**دانشگاه صنعتی شاهرود**
**دانشکده مهندسی برق و رباتیک**
**گروه قدرت**

عنوان:

# مدیریت سوخت نیروگاه‌های حرارتی در شرایط بحران با در نظرگرفتن محدودیت‌های شبکه‌ی برق

دانشجو:
محمد علی لاسمی

استاد راهنما:
محسن اصیلی

پایان نامه برای اخذ مدرک کارشناسی ارشد در رشته
مهندسی برق - گرایش قدرت

شهریور ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

**دانشگاه صنعتی شاهرود**
**دانشکده مهندسی برق و رباتیک**
**گروه قدرت**

عنوان:

# مدیریت سوخت نیروگاه‌های حرارتی در شرایط بحران با در نظرگرفتن محدودیت‌های شبکه‌ی برق

دانشجو:
محمد علی لاسمی

استاد راهنما:
محسن اصیلی

پایان نامه برای اخذ مدرک کارشناسی ارشد در رشته
مهندسی برق - گرایش قدرت

شهریور ۱۳۹۲

شماره : ۱۰۸۶/آ.ت.ب
تاریخ : ۹۲/۰۶/۲۵
ویرایش : ------

**بسمه تعالی**

مدیریت تحصیلات تکمیلی
**فرم شماره (۶)**

## 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 :

**محمد علی لاسمی** رشته : **بـــرق** گرایش : **قـــدرت**

تحت عنوان : **مدیریت سوخت نیروگاه های حرارتی در شرایط بحران با در نظر گرفتن محدودیتهای شبکه انتقال**

که در تاریخ **۹۲/۰۶/۲۵** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول ( با درجه : عالی امتیاز ۱۹ ) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱ـ عالی ( ۲۰ ـ ۱۹ )
۲ـ بسیار خوب ( ۱۸/۹۹ ـ ۱۸ )
۳ـ خوب ( ۱۷/۹۹ ـ ۱۶ )
۴ـ قابل قبول ( ۱۵/۹۹ ـ ۱۴ )
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

| عضو هیأت داوران | نام ونام خانوادگی | مرتبهٔ علمی | امضـــاء |
|---|---|---|---|
| ۱ـ استاد راهنما | محسن اصیلی | استادیار | |
| ۲ـ استاد مشاور | ـــــ | ـــــ | ـــــ |
| ۳ـ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی | امین حاجی زاده | استادیار | |
| ۴ـ استاد ممتحن | علی کرمی ملائی | استادیار | |
| ۵ ـ استاد ممتحن | مرتضی رحیمیان | استادیار | |

**رئیس دانشکده :**

تقدیم به

**پدر و مادر عزیز و فداکارم**

**با تشکر و سپاس از زحمات فراوانشان**

**به امید آنکه قطره‌ای از آن را جبران کنم**

در ابتدا از استاد ارجمند و عزیزم، جناب آقای دکتر محسن اصیلی نهایت تشکر و سپاس را دارم. کسی که با زحمات بی‌دریغ و دلسوزانه، در طول دوران تحصیل همواره با صبوری پرسش‌هایم را پاسخ داده و مرا در مسیر کسب دانش یاری نمود. در ادامه ضمن تشکر از همه‌ی اساتید محترم گروه قدرت، تشکر ویژه‌ای نیز از اساتید سیستم این مجموعه بالأخص جناب آقای دکتر مرتضی رحمیان را دارم. از قادر بی‌همتا برای همه‌ی این عزیزان آرزوی سلامتی و موفقیت روزافزون را خواستارم.

علم بالـــــست مرغ جـانت را — بر ســـــــپهر او برد روانت را

علم دل را به جای جان باشد — سر بی‌علـــــم بدگـمان باشد

دل بی‌علـــم چـشم بی‌نورست — مرد نادان ز مردمی دورســت

نیســت آب حیـــات جز دانش — نیســت باب نجـات جز دانش

علـم نورســت و جهل تاریکی — علـــم راهـــت برد به باریکی

تن به دانش سرشــته باید کرد — دل به دانـش فرشته باید کرد

از هر آن که مرا در راه کسب علم یاری سپرد تقدیر و تشکر می‌کنم.

# تعهـد نامـه

اینجانب محمدعلی لاسی ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی قدرت ..... دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

مدیریت سرخت نیروگاهی حرارتی در شرایط بحران با در نظر گرفتن محدودیت های شبکه انتقال

تحت راهنمائی آقای دکتر محسن اسمعیلی 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 « **دانشـگاه صـنعتی شـاهرود** » و یـا « 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 مسـتخرج از پایـان نامـه رعایـت مـی گردد.
- در کلیـه مراحل انجام این پایان نامـه، در مواردی که از موجـود زنـده ( یا بافت های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصـول اخـلاقی 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 :** ۹۲/۰۶/۲۵

**امضاء دانشجو**

محمدعلی لاسی

### 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

به مرور همراه با پیشرفت صنعت و نیاز روزافزون به یک انرژی امن، انرژی الکتریکی جایگاه ویژه‌ای در عرصه‌ی انرژهای دنیا پیدا کرده است. سوخت مصرفی همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تولید برق مطرح بوده است. با گسترش سیستم‌های قدرت، وابستگی بیشتر آن به سیستم‌های سوخت‌رسانی انکارناپذیر است، بطوریکه بحران و کمبود در این سیستم به طور مستقیم امنیت سیستم قدرت را تهدید می‌کند. در شرایط سخت زمستان همزمان با کاهش دما که افزایش تقاضای مصرف گاز از سوی مصرف‌کننده‌های غیر نیروگاهی را به همراه دارد، تأمین گاز مصرفی بسیاری از نیروگاه‌ها با محدودیت‌های جدی روبرو می‌شود. در این شرایط، معمولاً شبکه گاز قادر به تأمین گاز مصرفی تمام نیروگاه‌ها نیست. راهبُرد موثر برای جلوگیری از بحران در شبکه‌ی برق در این زمان استفاده از نیروگاه‌های چند سوخته می‌باشد. از این رو در این زمان برخی از نیروگاه‌های حرارتی با سوخت دوم خود که عمدتاً گازوئیل و یا مازوت می‌باشد، بهره‌برداری می‌شوند. به دلیل محدودیت‌هایی که در ذخیره‌سازی سوخت دوم وجود دارد، اگر به هر علتی زمان استفاده از سوخت دوم طولانی شود نیروگاه‌ها با کمبود سوخت و خطر خاموشی مواجه خواهند شد. این شرایط بحرانی عملاً در برودت دی‌ماه سال ۱۳۸۶ در ایران به وجود آمد.

آنچه که در این زمان اهمیت دارد، برنامه‌ریزی صحیح سوخت و مدیریت درست تولید می‌باشد. در این پایان‌نامه به مدیریت و برنامه‌ریزی تأمین سوخت نیروگاه‌ها چند سوخته، با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه‌ی برق و شبکه‌ی سوخت‌رسانی در شرایط بحران کمبود گاز پرداخته شده است، به طوری که به توان بدون به خطر انداختن امنیت دو شبکه، انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف-کنندگان را با حداقل هزینه تأمین نمود.

