS_{z_{p,j}}$ )<sup>۳</sup> تعریف می‌شود؛ که مقدارش از تقسیم کل توان درخواستی آن ناحیه بر مقدار ظرفیت آزاد بارگیری پست‌های ناحیه به دست می‌آید (همانند  $TMNS_p$  با این تفاوت که برای ناحیه مجزا به دست می‌آید)

( بنابراین :

$$TMNS_{z_{p,j}} \approx \frac{TP_{z_{p,j}} - AEC_{z_{p,j}}}{\lambda^{\max} S_{sub}^{\max}} \quad (۱۸-۴)$$

$$TP_{z_{p,j}} = \sum_{i \in \Psi_{p,j}^{\ln z}} S_{p,i} + \tau \sum_{i \in \Psi_{p,j}^{\ln z}} S_{p,i} \quad (۱۹-۴)$$

$$AEC_{z_{p,j}} = \lambda^{\max} \sum_{i \in \Psi_{p,j}^{Emz}} S_i^{mc} \quad (۲۰-۴)$$

<sup>1</sup> - Theoretical minimum number of transformers

<sup>2</sup> - Characteristic theoretical minimum number of transformers

<sup>3</sup> - Theoretical minimum number of substation for zone

که در آن‌ها،

$TMNS_{z_{p,j}}$  حداقل تعداد تئوری پست ناحیه ی زام در دوره ی  $p$ .

$TP_{z_{p,j}}$  کل بار مصرفی مورد انتظار ناحیه زام (برحسب MVA).

$AEC_{p,j}$  مجموع ظرفیت‌های آزاد بارگیری ممکن تمام پست‌های موجود ناحیه زام (برحسب MVA)

$\Psi_{p,j}^{inz}$  تمامی بارهای متعلق به ناحیه زام از منطقه برنامه‌ریزی برای دوره زمانی  $p$ .

تابع هدف مسئله تجزیه کردن کردن منطقه‌ی برنامه ریزی به نواحی مجزا، مجموع کل فواصل اقلیدسی

بین مراکز خوشه‌ها (نواحی مجزا) و مکان پست‌های در برگیرنده آنها را محاسبه می‌کند. این خوشه‌بندی

باید به گونه‌ای باشد که مجموع حداقل تعداد تئوری پست‌های کل نواحی ( $\sum_{j=1}^{nz} TMNS_{z_{p,j}}$ ) برابر با حداقل

تعداد پست تئوری کل منطقه‌ی برنامه‌ریزی ( $TMNS_p$ ) باشد، که بصورت زیر تعریف شده است :

$$OF_{nz}^{DPAZ} = \sum_{j=1}^{nz} \sum_{i \in \Psi_{p,j}^{inz}} \|X_i - X_{z_j}\|^2 \quad (4-21)$$

S.t

$$\sum_{j=1}^{nz} TMNS_{z_{p,j}} = TMNS_p \quad (4-22)$$

که در آن  $\|X_i^c - X_{z_j}\|^2$ ، نرم بین بردار مختصات  $i$  امین پست موجود و مرکز ثقل زامین خوشه (یا

ناحیه) ( $X_{z_j}$ ) است، که در حقیقت فاصله‌ی اقلیدسی را بین مراکز ناحیه‌ها و پست‌ها متعلق به آن‌ها تعیین

می‌کند. برای حل این مسئله از روش ICA-KCT که در بخش ۴-۳-۳ تشریح شد، استفاده شده است با این

تفاوت که در اینجا همان طور که مسئله ایجاب می‌کند، ثابت نگه‌داشتن مکان پست‌ها مفهومی ندارد زیرا که

در اینجا به دنبال تعیین مراکز ناحیه‌ها هستیم، نه مکان پست‌ها، بنابراین ساختار هر کشور به صورت

یکپارچه از یک قسمت تشکیل شده که مراکز ثقل نواحی را در بردارد. روند الگوریتم ICA-KCT برای

تقسیم منطقه برنامه‌ریزی به  $nz$  ناحیه به شرح زیر است:

۱. اجرای الگوریتم k-means برای  $n_z$  مرکز ثقل با هدف خوشه‌بندی پست‌های موجود تا

کشورهای اولیه تولید شود. حال، برای ارزیابی هر کشور به صورت زیر عمل می‌گردد:

مرحله الف) تخصیص پست‌ها و بارها به نزدیک‌ترین مرکز خوشه بر اساس نزدیک‌ترین

فاصله ی اقلیدسی.

$$\Psi_{p,j}^{snz} = \left\{ X_i^c : \|X_i^c - X_{z_m}\|^2 \leq \|X_i^c - X_{z_n}\|^2 \forall n, 1 \leq n \leq n_z \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, n_z, i = 1, 2, \dots, n_p^{es} \quad (23-4)$$

$$\Psi_{p,j}^{lnz} = \left\{ X_i^l : \|X_i^l - X_{z_m}\|^2 \leq \|X_i^l - X_{z_n}\|^2 \forall n, 1 \leq n \leq n_z \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, n_z, i = 1, 2, \dots, nL_p \quad (24-4)$$

مرحله ب) محاسبه تابع هدف (۴-۲۱) برای آن کشور.

مرحله ج) محاسبه‌ی حداقل تعداد تئوری پست‌ها موردنیاز هر خوشه (ناحیه)  $(TMNS_{z,p,j})$  و

مقایسه‌ی مجموع آن‌ها  $(\sum_{j=1}^{n_z} TMNS_{z,p,j})$  با حداقل تعداد تئوری پست‌ها منطقه ی

برنامه‌ریزی  $(TMNS_p)$ . در صورت زیاد بودن آن از مقدار حداقل تعداد تئوری پست برای کل

منطقه‌ی برنامه‌ریزی تخصیص جریمه به تابع هدف.

بعد از ارزیابی تمام کشورها، امپراطوریهای اولیه شکل می‌گیرند.

۲. اعمال عملگر جذب مشابه آنچه که برای الگوریتم توسعه داده شده ICA-KCT جهت حل مسئله

مکان‌یابی پست‌ها گفته شد (در اینجا قید ثابت بودن مکان پست‌های موجود وجود ندارد).

۳. اعمال عملگر انقلاب مشابه آنچه برای الگوریتم توسعه داده شده ICA-KCT برای حل مسئله

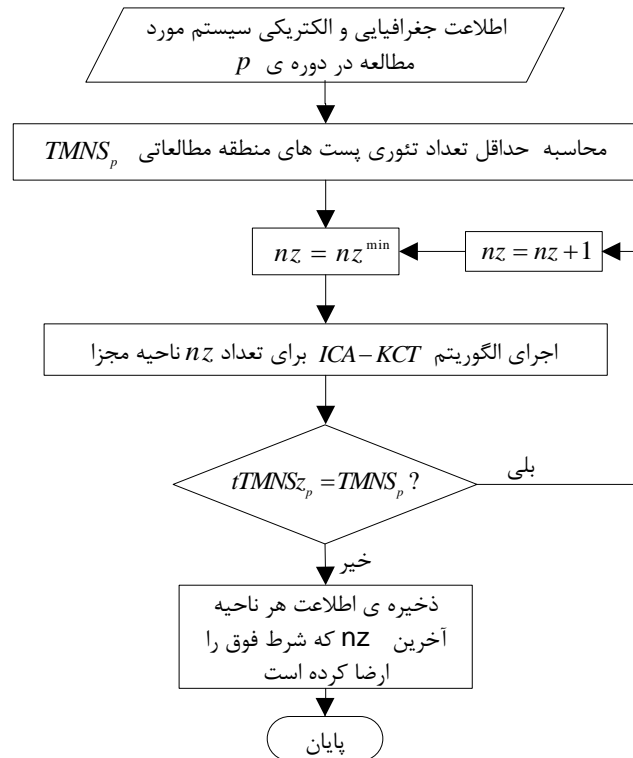
مکان‌یابی پست‌ها گفته شد (در اینجا قید ثابت بودن مکان پست‌های موجود وجود ندارد).

بقیه‌ی مراحل مشابه الگوریتم رقابت استعماری است که قبلاً بیان گردید.

تعداد نواحی که می‌توان منطقه برنامه‌ریزی را به آن تجزیه نمود، توسط یک روش تکراری که توسط

(فلوچارت شکل (۴-۹)) نمایش داده شده است، تعیین می‌شود. با توجه به این فلوچارت تعداد نواحی را تا

جایی می‌توان افزایش داد که امکان برقراری قید تعریف‌شده در رابطه ی (۴-۲۲) فراهم شود.



شکل (۴-۹) روند تجزیه کردن منطقه برنامه‌ریزی به نواحی مجزا

## ۴-۶-۱- ترتیب حل نواحی و تعیین پست‌های مشترک بین ناحیه‌ای

از آنجاکه توزیع بارها و پست‌ها در یک سیستم فوق توزیع برای یک شهر و حومه‌هایش نسبتاً به‌صورت پیوسته و بدون فاصله زیادی از هم وجود دارد، بنابراین بعد از تشکیل نواحی، بعضی از پست‌ها در نزدیکی مرز نواحی و نزدیک به بارهای ناحیه مجاور قرار دارند. از این رو، در نظر گرفتن چنین پست‌هایی در تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی ناحیه مجاورش منجر به رسیدن به یک جواب دقیق‌تر با در نظر داشتن توزیع پیوسته‌ی بارها و پست‌ها، و آنچه ذات شبکه ایجاب می‌کند، است. در چنین شرایطی، ترتیب حل نواحی اهمیت پیدا می‌کند، چراکه قبل از شرکت دادن پستی در تخصیص بهینه‌ی بارهای ناحیه مجاورش، باید آن پست در روند بهینه‌سازی تخصیص بارهای ناحیه خودش شرکت داده شود. زیرا، استفاده از ظرفیت آن پست، ابتدا برای بارهای ناحیه‌ی خودش اولویت دارد.

تعیین اولویت حل نواحی بر مبنای سیستم‌های خبره، بر پایه‌ی تشخیص و تدبیر برنامه‌ریز برای شرکت

دادن پستی در ناحیه مجاورش صورت می‌گیرد. مطابق فلوجارت ارائه‌شده در شکل (۴-۱)، بعد از انجام کامل روند بهینه‌سازی مکان‌یابی پست‌ها برای تک‌تک نواحی به صورت مجزا، نتایج توسط کاربر (برنامه‌ریز) مشاهده می‌گردد، و کاربر با توجه به موقعیت قرار گرفتن پست‌های مرزی با بارهای ناحیه‌ی مجاور، آن‌هایی که باید در روند تخصیص بارهای خوشه‌ی مجاورش شرکت داده شوند را بر مبنای اصول زیر مشخص می‌کند:

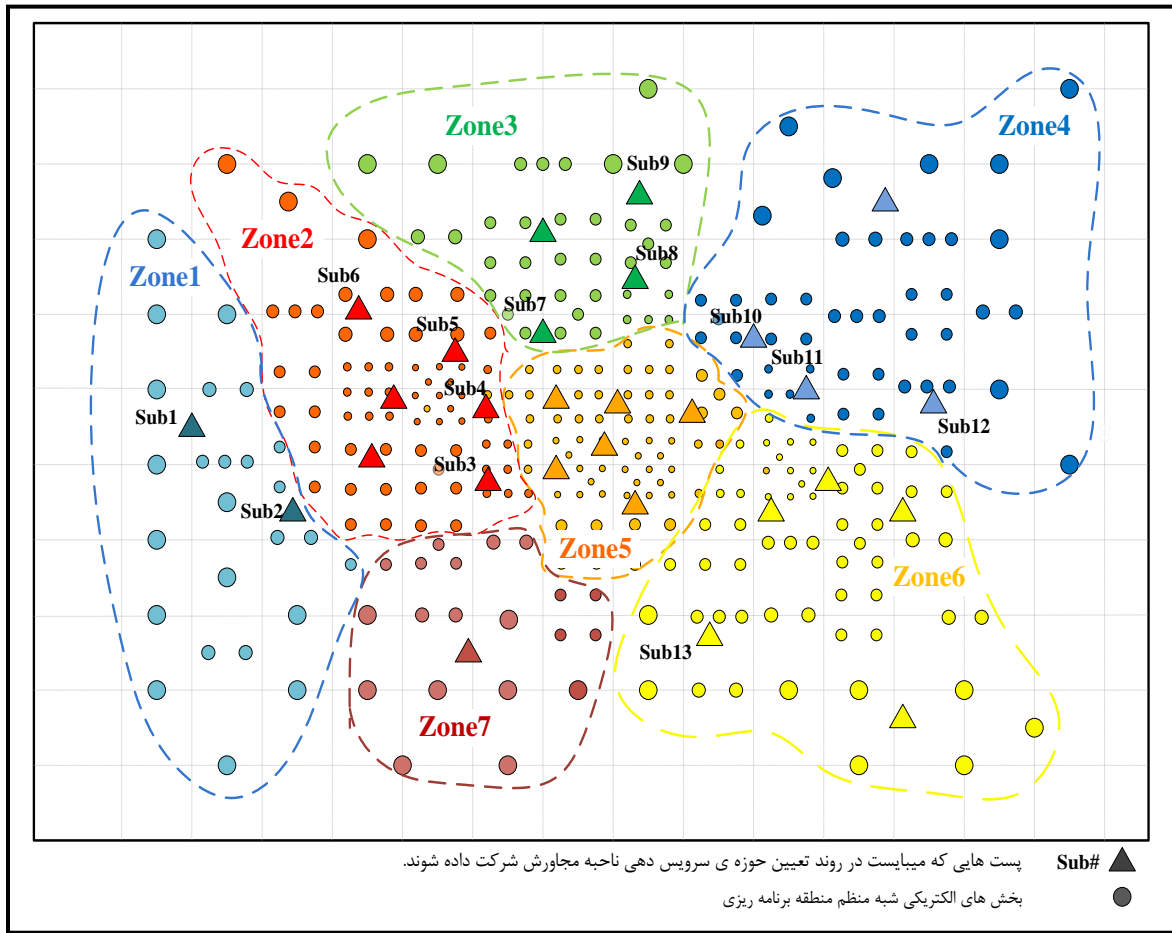
۱- تعیین ترتیب حل نواحی باید از بیرون یا ناحیه‌های بیرونی به ناحیه‌های درونی انجام شود. در اکثر موارد بهتر است از یک طرف ترتیب حل نواحی مورد بررسی قرار گیرد، در حالی که به نواحی بیرونی دیگر نیز توجه گردد.

۲- در اکثر موارد اولویت با نواحی است که در حاشیه‌ها قرار گرفته‌اند، چرا که آنها تنها از یک یا دو طرف دارای مرزی مشترک با نواحی مجاور هستند، بنابراین تعیین شدن ظرفیت پست‌ها آن نواحی برای شرکت در روند تخصیص نواحی درونی ضروری است.

۳- اولویت ناحیه A بر ناحیه B، بر مبنای نزدیک بودن پست‌های ناحیه‌ی A به بارهای ناحیه‌ی B تعیین می‌شود. گاهی اوقات هر دو ناحیه دارای پست‌هایی نزدیک به بارها ناحیه‌ی دیگر هستند، در این مواقع اولویت با ناحیه‌ای است که دارای پست بیشتری، نزدیک به بارهای ناحیه دیگر است. در این حالت اگر تعداد پست‌های نزدیک برای هر دو ناحیه یکسان باشد؛ باید با نگاه به تراکم بارها و بزرگی آنها این اولویت را تعیین نمود. بدین صورت که، اگر پست‌های ناحیه‌ی A به بارهای متراکم و بزرگ ناحیه‌ی B نزدیک باشد، اولویت تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی ناحیه‌ی A بر ناحیه‌ی B منطقی است (یعنی ابتدا باید ناحیه‌ی A تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی شود).

شکل (۴-۱۰) نمایی از تجزیه شدن منطقه‌ی برنامه‌ریزی به چندین ناحیه مجزا و موقعیت پست‌ها را نشان می‌دهد. برای روشن شدن موضوع روند انتخاب پست‌های مشترک بین ناحیه‌ای و تعیین ترتیب حل نواحی بر مبنای اصول تعریف شده‌ی فوق‌الذکر، برای مثال ارائه شده در شکل (۴-۱۰) را بصورت زیر تشریح می‌نماییم؛ با نگاه به ناحیه اول (*Zone1*) و دوم (*Zone2*) متوجه می‌شویم، که برخی از بارهای ناحیه دوم

به پست ۲ (Sub2) در ناحیه ی اول نزدیک است، بنابراین باید ناحیه ی ۱، زودتر از ناحیه ۲، تخصیص بارها را انجام دهد تا پست ۲ بتواند در روند حل تخصیص بارهای ناحیه دوم شرکت داده شود. از طرف دیگر، ناحیه‌ی شماره ۲ دارای مرزی مشترک با ناحیه‌های ۳، ۵، ۷ است. در مورد ناحیه ۲، ۵، ۷ کاملاً واضح است، که طبق منطقی که در بالا گفته شد ناحیه‌ی ۲ باید زودتر از همه‌ی آن‌ها روند تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی‌اش را انجام دهد، چرا که پست ۳ و ۴ باید در تخصیص بارهای ناحیه ۵ و پست ۳ در تخصیص بارهای ناحیه‌ی ۷ شرکت داده شوند. در مورد ناحیه‌ی ۲ و ۳ نیز، برتری حق تقدم ناحیه‌ی ۲ بر ۳ به دلیل نزدیک بودن تقریبی پست‌های ۶ و ۵ به بارهای ناحیه‌ی شماره‌ی ۳، کاملاً منطقی است. این موضوع در مورد برتری انجام تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی برای ناحیه‌ی ۳ بر ناحیه‌های ۴ و ۵، قابل استدلال است، چراکه نیاز است پست شماره ی ۷ و ۸ (که در داخل ناحیه ۳ قرار دارند) در تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی این نواحی شرکت داده شوند. حوزه‌ی سرویس‌دهی ناحیه‌ی ۴ نیز به دلیل داشتن پست‌های مجاور با ناحیه‌ی ۵، باید زودتر تعیین گردد. هرچند، که فاصله‌ی پست‌های مرزی این دو ناحیه‌ی از خط مرزی یک است، ولی چون ناحیه ی ۴ دارای دو پست مرزیست، بنابراین به نظر قابلیت پوشش‌دهی بیشتری نسبت به پست‌های ناحیه‌ی مجاورش داشته باشد. به همین ترتیب برتری ناحیه ی ۴ بر ۶ و برتری ناحیه ی ۵ بر ۶ و ۷، و ناحیه ی ۶ بر ۷ را می‌توان تشخیص داد. بنابراین، ترتیب حل نواحی همراه با تعیین پست‌های مرزی برای شرکت در روند حل مسئله تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی ناحیه‌ی مجاورش مشخص می‌گردد. مطابق با توضیحات بالا، می‌توان گفت که این تنها یک اشتراک یک‌طرفه است، یعنی ناحیه‌ای که زودتر تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی شود، می‌تواند پست‌هایش را در صورت لزوم در تخصیص ناحیه‌های مجاورش (که هنوز تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی نشده‌اند) شرکت بدهد. طبق توضیحات، ترتیب اولویت حل ناحیه‌ها به ترتیب ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ است. همان‌طور قبلاً اشاره شد، این عمل بعد از تعیین مکان پست‌های فوق توزیع جدید و قبل از تعیین حوزه ی سرویس‌دهی نواحی توسط کاربر (برنامه‌ریز) انجام می‌گیرد.



شکل (۴-۱۰) نمایی از تقسیم‌بندی منطقه مطالعاتی به نواحی مجزا و پست‌ها مشترک بین ناحیه‌ای

## ۴-۷- نتیجه‌گیری

این فصل به ارائه رویکردی جدید در برنامه‌ریزی توسعه‌ی پست‌های فوق توزیع بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی منطقه پرداخت، بطوریکه می‌تواند مکان پست‌های فوق توزیع را بدون نیاز به مکان‌های کاندید از پیش تعیین شده و با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و محدودیت جغرافیایی منطقه در نقاطی تعیین کند، که تا حد امکان به مراکز بار و زمین‌هایی با قیمت ارزان نزدیک باشند و هیچ ممنوعیتی از لحاظ محیطی و جغرافیایی برای ساخت نداشته باشند. همچنین برای تسهیل در روند برنامه‌ریزی شیوه‌ای جهت تجزیه منطقه‌ی برنامه‌ریزی به چندین ناحیه مجزا ارائه شد، که حل هر ناحیه در دو مرحله اصلی: یکی مکان‌یابی پست‌ها توسط الگوریتم توسعه‌یافته‌ی رقابت استعماری مبتنی بر  $k$ -means (ICA-KCT) و



تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی و ظرفیت بهینه‌ی پست‌ها توسط الگوریتم رقابت استعماری گسسته انجام می‌شود. در این راستا برای در نظر گرفتن پیوستگی شبکه، به‌وسیله یک روش ابتکاری پست‌هایی در مرز نواحی برای شرکت در روند تخصیص بارها ناحیه‌ی مجاور تعیین می‌گردند و تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی هر ناحیه به‌صورت مجزا و بر مبنای ترتیب الویت از قبل تعیین شده انجام می‌شود.



## **فصل پنجم:**

### **شبه‌سازی و تحلیل نتایج**

## ۵-۱- مقدمه

در این فصل به شبیه‌سازی و تحلیل نتایج بر روی دو شبکه متفاوت می‌پردازیم، بطوریکه شبکه ی اول، شبکه‌ای واقعی ولی نسبتاً کوچک است که اطلاعات آن در [۳] موجود است، و دیگری، شبکه فوق توزیع مشهد است. هدف از این شبیه‌سازی، برنامه‌ریزی توسعه چندمرحله‌ای پست‌فوق توزیع است. شبیه‌سازی‌ها، در سه بخش انجام شده است، در دو بخش اول، روش‌های پیشنهادی در فصل‌های سوم و چهارم جهت حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای سیستم نمونه مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرند. در بخش آخر با به‌کارگیری روش پیشنهادی مبتنی بر فصل چهارم، مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع برای شبکه مشهد حل می‌شود.

تمامی شبیه‌سازی در محیط متلب و توسط یک سیستم شخصی با مشخصات فنی از قبیل: قدرت پردازندگی هفت هسته (SPU)، فرکانس‌کاری ۱/۶ گیگاهرتز، و حافظه ی جانبی (RAM) ۴ گیگابایت انجام شده است.

فرضیات زیر در شبیه‌سازی‌ها و حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع در نظر گرفته شده است:

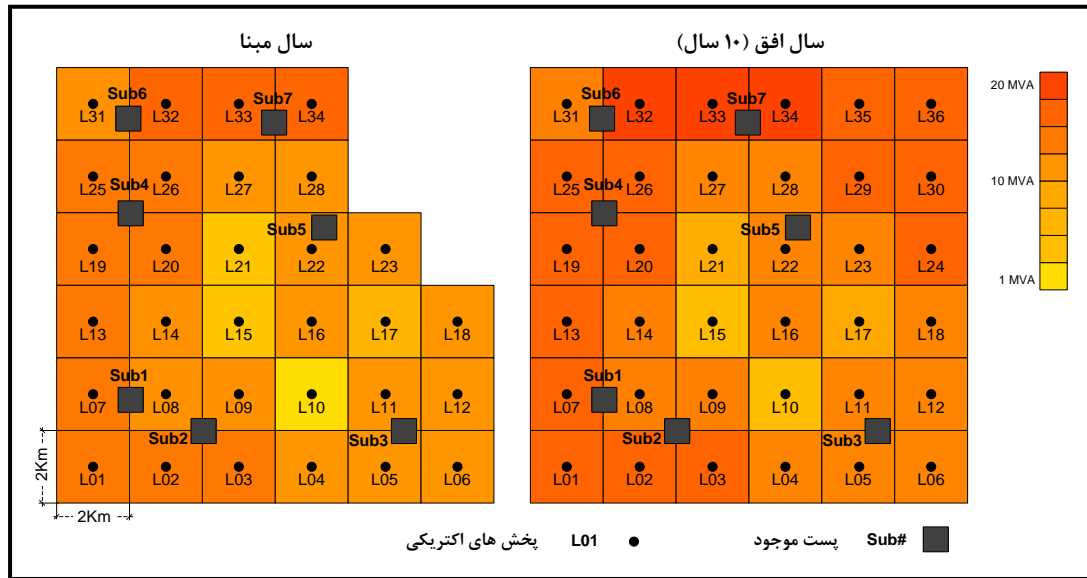
- تمامی اطلاعات جغرافیایی و الکتریکی بارهای منطقه برنامه‌ریزی در طول دوره ی برنامه‌ریزی معلوم است.
- پست‌ها یا ترانسفورماتور توزیع، بارهای نقطه‌ای پست‌های فوق توزیع هستند.
- تنها پیک بار در این برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است.
- از آنجاکه هیچ مکان کاندیدی برای احداث پست جدید در نظر گرفته نشده است، تمامی مکان‌ها در منطقه ی مطالعاتی به عنوان مکان کاندید شناخته می‌شوند.
- حداکثر ظرفیت بارگیری برای پست‌ها ۷۵٪ ( $\lambda^{\max}$ )، حداکثر افت ولتاژ مجاز ۵٪ ( $\Delta V_{\max}$ )، نرخ بهره ( $\eta^{Int}$ ) و تورم ( $\eta^{Inf}$ ) به ترتیب ۱۰٪ و ۸٪ و افق مطالعاتی ۱۰ سال ( $hy$ ) و هر دوره ۳

- سال و عامل تصحیح فاصله  $\kappa$  برابر با ۱,۶ [۹] فرض شده است [۸].
- هزینه اتلاف انرژی و ضریب تلفات  $0.36 (lf_p)$  برای تمام سال‌ها و دوره‌های برنامه‌ریزی به ترتیب برابر با  $0.07$  دلار بر کیلووات‌ساعت ( $C_y^{EL}$ ) و  $0.36 (lf_p)$  و درصد تلفات شبکه فشار متوسط  $2\% (\tau)$  فرض شده است [۸]، [۱۲].
  - اطلاعات فنی و اقتصادی فیدرها، پست‌ها و ترانسفورماتور به ترتیب در جدول (۵-۱)، (۵-۲) و (۵-۳) داده شده است.
  - ظرفیت هر پست جدید می‌تواند بین ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ مگاوات‌آمپر باشد، بنابراین حداکثر ظرفیت یک پست جدید ( $S_{sub}^{max}$ ) برابر با ۹۰ مگاوات‌آمپر است.