**کلمات کلیدی:** بحران سوخت، برنامه‌ریزی کوتاه مدت، مدیریت تولید، بهره‌برداری سیستم، حمل‌ونقل سوخت، پخش‌بار مستقیم

**لیست مقالات استخراج‌شده از پایان‌نامه**

۱. برنامه‌ریزی تأمین سوخت دوم نیروگاه‌های حرارتی در شرایط بحران کمبود گاز با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه انتقال

2. Extension of Multi-area Economic Dispatch with Multiple Fuel Options, considering the fuel limitations

# فهرست مطالب


**فصل اول:** مقدمه ۱

۱-۱) انگیزه‌های تحقیق ۲

۱-۲) اهداف تحقیق ۵

۱-۳) مروری بر پایان‌نامه ۶

**فصل دوم:** بررسی مسائل پیرامون تولید در نیروگاه‌های مختلف ۹

۲-۱) مقدمه ۱۰

۲-۲) انواع نیروگاه‌ها ۱۱

۲-۲-۱) نیروگاه‌های سوخت فسیلی ۱۱

۲-۲-۱-۱) نیروگاه‌های حرارتی ۱۲

۲-۲-۱-۲) نیروگاه‌های گازی ۱۳

۲-۲-۱-۳) نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ۱۴

۲-۲-۲) نیروگاه‌های آبی ۱۴

۲-۲-۲-۱) نیروگاه‌های آبی ساده ۱۵

۲-۲-۲-۲) نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای ۱۶

۲-۲-۳) نیروگاه‌های هسته‌ای ۱۷

۲-۲-٤) نیروگاه تجدید پذیر ..... ۱۸
۲-۳) منابع سوختی ..... ۱۸
۲-۳-۱) گاز طبیعی ..... ۱۹
۲-۳-۱-۱) دلایل مطلوبیت ویژه‌ی گاز طبیعی ..... ۱۹
۲-۳-۲) زغال‌سنگ ..... ۲۰
۲-۳-۳) نفت کوره یا مازوت ..... ۲۱
۲-٤) تولید در نقاط مختلف ..... ۲۲
**فصل سوم :** مروری بر کار دیگران ۲٦
۳-۱) مقدمه ..... ۲۷
۳-۲) برنامه‌ریزی سوخت ..... ۲۸
۳-۲-۱) محدودیت‌های سوخت‌رسانی ..... ۲۸
۳-۲-۲) طرح‌های سوختی ..... ۲۹
۳-۲-۳) برنامه‌ریزی یکپارچه ..... ۳۰
۳-۳) مدیریت تولید ..... ۳۱
۳-۳-۱) مسئله‌ی توزیع اقتصادی بار ..... ۳۲
۳-۳-۲) گسترش در تابع هزینه ..... ۳٤
۳-۳-۲-۱) تابع هدف ناصاف همراه با تأثیر دریچه‌ی سوخت ..... ۳٤
۳-٤-۱-۲) تابع هدف همراه با انتخاب متعدد سوخت ..... ۳۵

۳-۳-۳) گسترش در قیود مسئله ..... ۳۶
۳-۳-۳-۱) محدودیت‌های زیست‌محیطی ..... ۳۶
۳-۳-۳-۲) محدودیت نرخ تغییرات توان ..... ۳۷
۳-۳-۳-۳) محدودیت نواحی ممنوع بهره‌برداری ..... ۳۸
۳-۳-۳-٤) محدودیت نواحی چندگانه تولید ..... ۳۸
۳-٤) خلاصه‌ی فصل ..... ۳۹
**فصل چهارم :** فرمول‌بندی مسئله‌ی برنامه‌ریزی مورد بررسی ٤۰
٤-۱) مقدمه ..... ٤۱
٤-۲) تابع هزینه ..... ٤۲
٤-۳) محدودیت‌ها و قیود ..... ٤۳
٤-۳-۱) شبکه‌های سوخت‌رسانی ..... ٤۳
٤-۳-۱-۱) شبکه‌ی گاز طبیعی ..... ٤۳
٤-۳-۱-۲) شبکه‌ی سوخت‌رسانی سوخت‌های قابل ذخیره‌سازی ..... ٤٤
٤-۳-۱-۲-۱) محدودیت‌های حداکثر و حداقل سوخت در مخازن نیروگاهی ..... ٤٥
٤-۲-۱-۲-۲) محدودیت میزان سوخت تحویلی از مخازن شرکت نفت ..... ٤٦
٤-۲-۱-۲-۳) محدودیت روزانه انتقال کل سوخت ..... ٤٦
٤-۲-۱-۲-٤) محدودیت در میزان سوخت منتقل‌شده ..... ٤٦
٤-۳-۲) محدودیت‌های شبکه‌ی برق ..... ٤۷

٤-٣-٢-١) محدودیت‌های ظرفیت تولید هر نیروگاه..... ٤٩

٤-٣-٢-٢) تعادل توان تولیدی و مصرفی..... ٤٩

٤-٣-٢-٣) محدودیت توان عبوری از خطوط انتقال شبکه‌ی برق..... ٥٠

٤-٤) فرمولبندی کلی مسئله..... ٥٠

**فصل پنجم :** آنالیز عددی و مطالعه موردی ٥٢

٥-١) مقدمه ..... ٥٣

٥-٢) مطالعه‌ی موردی..... ٥٤

٥-٢-١) حالت اول..... ٥٨

٥-٢-٢) حالت دوم..... ٦٠

٥-٣) مقایسه‌ی دو حالت مورد بررسی در مطالعه‌ی موردی..... ٦٣

٥-٤) تحلیل نتایج با توجه به رفتار قیود..... ٦٥

**فصل ششم :** نتیجه‌گیری ٧٠

٦-١) نتیجه‌گیری ..... ٧١

**مراجع** ..... ٧٤

# فهرست شکل‌ها


| | | |
|---|---|---|
| شکل ۱-۱ | تغییر شکل بین انرژی‌های مختلف | ۳ |
| شکل ۲-۱ | تقسیم‌بندی کلی سوخت‌ها از منظر فرایند تبدیل انرژی | ۱۸ |
| شکل ۲-۲ | سهم تولید خالص برق به تفکیک منبع انرژی در ایالات‌متحده در سال ۲۰۱۰ | ۲۲ |
| شکل ۲-۳ | سهم تولید خالص برق به تفکیک منبع انرژی در ایالات‌متحده در سال ۲۰۱۱ | ۲۳ |
| شکل ۲-٤ | سهم تولید خالص برق به تفکیک منبع انرژی در ایالات‌متحده در سال ۲۰۰۲ | ۲۳ |
| شکل ۲-٤ | ترکیب تولید انرژی در اروپا در سال ۲۰۱۰ | ۲۵ |
| شکل ۳-۱ | شمای کلی از ورودی و خروجی نیروگاه‌های برق | ۲۸ |
| شکل ۳-۲ | سیستم شامل $N$ واحد حرارتی جهت تغذیه بار $PR$ | ۳۳ |
| شکل ۳-۳ | منحنی تابع هزینه با در نظر گرفتن تأثیر دریچه‌ی سوخت | ۳۵ |
| شکل ۳-٤ | منحنی هزینه سوخت این نیروگاه‌ها دارای انتخاب‌های مختلف سوخت | ۳٦ |
| شکل ۳-۵ | مدل نواحی تولید چندگانه برای ۳ ناحیه تولیدی | ۳۹ |
| شکل ٤-۱ | الگوی تولید روزانه پیش‌بینی شده | ٤۸ |
| شکل ۵-۱ | شبکه‌ی ۳۰ باسه نمونه مورد مطالعه | ۵٤ |
| شکل ۵-۲ | مقایسه‌ی نتایج حاصل مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی در دو حالت مختلف مطالعه‌ی موردی در روز اول | ٦۳ |
| شکل ۵-۳ | مقایسه‌ی نتایج حاصل مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی در دو حالت مختلف مطالعه‌ی موردی در روز دوم | ٦٤ |
| شکل ۵-٤ | مقایسه‌ی نتایج حاصل مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی در دو حالت مختلف مطالعه‌ی موردی در روز سوم | ٦٤ |

# فهرست جدول‌ها


| | | |
|---|---|---|
| جدول ۲-۱ | نیازهای فنی عمده برای جایگاه نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال‌سنگی همراه با اندازه نیروگاهی | ۱۳ |
| جدول ۲-۲ | مشخصات منابع سوختی مختلف | ۲۱ |
| جدول ۵-۱ | اطلاعات مربوط به حداقل انرژی تولیدی نیروگاه‌ها | ۵۵ |
| جدول ۵-۲ | اطلاعات مربوط به حداکثر انرژی تولیدی نیروگاه‌ها | ۵۵ |
| جدول ۵-۳ | ضریب تولید برای شین‌های تولیدی | ۵۶ |
| جدول ۵-٤ | ضریب خطی تابع هزینه برای واحدهای مختلف | ۵۶ |
| جدول ۵-۵ | مقدار راکتانس خطوط | ۵۷ |
| جدول ۵-۶ | بار پیش‌بینی‌شده در روز اول | ۵۷ |
| جدول ۵-۷ | بار پیش‌بینی‌شده در روز دوم | ۵۸ |
| جدول ۵-۸ | بار پیش‌بینی‌شده در روز سوم | ۵۸ |
| جدول ۵-۹ | نتایج تولید شین‌های تولیدی در دوره‌ی برنامه‌ریزی در حالت اول | ۵۹ |
| جدول ۵-۱۰ | اسامی خطوطی که دچار پرباری شده‌اند، در حالت اول | ۵۹ |
| جدول ۵-۱۱ | فواصل مخازن و نیروگاه‌ها | ۶۰ |
| جدول ۵-۱۲ | اطلاعات مربوط به مخازن نیروگاه‌های | ۶۱ |
| جدول ۵-۱۳ | محدودیت تحویل سوخت از مخازن شرکت نفت | ۶۱ |
| جدول ۵-۱٤ | نتایج تولید شین‌های تولیدی در دوره‌ی برنامه‌ریزی در حالت دوم | ۶۲ |
| جدول ۵-۱۵ | اسامی خطوطی که دچار پرباری شده‌اند، در حالت دوم | ۶۲ |
| جدول ۵-۱۶ | اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداقل حجم سوخت ذخیره شده‌ی مخازن نیروگاهی در روز اول دوره‌ی برنامه‌ریزی | ۶۵ |
| جدول ۵-۱۷ | اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداقل حجم سوخت ذخیره شده‌ی مخازن نیروگاهی در روز دوم دوره‌ی برنامه‌ریزی | ۶۶ |

جدول ۵-۱۸ اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداقل حجم سوخت ذخیره شده‌ی مخازن نیروگاهی در روز سوم دوره‌ی برنامه‌ریزی ٦٧
جدول ۵-۱۹ اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداکثر حجم سوخت ذخیره شده‌ی مخازن نیروگاهی در روز اول دوره‌ی برنامه‌ریزی ٦٧
جدول ۵-۲۰ اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت روزانه انتقال کل سوخت ٦٨
جدول ۵-۲۱ نتایج میزان انتقال سوخت در سه روز دوره‌ی برنامه‌ریزی ٦٩

# مدل فهرست علائم و اختصارات

## شاخص‌ها:

| | |
|---|---|
| $i$ | شاخص شماره‌ی باس‌ها |
| $j$ | شاخص شماره‌ی مخازن شرکت نفت |
| $k$ | شاخص شماره‌ی روزهای برنامه‌ریزی |
| $A$ | شاخص نمایش مخازن شرکت نفت |
| $B$ | شاخص نمایش نیروگاه‌های برق |
| $F$ | شاخص نمایش سوخت قابل ذخیره‌سازی |
| $O$ | شاخص نمایش سوخت گازوئیل |
| $H$ | شاخص نمایش سوخت مازوت |
| $G$ | شاخص نمایش سوخت گاز |

## ابعاد:

| | |
|---|---|
| $N$ | تعداد روز دوره برنامه‌ریزی |
| $n$ | تعداد شین‌های تولیدی |
| $n_{AO}$ | تعداد مخازن گازوئیل |
| $n_{AH}$ | تعداد مخازن مازوت |
| $n_{BO}$ | تعداد نیروگاه‌های گازوئیل سوز |
| $n_{BH}$ | تعداد نیروگاه‌های مازوت سوز |

## پارامترها:

| | |
|---|---|
| $\alpha$ | قیمت سوخت فسیلی مصرفی |
| $\beta$ | قیمت حمل‌ونقل سوخت |
| $\eta_{Oi}$ | راندمان نیروگاه $B_{Oi}$ |

$\eta_{Hi}$ راندمان نیروگاه $B_{Hi}$

$d_{Oij}$ فاصله بین مخزن $A_{Oi}$ و نیروگاه $B_{Oi}$

$d_{Hij}$ فاصله بین مخزن $A_{Hi}$ و نیروگاه $B_{Hi}$

$LF^{k}_{i_\max}$ حداکثر سوخت مجاز مصرفی نیروگاه گازسوز $i$ ام در روز $k$ ام

$LF^{k}_{i_\min}$ حداقل سوخت مجاز مصرفی نیروگاه گازسوز $i$ ام در روز $k$ ام

$P^{k}_{i_\max}$ حداکثر ظرفیت تولید نیروگاه گازسوز $i$ ام در روز $k$ ام

$P^{k}_{i_\min}$ حداقل ظرفیت تولید نیروگاه گازسوز $i$ ام در روز $k$ ام

$X^{0}_{BOi}$ میزان سوخت اولیه مخازن یک نیروگاه گازوئیل سوز در شروع دوره‌ی برنامه‌ریزی