## ۵-۲- برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع برای سیستم نمونه

در این قسمت با استفاده از روش‌های ارائه‌شده در فصل چهارم و پنجم، برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع برای یک سیستم نمونه که قسمتی از شمال تهران است انجام می‌شود. شکل (۵-۲) نمایی از چگونگی موقعیت بخش‌های الکتریکی و پست‌های موجود در سال مبنا و سال افق را برای این سیستم نمونه نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به بارها و نرخ رشد آن‌ها در جدول (۵-۳) آورده شده است، تعدادی از بارها (که در جدول مشخص شده‌اند) از سال سوم برنامه‌ریزی به شبکه اضافه شده‌اند. این شبکه دارای ۷ پست موجود است، که اطلاعات فنی آن‌ها در جدول (۵-۴) ارائه شده است. حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع برای این شبکه در سه حالت زیر ابتدا توسط روش اول: روش ترکیبی k-means توسعه‌یافته و برنامه‌ریزی دینامیکی انجام خواهد شد.

۱. حالت اول: هیچ پست موجودی در شبکه وجود ندارد.
۲. حالت دوم: هیچ کدام از پست‌های موجود قابلیت توسعه ظرفیت ندارند.
۳. حالت سوم: پست‌های موجود قابلیت توسعه ظرفیت خود را دارند.



شکل (۵-۱) سیستم نمونه در سال مینا و سال افق

جدول (۵-۱) اطلاعات فنی و اقتصادی فیدها [۱۲]

نوع فیدر	تعداد مدار	مقاومت (اهم بر کیلومتر)	راکتانس (اهم بر کیلومتر)	حداکثر جریان (آمپر)	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (\$۱۰³)
FOX	1	۰/۷۸۲۲	۰/۲۸۳۵	۱۶۰	۱۲/۵
Mink	1	۰/۴۵۴۵	۰/۲۶۶۴	۲۱۰	۱۵/۱۸
Dog	1	۰/۲۷۱۲	۰/۲۴۶۴	۳۳۰	۱۹/۶۴
Mink	1	۰/۲۲۷۳	۰/۱۳۳۲	۴۲۰	۲۲/۳۲
Fox	3	۰/۲۶۰۷	۰/۰۹۴۵	۴۸۰	۲۵
Mink	3	۰/۱۵۱۵	۰/۰۸۸۸	۶۳۰	۲۸/۵۷
Dog	2	۰/۱۳۵۶	۰/۱۲۳۲	۶۶۰	۳۲/۱۵
Dog	3	۰/۰۹۰۴	۰/۰۸۲۱	۹۶۰	۴۴/۶۵

جدول (۵-۲) اطلاعات فنی و اقتصادی ترانسفورماتور و پست‌ها [۱۲]، [۸]

ظرفیت (MVA)	هزینه‌های (\$۱۰³)		تلفات ترانسفورماتور (Kw)	
	خرید ترانسفورماتور	احداث پست	آهنی	مسی
۱۵	۲۴۵,۶	۳۷۲۰,۲۳	۱۶,۳	۶۹,۴
۳۰	۴۹۱,۲۱	۳۸۶۹,۰۴	۲۶,۸	۱۱۹,۹
۴۵	۷۳۶,۶	۴۰۱۷,۸۵	۳۵	۱۶۰
۶۰	۹۸۲,۱۴	۴۱۶۶,۶۶	۴۰	۲۰۰
۷۵	۱۲۲۷,۶۷	۴۳۱۵,۴۷	۵۰	۲۵۰
۹۰	۱۴۷۳,۲۱	۴۴۶۴,۲۸	۶۰	۳۱۰

جدول (۳-۵) اطلاعات بارهای سیستم نمونه

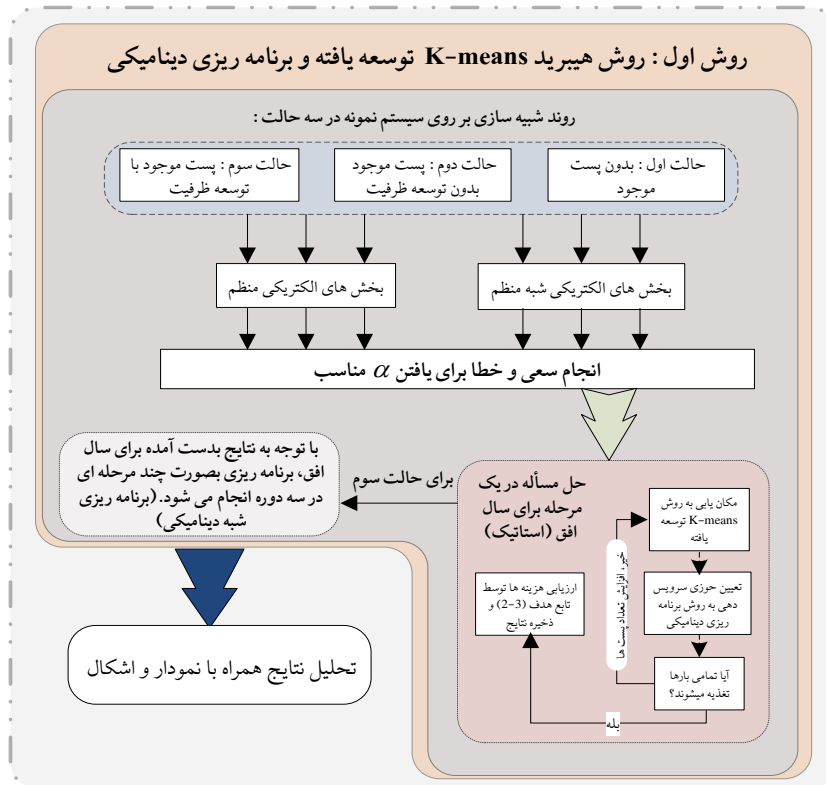
شماره ی بار	توان تقاضا (MVA)	سال حضور	نرخ رشد (درصد)	شماره ی بار	توان تقاضا (MVA)	سال حضور	نرخ رشد (درصد)	شماره ی بار	توان تقاضا (MVA)	سال حضور	نرخ رشد (درصد)
L01	۱۰	۱	۲	L13	۱۰	۱	۲	L25	۱۰	۱	۱۰
L02	۱۰	۱	۲	L14	۶	۱	۲	L26	۱۰	۱	۱۰
L03	۱۰	۱	۲	L15	۲	۱	۰	L27	۵	۱	۵
L04	۵	۱	۶	L16	۶	۱	۲	L28	۵	۱	۵
L05	۵	۱	۶	L17	۲	۱	۲	L29	۱۰	۳	۱۰
L06	۵	۱	۶	L18	۵	۱	۵	L30	۱۰	۳	۱۰
L07	۱۰	۱	۲	L19	۱۰	۱	۱۰	L31	۵	۱	۶
L08	۶	۱	۲	L20	۱۰	۱	۱۰	L32	۲۰	۱	۲
L09	۶	۱	۲	L21	۱	۱	۱	L33	۲۰	۱	۲
L10	۱	۱	۰	L22	۶	۱	۶	L34	۲۰	۱	۲
L11	۵	۱	۶	L23	۵	۱	۵	L35	۱۰	۳	۱۰
L12	۵	۱	۶	L24	۱۰	۳	۱۰	L36	۱۰	۳	۱۰

جدول (۴-۵) اطلاعات پست‌های فوق توزیع موجود برای سیستم نمونه

شماره ی پست	ظرفیت نصب شده (MVA)	ظرفیت قابل توسعه (MVA)
Sub 1	۶۰	۱۵،۳۰
Sub 2	۴۵	۱۵،۳۰،۴۵
Sub 3	۴۵	۱۵،۳۰،۴۵
Sub 4	۶۰	۱۵،۳۰
Sub 5	۴۵	۱۵،۳۰
Sub 6	۶۰	۱۵،۳۰،۴۵
Sub 7	۴۵	۱۵،۳۰،۴۵

## ۵-۲-۱- نتایج شبیه‌سازی برای روش اول: K-means و برنامه‌ریزی دینامیکی

اساس شبیه‌سازی برای روش اول بر روی سیستم نمونه در شکل (۵-۱) ارائه شده است. مطابق این شکل، قبل از اعمال روش ترکیبی k-means توسعه‌یافته و برنامه‌ریزی دینامیکی بر روی سیستم نمونه، به دلیل وابسته بودن تابع محاسبه‌کننده‌ی میانگین خوشه‌ها (یعنی رابطه‌ی (۳-۱۹)) به پارامتر  $\alpha$  در روند خوشه‌بندی k-means توسعه‌یافته، ابتدا با استفاده از روش سعی و خطا، بهترین مقدار از آن برای هر سه حالت از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم و با بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم به دست می‌آید، سپس مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای دو حالت اول تنها به صورت استاتیک و برای



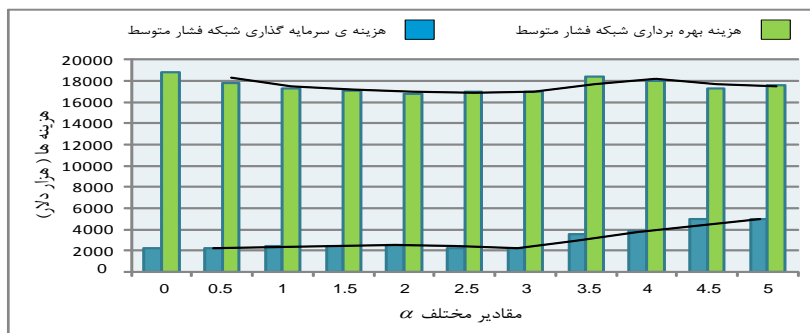
شکل (۲-۵) روند شبیه‌سازی برای روش اول (k-means و برنامه‌ریزی دینامیکی)

حالت سوم به صورت استاتیک و شبه دینامیکی (چند مرحله‌ای) انجام می‌شود. برای هر حالت از سیستم نمونه نتایج به دست آمده از برنامه‌ریزی برای سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم و شبه منظم همراه با نمودار و شکل مقایسه و تحلیل می‌شود.

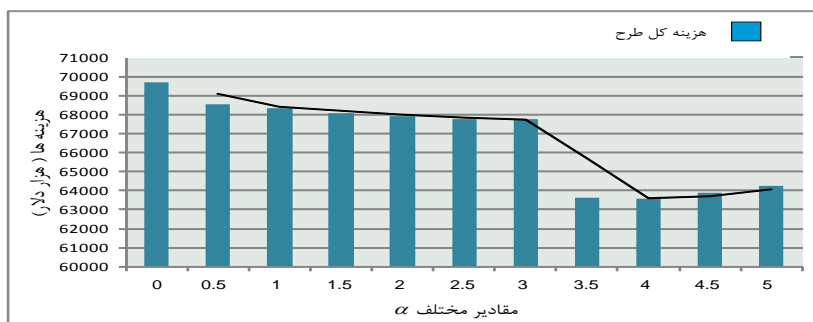
### الف. حالت اول: هیچ پست موجودی در شبکه وجود ندارد

در این حالت فرض می‌کنیم سیستم نمونه هیچ پست موجودی ندارد و هدف، برنامه‌ریزی توسعه پست در یک مرحله برای سال افق است. طبق رابطه‌ی (۳-۱۹)، از آنجاکه در مکان‌یابی به روش الگوریتم توسعه یافته k-means، توان بارهای هر خوشه به صورت یک ضریب وزنی در محاسبه میانگین (مرکز ثقل) هر خوشه در نظر گرفته شده است، و این ضریب وزنی به توان  $\alpha$  رسید تا بتوان سهم توان بارها را در این محاسبه تنظیم نمود. ابتدا با استفاده از روش سعی و خطا مقدار مناسب آن تعیین می‌شود. اشکال (۳-۵)،

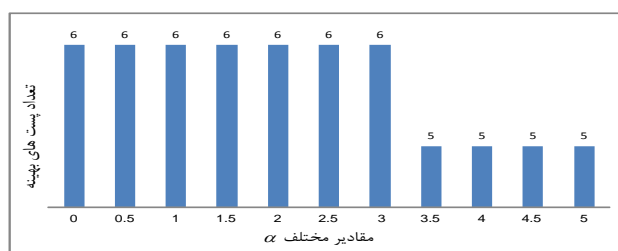




شکل (۳-۵) هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم



شکل (۴-۵) هزینه‌های کل طرح برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم



شکل (۵-۵) تعداد پست‌ها برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم

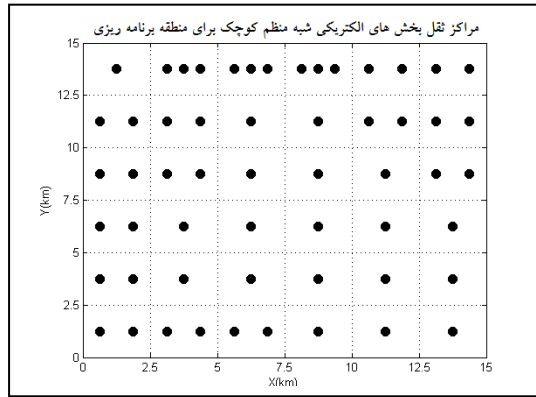
(۴-۵) و (۵-۵) نتایج مسئله برنامه‌ریزی را در یک مرحله برای سال افق، برای مقادیر مختلف  $\alpha$  نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۳-۵)، با افزایش مقدار  $\alpha$  تا مقدار ۳ به دلیل نزدیک شدن پست‌ها به بارهای بزرگ‌تر، هزینه‌های بهره‌برداری شبکه فشار متوسط سیر نزولی دارد، ولی از آنجاکه با این افزایش، متوسط فاصله بین پست‌ها و بارها زیاد می‌شود هزینه‌های سرمایه‌گذاری شبکه به نسبت افزایش می‌یابد. این اتفاق در  $\alpha = 3,5$  به بعد محسوس‌تر است. بطوریکه، از  $\alpha$  بزرگ‌تر از ۳,۵ هزینه‌های سرمایه‌گذاری شبکه فشار متوسط

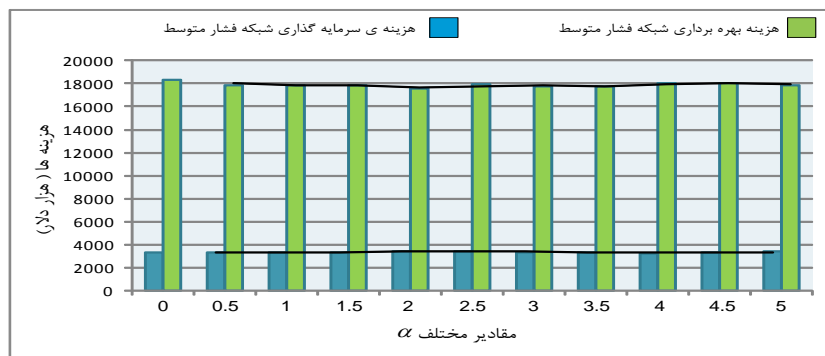
به‌شدت افزایش پیدا کرده است. ولی با نگاه به شکل (۴-۵) و (۵-۵) می‌توان متوجه شد که این افزایش هزینه نه‌تنها به دلیل نزدیک شدن پست‌ها به بارها بزرگ‌تر

است، بلکه به دلیل کاهش تعداد پست‌ها اتفاق افتاده است. با کم شدن تعداد پست‌ها خودبه‌خود متوسط طول فیدرهای شبکه فشار متوسط افزایش می‌یابد. با این حال، با نگاه به شکل (۴-۵) می‌توان فهمید که کمترین هزینه‌ی طرح در  $\alpha = 4$  اتفاق افتاده است.

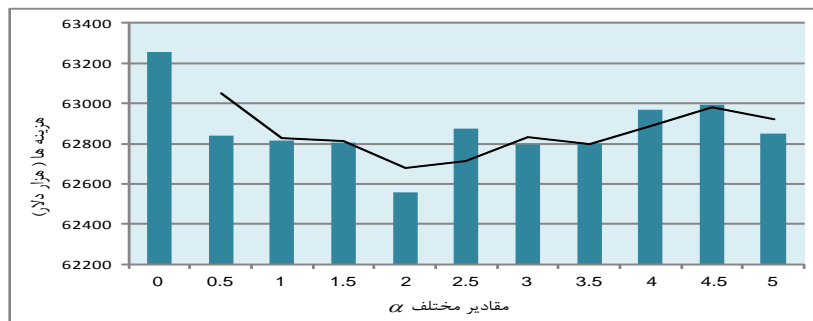
علت اینکه مسئله برنامه‌ریزی، در تعداد پست‌های کمتری برای  $\alpha$  های بزرگ‌تر از ۳,۵ به جواب رسیده است، قرارگیری پست‌ها در فاصله‌ی نزدیک به بارهای خیلی بزرگ منطقه‌ی برنامه‌ریزی (یعنی L33, L34, L32) است. بدین ترتیب، در روند تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی، این بارها بدون هیچ افت ولتاژ پیش از حدی، زودتر به پست مناسبشان وصل می‌گردند در صورتی که این اتفاق برای زمانی که پست‌ها در فاصله‌ی دورتری از این بارها قرار داشته باشند اتفاق نمی‌افتد، لذا، یکی از این بارهای بزرگ بدون تغذیه می‌ماند و الگوریتم دستور افزایش پست را صادر می‌کند. علت دیگر این موضوع را می‌توان در دسته‌بندی بارهای منطقه‌ی برنامه‌ریزی به بخش‌های الکتریکی منظم، بدون در نظر داشتن مقادیر توان هر بخش جستجو کرد. همان‌طور که در فصل چهارم اشاره شد، هنگامی که بارهای منطقه برنامه‌ریزی بدون در نظر داشتن توان هر بخش، به بخش‌های الکتریکی منظم تقسیم می‌شوند، ممکن است در این میان برخی از بخش‌های الکتریکی دارای توان مصرفی خیلی بزرگ باشند که در روند تخصیص بارها، این بخش‌ها نتوانند به پست‌های مجاور خود متصل شوند، چراکه آن پست‌ها دارای ظرفیت آزاد بارگیری برای تغذیه آن بار به‌تنهایی نیستند و به‌اشتباه الگوریتم دستور افزایش تعداد پست را صادر می‌کند. برای نشان دادن اهمیت این موضوع، مطابق شکل (۵-۶) بخش‌های الکتریکی منظم منطقه‌ی برنامه‌ریزی به بخش‌های الکتریکی شبه منظم با حداکثر توان مجاز ۱۰ مگاوات آمپر تبدیل شده است و هزینه‌های مختلف طرح برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در شکل‌های (۵-۷)، و (۵-۸) و تعداد پست‌ها در (۵-۹) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵-۹) مشاهده می‌شود، تعداد پست‌ها برای تمامی مقادیر  $\alpha$  یک است. بعلاوه در این حالت به دلیل تقسیم شدن بخش‌های الکتریکی غیرمجاز به بخش‌ها الکتریکی مجاز با بار یکسان، تغییر پارامتر  $\alpha$  تأثیر محسوسی در هزینه‌های شبکه فشار



شکل (۵-۶) بخش‌های الکتریکی شبه منظم کوچک برای منطقه برنامه‌ریزی سیستم نمونه

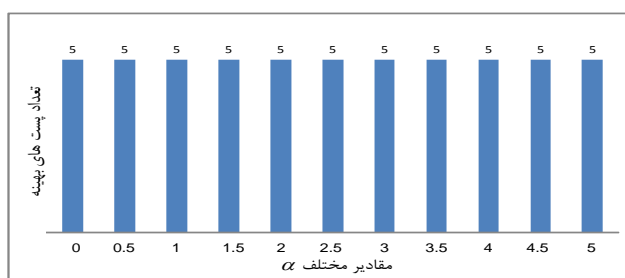


شکل (۵-۷) هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم

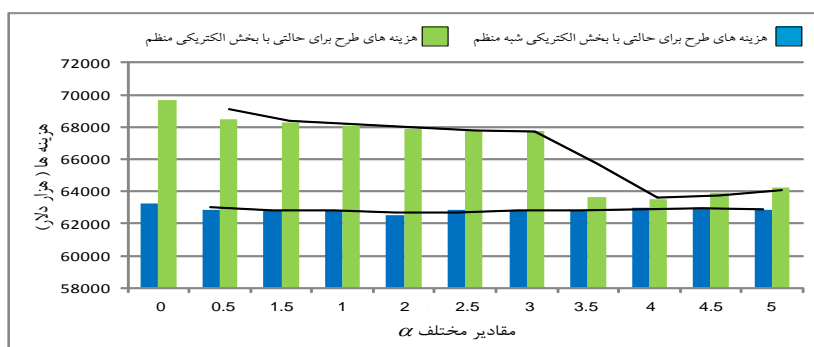


شکل (۵-۸) مقادیر مختلف هزینه‌های کل طرح برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم

متوسط ندارند، چراکه در این حالت تقریباً هر خوشه دارای تعدادی بخش است که توان مصرفی آن‌ها یکی است. به همین دلیل در شکل‌های (۵-۷) تغییر قابل توجهی در هزینه‌های شبکه فشار متوسط دیده نمی‌شود. با این حال با نگاه به شکل (۵-۸) می‌توان تغییرات هزینه‌های کل طرح برای مقادیر مختلف  $\alpha$  را به وضوح مشاهده کرد. با توجه به این شکل، مقدار  $\alpha$  مناسب در این حالت در  $\alpha = 2$  اتفاق



شکل (۹-۵) تعداد پست‌های برای مقادیر مختلف  $\alpha$  به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم



شکل (۱۰-۵) هزینه‌های کل طرح به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم و شبه‌منظم

افتاده است، چراکه هزینه‌های طرح برای این مقدار  $\alpha$  به مقدار قابل توجهی نسبت به مقادیر دیگر آن کم شده است.

برای نشان دادن مزیت استفاده از بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم، شکل (۱۰-۵) هزینه‌های کل طرح را برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در دو حالت استفاده از بخش‌های الکتریکی منظم و شبه‌منظم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، هزینه‌های کل طرح برای تمامی  $\alpha$  ها به مقدار قابل توجهی برای بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم کمتر است.