$X^{\min}_{BOi}$ حداقل ظرفیت سوخت مخازن نیروگاه $B_{Oi}$

$X^{\max}_{BOi}$ حداکثر ظرفیت سوخت مخازن نیروگاه $B_{Oi}$

$X^{0}_{BHi}$ میزان سوخت اولیه مخازن یک نیروگاه مازوت سوز در شروع دوره‌ی برنامه‌ریزی

$X^{\min}_{BHi}$ حداقل ظرفیت سوخت مخازن نیروگاه $B_{Hi}$

$X^{\max}_{BHi}$ حداکثر ظرفیت سوخت مخازن نیروگاه $B_{Hi}$

$X^{k}_{AOi}$ حداکثر گازوئیل تحویلی از مخزن $A_{Oi}$ در روز $k$ام

$X^{k}_{AHi}$ حداکثر گازوئیل تحویلی از مخزن $A_{Hi}$ در روز $k$ام

$X^{k}$ حداکثر میزان سوخت انتقالی در کل منطقه برای روز $k$ام

$P^{k}_{Di}$ توان مصرفی شین $i$ام در روز $k$ام

$P^{l}_{L_{\max}}$ حداکثر توان مجاز عبوری از خط $l$ ام

$x_{ij}$ راکتانس خط مرتبط بین شین $i$ام و $j$ ام

$B$ ماتریس سوسپتانس شبکه

$\lambda^{k}_{i}$ ضریب تولید شین $i$ام در روز $k$ام

## متغیرها:

$C$ هزینه کل در طول دوره برنامه‌ریزی

$C_f$ هزینه کل سوخت مصرفی توسط نیروگاه‌ها در طول دوره برنامه‌ریزی

$C_t$ هزینه کل حمل‌ونقل سوخت در طول دوره

$P_i^k$ توان تولیدی نیروگاه حرارتی $i$ ام در بدترین شرایط شبکه در روز $k$ ام

$\overline{P}_i^k$ توان متوسط تولیدی نیروگاه حرارتی $i$ ام در روز $k$ ام

$\delta_i^k$ زاویه‌ی ولتاژ در شین $i$ ام در روز $k$ ام

$I_{F\,ij}^k$ متغیر باینری درخواست سوخت نوع $F$ نیروگاه $i$ ام از مخزن $j$ ام شرکت نفت (برای $F= O, H$)

$\bar{x}_{Fij}^k$ مقدار حجم سوخت نوع $F$ مورد نیاز نیروگاه $i$ ام از مخزن $j$ ام شرکت نفت در روز $k$ ام (برای $F= O, H$)

$x_{Fij}^k$ مقدار حجم سوخت نوع $F$ دریافتی نیروگاه $i$ ام از مخزن $j$ ام شرکت نفت (برای $F= O, H$)

$F_i(P_i^k)$ تابع هزینه‌ی سوخت نیروگاه $i$ ام

$FC_i^k$ میزان سوخت مصرف شده نیروگاه حرارتی $i$ ام در روز $k$ ام

# فصل ۱

# مقدمه

## ۱-۱- انگیزه‌های تحقیق

نیاز به انرژی برای اجرای امور مختلف همواره یکی از دغدغه‌های مهم بشر بشمار آمده است. به مرور همراه با پیشرفت صنعت و نیاز روزافزون به انرژی پاک و امن، انرژی الکتریکی جایگاه ویژه‌ای در عرصه‌ی انرژی‌های موجود در دنیا پیدا کرده است. مزایای انرژی الکتریکی باعث افزایش کاربردهای آن در امور مختلف شده است، تاجایکه امروزه از آن به عنوان یک انرژی واسط برای استفاده‌ی بهتر بشر از دیگر انرژی‌های موجود یاد می‌شود. هفت شکل از انرژی وجود دارد که می‌توان تبدیل هر یک از آن‌ها را به هم به عنوان بخشی از فرایند تولید برق در نظر گرفت که عبارتند از: [۱]

۱) هسته‌ای (Nuclear)

۲) ترمودینامیکی (Thermodynamic)

۳) پتانسیل (Potential)

۴) جنبشی (Kinetic)

۵) الاستیک مکانیکی[۱] (mechanical elastic)

۶) الکتریکی / الکترومغناطیسی (Electrical/ Electromagnetic)

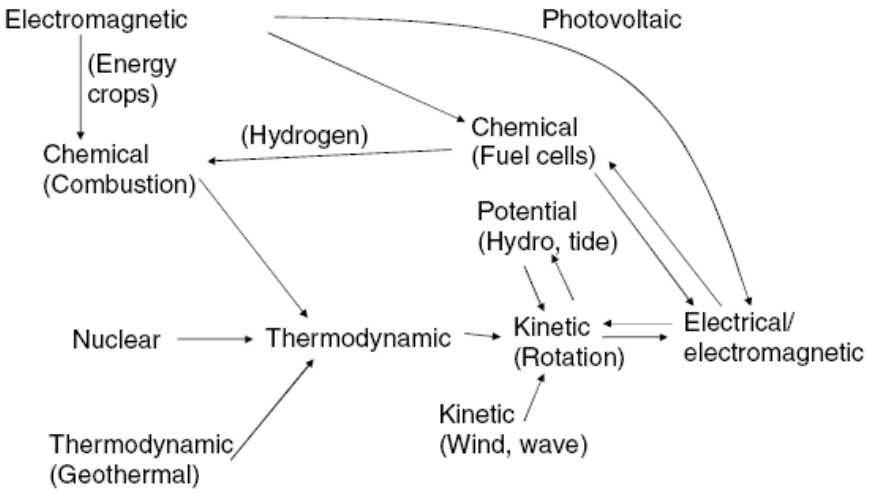
۷) شیمیایی (Chemical)

نحوی ارتباط هر یک از آن‌ها باهم در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. سوخت فسیلی همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تولید برق مطرح بوده است. از دیرباز نیروگاه‌های سوخت فسیلی بخش عمده‌ای از تولید برق سیستم‌های قدرت را بر عهده داشته‌اند. حتی امروزه نیز با

---

۱ - توانایی تبدیل دوجانبه فشار مکانیکی و الکتریسیته را به یکدیگر "خاصیت پیزوالکتریک" می نامند. این پدیده یکی از ویژگی‌های غیرمعمولی است که برخی سرامیک‌ها (مانند کوارتز) از خود بروز می‌دهند. با اعمال نیروی خارجی، دوقطبی‌های این سرامیک‌ها تحریک شده و میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. از طرف دیگر زمانی هم که یک میدان الکتریکی به یک کریستال پیزوالکتریک اعمال شود، تحت کرنش قرار می‌گیرد که اصطلاحا آن را رفتار پیزوالکتریک معکوس می‌نامند. به این انرژی باعث بروز خاصیت پیزوالکتریک، الاستیک مکانیکی گویند.