حال که مقدار مناسب  $\alpha$  تعیین شده می‌توان برنامه‌ریزی توسعه را برای این سیستم انجام داد. از این رو ابتدا این برنامه‌ریزی برای سیستم نمونه در حالت اول با بخش‌های الکتریکی منظم انجام می‌شود و سپس برای سیستم نمونه در حالت اول با بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم انجام می‌گردد. مطابق فلوجارت ارائه شده در شکل (۳-۱)، ابتدا حداقل تعداد تئوری پست برای شبکه در سال افق محاسبه می‌شود؛ و چون برای

این سیستم اطلاعات مربوط به بارها مطابق جدول به‌گونه‌ای است که برای هر بار یک نرخ رشد سالیانه تعریف شده است برای محاسبه‌ی مجموع بار مورد تقاضا در سال افق اگر فرض شود که  $R^g$  نرخ رشد بار  $z$  امین بار و  $yl_j$  سال حضور آن بار و  $hy$  افق برنامه‌ریزی باشد. تخمین بار مورد تقاضا، در سال افق با درصد تلفات  $\tau = 2\%$  برای شبکه فشار متوسط برابر است:

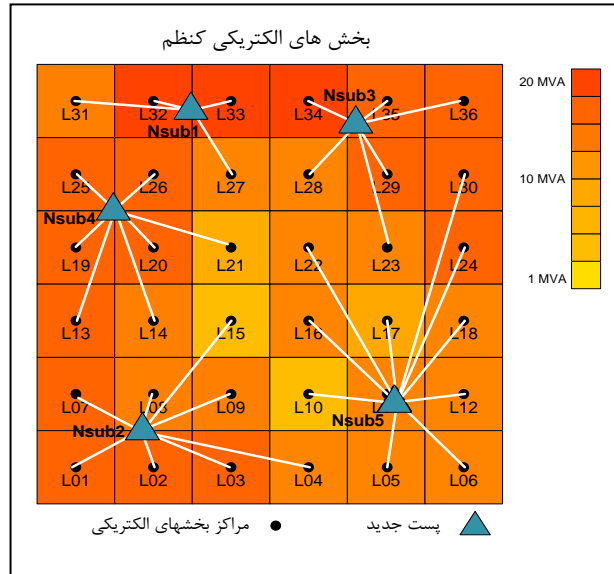
$$TP_{hy} = \sum_{i=1}^{nL} \left( (hy - yl_i + 1) \cdot R_j^g \right) S_i + 0.02 \sum_{i=1}^{nL} \left( (hy - yl_i + 1) \cdot R_j^g \right) S_i = 306.62 \quad MVA$$

در اینجا چون فرض شده است، پست موجودی وجود ندارد در نتیجه، ظرفیت آزاد بارگیری پست‌های موجود  $AEC_p$  برای سال افق برابر صفر است. بدین ترتیب حداقل تعداد تئوری پست‌ها برابر:

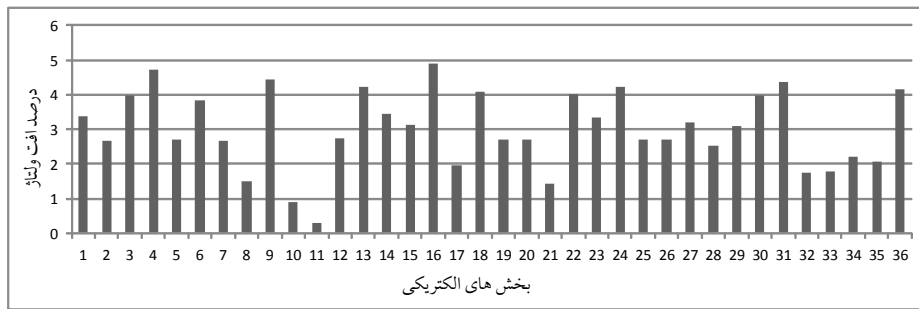
$$TMNS_p \cong \frac{306.62}{0.75 \times 90} \cong 5$$

بنابراین  $k_p$  که بیانگر تعداد کل پست‌ها در دوره  $p$  است (در اینجا چون برنامه‌ریزی استاتیک انجام می‌شود، بنابراین در یک دوره انجام می‌گیرد و  $p$  برابر یک است)، برابر با ۵ است و مکان‌یابی برای این تعداد پست توسط الگوریتم توسعه‌یافته  $k$ -means انجام می‌شود. با توجه به شکل (۵-۱) و فلوچارت شکل (۳-۱) مسئله برنامه‌ریزی برای این تعداد پست، برمبنای روش‌های چندبخشی در دو مرحله: (۱) مکان‌یابی بهینه پست‌ها توسط  $k$ -means (۲) تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی و ظرفیت بهینه‌ی پست انجام شده است و نتایج حاصل از آن در شکل (۵-۱۱) که نشان‌دهنده‌ی موقعیت مکانی و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها و در شکل (۵-۱۲) که درصد افت ولتاژ نقاط بار را نشان می‌دهد، نمایش می‌دهد.

جدول (۵-۵) نتایج فنی و اقتصادی را برای سال افق در یک مرحله برای این برنامه‌ریزی ارائه می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۵-۱۱) مشاهده می‌شود پست‌ها در مکان‌هایی قرار گرفته‌اند که نزدیک به بارهای بزرگ‌تر است.



شکل (۵-۱۱) مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم

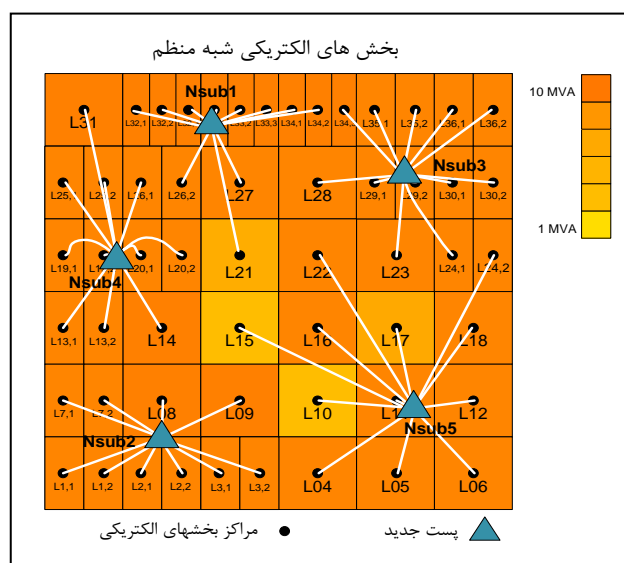


شکل (۵-۱۲) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم

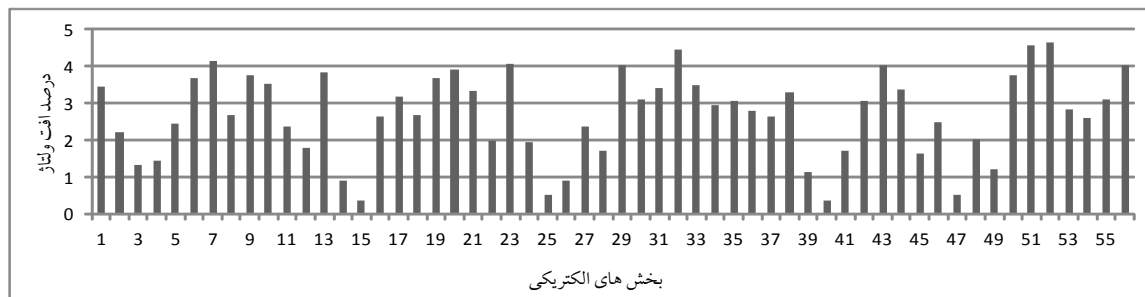
جدول (۵-۵) نتایج نهایی برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به صورت استاتیک به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم

شماره ی پست	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
			پست	شبکه ی پایین‌دستی	کل
Nsub1	۷۵	۶۹,۷۶۸	۸۱۲۳,۱	۲۶۷۰,۲	۱۰۷۹۳
Nsub2	۹۰	۶۹,۱۵۲	۸۳۵۹,۹	۴۶۷۲,۹	۱۳۰۳۳
Nsub3	۹۰	۷۱,۴۷۴	۸۳۸۵,۷	۴۰۴۹,۵	۱۲۴۳۵
Nsub4	۹۰	۶۹,۴۵	۸۳۶۳,۲	۴۱۴۷,۵	۱۲۵۱۱
Nsub5	۹۰	۷۴,۰۱۲	۸۴۱۵	۶۱۲۹,۸	۱۴۵۴۵
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)			۴۱۶۴۶,۹۱	۲۱۶۶۹,۹	۶۳۳۱۶,۸۱

مشابه حالت قبل، برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع برای سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم انجام شده و نتایج حاصل از مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها در شکل (۵-۱۳) نمایش داده شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت به دلیل شکستن بارهای بزرگ به بارهای کوچک‌تر روند تخصیص بهینه‌ی بارها بهتر از حالت قبلی انجام شده است به گونه‌ای مطابق جدول (۵-۶) هزینه‌های طرح کاهش پیدا کرده است و مطابق شکل (۵-۱۴) در صدفت ولتاژ بخش‌های الکتریکی نسبت به حالت منظم بهتر است. زیرا که، در این حالت بار L34 که در حالت قبلی توسط تنها یک پست تغذیه می‌شد در این حالت، توسط ۲ پست تغذیه شده است، در حالی که دو بخش از آن توسط پست Nsub1 (که نزدیک‌تر به آن بار قرار دارد) و یک بخش از آن توسط پست Nsub3 تغذیه می‌شود، این موضوع در کاهش تلفات و کاهش سطح مقطع فیدر تغذیه‌ی کننده که به ترتیب باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری می‌شود تأثیر بسزایی دارد. این نکته، در مورد بارهای L24 و L30 نیز قابل بیان است، چراکه در این حالت پست Nsub3 دیگر مجبور به تغذیه یک جای بار بزرگ L34 نبوده، از این‌رو دارای ظرفیت آزاد بارگیری برای قبول بارهای L24 و L30 بوده، بطوریکه در حالت قبلی این بارها به دلیل نبود ظرفیت آزاد بارگیری پست Nsub3 (که پست نزدیک‌تر است) به پست دورتر متصل شده‌اند (Nsub5).



شکل (۵-۱۳) مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم



شکل (۵-۱۴) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم

جدول (۵-۶) نتایج نهایی برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به‌صورت استاتیک به روش اول برای حالت اول از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم

شماره ی پست	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
			پست	شبکه ی پایین‌دستی	کل
Nsub1	۹۰	۷۴,۶۸	۸۴۲۲,۹	۴۰۱۳	۱۲۴۳۶
Nsub2	۷۵	۷۲,۳۷	۸۱۸۴,۸	۳۵۰۸,۳	۱۱۶۵۷
Nsub3	۹۰	۷۴,۳۴۶	۸۴۱۸,۹	۴۵۷۲,۳	۱۲۹۹۱
Nsub4	۹۰	۶۸,۲۱	۸۳۴۹,۷	۳۹۷۲,۴	۱۲۳۲۲
Nsub5	۹۰	۶۴,۳۱۷	۸۳۰۸,۸	۴۸۴۰,۵	۱۳۱۴۹
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)			۴۱۶۴۹,۰۸۶	۲۰۹۰۶,۳۹	۶۲۵۵۵,۴۸

## ب. حالت دوم: هیچ کدام از پست‌های موجود قابلیت توسعه ظرفیت ندارند

در این حالت مسئله برنامه‌ریزی در حالی حل می‌شود که پست‌ها موجود وجود دارند ولی هیچ کدام از آن‌ها قابلیت افزایش ظرفیت خود را ندارند، هماهنگی حالت قبلی، ابتدا باید  $\alpha$  مناسب توسط روش سعی و خطا تعیین شود از این‌رو مسئله برنامه‌ریزی برای مقادیر مختلف  $\alpha$  انجام شده است، و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری طرح برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در شکل (۵-۱۵) نشان داده شده است، همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در این حالت هزینه‌ها برای تمام مقادیر مختلف  $\alpha$  یکی است و به اصطلاح k-means توسعه‌یافته به  $\alpha$  حساس نیست. این پدیده به دو دلیل زیر اتفاق افتاده است:

۱. مکان پست‌های موجود ثابت است (تابعی از تغییرات  $\alpha$  نیست).
۲. از آنجاکه حداقل تعداد تئوری پست برای این شبکه در سال افق یکی است، مکان پست جدید



دقیقاً درجایی قرار می‌گیرد که توسط بارهای L24, L29, L30, L35, L36 تشکیل خوشه می‌دهد

و به دلیل مساوی بودن توان تمامی این بارها، ضریب وزنی در محاسبه میانگین خوشه بی‌تأثیر

می‌ماند.

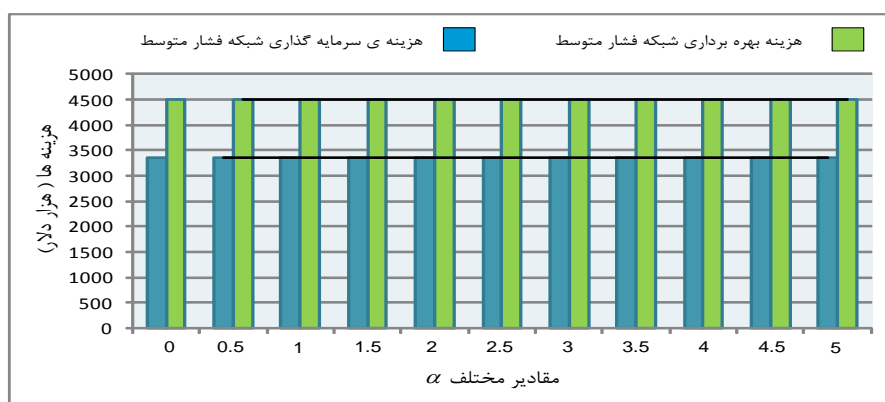
بنابراین، از آنجاکه  $\alpha$  در تعیین مراکز ثقل خوشه‌ها در این حالت خاص بی‌تأثیر است، پارامتر  $\alpha$  را برابر با صفر در نظر می‌گیریم و مسئله برنامه‌ریزی را حل می‌کنیم. این موضوع در مورد بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم نیز صادق است، چراکه شرایط یکی است، بنابراین از آوردن نمودار هزینه‌ها برای مقادیر مختلف  $\alpha$  برای بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم اجتناب می‌کنیم.

برای انجام برنامه‌ریزی مطابق فلوجارت ارائه‌شده در شکل (۳-۱) ابتدا حداقل تعداد تئوری برای پست باید محاسبه شود، بر مبنای روابط (۳-۱)، و (۳-۳) با در نظر داشتن حداکثر ظرفیت آزاد بارگیری برای پست‌های موجود (AEC) داریم:

$$TMNS_1 \cong \frac{306.62-270}{0.75 \times 90} \cong 1$$

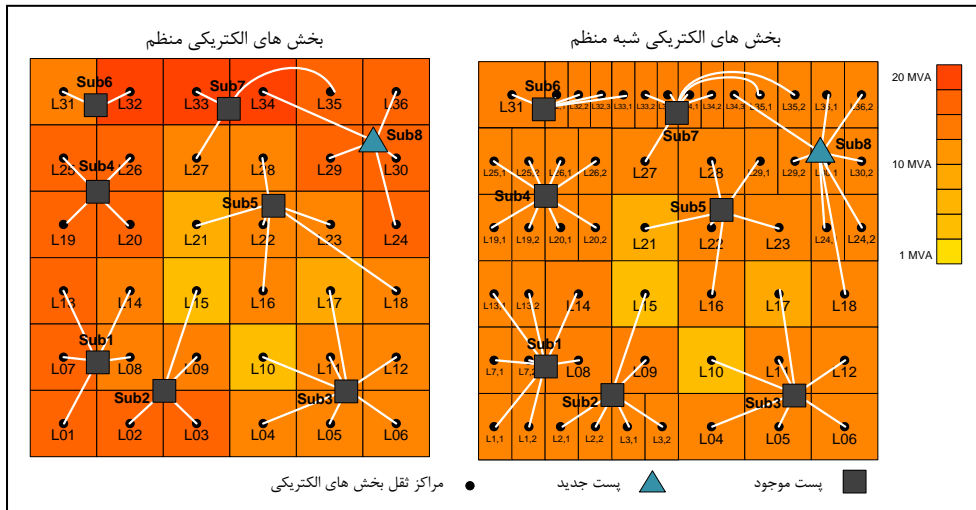
یعنی علاوه بر پست‌های موجود، تنها یک پست جدید لازم است، بنابراین با توجه به آنکه تعداد پست‌های موجود در دوره‌ی اول (یعنی سال افق)  $n_1^{es}$  برابر هفت و تعداد پست‌های جدید برای این دوره  $n_1^{ns}$  برابر با یک فرض شده ( $n_1^{ns}$ )، از این‌رو تعداد کل خوشه‌ها یا مکان پست‌ها یعنی ( $k_1$ ) برابر است با:

$$k_1 = n_1^{es} + n_1^{ns} = 7 + 1 = 8$$

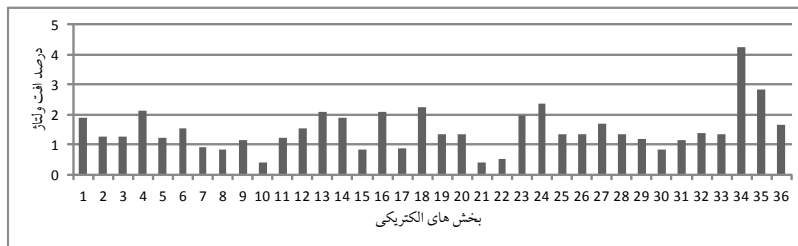


شکل (۵-۱۵) مقادیر مختلف هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم

برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع با این تعداد پست اولیه برای بخش‌های الکتریکی منظم و شبه منظم انجام شده است و نتایج نهایی مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست در شکل (۵-۱۶)، درصد افت ولتاژ در اشکال (۵-۱۷)، (۵-۱۸) و مشخصات فنی و اقتصادی طرح پیشنهادی حاصل از برنامه‌ریزی تک مرحله برای هر دو بخش الکتریکی منظم و شبه منظم در جدول (۵-۷)، (۵-۸) ارائه شده است. با توجه به شکل (۵-۱۶) با مقایسه حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها در دو حالت بخش‌های الکتریکی منظم و شبه منظم، تخصیص بارها در حالت شبه منظم موفق‌تر از حالت منظم است، زیرا در حالت منظم پست Sub8 به دلیل دریافت بار بزرگ L34، دارای ظرفیت خالی برای دریافت بار L18 نیست و این منجر به اتصال به اجبار بار L18 به پست دورترش یعنی Sub5 می‌شود، که در نهایت باعث افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری طرح می‌گردد. از این رو با توجه به جدول (۵-۷)، (۵-۸) هزینه‌ی کل شبکه پایین‌دستی (یا فشار متوسط) در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی برای حالت شبه منظم، حدود ۱,۰۸۷ میلیون دلار کمتر از حالت منظم است. علاوه بر این به دلیل دریافت تمام بار L34 توسط پست Sub8 در حالت منظم، این پست مجبور به افزایش ظرفیت خود تا ۹۰ MVA بوده است، در حالی که پست نزدیک‌تر به این بار Sub7 تنها ۶۱,۸۱ درصد بارگیری شده است. ولی در حالت شبه منظم پست Sub7 توانسته بخش بزرگی از بار L34 که به سه بخش الکتریکی کوچک تقسیم شده است را تغذیه کند و با این عمل از حداکثر ظرفیت آزاد بارگیری خود استفاده کرده و در صد بارگیری خود را به ۷۳,۰۷۷ برساند. در این شرایط، تنها یک بخش الکتریکی کوچک از بار L34 به پست Sub8 متصل شده و این پست توانسته ظرفیت خود را در سطح ۷۵MVA ثابت نگه دارد. تمامی این عوامل باعث کاهش ۱۰۷,۳۱ هزار دلار هزینه‌ی پست‌ها در حالت شبه منظم نسبت به حالت منظم شده است.



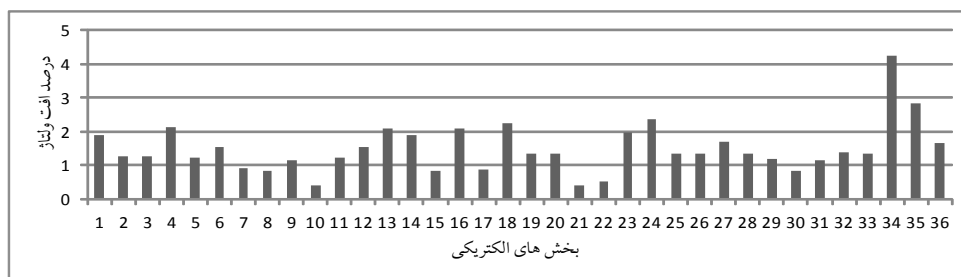
شکل (۵-۱۶) مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به روش اول برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم و شبه‌منظم



شکل (۵-۱۷) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی به روش اول برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم

جدول (۵-۷) نتایج نهایی برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به صورت استاتیک به روش اول برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های منظم

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
				پست	شبکه ی پایین دستی	کل
Sub1	۶۰	۶۰	۷۳,۲۶	۶۸۷,۰۲	۲۹۲۱,۶	۳۶۰۸,۶
Sub2	۴۵	۴۵	۶۴,۶۸۸	۴۹۲,۳	۱۶۲۷,۳	۲۱۱۹,۶
Sub3	۴۵	۴۵	۷۰,۱۱	۵۲۶,۵۷	۲۰۴۶,۳	۲۵۷۲,۸
Sub4	۶۰	۶۰	۷۴,۱۸	۶۹۵,۰۵	۲۴۶۲,۷	۳۱۵۷,۸
Sub5	۴۵	۴۵	۶۸,۶۱	۵۱۶,۸۴	۲۱۸۷,۹	۲۷۰۴,۷
Sub6	۴۵	۴۵	۵۸,۱۳	۴۵۴,۶	۱۱۸۶,۸	۱۶۴۱,۴
Sub7	۶۰	۶۰	۶۱,۸۱	۵۹۵,۱۹	۲۳۵۸,۵	۲۹۵۳,۷
Sub8	۰	۹۰	۷۱,۳۶	۸۳۸۴,۵	۴۶۰۷,۹	۱۲۹۹۲
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)				۱۲۳۵۲,۰۳۲	۱۹۳۹۹,۰۲۱	۳۱۷۵۱,۰۵۴



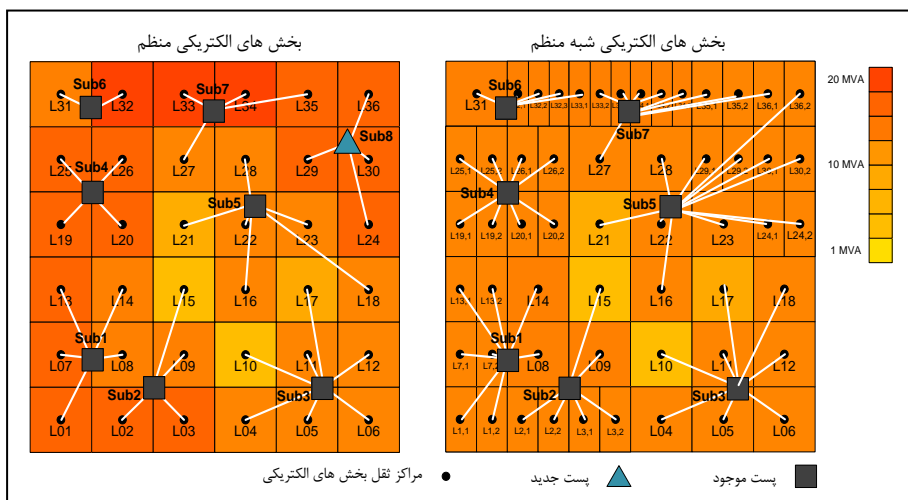
شکل (۵-۱۸) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی برای روش اول و برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم

جدول (۵-۸) نتایج نهایی برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع بصورت استاتیک به روش اول برای حالت دوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
				پست	شبکه ی پایین دستی	کل
Sub1	۶۰	۶۰	۷۳,۰۷۸	۶۸۵,۳۷	۲۷۵۴,۳	۴۳۳۹,۶
Sub2	۴۵	۴۵	۶۴,۵۶	۴۹۱,۵۸	۱۵۵۶,۷	۲۰۴۸,۳
Sub3	۴۵	۴۵	۷۰,۱۱	۵۲۶,۵۷	۲۰۴۶,۳	۲۵۷۲,۸
Sub4	۶۰	۶۰	۷۳,۹۸۱	۶۹۳,۲۵	۲۲۸۲,۶	۲۹۷۵,۸
Sub5	۴۵	۴۵	۶۸,۱۴	۵۱۳,۸۳	۱۹۱۸,۹	۲۴۳۲,۷
Sub6	۴۵	۴۵	۷۳,۶۸۶	۵۵۰,۶۳	۱۹۶۸,۹	۲۵۱۹,۶
Sub7	۶۰	۶۰	۷۳,۰۷۷	۶۸۵,۳۶	۲۵۲۹,۴	۳۲۱۴,۸
Sub8	۰	۷۵	۶۷,۱۳۷	۸۰۹۸,۱	۳۲۵۴,۱	۱۱۳۵۲
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)				۱۲۲۴۴,۷۲	۱۸۳۱۱,۱۲	۳۰۵۵۵,۸۵

### ج . حالت سوم: پست‌های موجود قابلیت توسعه ظرفیت دارند

در این حالت فرض شده که پست‌های موجود طبق جدول (۵-۴) می‌توان ظرفیت خود را در طول برنامه‌ریزی توسعه دهند و از آنجا که در این حالت نیز مشابه حالت قبل الگوریتم k-means توسعه یافته به پارامتر  $\alpha$ ، حساس نیست (به دلیل اینکه مکان پست‌های موجود تغییری نکرده است و شرایط مکانی پست‌ها مشابه حالت قبلی است، بنابراین در اینجا از آوردن نمودار هزینه‌ها اجتناب شده است)، بنابراین ابتدا برنامه‌ریزی استاتیک یا تک مرحله‌ای توسعه پست فوق توزیع برای  $\alpha = 0$  برای بخش‌های الکتریکی منظم و شبه منظم انجام شده و نتایج آنها در شکل (۵-۱۹)، (۵-۲۰)، و (۵-۲۱) و جدول (۵-۹)، (۵-۱۰) آورده شده است.



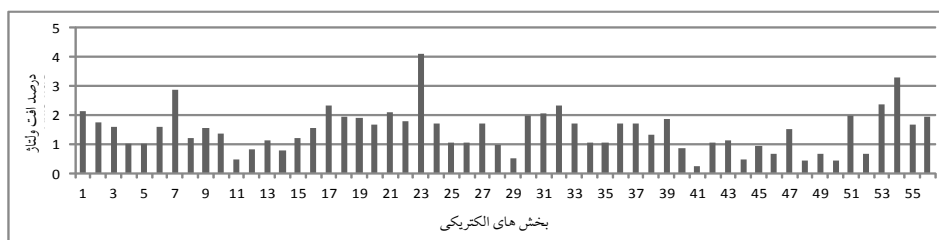
شکل (۵-۱۹) مکان و حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها، حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم و شبه‌منظم



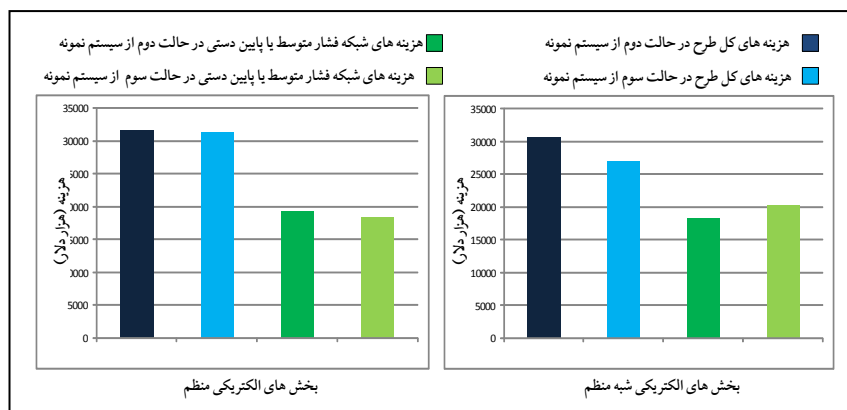
شکل (۵-۲۰) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی برای روش اول و برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم

جدول (۵-۹) نتایج نهایی برنامه‌ریزی تک مرحله‌ای توسعه پست فوق توزیع به روش اول برای سیستم نمونه در حالت سوم با بخش‌های الکتریکی منظم

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
				پست	شبکه ی پایین دستی	کل
Sub1	۶۰	۶۰	۷۳٫۲۶	۶۸۷٫۰۲	۲۹۲۱٫۶	۳۶۰۸٫۶
Sub2	۴۵	۴۵	۶۴٫۶۸	۴۹۲٫۳	۱۶۲۷٫۳	۲۱۱۹٫۶
Sub3	۴۵	۴۵	۷۰٫۱۱	۵۲۶٫۵۷	۲۰۴۶٫۳	۲۵۷۲٫۸
Sub4	۶۰	۶۰	۷۴٫۱۸	۶۹۵٫۰۵	۲۴۶۲٫۷	۳۱۵۷٫۸
Sub5	۴۵	۴۵	۶۸٫۶۱	۵۱۶٫۸۴	۲۱۸۷٫۹	۲۷۰۴٫۷
Sub6	۴۵	۴۵	۵۸٫۱۳	۴۵۴٫۶	۱۱۸۶٫۸	۱۶۴۱٫۴
Sub7	۶۰	۹۰	۶۴٫۰۱	۱۷۰۰٫۳	۳۲۷۹٫۱	۴۹۷۹٫۴
Sub8		۶۰	۷۲٫۳۱	۷۹۰٫۱	۲۶۸۰	۱۰۵۸۱
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)				۱۲۹۷۳٫۶۴	۱۸۳۹۱٫۷۲	۳۱۳۶۵٫۳۷



شکل (۵-۲۱) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی برای روش اول و برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی شبه منظم

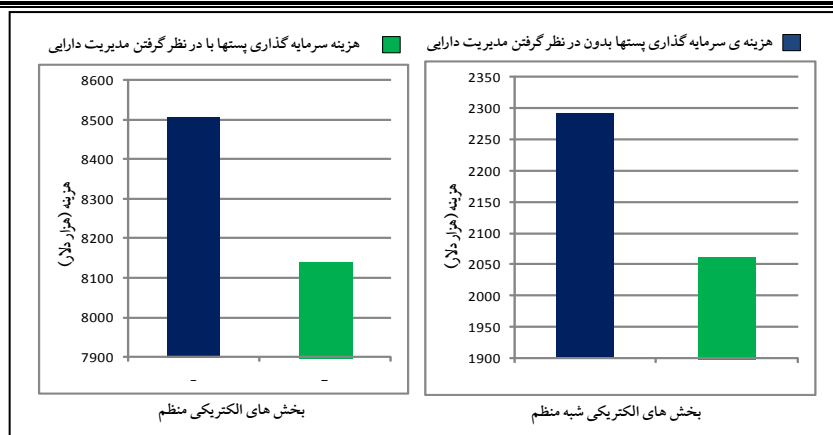


شکل (۵-۲۲) مقایسه هزینه‌های حالت دوم و سوم از سیستم نمونه (با روش حل اول)

جدول (۵-۱۰) نتایج نهایی برنامه‌ریزی تک مرحله‌ای توسعه پست فوق توزیع برای سیستم نمونه در حالت سوم با بخش‌های الکتریکی شبه منظم

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
				پست	شبکه ی پایین دستی	کل
Sub1	۶۰	۶۰	۷۳,۰۷۸	۶۸۵,۳۷	۲۷۵۴,۳	۳۴۳۹,۶
Sub2	۴۵	۴۵	۶۴,۵۶	۴۹۱,۵۸	۱۵۵۶,۷	۲۰۴۸,۳
Sub3	۴۵	۶۰	۶۲,۰۳۴	۱۰۵۵,۲	۲۶۸۰,۵	۳۷۳۵,۶
Sub4	۶۰	۶۰	۷۳,۹۸	۶۹۳,۲۵	۲۲۸۲,۶	۲۹۷۵,۸
Sub5	۴۵	۹۰	۷۰,۶	۱۷۷۰,۵	۵۴۶۷,۱	۷۲۳۷,۶
Sub6	۴۵	۴۵	۷۳,۶۸	۵۵۰,۶۳	۱۹۶۸,۹	۲۵۱۹,۶
Sub7	۶۰	۷۵	۷۴,۹۴	۱۵۰۱,۴	۳۵۷۱,۵	۵۰۷۲,۸
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)				۶۷۴۷,۸۲	۲۰۲۸۱,۸۲	۲۷۰۲۹,۲۹

با مقایسه نتایج بدست آمده از دو حالت توسعه‌پذیری پست‌های موجود و عدم توسعه‌پذیری آنها می‌توان نتیجه گرفت، که با توسعه پست‌های موجود می‌توان به مقدار قابل توجهی در هزینه‌های طرح توسعه صرفه‌جویی کرد، بطوریکه حدود ۳۸۵,۶۸۴ هزار دلار و ۳,۵۲۶ میلیون دلار بترتیب برای بخش‌های



شکل (۵-۲۳) هزینه‌های سرمایه‌گذاری پست در دو حالت در نظر گرفتن و در نظر نگرفتن مدیریت دارایی

الکتریکی منظم و غیر منظم نسبت به حالت دوم هزینه‌ها کاهش پیدا کرده است (شکل (۵-۲۲)).  
 با توجه به جدول (۵-۹) و (۵-۱۰) و شکل (۵-۱۹) می‌توان دید که بازهم تخصیص بارها برای بخش‌های الکتریکی شبه‌منظم موفق‌تر از بخش‌های الکتریکی منظم عمل کرده است، بطوریکه در حالت شبه منظم بخشی از بار L35 توسط پست Sub8 و بخشی از بار L29 توسط پست Sub5 تغذیه می‌شود، که منجر به کاهش تلفات و هزینه‌های مرتبط با آن شده است و به‌طور کلی حدود ۴,۳۳ میلیون دلار در هزینه‌های کل طرح صرفه‌جویی شده است.

در فصل سوم گفته شد که در این پایان‌نامه تابع هزینه‌ی اتصالی در روند تخصیص بارها تعریف شده که شامل هزینه‌های توسعه ظرفیت پست علاوه بر هزینه‌های شبکه فشار متوسط است، که این امر منجر به استفاده بهینه از پتانسیل موجود شبکه و در نظر گرفتن مدیریت دارایی می‌شود، بطوریکه می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌گذاری پست را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد. از این رو قبل از انجام برنامه‌ریزی دینامیکی، تخصیص بارها برای هر دو: بخش‌های الکتریکی منظم و شبه‌منظم بدون در نظر گرفتن هزینه‌های توسعه ظرفیت یا مدیریت دارایی انجام شده (یعنی فرض شده که  $\sum_{i \in \Psi_p^m} ExC_{p,i}^s$  از رابطه ی (۳-۲۱) حذف شده است و تخصیص بهینه‌ی بارها تنها بر مبنای هزینه‌های شبکه‌ی فشار متوسط انجام گیرد). شکل (۵-۲۳) هزینه‌ی مرتبط با سرمایه‌گذاری پست را برای با و بدون در نظر گرفتن مدیریت دارایی برای سیستم نمونه در حالت سوم با بخش‌های الکتریکی منظم و شبه‌منظم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با در

جدول (۵-۱۱) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به روش اول برای سیستم نمونه برای حالت سوم در دوره اول

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
				پست	شبکه ی پایین‌دستی	کل
Sub1	۶۰	۶۰	۷۰,۳۳	۱۷۱,۵۹	۹۶۳,۰۳	۱۱۳۴,۹
Sub2	۴۵	۴۵	۶۲,۴۸	۱۲۳,۴۸	۵۷۵,۷۶	۶۹۹,۳۶
Sub3	۴۵	۴۵	۶۳,۶۴	۱۲۵	۸۰۷,۳۳	۹۳۲,۷۸
Sub4	۶۰	۶۰	۶۸	۱۶۶,۰۹	۷۸۰,۴۴	۹۴۶,۵۳
Sub5	۴۵	۴۵	۶۳,۲۸	۱۲۴,۴۱	۸۶۳,۰۶	۹۸۸,۲
Sub6	۴۵	۴۵	۵۵,۹۱	۱۱۳,۷۵	۳۷۲,۵۷	۴۸۶,۳۲
Sub7	۶۰	۷۵	۶۰,۲۴	۱۰۸۵,۸	۶۸۳,۸۷	۱۷۶۹,۳۲
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)				۱۹۱۱,۷۱	۵۰۴۶,۰۵۴	۶۹۵۷,۷۷

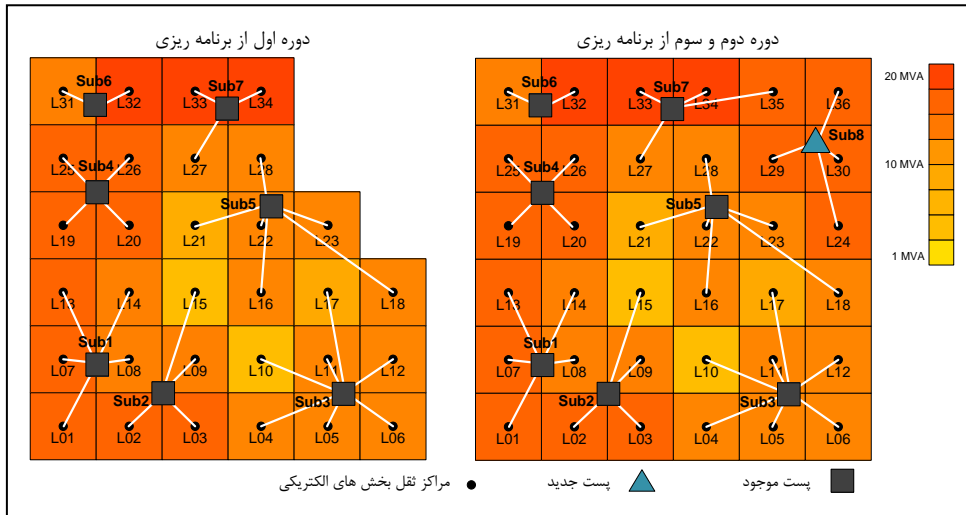
جدول (۵-۱۲) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به روش اول برای سیستم نمونه برای حالت سوم در دوره دوم

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
				پست	شبکه ی پایین‌دستی	کل
Sub1	۶۰	۶۰	۷۱	۲۷۰,۵۹	۱۰۴۲,۸	۱۳۱۳,۸
Sub2	۴۵	۴۵	۶۳,۰۲	۱۹۴,۳۳	۵۵۹,۸۹	۷۵۴,۴۱
Sub3	۴۵	۴۵	۶۶,۴۸	۲۰۳,۴۱	۶۵۹,۶۴	۸۶۳,۰۵
Sub4	۶۰	۶۰	۷۰,۶۶	۲۶۸,۸۶	۸۹۵,۷	۱۱۶۴,۶
Sub5	۴۵	۴۵	۶۵,۴۲	۲۰۱,۰۵	۷۰۵,۳۸	۹۰۶,۴۳
Sub6	۴۵	۴۵	۵۶,۶۲	۱۷۹,۳۶	۴۳۳,۵	۶۱۲,۸۷
Sub7	۶۰	۹۰	۶۲,۰۴۴	۳۱۷,۳۱	۱۳۱۰,۹	۱۶۲۸,۲
Sub8	۰	۶۰	۶۸,۶۶	۴۱۵۱,۴	۱۲۰۷,۶	۵۳۵۹
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)				۵۷۸۶,۹۸	۶۸۱۵,۳۷	۱۲۶۰۲,۳۶

جدول (۵-۱۳) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به روش اول برای سیستم نمونه برای حالت سوم در دوره سوم

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
				پست	شبکه ی پایین‌دستی	کل
Sub1	۶۰	۶۰	۷۱,۵	۳۲۷	۱۲۴۹,۷	۱۵۷۶,۷
Sub2	۴۵	۴۵	۶۳,۴۲۲	۲۳۴,۳۲	۶۷۱	۹۰۵,۳۲
Sub3	۴۵	۴۵	۶۸,۶۲۲	۲۵۰,۶۳	۷۹۰,۵۴	۱۰۴۱,۲
Sub4	۶۰	۶۰	۷۲,۶۶۷	۳۳۰,۸۲	۱۰۷۳,۴	۱۴۰۴,۳
Sub5	۴۵	۴۵	۶۷,۰۲۲	۲۴۶	۸۴۵,۳۶	۱۰۹۱,۴
Sub6	۴۵	۴۵	۵۷,۱۵۶	۲۱۶,۳۷	۵۱۹,۵۳	۷۳۵,۹۱
Sub7	۶۰	۹۰	۶۲,۶۷۸	۳۸۳,۴۹	۱۴۱۹	۱۸۰۲,۵
Sub8	۰	۶۰	۷۰,۶۶۷	۳۲۳,۰۶	۱۱۶۲,۵	۱۴۸۵,۶
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)				۲۳۱۱,۶۷	۷۷۳۱,۱۶	۱۰۰۴۲,۸۳





شکل (۵-۲۴) مکان و حوزه سرویس‌دهی پست‌ها، حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع به صورت شبه‌دینامیکی به روش اول برای حالت سوم از سیستم نمونه

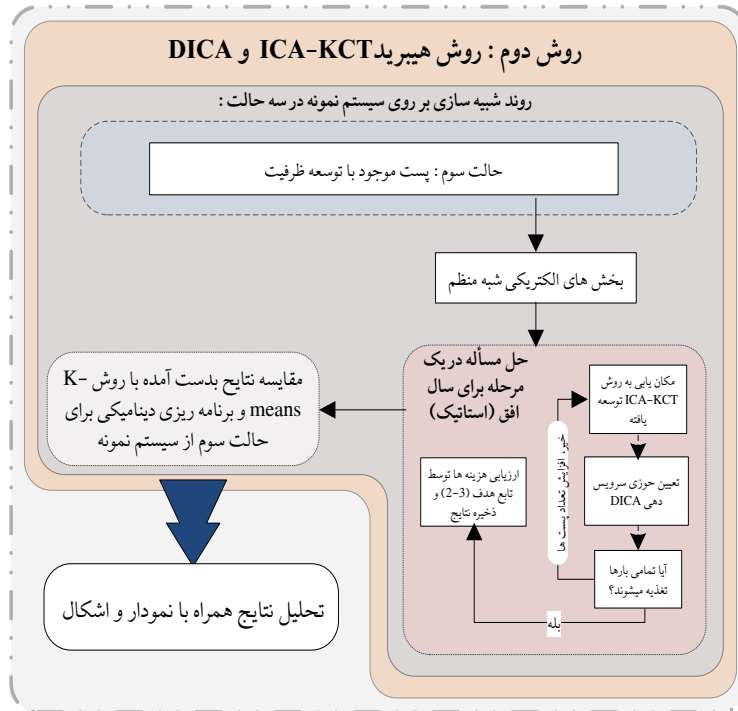
نظر داشتن هزینه‌ی توسعه ظرفیت پست‌ها در تابع هزینه‌ی اتصال می‌توان هزینه‌ی سرمایه‌گذاری پست‌ها را به مقدار قابل توجهی کاهش داد و از حداکثر پتانسیل موجود شبکه استفاده نمود.

طبق تعریف برنامه‌ریزی شبه‌دینامیکی یا چندمرحله‌ای که در فصل دوم بیان شد، بعد از انجام برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای و به دست آوردن ساختار نهایی شبکه در سال افق، در مرحله‌ی دوم برنامه‌ریزی باید در چند دوره (که معمولاً دو یا سه‌ساله) است با توجه به نتایج به دست آمده در مرحله‌ی اول انجام گیرد، در اینجا نیز برنامه‌ریزی در ۳ دوره‌ی سه‌ساله برای بخش‌های الکتریکی منظم انجام شده است و نتایج آن در سه دوره در جدول‌های (۵-۱۱)، (۵-۱۲)، (۵-۱۳) و شکل (۵-۲۴) ارائه شده است.

## ۵-۲-۲- برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع برای حالت سوم از سیستم نمونه

### توسط روش دوم: ICA-KCT و DICA

در این قسمت مطابق شکل (۵-۲۵)، برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع را برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم به صورت استاتیک، توسط روش دوم: ICA-KCT و DICA انجام می‌شود. از آنجاکه سیستم نمونه بزرگ نیست، بنابراین نیازی به تجزیه کردن منطقه برنامه‌ریزی به نواحی

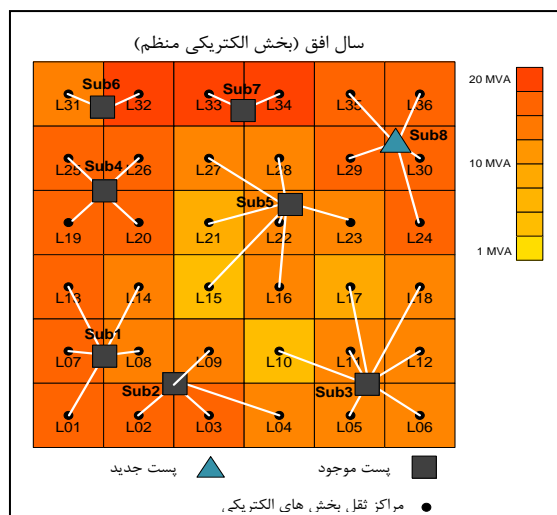


شکل (۵-۲۵) روند شبیه‌سازی به روش دوم (DICA و ICA-KCT)

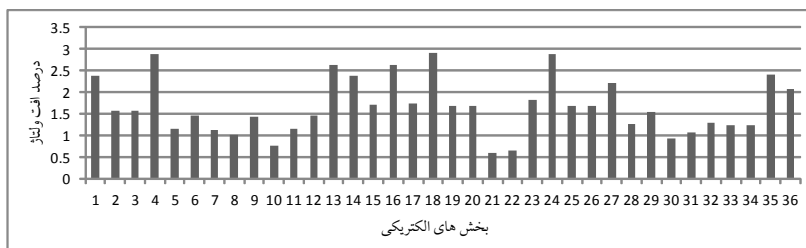
مجزای کوچک نیست و برنامه‌ریزی مشابه روند ارائه‌شده برای روش اول بر پایه شیوهی چندبخشی تنها در دو مرحله: (۱) مکان‌یابی بهینه‌ی پست (توسط ICA-KCT) و (۲) تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی و ظرفیت بهینه‌ی پست‌ها (توسط DICA) انجام‌شده است. از این‌رو بعد از بدست آوردن حداقل تعداد تئوری پست‌های موردنیاز جدید برای تأمین بار در آینده، ابتدا مکان‌یابی پست‌ها توسط الگوریتم توسعه‌یافته ترکیبی ICA-KCT انجام می‌شود، ولی از آنجا که، هزینه‌های زمین مدنظر نیست، این مکان‌یابی تنها بر اساس حداقل‌سازی هزینه‌های شبکه فشار متوسط انجام‌شده است، یعنی از رابطه‌ی (۴-۱) بخش مربوط به هزینه زمین حذف‌شده است، بنابراین داریم:

$$OF_p^{OSSP} = T.C_y^{EL} . Lf_p \cdot \sum_{i=1}^{k_p} \sum_{j \in \Psi_i^d} PL_{p,ij}^f \quad (۱-۵)$$

عناصر رابطه‌ی (۵-۱)، در رابطه‌ی (۴-۱) معرفی‌شده‌اند. رابطه‌ی (۵-۱)، تنها بر اساس قیود تعریف شده

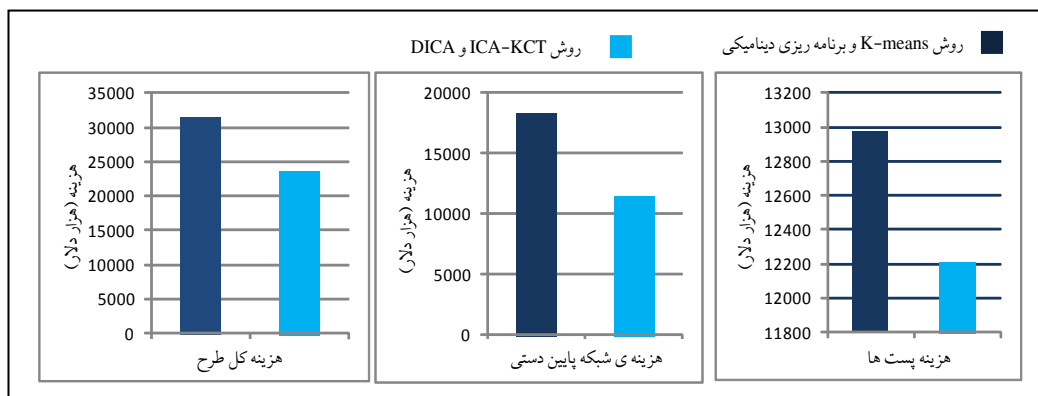


شکل (۵-۲۶) مکان و حوزه سرویس‌دهی پست‌ها، حاصل از برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع به روش اول برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم



شکل (۵-۲۷) درصد افت ولتاژ در هر بخش الکتریکی برای روش دوم و برای حالت سوم از سیستم نمونه با بخش‌های الکتریکی منظم

برای رابطه (۴-۴) و (۴-۵) مسئله مکان‌یابی حل شده است. پس از تعیین مکان پست‌های جدید، برای تعیین بهینه‌ی حوزه‌ی سرویس‌دهی الگوریتم DICA بکار گرفته شده است. نتیجه نهایی در شکل (۵-۲۶)، درصد افت ولتاژ در شکل (۵-۲۷)، و نتایج فنی و اقتصادی پست‌ها در جدول (۵-۱۴) آورده شده است. با مقایسه هزینه‌های مختلف طرح (شکل (۵-۲۸))، برتری روش DICA بر روش برنامه‌ریزی دینامیکی جهت پیدا کردن بهترین ترتیب توالی اتصال بارها (در تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی) به‌وضوح پیداست، چراکه مکان پست جدید Sub8 برای هر دو روش k-means توسعه‌یافته و ICA-KCT یکی است، ولی تخصیص بارها در روش DICA به‌گونه‌ای انجام شده است که توانسته هزینه‌های کل طرح را حدود ۷,۷۱۵ میلیون دلار کاهش دهد.



شکل (۵-۲۸) هزینه‌های مختلف طرح پیشنهادی توسط روش اول و دوم برای حالت سوم از سیستم نمونه

جدول (۵-۱۴) نتایج نهایی برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای توسعه پست‌فوق توزیع به روش دوم برای سیستم نمونه در حالت سوم با بخش‌های الکتریکی شبه منظم

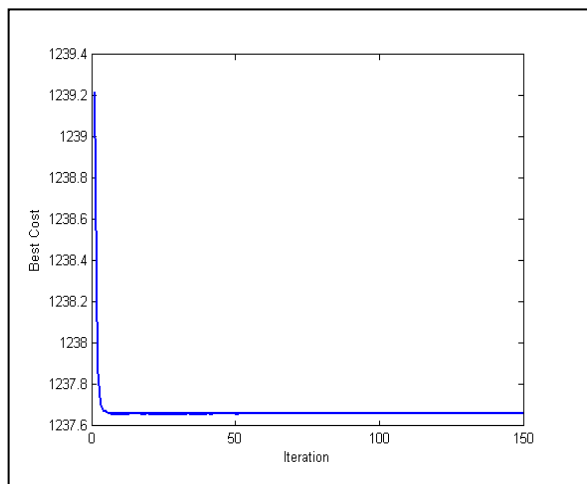
شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)		
				پست	شبکه ی پایین دستی	کل
Sub1	۶۰	۶۰	۷۲,۴۹۶	۶۸۰,۳۴	۴۹۰,۲۷	۱۱۷۰,۶
Sub2	۴۵	۴۵	۷۲,۲۱۶	۵۴۰,۵۸	۳۶۸,۶۱	۹۰۹,۲
Sub3	۴۵	۴۵	۶۹,۲۸	۵۲۱,۱۲	۵۱۶,۲	۱۰۳۷,۳
Sub4	۶۰	۶۰	۷۳,۵۲۲	۶۸۹,۲۳	۳۷۵,۱۸	۱۰۶۴,۴
Sub5	۴۵	۴۵	۷۲,۴	۵۴۱,۸۳	۵۱۸,۸۳	۱۰۶۰,۷
Sub6	۴۵	۴۵	۵۷,۷	۴۵۲,۲۸	۱۷۶,۵۲	۶۲۸,۸
Sub7	۶۰	۶۰	۶۷,۹۱	۶۴۲,۲	۲۴۸,۸۹	۸۹۱,۰۹
Sub8		۷۵	۷۱,۶۳	۸۱۴۱,۴	۵۴۸,۰۴	۸۶۸۹,۴
مجموع هزینه‌ها (هزار دلار)				۱۲۲۰۸,۹۹	۱۱۴۴۰,۸۲	۲۳۶۴۹,۸۱

پارامترها مختلف الگوریتم ICA-KCT و DICA در جدول (۵-۱۵) آورده شده است، و اشکال (۵-۲۹) و

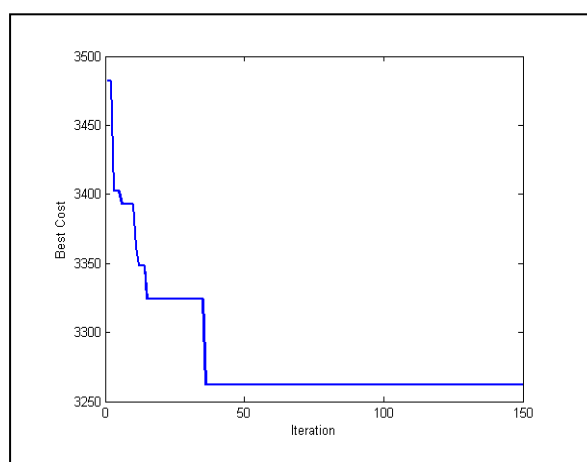
(۵-۳۰) به ترتیب نمودار همگرایی الگوریتم ICA-KCT و DICA را برای مکان‌یابی و تعیین حوزه‌ی

سرویس‌دهی پست‌ها در ۱۵۰ تکرار نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم توانسته در همان

تکرارها اول به بهترین جواب ممکن دست یابد که این نشان‌دهنده کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی است.