پیشرفت علم و فناوری در زمینه‌های مختلف تولید برق مانند تولید برق از طریق انرژی هستی، برقابی و انرژی‌های تجدید پذیر، همچنان این بخش عمده‌ی تولید توسط نیروگاه‌های سوخت فسیلی حفظ شده است. به طور مثال طبق آخرین گزارش‌ها تولید برق در اروپا در سال ۲۰۱۰، ۵۴/۸٪ برق تولید توسط سوخت فسیلی، ۲۷/۳٪ انرژی هسته‌ای، ۱۲/۲٪ انرژی برقابی و بقیه تولید توسط انرژی‌ها تجدید پذیر بوده است. [۲] همچنین در کشور آمریکا تنها دو سوخت فسیلی زغال-سنگ و گاز طبیعی به ترتیب عهده‌دار ۴۲/۲۷٪ و ۲۴/۷۲٪ از کل تولید خالص برق آمریکا در سال ۲۰۱۱، می‌باشند. [۳]




شکل ۱-۱: تغییر شکل بین انرژی‌های مختلف [۱]

زغال‌سنگ و گاز طبیعی از جمله مهم‌ترین سوخت‌های فسیلی مصرفی برای تولید برق محسوب می‌شوند. از طرفی گاز طبیعی به دلیل آلایندگی کم همواره به عنوان یک سوخت پاک بشمار می‌آید و تمایل شبکه‌های برق برای استفاده از این نوع سوخت رو به فزونی است. با گسترش سیستم‌های قدرت، وابستگی بیشتر آن به سیستم‌های سوخت‌رسانی انکارناپذیر است، به طوری که بحران و کمبود در این سیستم به طور مستقیم امنیت سیستم قدرت را تهدید می‌کند. وابستگی متقابل سیستم‌های گاز طبیعی و برق می‌تواند به طور مستقیم بروی امنیت و اقتصاد دو سیستم تأثیر بگذارد. به طور مثال وقفه و یا افت فشار در سیستم‌های خط لوله گاز طبیعی ممکن

است منجر به از دست دادن تولید ژنراتور گازسوز شود که می‌تواند به طور چشمگیری باعث کاهش عرضه‌ی توان الکتریکی شود و امنیت سیستم قدرت را به خطر اندازد. در شرایط سخت زمستان در مواقعی که هر دو شبکه به صورت همزمان در حالت پر باری هستند این وابستگی بسیار بیشتر می‌باشد و هر اتفاق پیش‌بینی‌نشده و بحران در شبکه‌ی گاز با ایجاد بحران سوخت، می‌تواند شبکه‌ی برق را با خاموشی و قطعی بار روبرو کند.

- به راستی برای جلوگیری از ایجاد چنین مشکل چه باید کرد؟
- راه حل برون‌رفت از بحران سوخت چیست؟

یک راهبُرد موثر برای برون‌رفت از این قضیه استفاده از نیروگاه‌ها چند سوخته[۲] می‌باشد تا در صورتی که سوخت اول آن‌ها تأمین نشد بتواند با استفاده از سوخت جایگزین یعنی سوخت دوم خود بار شبکه را تأمین کنند. در نیروگاه‌های ایران معمولاً سوخت اول نیروگاه‌های فسیلی، گاز طبیعی می‌باشد و سوخت‌های گازوئیل و نفت کوره (مازوت) به عنوان سوخت دوم مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سوخت‌ها در مخازن نیروگاهی ذخیره می‌شوند.

در شرایطی که شبکه‌ی گاز با مشکل عدم گاز دهی به بعضی از این نیروگاه‌ها مواجه می-شود (برای مثال در زمان تعمیرات واحدهای شبکه‌ی گاز، شرایط بحران و پیک مصرف) شرکت نفت موظف است سوخت این نیروگاه‌ها را تأمین کند. برای تأمین نیاز سوخت این نیروگاه‌ها شرکت نفت، سوخت‌های ذخیره‌شده در مخازن خود را به صورت روزانه به مخازن نیروگاهی منتقل می‌کند. این حمل‌ونقل سوخت همواره با محدودیت‌های چون بارگیری، انتقال و ... همراه است. در این زمان به هر دلیلی که محدودیت شبکه‌ی گاز طولانی شود برنامه‌ریزی صحیح سوخت دوم نیروگاه‌های سوخت فسیلی از اهمیت ویژه برخوردار می‌شود. در صورت عدم برنامه‌ریزی صحیح با توجه به شرایط موجود در دو شبکه خطر خاموشی نیروگاه‌های شبکه برق را تهدید می‌کند. چنین

2 - With Various Fuel

شرایطی عملاً در بحران تأمین سوخت نیروگاه‌های کشور در دی‌ماه سال ۱۳۸۶ مشاهده گردید؛ که منجر به خاموشی چندین نیروگاه شد. از جمله مسائلی که شبکه در این شرایط با آن روبروست جابجایی در تولید نیروگاه‌ها به دلیل بحران و کمبود سوخت می‌باشد، در واقع محدودیت‌های سوخت‌رسانی به طور مستقیم بروی ظرفیت تولیدی تأثیر می‌گذارد. این شرایط بالأخص در زمان پر باری شبکه بیشتر رخ می‌دهد. نتیجه‌ی این جابجایی تولید که شرایط توزیع اقتصادی بار را تغیر می‌دهد موجب می‌شود، برخی از خطوط دچار اضافه‌بار شوند. در این حالت برای حفظ حد مجاز ظرفیت انتقالی خطوط و امنیت شبکه برق، به ناچار باید برخی از نیروگاه‌های پربازده در ظرفیت تولید کمتری بهره‌برداری شوند. این همان مسئله‌ی حبس تولید می‌باشد که عملاً در آن حادثه سال ۱۳۸۶ مشاهده شد.

در روشی که قبلاً برای برنامه‌ریزی کوتاه مدت سوخت در شرایط بحران ارائه‌شده [۴]، عملاً محدودیت‌های شبکه برق لحاظ نگردیده است. با توجه به اینکه محدودیت‌های مربوط به برخی از خطوط انتقال همواره در حالت‌های پرباری، جزء قیود فعال مسئله به شمار می‌آیند، از این رو برای رسیدن به یک جواب صحیح، تعیین درست محدودیت‌های شبکه‌ی برق اهمیت بسزایی دارد. در سایه‌ی یک توزیع نادرست توان تولیدی بین نیروگاه‌ها، امنیت شبکه‌ی برق را با خطر جدی روبرو می‌شود. همچنین در این پروژه با ارائه‌ی یک راهبُرد موثر، ضمن در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه‌ی برق، محدودیت‌های شبکه‌ی گاز نیز مدل گردیده است.