شکل (۵-۲۹) روند همگرایی تابع هزینه در مکان‌یابی پست‌ها به روش ICA-KCT



شکل (۵-۳۰) روند همگرایی تابع هزینه برای تعیین حوزه سرویس‌دهی بهینه به روش DICA

جدول (۵-۱۵) پارامترهای الگوریتم ICA-KCT و DICA

	جمعیت اولیه	تعداد امپراطوری‌های	عملگر فشار انتخاب	ضریب جذب	ضریب میانگین هزینه‌های کلونی‌ها $\bar{f}_i$	نرخ انقلاب	احتمال انقلاب
روش ICA-KCT	۱۰۰	۱۰	۱	۲	۰,۱	۰,۰۵	۰,۱
روش DICA	۲۰۰	۲۰	۱	--	۰,۱	۰,۱۵	۰,۱

## ۵-۳- برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع برای شبکه مشهد توسط

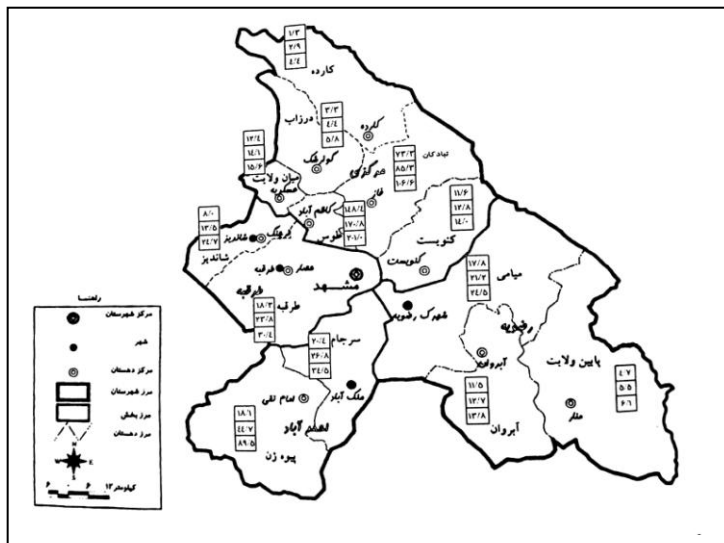
### روش دوم: ICA-KCT و DICA

شبکه‌ی فوق توزیع مشهد شامل خود شهر مشهد و سیزده حومه‌ی اطرافش: بیوه زن، سرجام، شاندریز، طرهبه، تبادکان، طوس، کارده، میان ولایت، کنویست، آبروان، پایین ولایت، درزاب، میامی که نقشه‌ی از این تقسیم‌بندی در شکل (۵-۳۱) آورده شده است. این شبکه دارای ۴۴ پست فوق توزیع موجود در ولتاژ ۱۳۲ و ۶۳ کیلوولت با ظرفیت ۲۵۵۰ مگاوات آمپر است، که ۱۰۳۸۷ ترانسفورماتور توزیع با ظرفیت موجود ۲۵۶۷٫۵ مگاوات آمپر را که در منطقه‌ای به وسعت ۱۱٫۴۵ هزار کیلومتر مربع توزیع شده‌اند، را تغذیه می‌کند [۱۲]. شکل (۵-۳۲) موقعیت ۴۴ پست موجود همراه با ترانسفورماتورهای توزیع تغذیه شونده توسط آن‌ها را در شبکه‌ی فوق توزیع مشهد نشان می‌دهد.

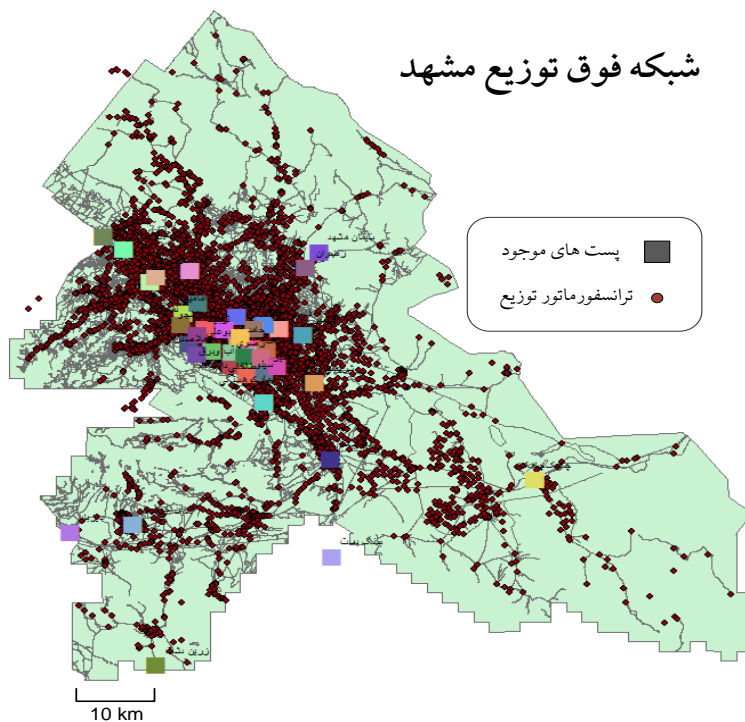
هدف از این برنامه‌ریزی توسعه بلند-مدت پست‌های فوق توزیع به صورت یک برنامه‌ریزی شبه‌دینامیکی یا چندمرحله‌ای برای ۱۰ سال آینده با در نظر داشتن پست‌های موجود است، بطوریکه فرضیات زیر در این برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است:

- برای محاسبه ی تلفات ترانسفورماتور پست‌های فوق توزیع فرض شده که تمامی آن‌ها دارای ولتاژ ۱۳۲/۲۰ کیلوولت هستند.
- تمامی پست‌های ۱۳۲/۲۰ کیلوولت موجود که ظرفیت آن‌ها کمتر از ۹۰ MVA است می‌توانند ظرفیت خود را تا ۹۰ MVA توسعه دهند، در این میان فرض شده برخی از پست‌های موجود ۶۳/۲۰ کیلوولت نیز، که در مراکز پرمصرف قرار دارند می‌توانند ظرفیت خود را تا ۹۰ مگاوات آمپر توسعه دهند.

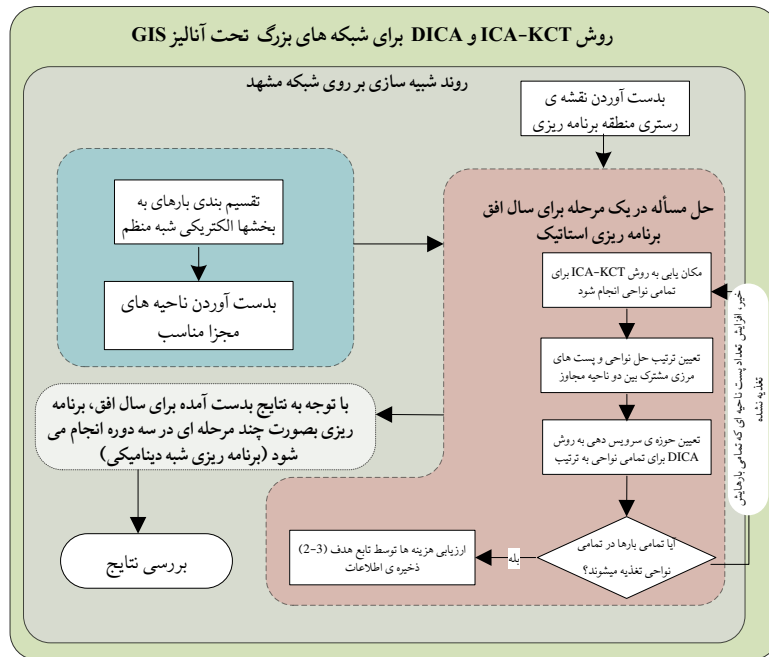
اطلاعات فنی مربوط به پست‌های فوق توزیع موجود مشهد در جدول (۵-۱۶) ارائه شده است.



شکل (۵-۳۱) حوزه‌ی شبکه فوق توزیع مشهد در یک نمای کلی با تفکیک حومه‌ها مختلف آن [۱۲]



شکل (۵-۳۲) پست‌های فوق توزیع و توزیع موجود در شبکه فوق توزیع مشهد



شکل (۵-۳۳) روند برنامه‌ریزی توسعه چند مرحله‌ای پست‌فوق توزیع برای شبکه فوق توزیع مشهود

روند برنامه‌ریزی مطابق شکل (۵-۳۳)، به این صورت انجام شده است که ابتدا نقشه ی رستری از منطقه برنامه‌ریزی تهیه می‌شود، سپس بارهای منطقه‌ی برنامه‌ریزی به بخش‌های الکتریکی شبه منظم کوچک تقسیم می‌گردند. با استفاده از الگوریتم ICA-KCT منطقه‌ی برنامه‌ریزی به چندین ناحیه‌ی مجزای کوچک تجزیه می‌شود. مرحله اول در برنامه‌ریزی شبه دینامیکی، انجام یک برنامه‌ریزی استاتیک برای تعیین ساختار کلی شبکه در سال افق است، بدین صورت که ابتدا حداقل تعداد تئوری پست برای کل منطقه برای سال افق محاسبه می‌شود و سپس منطقه‌ی برنامه‌ریزی به تعدادی ناحیه مجزا تجزیه می‌شود که مجموع حداقل تعداد تئوری پست‌های تمام نواحی آن برابر با حداقل تعداد تئوری برای کل منطقه باشد. بعد از تعیین نواحی، مکان‌یابی بهینه ی پست بر مبنای ارزیابی نقشه رستری به دست آمده و هزینه‌های شبکه‌ی فشار متوسط توسط الگوریتم ICA-KCT انجام می‌شود. پس از مشخص شدن مکان پست‌های جدید، ترتیب حل نواحی و پست‌های بین ناحیه‌ی مشترک برای تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی نواحی توسط روش ابتکاری ارائه شده در قسمت ۴-۶-۲ از بخش چهارم مشخص شده و سپس تخصیص بهینه‌ی هر ناحیه به صورت مجزا و به ترتیب اولویت تعریف شده با استفاده از الگوریتم DICA بر مبنای حق تقدم اتصال بارها به مناسب‌ترین



جدول (۵-۱۶) اطلاعات فنی پست‌های فوق توزیع موجود شبکه مشهد [۱۲]

ولتاژ (KV)	ظرفیت قابل توسعه (MVA)	ظرفیت موجود (MVA)	نام پست	شماره پست	ولتاژ (KV)	ظرفیت قابل توسعه (MVA)	ظرفیت موجود (MVA)	نام پست	شماره پست
۱۳۲	۹۰	۶۰	پاژ	۲۴	۱۳۲	۹۰	۶۰	فارمد	۱
۶۳	۶۰	۹۰	چاهک	۲۵	۱۳۲	۹۰	۹۰	صنعت	۲
۶۳	۶۰	۹۰	رضوان	۲۶	۱۳۲	۹۰	۶۰	امامیه	۳
۶۳	۶۰	۹۰	سیمان مشهد	۲۷	۱۳۲	۹۰	۶۰	نمایشگاه	۴
۶۳	۶۰	۶۰	مشهد ۶۳	۲۸	۶۳	۶۰	۶۰	آب و برق	۵
۱۳۲	۶۰	۹۰	موبیل حافظ	۲۹	۱۳۲	۹۰	۶۰	دانشجو	۶
۱۳۲	۹۰	۹۰	گلشهر	۳۰	۱۳۲	۹۰	۶۰	پردیس	۷
۶۳	۶۰	۹۰	سیلو	۳۱	۱۳۲	۹۰	۶۰	خواجه ربیع	۸
۱۳۲	۶۰	۹۰	ماشین ابزار	۳۲	۱۳۲	۹۰	۹۰	سپاد	۹
۱۳۲	۹۰	۶۳	طالقانی	۳۳	۶۳	۹۰	۶۰	حامد	۱۰
۱۳۲	۹۰	۶۳	ملاصدرا	۳۴	۶۳	۹۰	۶۰	دانشگاه	۱۱
۱۳۲	۹۰	۶۳	بوعلی	۳۵	۶۳	۹۰	۶۰	دروازه قوچان	۱۲
۶۳	۶۰	۶۳	امام‌رضا ثامن	۳۶	۶۳	۹۰	۶۰	شمال پارک	۱۳
۶۳	۹۰	۱۳۲	دبیری	۳۷	۱۳۲	۹۰	۶۰	تپه سلام	۱۴
۱۳۲	۹۰	۱۳۲	تربیت	۳۸	۱۳۲	۹۰	۳۰	ایران خودرو	۱۵
۱۳۲	۹۰	۶۳	غدیر	۳۹	۶۳	۹۰	۶۰	طرق	۱۶
۱۳۲	۹۰	۱۳۲	رضوی	۴۰	۱۳۲	۹۰	۶۰	کوهسنگی	۱۷
۱۳۲	۹۰	۶۳	مشهد ۱۳۲	۴۱	۶۳	۹۰	۶۰	ملک	۱۸
۱۳۲	۹۰	۱۳۲	توس	۴۲	۱۳۲	۹۰	۶۰	شریعتی	۱۹
۱۳۲	۹۰	۱۳۲	سنگ بست	۴۳	۱۳۲	۹۰	۳۰	دیزباد	۲۰
۱۳۲	۶۰	۱۳۲	زرین دشت	۴۴	۱۳۲	۹۰	۶۰	ساغروان	۲۱
		۶۳		۴۵	۶۳	۹۰	۶۰	بازار رضا	۲۲
		۶۳			۶۳	۹۰	۶۰	بهار	۲۳

پست انجام می‌شود. سپس اگر تمامی بارهای منطقه‌ی برنامه‌ریزی به پست‌ها متصل شده بودند، تابع هزینه کل یعنی (۳-۴) محاسبه می‌شود تا هزینه‌ی نهایی طرح تعیین گردد، در غیر این صورت تعداد پست‌های آن ناحیه‌ی کوچک مجزایی که دارای بارهایی است که بی‌تغذیه مانده‌اند، افزایش می‌یابد و سپس مکان‌یابی برای آن ناحیه مجدداً انجام شده و دوباره فرایند تخصیص بارهای برای آن انجام می‌شود. این کار تا زمانی انجام می‌شود که تمامی بارها به پست‌ها متصل شوند.

بعد از تعیین ساختار کلی شبکه در سال افق، برنامه‌ریزی در سه دوره ۳ ساله برای سال افق با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مرحله ۱ اول، انجام شده و تمامی تصمیمات بر مبنای نتایج مرحله اول انجام

می‌گیرد. تمامی نتایج حاصل از مرحله اول و دوم برنامه‌ریزی همراه با شکل و جدول در بخش‌های جلوتر ارائه شده است.

## ۵-۳-۱- تهیه نقشه رستری

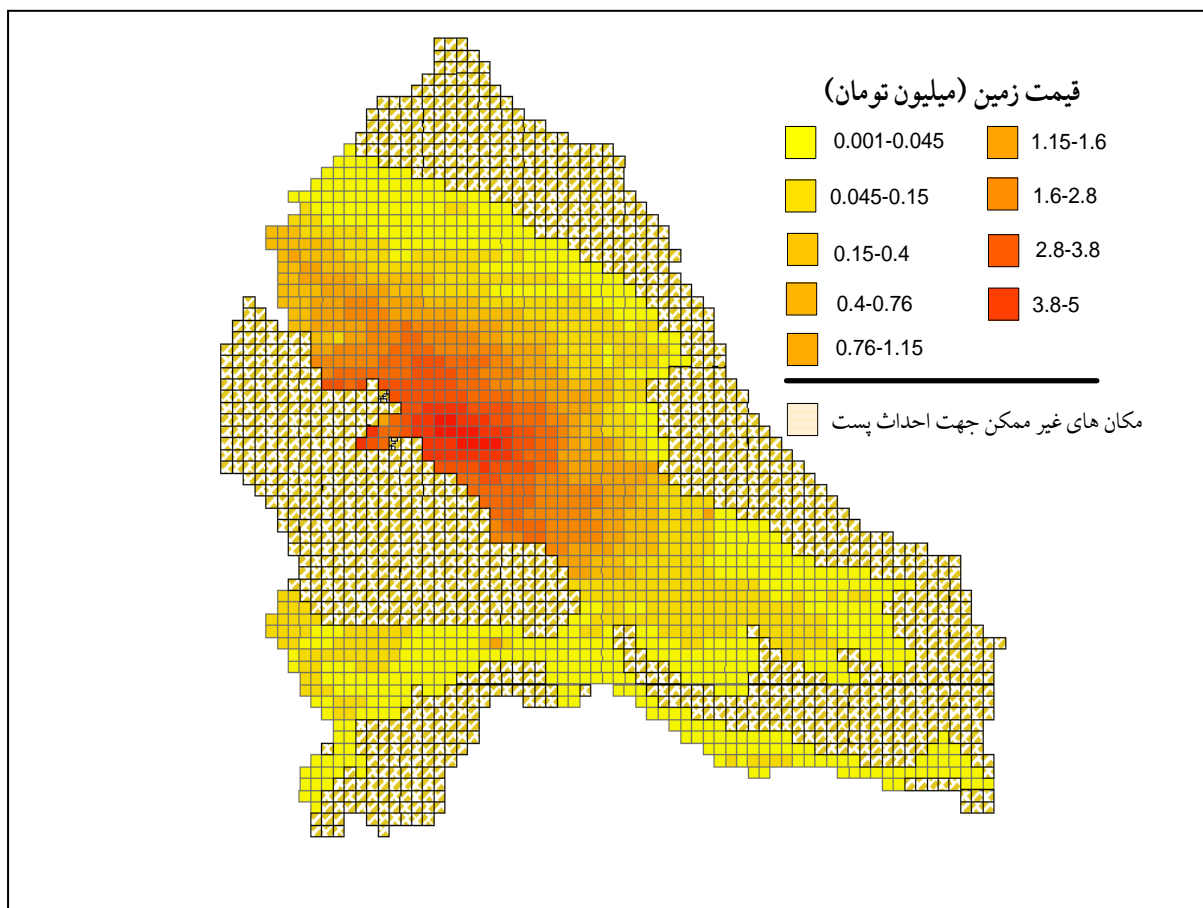
نقشه‌ی رستری از منطقه‌ی برنامه‌ریزی توسط نرم‌افزار ArcMap تهیه شده است، بدین ترتیب که منطقه‌ی برنامه‌ریزی به سلول‌های مربع شکل با طول ۲ کیلومتر تقسیم شده است (یعنی دقت نقشه ۲ کیلومتر است)، سپس برخی سلول‌ها که پوشش دهنده‌ی بعضی از مناطقی هستند که نیازمند بررسی دقیق‌تر می‌باشند مانند: حرم مطهر (که در مرکز شهر قرار گرفته است)، طرqbه، شاندیز (به دلیل آنکه این مناطق در بین دو کوه قرار گرفته‌اند که امکان ساخت پست در آن‌ها وجود دارد ولی بر روی کوه‌های اطراف غیرممکن است) به سلول‌های مربع شکل با طول ۵۰۰ متر تقسیم شده‌اند. هر سلول توسط مرکز ثقلش شناخته می‌شود و دارای سه مشخصه است:

۱. طول و عرض جغرافیایی (مشخصه جغرافیایی)

۲. امکان و عدم امکان ساخت پست (مشخصه محدودیت جغرافیایی و محیطی)

۳. هزینه‌ی خرید زمین (مشخصه‌ی اقتصادی)

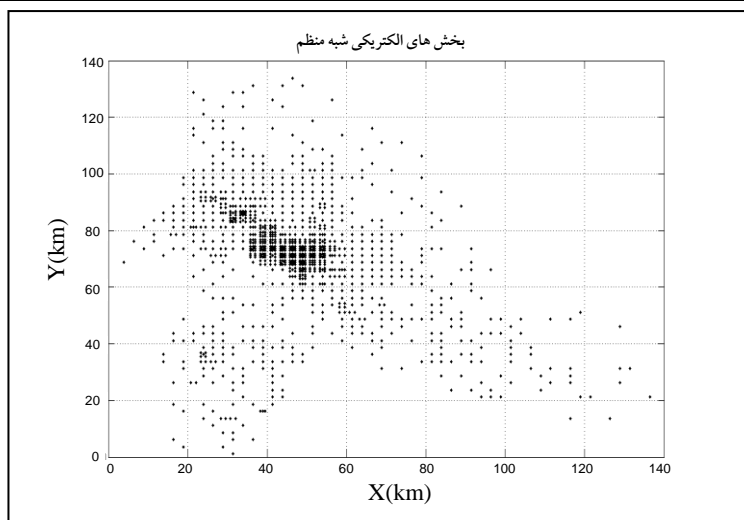
تمامی مشخصه‌های اقتصادی، محدودیت‌های جغرافیایی و محیطی توسط بررسی کلی از موقعیت مکانی سلول به صورت دستی به هر سلول داده شده است. به‌طور کلی منطقه‌ی برنامه‌ریزی شامل ۲۶۵۳ سلول با دقت ۲ کیلومتر و ۴۳۲ سلول با دقت ۵۰۰ متر است. شکل (۵-۳۴) نقشه‌ی رستری از منطقه‌ی برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. در این برنامه‌ریزی کوه‌ها و سدها، دره‌ها، و مکان‌های زیارتی مثل حرم مطهر به‌عنوان مکان‌های غیرممکن جهت احداث پست شناخته شده است.



شکل (۵-۳۴) نقشه‌ی رستری برای منطقه برنامه‌ریزی

### ۵-۳-۲- ایجاد بخش‌های الکتریکی منظم

بخش‌های الکتریکی شبه منظم با اندازه‌ی اصلی ۲,۵ کیلومتر و قید حداکثر توان تقاضای ۵ مگاوات آمپر برای بارهای منطقه‌ی برنامه‌ریزی برای سال افق به صورت شکل (۵-۳۵) نشان داده شده است، بطوریکه در سال افق ۱۱۵۸ بخش الکتریکی شبه منظم وجود دارد و هر بخش با مرکز ثقلش شناخته می‌شود که دارای دو مشخصه است، مشخصه جغرافیایی که طول و عرض جغرافیایی را نشان می‌دهد و مشخصه الکتریکی که مجموع بارهای تقاضای دربرگیرنده توسط آن بخش الکتریکی را ارائه می‌دهد.