## ۱-۲- اهداف تحقیق

بهره‌برداری موثر اقتصادی از سیستم قدرت نه تنها به عملکرد تولید الکتریکی بلکه به زیر سیستم‌های مرتبط به آن نیز بستگی دارد که از جمله می‌توان به سیستم تأمین انرژی اولیه (سوخت مصرفی) اشاره کرد. این امر به دلیل آن است که سوخت مهم‌ترین بخش هزینه تولید برق را شامل می‌شود. [۶] این وابستگی در شرایط بحرانی جدی‌تر می‌باشد. با توجه به الگوهای مصرف

گاز، در شرایط خاص و بحرانی شرکت گاز برای جلوگیری از افت فشار در خطوط لوله‌ی گاز و حفظ امنیت شبکه‌ی گاز، قادر به تأمین گاز مصرفی بعضی از نیروگاه‌های شبکه‌ی برق نمی‌باشد. در این حالت برای حفظ امنیت شبکه‌ی برق این نیروگاه‌ها باید با سوخت دوم خود بهره‌برداری شوند.

تعیین میزان تولید و متناسب با آن سوخت مصرفی این نیروگاه‌ها به طور مستقیم بر روی امنیت شبکه‌ی برق تأثیرگذار است و حفظ امنیت شبکه‌ی برق بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های این شبکه‌ی امکان‌پذیر نیست. در چنین شرایطی، مدیریت انتقال سوخت به این نیروگاه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و مدیریت صحیح انتقال و پخش بار اقتصادی درست بین نیروگاه‌ها، هم کاهش هزینه‌های تولید و هم عدم بروز شرایط بحرانی را منجر می‌شود. هدف از انجام این پروژه ارائه‌ی یک مدل یکپارچه با مدلسازی سیستم‌های مختلف سوخت‌رسانی و شبکه‌ی برق جهت دستیابی به اقتصادی‌ترین حالت تولید با حفظ امنیت شبکه‌ی برق (مدیریت تولید[3]) و برنامه‌ریزی صحیح سوخت دوم در شرایط بحران و کمبود سوخت می‌باشد.

## ۱-۳- مروری بر پایان‌نامه

همان طور که گفته شد، در این پایان‌نامه مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید و تأمین سوخت نیروگاه‌های سوخت فسیلی با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه‌ی برق و شبکه‌ی سوخت‌رسانی در شرایط کمبود سوخت مورد بررسی قرار می‌گیرد. آنچه که امروزه اهمیت شرایط و محدودیت‌های سوخت‌رسانی برای نیروگاه‌های سوخت فسیلی را افزون می‌کند، سهم عمده‌ی این نیروگاه در میزان تولید شبکه‌ی برق می‌باشد. در فصل ۲ ضمن بیان مختصری از انواع نیروگاه‌ها با جمع‌آوری و ارائه‌ی اطلاعات عملی تولید از نقاط و کشورهای مختلف سعی می‌شود، جایگاه ویژه‌ی نیروگاه‌های سوخت فسیلی بیان شود. اطلاعات جمع‌آوری شده از منابع معتبر اخذ گردیده است که در قسمت مراجع به آن اشاره شده است، همچنین سعی شده از آخرین و بروزترین اطلاعات

3 - Generation Management

موجود استفاده شود. در این فصل مزایای نیروگاه‌های سوخت فسیلی که از جمله مهم‌ترین آن می‌توان به هزینه‌ی اولیه و زمان احداث کم، جا یابی آسان که می‌تواند به عنوان یک قابلیت برای کنترل توزیع درست توان در امر توسعه تولید برای شبکه برق در نظر گرفت و قطعیت و امنیت بالا در تولید به دلیل آن که انرژی اولیه این نیروگاه‌ها قابل ذخیره‌سازی است، مورد بررسی قرار می-گیرد. از طرفی چون هزینه‌ی بهره‌برداری این نیروگاه‌ها به دلیل مصرف سوخت نسبت به دیگر نیروگاه بیشتر است، همواره بهره‌برداری اقتصادی این نیروگاه مد نظر بوده است. اهمیت، قیمت و امکان دسترسی از جمله عوامل تعیین‌کننده برای نوع سوخت مصرفی می‌باشد. در این فصل در مورد انواع سوخت نیز بحث شده است تا ضمن ارائه‌ی ویژگی و ماهیت‌های هر یک، به نحوی و ساختار سوخت‌رسانی و ذخیره‌سازی آن‌ها پی برد.

در بحث مدلسازی سیستم در نظر گرفتن هر یک از شرایط محیطی و محدودیت‌های عملی می‌تواند ما را به نتیجه مطلوب نزدیک‌تر کنند. حتی در بعضی از مواقع نادیده گرفتن هر یک از این محدودیت‌ها می‌تواند ما را از مدیریتی صحیح و شدنی دور کنند. ابزار مدیریت تولید در شبکه‌ی برق، مسئله‌ی پخش بار[۴] می‌باشد. در سایه توزیع اقتصادی بار[۵] درست است که می‌توان یک مدیریت صحیح تولید در سیستم‌های قدرت ایجاد کرد، از این رو همواره سعی بر آن است با در نظر گرفتن پارامترها و مسائل مهم مرتبط با تولید برق در مسئله‌ی پخش بار به جواب مورد نظر رسید. از آنجا که مسئله مورد بررسی در این پایان‌نامه نیز یک مسئله‌ی بهره‌برداری برای مدیریت تولید و برنامه‌ریزی سوخت می‌باشد و در چهارچوب یک مسئله‌ی پخش بار توسعه‌یافته (مسئله‌ی پخش بار سنتی به همراه محدودیت‌های سوخت‌رسانی) بیان می‌شود در فصل ۳ به مروری بر کارهای صورت گرفته در این دو حوزه پرداخته می‌شود. در ادامه در فصل ۴ فرمول‌بندی مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید و تأمین سوخت نیروگاه‌ها سوخت فسیلی با گزینه‌های متعدد سوخت، با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه‌ی انتقال برق در شرایط بحران کمبود گاز ارائه می‌شود. با

4 - Power Flow
5 - Economic Load Dispatch

برنامه‌ریزی صورت گرفته ضمن اینکه می‌توان انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف‌کنندگان را با حداقل هزینه تأمین نمود بلکه از به خطر انداختن امنیت شبکه برق نیز می‌توان جلوگیری کرد. آنالیز عددی و مطالعه‌ی موردی در فصل ۵ آورده شده است و در انتها در فصل ۶ نتیجه‌گیری از پایان‌نامه و ارائه‌ی پیشنهادها صورت می‌گیرد.