شکل (۳۵-۵) بخش‌های الکتریکی شبه منظم برای سال افق

### ۵-۳-۳- تجزیه منطقه برنامه‌ریزی به نواحی کوچک

برای انجام تجزیه کردن منطقه‌ی برنامه‌ریزی به نواحی کوچک مجزا ابتدا باید حداقل تعداد تئوری پست‌های جدید برای کل منطقه برنامه‌ریزی برای سال افق به دست آورده شود ( $TMNS_p$ )، برای شبکه

$$\text{مشهد، این مقدار طبق رابطه‌ی (۳-۱) برابر است با: } TMNS_1 \cong \frac{3355.5-2745.8}{0.75 \times 90} \cong 10$$

بنابراین با استفاده از الگوریتم ICA-KCT پست‌ها باید طوری خوشه‌بندی شوند که مجموع حداقل تعداد

تئوری پست‌های تمام نواحی ( $\sum_{j=1}^{nz} TMNS_{z_{p,j}}$ ) برای آن دوره برابر با حداقل تعداد تئوری پست برای کل

منطقه‌ی برنامه‌ریزی ( $TMNS_p$ ) شود و تعداد نواحی را تا زمانی می‌توانیم افزایش دهیم که این قید امکان

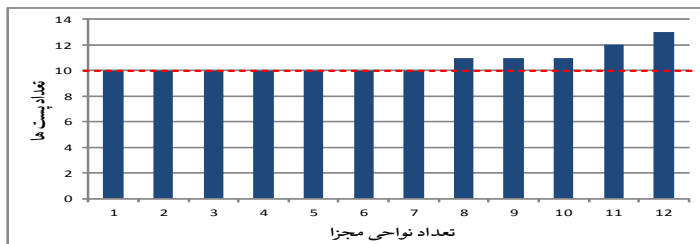
ارضا شدن را داشته باشد. شکل (۳۶-۵) نشان می‌دهد که تا تعداد ۷ ناحیه این قید امکان ارضا شدن را برای

شبکه‌ی مشهد داشته است و از آن به بعد مجموع حداقل تعداد تئوری پست‌های تمام نواحی از حد ۱۰ عدد

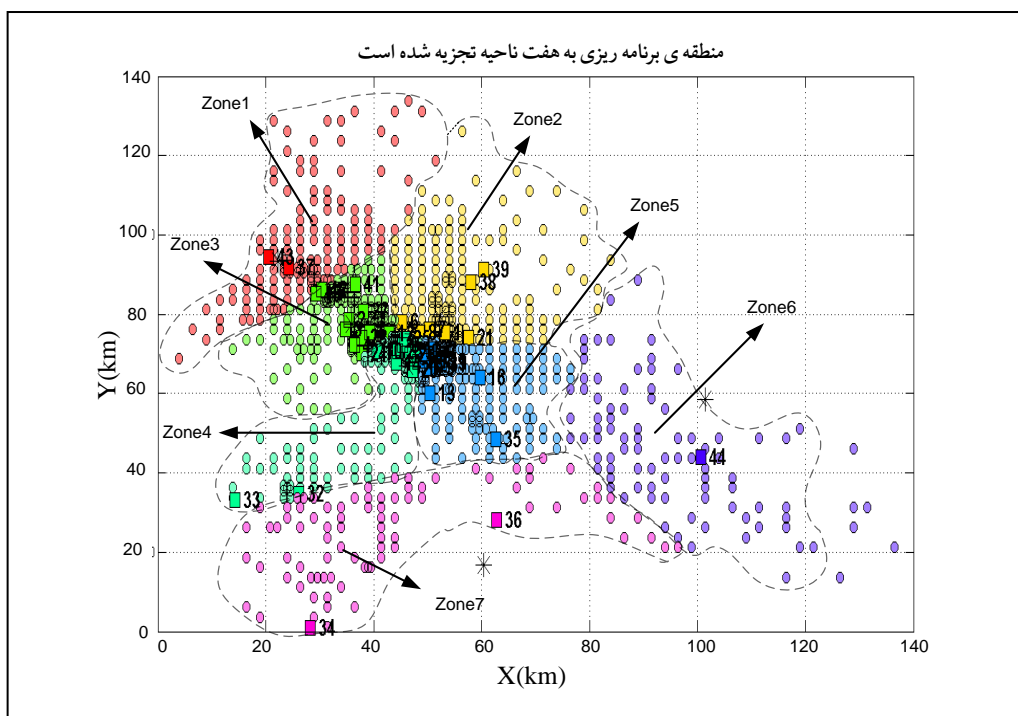
تجاوز کرده است. بنابراین، منطقه‌ی برنامه‌ریزی به هفت ناحیه تجزیه‌شده است (شکل (۳۷-۵)). شکل (۵-۵)

(۳۸) نیز روند همگرایی تابع هزینه را برای الگوریتم ICA-KCT، در تعیین نواحی هفت‌گانه نشان می‌دهد،

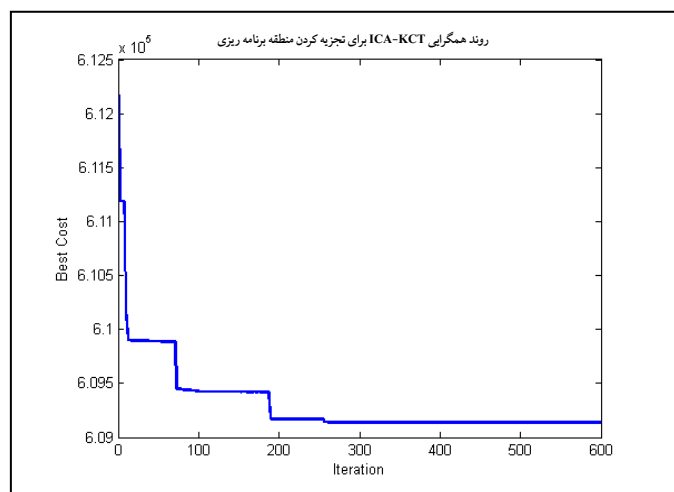
همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم برای تکرار ۲۰۰ام به بعد به سمت جواب همگرا شده است.



شکل (۵-۳۶) مجموع حداقل تعداد تئوری پست‌ها تمام نواحی برای تعدادهای مختلف نواحی مجزا



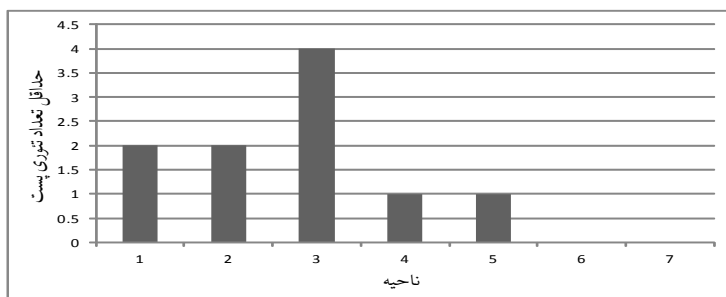
شکل (۵-۳۷) نواحی هفتگانه حاصل از تجزیه منطقه برنامه‌ریزی به نواحی مجزا توسط ICA-KCT



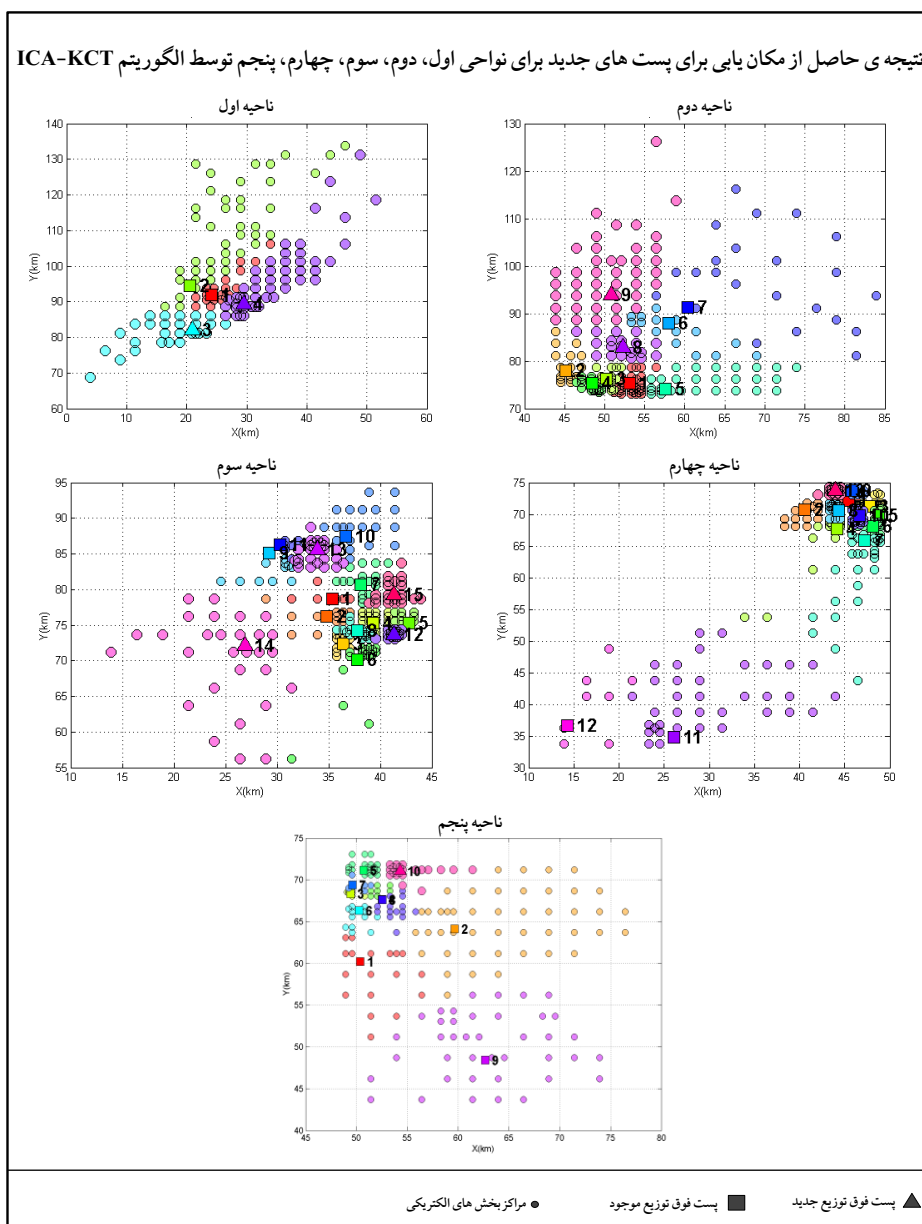
شکل (۵-۳۸) روند همگرایی الگوریتم ICA-KCT در تجزیه کردن منطقه برنامه‌ریزی به نواحی مجزا

### ۵-۳-۴- مکان‌یابی بهینه و تعیین حوزه سرویس‌دهی برای نواحی مجزا

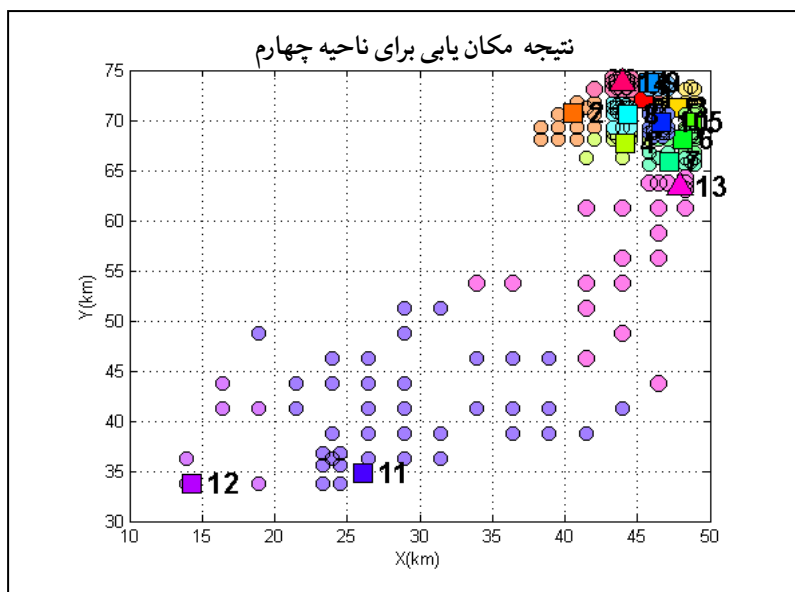
مطابق شکل (۵-۳۳) گام اول در برنامه‌ریزی توسعه پست‌فوق توزیع، مکان‌یابی بهینه پست جدید برمبنای ملاحظات جغرافیایی، اقتصادی مکان‌ها (ارزیابی نقشه رستری) و در نظر داشتن هزینه‌های شبکه‌ی فشار متوسط است. از آنجا که مکان‌یابی برای هر ناحیه به صورت مجزا انجام می‌شود، بنابراین ابتدا باید حداقل تعداد تئوری پست‌های جدید برای هر ناحیه ( $TMNSz_{p,j}$ ) برای دوره  $p$  مشخص گردد، و آن ناحیه‌هایی در فرایند مکان‌یابی قرار می‌گیرند که دارای  $TMNSz_{p,j}$  بزرگ‌تر از صفر برای دوره  $p$  باشند (از آنجا که در مرحله‌ی اول از برنامه‌ریزی شبه دینامیکی، برنامه‌ریزی در یک مرحله انجام می‌شود، در نتیجه برنامه‌ریزی در یک دوره و  $p=1$  است). شکل (۵-۳۹) مقدار حداقل تعداد تئوری را برای هر ناحیه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل نواحی ۱، ۲، ۳، ۴، و ۵ نیاز به احداث پست جدید دارند، از این‌رو مکان‌یابی برای این نواحی به صورت مجزا انجام شده است و موقعیت مکانی پست‌ها برای آن ناحیه‌ها به صورت تفکیک شده در شکل (۵-۴۰) ارائه شده است (توجه گردد که شماره‌گذاری پست‌ها در این شکل برمبنای تعداد پست‌ها هر ناحیه انجام شده است و با شماره‌ی واقعی آن پست فرق دارد). ولی از آنجا که ناحیه‌ی چهارم بعد از فرایند تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی دارای بارهایی است که به هیچ پستی نتوانسته‌اند وصل شوند، نیاز است تا حداقل تعداد تئوری پست را برای این ناحیه از یک به دو افزایش دهیم (دلیل نام‌گذاری حداقل تعداد تئوری پست در اینجا به خوبی قابل فهم است چرا که این تعداد ممکن است تنها از لحاظ تئوری درست باشد، و در عمل جواب گوی کل بارها نباشد، یعنی ممکن است بارهایی وجود داشته باشند که مقدار توان مورد تقاضای آن‌ها از ظرفیت آزاد بارگیری پست‌های مجاور بیشتر باشند، در حالی که مجموع ظرفیت آزاد بارگیری پست‌های مجاور از مقدار توان درخواستی آن بار بیشتر باشد). از این‌رو، شکل (۵-۴۱) نتیجه‌ی مکان‌یابی مجدد را برای ناحیه‌ی چهارم با دو پست جدید نشان داده است. شکل (۵-۴۲) نیز نمای کلی از موقعیت تمامی پست‌ها (۴۴ عدد پست موجود به علاوه ۱۱ عدد پست جدید) را در منطقه‌ی برنامه‌ریزی نشان می‌دهد.



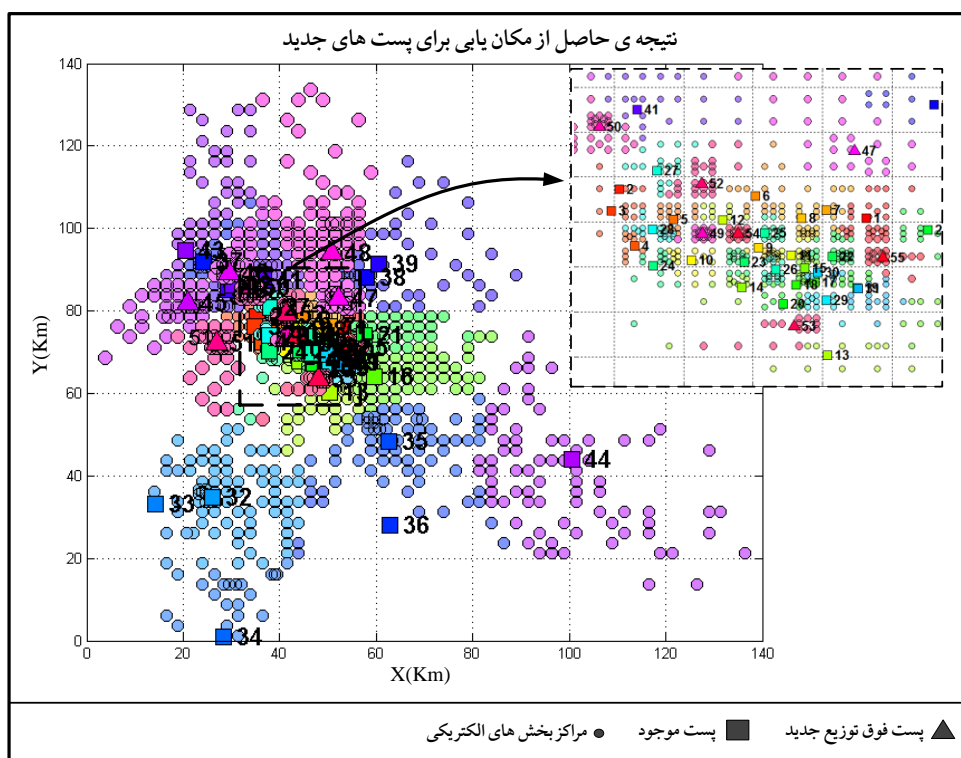
شکل (۳۹-۵) حداقل تعداد تئوری پست برای نواحی مختلف



شکل (۴۰-۵) خروجی نتیجه‌ی مکان‌یابی برای پنج ناحیه توسط الگوریتم ICA-KCT



شکل (۴۱-۵) خروجی نتیجه‌ی مکان‌یابی برای ناحیه چهارم



شکل (۴۲-۵) خروجی نتیجه‌ی مکان‌یابی پست‌های جدید توسط الگوریتم ICA-KCT برای سال افق (شبکه مشهد)

مطابق روند بهینه‌سازی نمایش داده‌شده در شکل (۳۳-۵) بعد از تعیین مکان پست‌های جدید، باید

حوزه‌ی سرویس‌دهی برای تمامی پست‌ها توسط الگوریتم DICA تعیین شود، ولی برای انجام فرایند



بهینه‌سازی تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی، ابتدا باید ترتیب حل نواحی و پست‌های مرزی مشترک مشخص گردند. بدین منظور با توجه به شکل (۵-۴۳)، بر اساس شرکت دادن پست‌های مرزی در تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی ناحیه مجاور، ترتیب حل نواحی به صورت تعیین شده است:

$$Zone1 \rightarrow Zone3 \rightarrow Zone2 \rightarrow Zone4 \rightarrow Zone5 \rightarrow Zone6 \rightarrow Zone7$$

همانطور که در شکل (۵-۴۳) مشاهده می‌شود از آنجا که باید پست‌های شماره ۱۲، ۵۲، ۲۷ و ۴۱ به علت نزدیکی به بارهای ناحیه‌ی دوم (Zone2) در تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی این ناحیه شرکت داده شوند، بنابراین باید نواحی اول و سوم (Zone1 و Zone3) زودتر از ناحیه‌ی دوم (Zone2) تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی شوند. در مورد ناحیه‌ی سوم (Zone3)، چون به نظر می‌رسد پست‌های ۴۵ و ۴۶ از ناحیه اول (Zone1) می‌توانند به دلیلی نزدیک به بارها این ناحیه مؤثر باشند بنابراین ابتدا ناحیه اول و سپس ناحیه سوم باید تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی شوند. در مورد نواحی دیگر نیز به همین صورت است، بطوریکه باید پست‌های ۴۹، ۱۲، ۲۴ از ناحیه‌ی سوم (Zone3) و پست‌های ۶، ۸، از ناحیه‌ی دوم در تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی ناحیه‌ی چهارم (Zone4) شرکت داده شوند. در تخصیص بارهای ناحیه‌ی پنجم نیز بهتر است، پست‌ها ۱۵، ۵۳، از ناحیه‌ی چهارم (Zone4) و پست‌های ۲۱، ۱ از ناحیه‌ی دوم (Zone2)، شرکت داده شود. در مورد ناحیه ششم (Zone6) نیز به نظر می‌رسد، شرکت دادن پست‌های ۳۹، ۱۶، ۳۵ در تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی آن ناحیه مفید واقع شود. و همچنین در مورد ناحیه‌ی هفتم (Zone7) نیز می‌توان پست‌های ۴۴، ۱۳، ۳۵، ۳۲، ۳۳ را در تخصیص بهینه‌ی بارهای آن ناحیه در نظر داشت. بنابراین می‌توان تمامی گفته‌های بالا را بصورت زیر لیست نمود:

Sub: 12, 27, 52, 41 → Zone2

Sub: 45, 46 → Zone3

Sub: 24, 12, 6, 8, 49 → Zone4

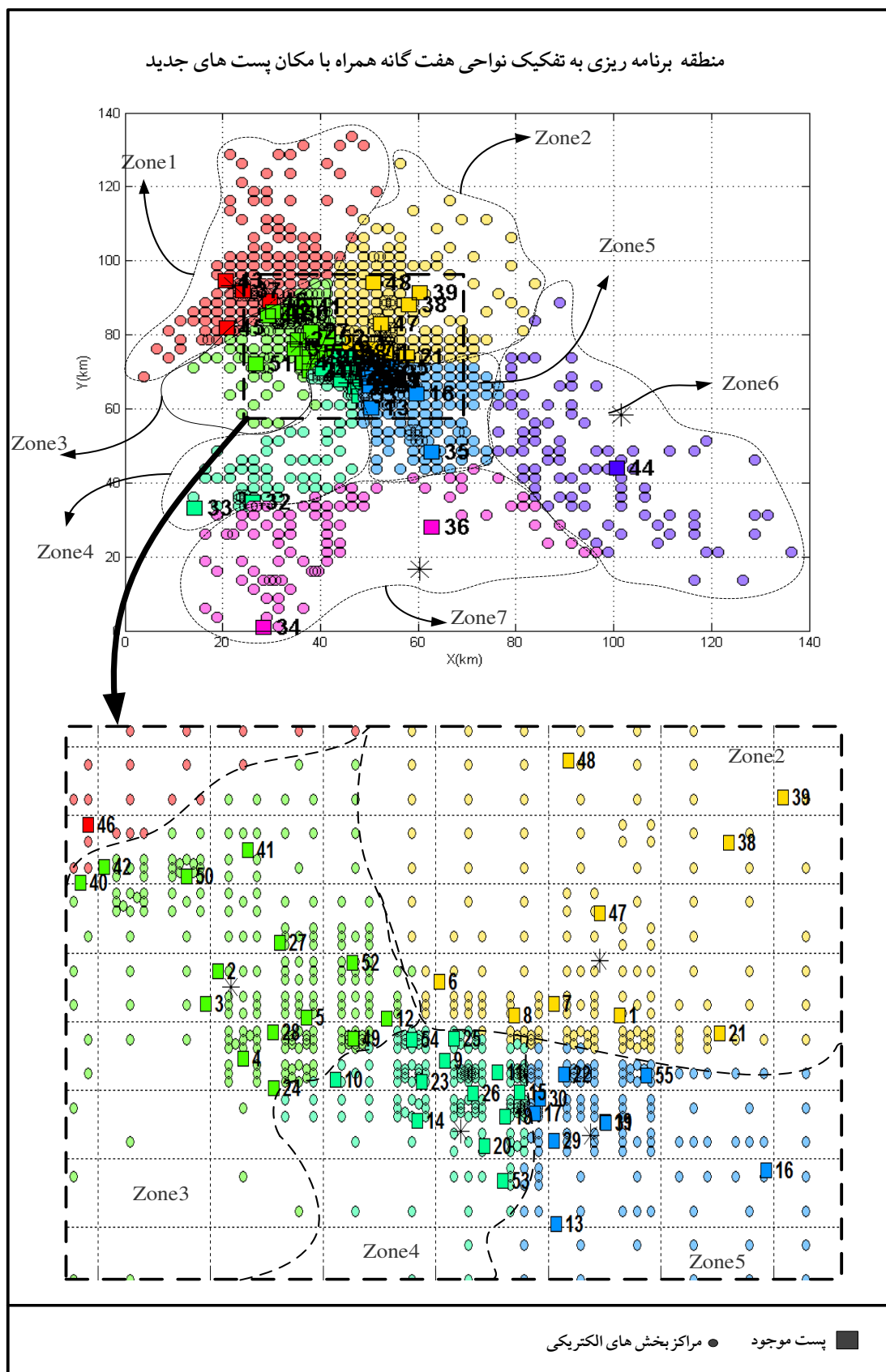
Sub: 15, 7, 1, 21, 53 → Zone5

sub: 16, 35, 39 → Zone6

Sub: 44, 13, 35, 32, 33 → Zone7

با توجه به گفته‌های بالا تعیین حوزه‌ی سرویس‌دهی نواحی به ترتیب اولویت تعریف شده و با در نظر داشتن پست‌های مشترک بین ناحیه برای تمامی نواحی بصورت مجزا توسط الگوریتم DICA بر مبنای

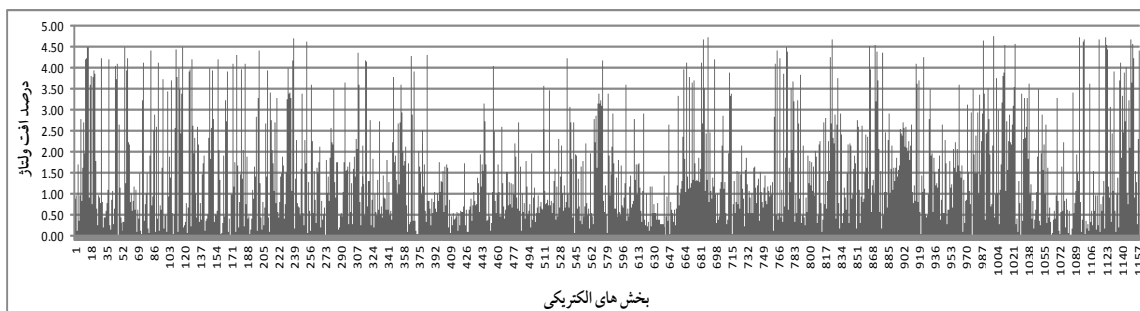
اولویت اتصال بارها به بهترین پست انجام شده است. نتایج بدست‌آمده از این بهینه‌سازی برای تمامی نواحی بصورت جداگانه در شکل (۵-۴۴) آورده شده است، همانطور که مشاهده می‌گردد برای ناحیه‌های سوم، ششم، و هفتم برخی از بارها به پست‌هایی وصل شده‌اند که مربوط به ناحیه مجاور است که این نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در جهت رسیدن به جواب دقیق‌تر با در نظر داشتن پیوستگی منطقه‌ی برنامه‌ریزی است. در شکل (۵-۴۴) ناحیه‌ی سرویس‌دهی هر پست توسط رنگ مشخص شده است، بطوریکه در این شکل برای ناحیه اول پست چهارم که بنفش رنگ است، بارهای تحت پوشش نیز بنفش رنگ می‌باشند. با توجه به نتایج بدست‌آمده از حوزه‌ی سرویس‌دهی برای تمامی پست‌ها می‌توان دید که تمامی بارها از طریق پست‌هایشان تغذیه می‌شوند و هیچ باری بدون تغذیه نمانده، علاوه بر آن، با نگاه به شکل (۵-۴۴) که افت ولتاژ بخش‌های الکتریکی را نشان می‌دهد، می‌توان دید که افت ولتاژ تمامی بخش‌های الکتریکی از مرز ۰.۵٪ عبور نکرده است. بنابراین با ارزیابی تابع هزینه می‌توان هزینه‌ی طرح را محاسبه نمود. از اینرو نتایج فنی و اقتصادی طرح پیشنهادی برای سال افق در یک مرحله در جدول (۵-۱۷) ارائه شده است. با توجه به این جدول می‌توان دید که تمامی پست‌های موجود ظرفیت خود را توسعه داده‌اند، و ۱۰ پست جدید نیز در حداکثر ظرفیت ممکن بهره‌برداری می‌شوند. هزینه‌های برآورد شده برای کل طرح پیشنهادی در یک مرحله برنامه‌ریزی برابر ۴۱۴,۰۰۷ میلیون دلار است، بطوریکه ۱۳۴,۴۸۰ میلیون دلار آن مربوط به هزینه‌های توسعه ظرفیت و احداث پست بعلاوه‌ی هزینه‌ی تلفات ترانسفورماتورهای پست‌ها در طول دوره برنامه‌ریزی، ۲۳۷,۴۳۱ میلیون دلار مربوط به هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از شبکه فشارمتوسط در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی، و ۴۲۰,۹۵ میلیون دلار مربوط به هزینه‌های خرید زمین برای احداث پست است.



شکل (۴۳-۵) منطقه برنامه‌ریزی به تفکیک نواحی هفت ناحیه همراه با مکان پست‌های جدید



شکل (۴۴-۵) نتیجه تعیین حوزه سرویس دهی برای نواحی هفت گانه توسط الگوریتم DICA



شکل (۴۵-۵) درصد افت ولتاژ بخش‌های الکتریکی شبه منظم برای شبکه مشهد

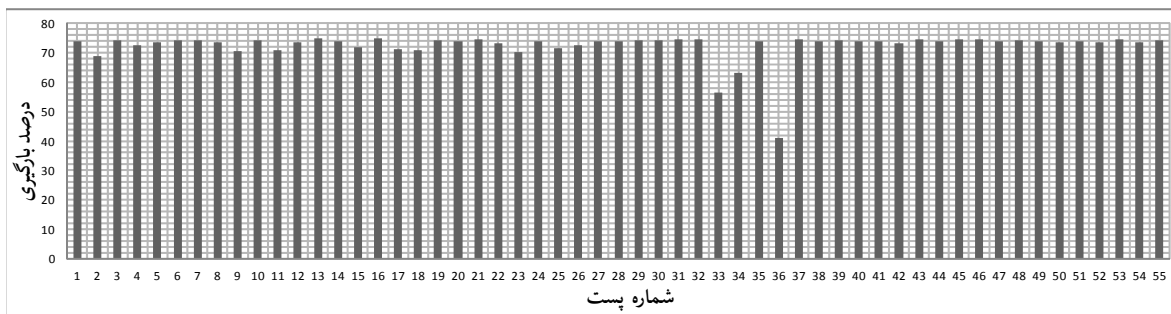
جدول (۱۷-۵) اطلاعات فنی و اقتصادی حاصل از برنامه‌ریزی توسعه تک‌مرحله‌ای برای شبکه مشهد

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)			
				پست	شبکه ی پایین‌دستی	خرید زمین	کل
۱	60	90	73.99	2453.23	661.30	0	3114.53
۲	60	90	69.01	2392.87	929.74	0	3322.61
۳	60	90	74.25	2456.59	1114.28	0	3570.86
۴	60	60	72.53	729.21	282.63	0	1011.84
۵	60	90	73.57	2448.02	542.98	0	2991.00
۶	60	90	74.15	2455.28	1181.40	0	3636.68
۷	60	90	74.26	2456.72	1018.10	0	3474.81
۸	90	90	73.70	976.40	544.84	0	1521.24
۹	60	90	70.44	2409.82	574.90	0	2984.72
۱۰	60	90	74.28	2456.88	822.88	0	3279.76
۱۱	60	90	70.86	2414.78	491.81	0	2906.58
۱۲	60	90	73.51	2447.23	651.62	0	3098.86
۱۳	60	90	74.85	2464.18	2237.95	0	4702.13
۱۴	60	90	73.87	2451.75	597.94	0	3049.69
۱۵	60	90	72.05	2429.21	344.83	0	2774.04
۱۶	60	90	74.78	2463.20	5191.72	0	7654.93
۱۷	60	90	71.25	2419.55	352.31	0	2771.87
۱۸	60	90	71.03	2416.85	358.07	0	2774.92
۱۹	60	60	74.16	744.43	720.92	0	1465.35
۲۰	30	60	73.89	1233.00	360.45	0	1593.46
۲۱	60	90	74.44	2458.95	2398.51	0	4857.46
۲۲	60	60	73.09	734.40	206.47	0	940.87
۲۳	60	90	70.22	2407.18	389.88	0	2797.05
۲۴	60	90	73.92	2452.35	1299.24	0	3751.59

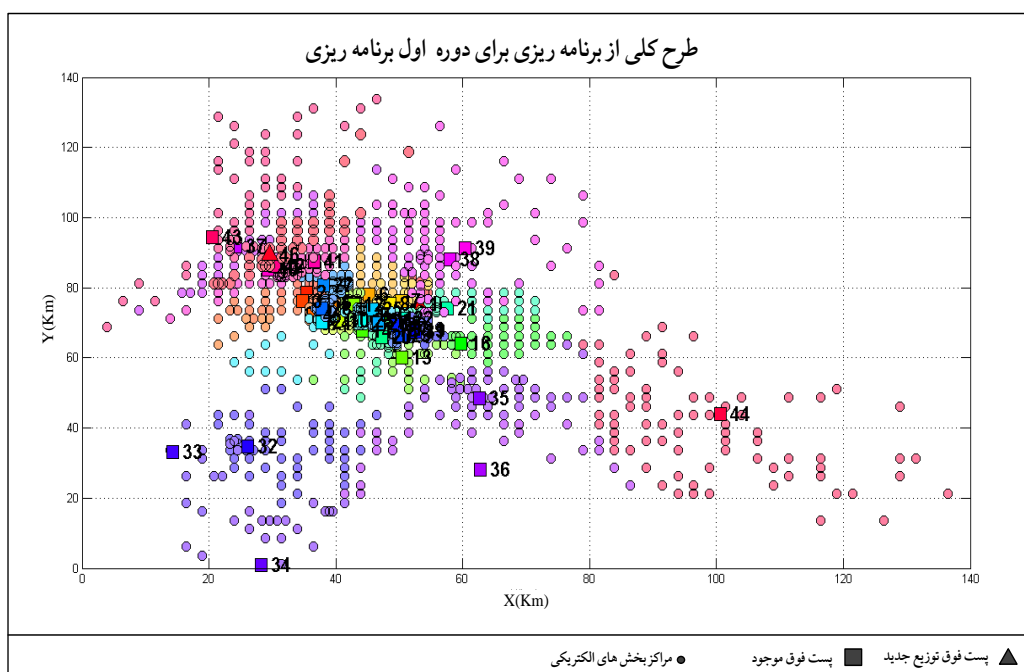
برنامه ریزی توسعه چند مرحله‌ای پست‌های فوق توزیع با استفاده از روش خوشه‌بندی بار

فصل پنجم:

۲۵	90	90	71.69	951.59	305.64	0	1257.23
۲۶	60	60	72.44	728.38	247.52	0	975.91
۲۷	60	90	73.98	2453.14	990.96	0	3444.11
۲۸	60	90	73.78	2450.64	512.68	0	2963.32
۲۹	60	90	74.17	2455.50	623.19	0	3078.69
۳۰	60	90	74.16	2455.42	784.43	0	3239.85
۳۱	60	90	74.41	2458.58	843.12	0	3301.70
۳۲	30	90	74.52	2459.90	8061.33	0	10521.23
۳۳	30	60	56.31	1578.50	2754.30	0	4332.80
۳۴	30	45	63.05	1163.04	3893.47	0	5056.51
۳۵	60	90	74.02	2466.31	4730.35	0	7196.66
۳۶	60	60	40.94	491.16	6260.87	0	6752.03
۳۷	30	60	74.55	1239.17	2648.95	0	3888.12
۳۸	60	60	74.02	752.61	2775.06	0	3527.67
۳۹	60	60	74.10	753.36	8479.08	0	9232.44
۴۰	90	90	73.73	976.84	1001.96	0	1978.80
۴۱	60	90	73.86	2451.69	1280.37	0	3732.06
۴۲	60	90	73.21	2443.55	1072.10	0	3515.66
۴۳	60	90	74.65	2461.61	12930.81	0	15392.42
۴۴	30	60	74.02	1725.26	20759.12	0	22484.38
۴۵	0	90	74.58	4797.07	3167.31	2285.71	7964.37
۴۶	0	90	74.61	4797.38	5525.54	1904.76	10322.92
۴۷	0	90	74.04	4802.87	2257.13	1523.81	7060.00
۴۸	0	90	74.17	4804.54	6318.32	190.48	11122.86
۴۹	0	90	74.01	4789.82	506.91	8571.43	5296.73
۵۰	0	90	73.62	4784.96	634.96	3047.62	5419.91
۵۱	0	75	73.88	863.79	2550.61	4761.90	3414.40
۵۲	0	90	73.40	4782.20	526.66	4571.43	5308.86
۵۳	0	90	74.47	4795.64	2869.50	2857.14	7665.14
۵۴	0	90	73.41	4782.30	292.16	9142.86	5074.46
۵۵	0	90	74.16	4791.68	757.65	3238.10	5549.34
هزینه ی کل طرح				134480.59	237431.70	42095	414007.54



شکل (۵-۴۶) درصد بارگیری پست‌ها برای برنامه ریزی توسعه پست فوق توزیع برای شبکه مشهد در یک مرحله



شکل (۵-۴۷) نتیجه برنامه‌ریزی برای شبکه مشهد در دوره اول

شکل (۵-۴۶) درصد بارگیری پست‌ها را برای سال افق نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌گردد، تمامی پست‌ها کمتر از ۷۵٪ درصد بارگیری مجاز بارگیری شده‌اند، و تمامی آنها از حداکثر ظرفیت بارگیری خود در این برنامه‌ریزی استفاده کرده‌اند.

حال با توجه به اطلاعات بدست آمده از مرحله‌ی اول برنامه‌ریزی که دربردارنده ساختار کلی شبکه در سال افق می‌باشد، در این مرحله برنامه‌ریزی در سه دوره ۳ ساله بصورت چند مرحله‌ای انجام شده است، بطوریکه در هر دوره تمامی مراحل که برای برنامه‌ریزی در مرحله‌ی اول (برنامه‌ریزی استاتیک) گفته شد

انجام می‌شود با این تفاوت که در این مرحله تمامی تصمیمات شامل: مکان پست‌های جدید، مقدار توسعه ظرفیت پست‌های موجود، ظرفیت پست‌های جدید، حوزه‌ی سرویس‌دهی پست‌ها معلوم است و تصمیمات در هر دوره از برنامه‌ریزی با توجه به تصمیمات اصلی گرفته شده، انجام می‌شود. بنابراین نتایج حاصل از این برنامه‌ریزی توسط جدول (۱۷-۵)، (۱۹-۵)، (۲۰-۵) و شکل‌های (۴۷-۵)، (۴۸-۵)، (۴۹-۵) در سه دوره ارائه شده است.

جدول (۱۸-۵) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع مشهد در دوره اول

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)			
				پست	شبکه ی پایین دستی	خرید زمین	کل
۱	60	60	58.68	535.51	734.92	0	1270.44
۲	60	75	72.65	1967.97	1477.27	0	3445.25
۳	60	90	73.55	2348.79	1726.35	0	4075.15
۴	60	60	66.75	593.07	504.39	0	1097.46
۵	60	90	71.45	2293.00	878.15	0	3171.14
۶	60	75	70.29	1953.88	1660.13	0	3614.01
۷	60	75	59.12	1849.70	1195.62	0	3045.31
۸	90	90	59.15	697.44	892.74	0	1590.18
۹	60	75	68.97	1925.30	969.23	0	2894.54
۱۰	60	60	72.18	630.77	1293.98	0	1924.74
۱۱	60	75	63.56	1877.14	843.23	0	2720.37
۱۲	60	90	71.75	2293.82	1079.89	0	3373.71
۱۳	60	60	54.96	304.15	2443.16	0	2747.31
۱۴	60	75	61.04	1855.75	967.37	0	2823.12
۱۵	60	60	70.43	610.51	602.58	0	1213.09
۱۶	60	60	45.76	487.27	4299.76	0	4787.03
۱۷	60	60	69.48	602.66	600.70	0	1203.37
۱۸	60	75	67.58	1910.13	621.10	0	2531.24
۱۹	60	60	25.39	373.89	436.59	0	810.48
۲۰	30	60	74.05	1620.34	589.68	0	2210.02
۲۱	60	60	39.27	443.19	2398.24	0	2841.44
۲۲	60	60	59.94	540.99	291.03	0	832.02
۲۳	60	75	62.07	1863.48	662.62	0	2526.10
۲۴	60	75	64.06	1888.54	1784.87	0	3673.41



برنامه ریزی توسعه چند مرحله‌ای پست‌های فوق توزیع با استفاده از روش خوشه‌بندی بار

فصل پنجم:

۲۵	90	90	72.45	828.74	507.28	0	1336.02
۲۶	60	60	47.10	458.64	424.80	0	883.45
۲۷	60	90	73.20	2319.73	1621.23	0	3940.96
۲۸	60	75	63.02	1873.43	793.96	0	2667.38
۲۹	60	60	70.74	611.70	1023.16	0	1634.87
۳۰	60	60	64.37	569.21	950.66	0	1519.88
۳۱	60	60	64.36	569.80	1055.15	0	1624.95
۳۲	30	75	58.99	1860.16	7319.31	0	9179.47
۳۳	30	30	67.55	349.03	2947.55	0	3296.57
۳۴	30	30	56.58	155.60	4502.21	0	4657.81
۳۵	60	75	62.86	1875.53	5769.49	0	7645.02
۳۶	60	60	28.75	396.57	6811.70	0	7208.27
۳۷	30	60	73.49	1663.45	3363.03	0	5026.48
۳۸	60	60	71.42	694.44	2576.60	0	3271.04
۳۹	60	60	63.85	676.69	7981.16	0	8657.85
۴۰	90	90	73.64	859.98	1750.09	0	2610.07
۴۱	60	90	73.78	2323.20	2150.96	0	4474.16
۴۲	60	90	73.40	2310.56	2101.21	0	4411.76
۴۳	60	75	64.38	1931.26	12325.38	0	14256.65
۴۴	30	60	62.20	1587.80	21696.17	0	23283.96
۴۶	0	90	72.88	4681.70	5609.74	1904.76	12196.2
هزینه ی کل طرح				60064.53	73572.1	1904.76	135541.39

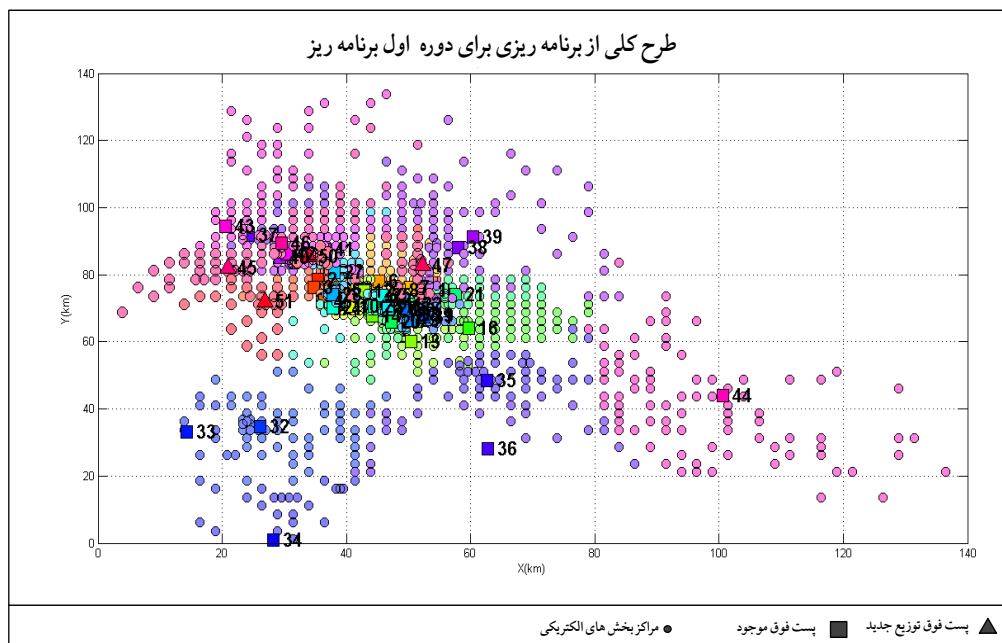
جدول (۵-۱۹) نتایج برنامه ریزی توسعه پست فوق توزیع مشهد در دوره دوم

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)			
				پست	شبکه ی پایین دستی	خرید زمین	کل
۱	60.00	90.00	74.06	2801.52	1662.73	0.00	4464.25
۲	75.00	90.00	74.01	2794.33	2593.59	0.00	5387.92
۳	90.00	90.00	74.06	1007.90	2567.28	0.00	3575.19
۴	60.00	60.00	74.05	995.71	758.38	0.00	1754.09
۵	90.00	90.00	71.62	970.04	1363.21	0.00	2333.26
۶	75.00	90.00	71.68	2775.04	2533.77	0.00	5308.82
۷	75.00	90.00	73.88	2804.74	2440.83	0.00	5245.57
۸	90.00	90.00	74.16	1327.76	1366.23	0.00	2693.99
۹	75.00	90.00	72.13	2763.72	1444.68	0.00	4208.41
۱۰	60.00	90.00	71.05	2743.35	2056.33	0.00	4799.68
۱۱	75.00	90.00	73.02	2773.83	1229.56	0.00	4003.39
۱۲	90.00	90.00	73.96	1000.57	1672.00	0.00	2672.56
۱۳	60.00	75.00	70.02	2331.39	4341.07	0.00	6672.46

برنامه ریزی توسعه چند مرحله‌ای پست‌های فوق توزیع با استفاده از روش خوشه‌بندی بار

فصل پنجم:

۱۴	75.00	90.00	73.85	2797.90	1390.30	0.00	4188.20
۱۵	60.00	90.00	73.70	2786.60	879.53	0.00	3666.13
۱۶	60.00	75.00	59.50	2317.16	6892.35	0.00	9209.51
۱۷	60.00	75.00	71.87	2353.48	879.04	0.00	3232.53
۱۸	75.00	90.00	72.25	2759.06	902.57	0.00	3661.63
۱۹	60.00	60.00	72.81	992.79	1734.97	0.00	2727.77
۲۰	60.00	60.00	74.04	1010.60	913.31	0.00	1923.91
۲۱	60.00	90.00	73.35	2833.80	3919.28	0.00	6753.09
۲۲	60.00	60.00	74.09	999.74	515.20	0.00	1514.94
۲۳	75.00	90.00	71.54	2749.69	972.36	0.00	3722.05
۲۴	75.00	90.00	71.48	2761.02	2422.24	0.00	5183.26
۲۵	90.00	90.00	73.60	1309.40	779.09	0.00	2088.48
۲۶	60.00	60.00	66.56	907.84	619.49	0.00	1527.34
۲۷	90.00	90.00	73.01	993.24	2578.68	0.00	3571.91
۲۸	75.00	90.00	72.89	2774.01	1310.16	0.00	4084.17
۲۹	60.00	75.00	73.20	2373.18	1633.06	0.00	4006.23
۳۰	60.00	90.00	64.42	2645.47	1704.19	0.00	4349.67
۳۱	60.00	90.00	72.14	2770.62	1883.62	0.00	4654.24
۳۲	75.00	75.00	72.01	984.82	9145.35	0.00	10130.18
۳۳	30.00	45.00	59.93	1297.35	4744.17	0.00	6041.52
۳۴	30.00	45.00	66.47	1342.92	7065.46	0.00	8408.38
۳۵	75.00	90.00	65.17	2655.86	7619.37	0.00	10275.23
۳۶	60.00	60.00	33.97	630.46	8088.66	0.00	8719.13
۳۷	60.00	60.00	65.80	906.36	4191.69	0.00	5098.05
۳۸	60.00	60.00	73.51	1054.82	4994.24	0.00	6049.06
۳۹	60.00	60.00	73.19	1116.53	10390.41	0.00	11506.94
۴۰	90.00	90.00	71.81	1282.53	2714.85	0.00	3997.38
۴۱	90.00	90.00	73.85	1005.56	3140.40	0.00	4145.96
۴۲	90.00	90.00	70.87	961.34	2960.88	0.00	3922.22
۴۳	75.00	90.00	63.57	2656.89	15230.85	0.00	17887.75
۴۴	60.00	60.00	67.42	646.36	23110.46	0.00	23756.81
۴۶	90.00	90.00	65.89	1209.95	7531.97	0.00	8741.92
۴۵	0.00	75.00	67.85	1124.04	5537.25	2285.71	8947
۴۷	0.00	90.00	73.59	5182.11	5741.24	1523.81	12447.16
۵۰	0.00	90.00	73.88	5125.94	1781.35	3047.62	9954.91
۵۱	0.00	75.00	64.83	1069.19	4281.10	4761.90	10082.19
هزینه ی کل طرح				95478.56	119335.59	11619.04	226433.1944



شکل (۴۸-۵) نتیجه برنامه‌ریزی برای شبکه مشهود در دوره دوم

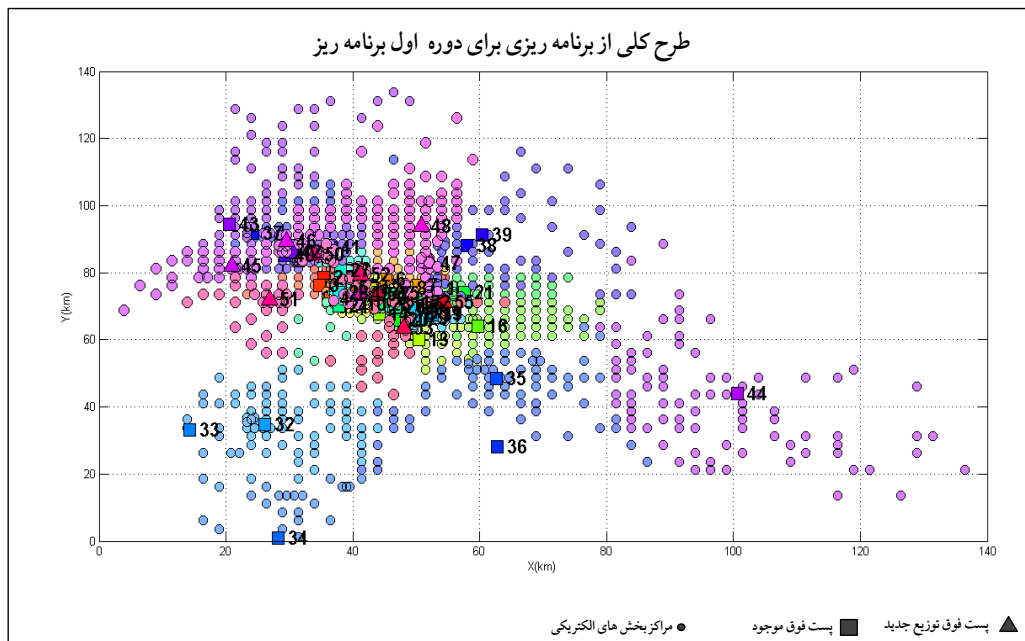
جدول (۲۰-۵) نتایج برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع مشهود در دوره سوم