# فصل ۲

# بررسی مسائل پیرامون تولید در نیروگاه‌های مختلف

## ۲-۱- مقدمه

همان طور که پیش‌تر گفته شد، پروژه انجام‌شده در این پایان‌نامه یک نوع برنامه‌ریزی کوتاه مدت و مدیریت تولید نیروگاه‌های سوخت فسیلی می‌باشد که ضمن حفظ امنیت شبکه برق در شرایط بحران کمبود سوخت، مقرون به صرفه‌ترین حالت ممکن برای تولید را در پی دارد. به دلایل مختلف که در این فصل بحث می‌شود و همان طوری که در فصل اول اشاره شد، نیروگاه‌های سوخت فسیلی همواره سهم عمده‌ای در تولید برق شبکه‌های قدرت را دارا هستند. بحث هزینه‌ی تولید و هزینه‌ی سوخت مصرفی این دسته از نیروگاه‌های شبکه‌ی برق، اهمیت بهره‌برداری اقتصادی از این نیروگاه‌ها را دو چندان کرده است. از این رو در این فصل قصد داریم در ابتدا با بیان مختصری از مباحث پیرامون بهره‌برداری نیروگاه مختلف، تفاوت و اهمیت موضوع برنامه‌ریزی تولید و بهره‌برداری بهینه از نیروگاه سوخت فسیلی مطرح شود.

شناخت اجزای مختلف یک سیستم همواره درک بهتری برای مطالعه‌ی آن به ما می‌دهد. از این رو برای برنامه‌ریزی صحیح سوخت‌رسانی و تعیین درست سوخت دوم مصرفی نیاز به شناخت ماهیت و درک ابعاد مختلف سوخت‌های مصرفی احساس می‌شود. ارائه‌ی ویژگی و ماهیت‌های هر یک از سوخت‌های فسیلی دید مناسبی را در بحث ذخیره‌سازی و مسائل مربوط به سوخت‌رسانی این نوع سوخت‌ها به خواننده می‌دهد. بدین منظور در ادامه‌ی این فصل مسائل مربوط به منابع سوختی و انواع سوخت مصرفی در نیروگاه‌های سوخت فسیلی بحث شده است. در این فصل بیشتر سعی شده به مسائل عملی و عینی پرداخته شود تا خواننده با درک مطالب و با در کنار هم قرار دادن مقایسه‌های درست پیرامون تولید نیروگاه‌های مختلف، به یک دید صحیح در مورد اهمیت موضوع بهره‌برداری نیروگاه سوخت فسیلی و مسئله‌ی سوخت‌رسانی این نیروگاه‌ها برسد.

## ۲-۲- انواع نیروگاه‌ها

نیروگاه‌ها مجموعه‌ای پیچیده هستند که از اجزاء منفرد، تجهیزات، سیستم‌های مکانیکی و برقی تشکیل‌شده‌اند. واژه‌ی نیروگاه را به معنای گسترده‌ی آن می‌تواند شامل همه‌ی تجهیزات واحدها، سیستم‌های مهندسی و ساختمان‌های مربوطه اختصاص داد. [۵] در حالت کلی می‌توان نیروگاه‌های تولیدکننده‌ی برق را به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱) نیروگاه‌های سوخت فسیلی

۲) نیروگاه‌های برقابی

۳) نیروگاه‌های هسته‌ای

۴) نیروگاه‌های تجدید پذیر

### ۲-۲-۱- نیروگاه‌های سوخت فسیلی

به آن دسته از نیروگاه‌هایی اطلاق می‌شود که از سوخت‌های فسیلی برای تولید برق استفاده می‌کنند. در حالت کلی این نیروگاه‌ها را می‌توان به دو دسته‌ی اصلی تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از : نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاه‌های گازی. از منظر نوع سوخت مصرفی این نیروگاه‌ها را می‌توان به ۳ دسته‌ی زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱) واحدهایی که با یک نوع سوخت مصرفی قابل بهره‌برداری می‌باشند. (نیروگاه فقط زغال‌سنگی، نیروگاه فقط گازسوز و ....)

۲) واحدهایی که با چند نوع سوخت مصرفی قابل بهره‌برداری می‌باشند ولی قابلیت بهره-برداری همزمان را ندارند.

۳) واحدهایی با چند نوع سوخت[1] مصرفی قابل بهره‌برداری می‌باشند و قابلیت بهره-برداری همزمان را دارا هستند. [۶]

عیب این نوع نیروگاه تولید گازهای گلخانه‌ای و محدودیت سوخت فسیلی می‌باشد ولی مزایای این نیروگاه‌ها باعث شده که سهم عمده‌ای در تولید برق را به خود اختصاص دهند. از جمله‌ی این مزایا می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱) محدودیت بسیار کمتر برای محل احداث در مقایسه با دیگر نیروگاه‌های (جا یابی آسان)

۲) محدودیت بسیار کمتر پیرامون مسائل امنیتی در مقایسه با نیروگاه‌های هسته‌ای

۳) تولید مطمئن و پایدار در صورت عدم محدودیت سوخت، در مقایسه با نیروگاه‌های تجدید پذیر

۴) قابلیت مانور و تغیر مناسب در توان تولیدی برای بهره‌برداری بهتر از شبکه

## ۲-۲-۱-۱- نیروگاه‌های حرارتی

در این نوع نیروگاه‌ها که عموماً دارای ظرفیت تولید برق بالایی می‌باشند، از سوخت فسیلی (همچون گاز طبیعی، گازوئیل، زغال‌سنگ، مازوت) برای تولید بخار توسط بویلر جهت به حرکت درآوردن پره‌های توربین و روتور ژنراتور استفاده‌شده و در نهایت موجب تولید برق می‌گردد. نیروگاه‌های بخار به منظور تأمین انرژی الکتریکی به سه نوع تبدیل انرژی نیاز دارند:

۱) انرژی شیمیایی موجود در سوخت‌های فسیلی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و توسط حرارت تولیدشده آب مایع به بخار تبدیل می‌شود. این کار در دیگ بخار انجام می‌شود.

---

1 - With Multiple Fuel Options

۲) تبدیل انرژی حرارتی بخار به انرژی مکانیکی، این کار توسط توربین انجام می‌شود.

۳) تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی، این کار توسط ژنراتور انجام می‌شود.