شماره ی پست	ظرفیت موجود پست (MVA)	ظرفیت بهینه ی پست (MVA)	درصد بارگیری	هزینه‌ها (هزار دلار)			
				پست	شبکه ی پایین دستی	خرید زمین	کل
۱	90	90	73.26	870.51	1906.65	0	2777.15
۲	90	90	68.09	817.50	2536.44	0	3353.94
۳	90	90	73.32	873.45	2803.94	0	3677.39
۴	60	60	72.06	854.56	816.01	0	1670.56
۵	90	90	72.98	865.93	1550.59	0	2416.52
۶	90	90	73.25	872.30	2749.31	0	3621.61
۷	90	90	73.50	873.56	2358.83	0	3232.39
۸	90	90	73.11	1144.23	1554.95	0	2699.18
۹	90	90	69.80	832.39	1671.94	0	2504.32
۱۰	90	90	73.35	873.71	2213.44	0	3087.16
۱۱	90	90	70.31	836.74	1425.98	0	2262.72
۱۲	90	90	72.75	865.24	1912.04	0	2777.28
۱۳	75	90	73.47	2634.51	4926.27	0	7560.78
۱۴	90	90	73.26	869.21	1629.18	0	2498.39
۱۵	90	90	71.65	849.41	1017.60	0	1867.01
۱۶	75	90	73.50	2633.37	7954.60	0	10587.97
۱۷	75	90	70.86	2582.21	1021.81	0	3604.02
۱۸	90	90	70.63	838.56	1041.79	0	1880.34
۱۹	60	60	73.12	872.39	1934.61	0	2806.99

برنامه ریزی توسعه چند مرحله‌ای پست‌های فوق توزیع با استفاده از روش خوشه‌بندی بار

فصل پنجم:

۲۰	60	60	73.30	869.46	1026.47	0	1895.93
۲۱	90	90	73.44	875.53	4306.51	0	5182.04
۲۲	60	60	72.74	860.63	602.57	0	1463.20
۲۳	90	90	69.78	830.06	1136.58	0	1966.64
۲۴	90	90	73.20	869.73	2582.32	0	3452.04
۲۵	90	90	71.34	1115.16	898.38	0	2013.54
۲۶	60	60	72.02	853.58	715.17	0	1568.76
۲۷	90	90	73.06	870.43	2614.04	0	3484.47
۲۸	90	90	73.24	868.23	1445.22	0	2313.45
۲۹	75	90	73.49	2624.34	1773.57	0	4397.91
۳۰	90	90	73.38	872.43	2206.27	0	3078.70
۳۱	90	90	73.47	875.20	2350.04	0	3225.25
۳۲	75	90	73.34	2629.50	10664.96	0	13294.46
۳۳	45	60	54.82	1681.01	5359.24	0	7040.24
۳۴	45	45	78.11	277.72	7538.53	0	7816.25
۳۵	90	90	73.49	881.99	7722.04	0	8604.04
۳۶	60	60	37.84	575.58	8281.55	0	8857.13
۳۷	60	60	73.27	876.68	4274.64	0	5151.32
۳۸	60	60	73.37	881.97	5597.84	0	6479.81
۳۹	60	60	73.08	882.85	12095.68	0	12978.53
۴۰	90	90	72.79	1144.74	2629.71	0	3774.45
۴۱	90	90	72.73	869.15	3158.95	0	4028.11
۴۲	90	90	72.11	862.01	2973.06	0	3835.06
۴۳	90	90	72.85	877.87	16329.02	0	17206.88
۴۴	60	60	72.38	517.66	23686.19	0	24203.85
۴۶	90	90	73.52	1157.65	7763.22	0	8920.87
۴۵	75	90	73.47	2630.50	5572.57	0	8203.08
۴۷	90	90	73.38	1164.09	5970.78	0	7134.88
۵۰	90	90	72.90	1143.10	1787.12	0	2930.21
۵۱	75	75	72.75	1146.86	4434.46	0	5581.33
۴۸	0	90	73.41	4975.57	10291.56	190.48	15457.62
۴۹	0	90	73.47	4958.32	1428.70	8571.43	14958.44
۵۲	0	90	72.84	4949.39	1483.51	4571.43	11004.33
۵۳	0	90	73.22	4965.14	5258.52	2857.14	13080.8
۵۴	0	90	73.09	4949.51	837.28	9142.86	14929.65
۵۵	0	90	73.44	4960.50	2027.06	3238.10	10225.66
هزینه ی کل طرح				84203.92	110147.9962	28571.44	222923.3619



شکل (۴۹-۵) نتیجه برنامه‌ریزی برای شبکه مشهد در دوره سوم

جدول (۲۱-۵) هزینه‌های کل برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای توسعه پست فوق توزیع مشهد

هزینه ی مرتبط با شبکه پایین دستی (میلیون دلار)	هزینه مرتبط با پست‌ها (میلیون دلار)	هزینه ی کل پروژه (میلیون دلار)
۳۳۱،۹۶۱	۲۸۱،۸۴۲	۵۸۴،۸۹۷



## **فصل ششم:**

# **نتیجه‌گیری و پیشنهادات**

## ۶-۱- نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده در این گزارش را می‌توان بصورت زیر جمع‌بندی نمود:

- با تطبیق الگوریتم k-means برای در نظر داشتن توان بارها در تعیین مراکز ثقل خوشه‌ها می‌توان آن را به یک ابزار ساده و سریع در ارزیابی مکان‌های مناسب جهت احداث پست و نقاط به اصطلاح کلیدی در منطقه برنامه‌ریزی تبدیل نمود. علاوه بر اینها این ابزار می‌تواند وابستگی حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها را به مکان‌های کاندید که امکان افتادن روند حل مسئله در مسیر اشتباه را افزایش می‌دهد، بهبود بخشد.
- با به توان رساندن ضرایب وزنی توسط پارامتر متغیر  $\alpha$ ، در محاسبه‌ی میانگین خوشه‌ها توانستیم الگوریتم k-means را تا حد ممکن در مکان‌یابی پست‌ها نسبت به ساختارهای گوناگون در شبکه‌های مختلف منعطف نماییم.
- در این پایان‌نامه، توسط شیوه جدید و ساده‌ای، با اعمال قید حداکثر بارمورد تقاضا برای بخش‌های الکتریکی، آنهایی که دارای مقدار پیش از حد بودند، به بخش‌های الکتریکی کوچک‌تر تقسیم بندی شدند و بخش‌های الکتریکی شبه منظم را ایجاد نمودند. در فصل پنجم با بکارگیری این شیوه بر روی سیستم نمونه نشان دادیم که این موضوع در روند تخصیص بارها به پست‌ها بسیار اهمیت دارد چراکه در بعضی مواقع برنامه‌ریزی بر روی بخش‌های الکتریکی منظم باعث افتادن مسیر بهینه‌سازی در روندی اشتباه می‌گردد و الگوریتم دستور افزایش پست را صادر می‌کند که باعث افزایش قابل توجهی در هزینه‌های طرح می‌شود.
- با توجه به فضای جستجوی وسیع تخصیص بهینه بارها به پست‌ها در روند تعیین حوزه‌ی سرویس دهی، برنامه‌ریزی دینامیکی به عنوان یک ابزار ریاضی جهت پیدا کردن بهترین ترتیب توالی برای اتصال بارها به پست مناسبشان بکار گرفته شد، بطوریکه توانست بخش بزرگی از



- جواب‌های غیرممکن را نادیده گرفته و سرعت همگرایی جواب را افزایش دهد.
- در فصل پنجم نشان دادیم که افزودن هزینه‌ی توسعه ظرفیت پست به تابع هزینه‌ی اتصال می‌تواند به مقدار قابل توجهی هزینه‌های سرمایه‌گذاری طرح را کاهش داده و شرایطی را ایجاد کند که از حداکثر ظرفیت موجود شبکه استفاده گردد.
  - با توجه به بزرگی ابعاد پست‌های فوق توزیع، و عدم امکان بررسی جزء به جزء منطقه‌ی برنامه‌ریزی برای انتخاب مکان‌های کاندید مناسب با در نظر داشتن تمامی مشخصه‌ها و معیارها برنامه‌ریزی توسط مهندسين خبره، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی منطقه در روند مکان‌یابی پست‌های فوق توزیع بصورت هوشمند امری الزامیست، که در این پایان‌نامه با توسعه الگوریتم ICA-KCT مبتنی بر خوشه‌بندی k-means موفق شدیم مکان‌یابی پست‌های فوق توزیع را با در نظر داشتن ملاحظات جغرافیایی، محیطی، اقتصادی، و محدودیت‌های فنی و عملی بدون نیاز به مکان‌های کاندید از پیش تعیین شده با هدف حداقل سازی هزینه‌های فشار متوسط و هزینه‌ی خرید زمین جهت احداث پست، انجام دهیم.
  - در این پایان‌نامه در یک رویکرد جدید، جهت تسهیل در فرایند ارزیابی منطقه بر مبنای نقشه‌رستری، نقشه‌ی رستری به گونه‌ای تهیه شد که دارای دو دقت باشد، بطوریکه در جاهایی که نیاز به نگاه دقیق‌تر داشت، دقت نقشه‌ی رستری زیاد و در جاهای دیگر که نیاز به دقت زیادی نداشت از دقت پایین‌تر استفاده شد.
  - حل مستقیم کل منطقه برنامه‌ریزی برای شبکه‌های بزرگ واقعی، منجر به رسیدن به جواب‌هایی غیر معقول می‌گردد. در این پایان‌نامه روشی جهت تجزیه‌ی منطقه برنامه‌ریزی به نواحی مجزا بر مبنای در نظر داشتن ظرفیت آزاد بارگیری پست‌های موجود و بارهای مورد تقاضا هر ناحیه ارائه گردید که بتواند با حفظ حداقل تعداد تئوری پست‌های جدید مورد نیاز کل منطقه‌ی برنامه‌ریزی، ناحیه‌هایی را تشکیل دهد که مجموع حداقل تعداد تئوری پست‌های جدید آنها از تعداد تئوری پست‌های جدید برای کل منطقه تجاوز نکند. در فصل

شبیه سازی نشان دادیم که این شیوه تا چه اندازه می تواند روند برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع را برای یک شبکه بزرگ تسهیل بخشد.

- در این پایان‌نامه، با توسعه عملگرهای جذب و انقلاب، الگوریتم رقابت استعماری جهت حل مسئله گسسته‌ی بهترین ترتیب توالی توسعه داده شد، و نشان دادیم که می‌تواند در تعیین حوزه‌ی سرویس دهی بسیار موفق‌تر از برنامه‌ریزی دینامیکی عمل کند.
- در این پایان‌نامه روش‌های پیشنهادی برای حالات مختلف، بر روی سیستم نمونه اعمال و مورد ارزیابی قرار گرفت، همچنین با بکارگیری روش ارائه شده در فصل چهارم (روش دوم: ICA- KCT و DICA) برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع برای شبکه مشهد انجام شد.

## ۶-۲- پیشنهادات

- در این پایان‌نامه با توجه به مطالعات انجام گرفته می‌توان پیشنهادات زیر را مطرح نمود :
- در این پایان‌نامه برای اولین بار از سیستم اطلاعات جغرافیایی در غالب نقشه‌رستری جهت مکان‌یابی هوشمند پست‌های فوق توزیع با در نظر گرفتن مشخصه‌های جغرافیایی، محدودیت‌های محیطی و فنی استفاده شد، که می‌توان با توسعه این روش مشخصه‌های بیشتر و گوناگونی را در این فرایند وارد نمود که بتواند با ارزیابی منطقه برنامه‌ریزی، مکان‌هایی را جهت نصب واحدهای تولید پراکنده پیشنهاد دهد.
  - در این پایان‌نامه برنامه‌ریزی توسعه پست فوق توزیع بدون در نظر داشتن مسیریابی بهینه‌ی فیدرهای فشار متوسط انجام گردید، بطوریکه می‌توان این مسئله را با در نظر گرفتن نقشه‌های خیابانی جهت رسیدن به مسیر بهینه برای فیدرهای فشار متوسط حل نمود.
  - تاکنون برنامه‌ریزی‌های انجام شده در توسعه پست فوق توزیع، بازار برق را در این برنامه‌ریزی در نظر نگرفته‌اند، که می‌توان در آینده در یک رویکرد جدید این برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن

محیط بازارهای رقابتی انجام داد.

## مراجع

- [1] T. Gonen, *Electric power distribution system engineering*, New York: McGraw-Hill, 1986.
- [2] M. S. S. Hossein Seifi, *Electrical power system planning*, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [3] M. S. M.R. Haghifam, "Optimal location and sizing of HV/MV substations in uncertainty load environment using genetic algorithm," *Elect. Power Syst Res*, vol. 63, pp. 37-50, Aug. 2002.
- [4] H. L. Willis, *Power distribution planning reference book*, New York: Marcel Dekker, 1997.
- [5] H. S. Mohammad Sadegh Sepasian, Asghar Akbari Foroud, Seyyed Hadi Hosseini, Esmail Mohseni Kabir, "A New Approach for Substation Expansion Planning," *IEEE Trans Power System*, vol. 21, no. 2, pp. 997-1004, May. 2006.
- [6] C. M. D. Luis González Sotres, Álvaro Sánchez-Miralles, Manuel Alvar Miró, "Large-Scale MV/LV Transformer Substation Planning Considering Network Costs and Flexible Area Decomposition," *IEEE Trans Power Delivery*, vol. 28, no. 4, Oct. 2013.
- [7] H. M. Seyed Mahdi Mazhari, "Dynamic sub-transmission substation expansion planning using learning," *Electric Power Systems Research*, vol. 96, pp. 255-266, 2013.
- [8] H. M. Seyed Mahdi Mazhari, Rubén Romero, "A Hybrid heuristic and evolutionary algorithm for distribution substation planning," *Systems Journal*, vol. PP, no. 99, pp. 1-13, Dec. 2014.
- [9] S. H. H. Sajad Najafi, Mehrdad Abedi, Arash Vahidnia, and Saeed Abachezadeh, "A Framework for Optimal Planning in Large Distribution Networks," *IEEE Trans Power System*, vol. 24, no. 2, pp. 1019-1028, May. 2009.
- [10] a. H. R. Alejandro Navarro, "Large-scale distribution planning—part I: simultaneous network and transformer optimization," *IEEE Trans Power System*, vol. 24, no. 2, pp. 744-751, May. 2009.
- [11] R. G. R. S. Najafi Ravadanegh, "On optimal multistage electric power distribution networks expansion planning," *Elect. Power Energy Syst Syst*, vol. 54, pp. 487-497, 2014.
- [۱۲] بخش مدیریت برنامه‌ریزی، شرکت برق منطقه ای مشهد.
- [13] T. G. J. Ramirez-Rosado, "Pseudodynamic planning for expansion of power distributaion," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 245-254, Feb. 1991.
- [14] J. R. M. X. Wang, *Modern power system planning*, London: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1994.
- [15] G. L. T. D. L. Wall, J.E. D. Northcote-Green, "An optimization model for planning radial distribution networks," *IEEE Trans Power Apparatus and systems*, vol. PAS-98, no. 3, pp. 1061-1068, 1979.

- [16] J. F. F. M. Lavorato, Marcos J. Rider, R. Romero, "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems," *IEEE Trans Power System*, vol. 27, no. 1, pp. 172-180, Feb. 2012.
- [17] M. M. A. S. S.S. Sharif, A. Vannelli, "Optimal model for future expansion of radial distribution networks using mixed integer programming." pp. 152–155.
- [18] N. C. S. S. Ganguly, D. Das, "Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming" *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 46, pp. 65–78, 2013.
- [19] R. H. H.K. Youssef, "Dynamic solution of distribution planning in intermediate time range," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 3, no. 1, pp. 341–348, 1988.
- [20] K. B. S. Wong, J.D. Fuller, "Electric power distribution system design and planning in a deregulated environment," *IET Gener. Transm. Distrib*, vol. 3, no. 12, pp. 1061–1078, 2009.
- [21] D. L. W. G. L. Thompson, "A branch and bound model for choosing optimal substation locations," *IEEE Trans Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 5, pp. 2683-2688, 1981.
- [22] Y. Tang, "Power distribution systems planning with reliability modeling and optimization," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 11, no. 1, pp. 181–189, 1995.
- [23] E. B. M. P. Singh, W.P. Adams, "A new technique for optimal time dynamic distribution substation and feeder planning," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 47, no. 3, pp. 197–204, 1998.
- [24] S. B. H. Dale M. Crawford, Jr, "A mathematical optimization technique for locating and sizing distribution substations, and deriving their optimal service area," *IEEE Trans Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, no. 2, Apr. 1975.
- [25] J. C. Y.Hsu, "Distribution planning using a knowledge-based expert System," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1514-1519, July. 1990.
- [26] H. M. Seyed Mahdi Mazhari, Hamid Falaghi, "A hybrid heuristic and learning automata-based algorithm for distribution substations siting, sizing and defining the associated service areas," *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 433–456, Dec. 2014.
- [27] S.K.Goswami, "distribution system planning using baranch exchange technique," *IEEE Trans Power System*, vol. 12, no. 2, pp. 718-723, 1997.
- [28] V. J. Rayward-Smith, *Modern heuristic search methods*: Chichester: Wiley, 1996.
- [29] A. H. A. Y. G. Moustafa, M. M. Mansour, H. K. Temraz, M. A. Madkour, "An artificial neural network for optimum topology in distribution expansion planning," in *Can. Conf. Electr. Comput. Eng*, pp. 786–789, 1996,
- [30] J. L. B.-A. I. J. Ramirez-Rosado, "Reliability and costs optimization for distribution networks expansion using an evolutionary algorithm," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 16, no. 1, pp.111-118, 2001.
- [31] M.-R. H. Javad Salehi, "Long term distribution network planning considering urbanity uncertainties," *Elect. Power Energy Syst*, vol. 42, no. 1, pp. 321–333, 2012.
- [32] C. L. T. B. V. F. Martins, "Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 26, no. 4, pp. 2164–2172, 2011.

- [33] M. F.-F. Saeed Heidari, Shahram Kazemi,, "Power distribution network expansion planning considering distribution automation," *IEEE Trans Power System*, vol. 30, no. 3, pp. 1261 - 1269, 2015.
- [34] H. M. K. J. F. Gómez, P. M. De Oliveira, L. Ocque, J. M. Yusta, "Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits," *IEEE Trans Power System*, Vol. 19 ,No. 2, pp. 996-1004, May. 2004., vol. 19, no. 2, pp. 996-1004, 2004.
- [35] R. G. R. S. Najafi Ravadanegh, "A heuristic algorithm for optimal multistage sizing, siting and timing of MV distribution substations," *Elect. Power Syst Res*, vol. 105, pp. 134-141, 2013.
- [36] A. P. A. Kai Zou, Kashem M. Muttaqi, Sarath Perera, "Distribution System Planning With Incorporating DG Reactive Capability and System Uncertainties," *IEEE Trans Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 112-123, 2012.
- [37] V. F. M. C. L. T .Borges, "Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 36, pp. 107–116, 2012.
- [38] S. G. N. C. S. D. Das, "Recent advances on power distribution system planning: a state-of-the-art survey," *Energy Syst*, vol. 4, no. 2, pp. 165-193, Dec. 2013.
- [39] A. M. C. Benvindo Rodrigues Pereira Junior, Javier Contreras, José Roberto Sanches Mantovani, "Multiobjective multistage distribution system planning using tabu search," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 1, pp. 35 - 45, Jan. 2014.
- [40] L. Jun Shu, Lizi Zhang, Bing Han, "Spatial power network expansion planning considering generation expansion," *IEEE Trans Power System*, vol. 30, no. 4, pp. 1815 - 1824, 2015.
- [41] A. P. A. K. Zou, K. M. Muttaqi, S. Perera, "Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 112–123, 2012.
- [۴۲] سیدمهدی مظهري، حمید فلقی، محسن فرشاد، "مکان یابی چند مرحله ای پست های فوق توزیع با استفاده از یک روش ابتکاری جدید،" در بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق ۲۰۱۰.
- [43] H. H. Z. T.H.M. El-Fouly, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, "A new optimization model for distribution substation siting, sizing, and timing," *Elect. Power Energy Syst*, vol. 30, no. 5, pp. 308–315, Jun. 2008.
- [44] M. M. A. S. H.K. Temraz, "A planning model for siting, sizing and timing of distribution substations and defining the associated service area," *Electric Power System Res*, vol. 62, no. 2, pp. 145-151, Jun 2002.
- [45] B. Shi Na , Liu Xumin, Guan Yong, "Research on k-means clustering algorithm: An Improved k-means clustering algorithm." pp. 63 - 6, 2010.
- [46] E. T. F. Taher Niknam, Narges Pourjafarian, Alireza Roustaa, "An efficient hybrid algorithm based on modified imperialist competitive algorithm and K-means for data clustering," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, no. 2, pp. 306-317, Mar. 2011.
- [47] E. Masud, "An interactive procedure for sizing and timing distribution substations using optimization techniques," *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, no. 5, pp. 281–1286, 1974.

- [48] D. L. W. G.L. Thompson, "A branch and bound model for choosing optimal substations locations," *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 5, pp. 2683 - 2688, 1981.
- [49] M. T. T. W.M. Lin, S.W. Wu, "Load assignment for determining substation service areas with the use of digital mapping." pp. 430 - 434.
- [50] A. J. Wood, *power generation, operation, and control*, p.^pp. 72-76, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [51] M. P. P. Nicholas G. Boulaxis, "Optimal feeder routing in distribution system planning using dynamic programming technique and GIS facilities," *IEEE Trans Power Deleviry*, vol. 17, no. 1, pp. 242-247, Jan. 2002.
- [52] A. P. Sujit Mandal, "Optimal Selection of Conductors for Distribution Feeders," *IEEE Trans Power System*, vol. 17, no. 1, pp. 192-197, Feb. 2002.
- [53] L. S. V. Guillermo A. Jiménez-Estévez ,and Vladimir Marianov, "Determination of feeder areas for the design of large distribution networks," *IEEE Trans Power Deleviry*, vol. 25, no. 3, pp. 1912-1922, Jul. 2010.
- [54] M. B. S. a. R. E. M. Farrokhifar, "A novel method for optimal location and expansion of subtransmission Substations considering existing medium-voltage distribution feeders," *American Journal of Applied Science*, vol. 6, no. 3, pp. 368-379, 2009.
- [55] a. H. R. Alejandro Navarro, "Large-scale distribution planning—part II: Macro-optimization with Voronoi's diagram and tabu search," *IEEE Trans Power System*, vol. 24, no. 2, pp. 752-758, May. 2009.
- [56] C. L. E. Atashpaz-Gargari, "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition," in *Expert Systems with Applications*, pp. 4661–4666, 2007.
- [57] M. Melanie, *An Introduction to Genetic Algorithms*, London, England: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [58] L. W. Jun Shu, Zuyi Li, Mohammad Shahidepour, Lizi Zhang ,Bing Han, "A new method for spatial power network planning in complicated environments," *IEEE Trans Power System*, vol. 27, no. 1, pp. 381-389, 2012.
- [59] Y. W. Shuhui Xu, Aiqin Huang, "Application of Imperialist Competitive Algorithm on Solving the Traveling Salesman Problem," *algorithms*, vol. 7, pp. 229-242, 2014.
- [60] M. M. H. Saeed Jazebi, Ramezan Ali Naghizadeh, "Distribution Network Reconfiguration in the Presence of Harmonic Loads: Optimization Techniques and Analysis," *IEEE Trans On Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1929-1937, 2014.

**Abstract:**

The sub-transmission substation expansion planning (SSEP) is a complicated problem and the aim of solving this problem is to determine optimal number, locations, capacities, and associated service area of all substations considering several technical constraints (such as voltage drop, loading capacity of substations, thermal limit of feeders, and radial network), at the possible minimum cost. In this thesis, two novel heuristic combination methods based on clustering technique is presented to solve the SSEP problem in two steps: (1) Optimal substation placement, (2) Optimal substation allocation. In the first method, the k-means algorithm is developed by setting power demand of loads in calculating the mean of each cluster as a weight coefficient. This leads to place substations that are closer to big loads without any predetermined candidate locations. In the next step, by using dynamic programming (DP), optimal capacities and associated service area of substation with aim of minimizing investment and operational costs is determined. In this regard, a new connection cost including the cost of expansion capacity of substations is added to the costs of MV network. So that in the new approach, the loads are connected to that substations that no need to expand their capacities. Thus, the maximum existing network potential is used and the asset management to be considered. The second method presents a methodology solution to solve the SSEP for real large-scal network by the targeted decomposition of planning area into isolated small zones. So that the optimal substation placement problem is to be solved separately based on the geographical information system (GIS) for each zone. To do so, the imperialist competition algorithm based on k-means clustering technique (ICA-KCT) is employed. The discret problem of the best priority sequence of load connection is solved using discret ICA (DICA) to find out optimal associated service area of substations. Hence, the main ICA operators (assimilation and revolution) are utilized, so that an approximate prioritization heuristic method is used to apply the revolution operator process, in order to make DICA to be robust. Finally, the proposed method for solving the SSEP problem is applied to a typical test system and sub-transmission network of Mashhad. The findings of simulation verify the efficiency and robustness of proposed methods.

**Keywords:**

Imperialist Competite Algorithm, Subtransmission substation expansion planning, K-means algorithm





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Electrical and Robotic Engineering**

# **Multi-stage Sub-transmission Substation Expansion Planning Using Load Clustering Method**

**Soroush Vahedi**

**Supervisor:**  
**Dr. Mahdi Banejad**

**Advisor:**  
**Dr. Mohsen Assili**

**September 2015**