به دلیل ارزش حرارتی کم ذغال‌سنگ، نیروگاه‌های زغال‌سنگی نسبت به نیروگاه‌های نفتی، احتیاج به بویلرهای بزرگ‌تری دارند. همچنین مباحث ذخیره‌سازی، حجم مخازن و امکانات حمل‌ونقل در این نوع نیروگاه‌ها به تسهیلات بیشتری نیازمند می‌باشد. نیازهای فنی عمده برای جایگاه نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال‌سنگی با توجه به اندازه نیروگاهی که مورد نظر هستند، در جدول ۲-۱ آمده است. [۵]

جدول ۲-۱: نیازهای فنی عمده برای جایگاه نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال‌سنگی همراه با اندازه نیروگاهی [۵]

| پارمترها | نیروگاه زغالی ۱۸۰۰ مگاواتی | نیروگاه هسته‌ای ۱۲۰۰ مگاواتی |
|---|---|---|
| **انتقال سوخت** | روش‌های اقتصادی برای حمل تا ۵ میلیون تن در سال | حجم کم و غیر مداوم |
| **آب خنک‌کننده** | ۳-۵۲ مترمکعب بر ثانیه | ۳-۵۲ مترمکعب بر ثانیه |
| **زمین** | ۱۰۰ هکتار برای ساخت‌وساز | ۶۰ هکتار برای ساخت‌وساز |
| **دفع ضایعات** | امکان دفع تا حد ۱ میلیون تن خاکستر در سال | نزدیکی به راه‌آهن برای ارسال مخزن‌های پس ماند (تقریباً ۲۰ محموله در سال) |

## ۲-۲-۱-۲- نیروگاه‌های گازی

توربین‌های گازی از سه قسمت کمپرسور، محفظه‌ی احتراق و توربین تشکیل‌شده‌اند. ابتدا فشار گاز در کمپرسور زیاد و سپس گاز فشرده‌شده در محفظه‌ی احتراق گرم می‌شود. پس از آن گاز با فشار و درجه حرارت بالا وارد توربین و در آنجا انرژی حرارتی آن به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود.

اندازه نیروگاه توربین گازی، در مقایسه با نیروگاه بخار، کوچک‌تر، وزنش کمتر و هزینه اولیه آن برای تولید هر واحد توان از هزینه مربوط به نیروگاه بخار کمتر است. امروزه این نیروگاه‌ها در تولید پراکنده کاربرد فراوانی یافته‌اند. [۷] از جمله مزایا عمده‌ی این نیروگاه‌ها این است که سرعت بالای راه‌اندازی‌شان می‌باشد طوری که این واحدهایی قادرند سریعاً در مدار قرار گیرند. به همین دلیل بهره-برداری از این نیروگاه‌ها در مواقع اضطراری و پیک بار به عنوان یک راهبُرد موثر در شبکه‌ی برق مطرح می‌باشد.

### ۲-۲-۱-۳- نیروگاه‌های سیکل ترکیبی

نیروگاه سیکل ترکیبی در واقع ترکیبی از نیروگاه‌های بخاری و گازی می‌باشند. در این نوع نیروگاه، از حرارت موجود در گازهای خروجی از توربین‌های گازی، برای تولید بخار آب مورد نیاز در توربین‌های بخار استفاده می‌شود. اگر توربین گازی به صورت سیکل ترکیبی نباشد، گازهای خروجی آن، مستقیماً وارد هوا شده و انرژی باقی‌مانده در آن هدر می‌رود. درحالی‌که در نیروگاه سیکل ترکیبی، از این انرژی استفاده‌شده و بویلر توربین بخار بدون نیاز به سوخت، بخار آب تولید می‌کند؛ بنابراین، با استفاده از این روش، راندمان سیکل افزایش می‌یابد.

### ۲-۲-۲- نیروگاه‌های آبی

به طور کلی این دسته از نیروگاه‌ها را می‌توان به دو دسته‌ی نیروگاه‌های برقابی ساده و تلمبه ذخیره‌ای تقسیم‌بندی کرد. مشخصه‌های تولید این نیروگاه‌ها به شدت تحت تأثیر ساختار کلی هیدرولیکی واحدهایشان، قرار دارند. در عمل، از نظر هیدرولیکی، بسیاری از نیروگاه‌های آبی به صورت سری و یا موازی بسته می‌شوند. در این صورت خروجی بسیاری از نیروگاه که در قسمت بالای رودخانه واقع است تأثیر بر ورودی به حوضچه نیروگاه بعدی می‌گذارد.

## ۲-۲-۱-۲- نیروگاه‌های آبی ساده

از نظر زمان راه‌اندازی این نیروگاه‌ها سریع‌تر از نیروگاه‌های حرارتی می‌باشند. هزینه سرمایه-گذاری اولیه و زمان اجرای پروژه احداث به علت امر طولانی بودن فاز مطالعات هیدرولوژیکی این نیروگاه‌ها نسبت به نیروگاه‌های حرارتی بیشتر بوده است. از طرفی به دلیل عدم استفاده‌ی سوخت دارای هزینه‌ی بهره‌برداری بسیار پایینی بوده و از این رو به عنوان تأمین‌کننده‌ی بار پایه در سیستم-های قدرت در نظر گرفته می‌شوند. البته همان طور که گفته شد محدودیت بهره‌برداری آب و همچنین محدودیت در سطح ذخیره‌سازی مخازن در بهره‌برداری واحدهای آبی برای حفظ تولید و امنیت سد باید در نظر گرفته شود. از این رو برای برنامه‌ریزی کامل در سیستم‌ها متشکل از واحدهای حرارتی و برقابی بهتر است محدودیت‌های بهره‌برداری هر دو نوع واحد تولیدی لحاظ شود که برنامه-ریزی گرمابی[1] معروف است. قید مربوط به واحدهای آبی به صورت زیر می‌باشد: [۸]

$$\begin{aligned} &hydro\ constra\text{int} \\ &s_k^{t+1} = s_k^t + f_k^t - W_K(P_k^t) \qquad (۱-۲) \\ &s_k^{\min} \le s_k^t \le s_k^{\max} \end{aligned}$$

در رابطه‌ی بالا $s_k^{t+1}$، $s_k^t$، $f_k^t$ و $W_K(P_k^t)$ به ترتیب حجم آب پشت سد در زمان $t+1$ ، حجم آب پشت سد در زمان $t$ ، جریان ورودی آب به سد (از آنجا که تفاضل بازه‌ی زمانی برابر با واحد می-باشد، بُعد دبی در این بازه نیز مترمکعب می‌باشد) و تابع تخلیه که حجم آب تخلیه‌شده را با توجه به توان تولیدی نشان می‌دهد. از جمله عیوب این نیروگاه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه‌های آبی محدود هستند.

۲) بیشتر نیروگاه‌های آبی از مراکز تجمع جمعیت دور هستند و باید برای انتقال آن‌ها نیز هزینه‌ای صرف کرد.

1 - Hydrothermal Scheduling

۳) وابستگی شدید به میزان آب ورودی است و از آنجای که میزان آب پشت سد به بارش‌ها وابسته است و در صورتی که میزان بارش برف و باران کاهش یابد میزان تولید انرژی الکتریکی نیز کاهش می‌یابد.

## ۲-۲-۲-۲- نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای

این نیروگاه‌ها در واقع از دو سد متوالی تشکیل می‌شوند. در واقع کار این نوع نیروگاه‌ها ذخیره‌ی انرژی الکتریکی می‌باشد. الکتریسیته‌ی ارزان را در مواقعی که تقاضای زیاد نیست می‌توان با استفاده از واحدهای کارآمد سوخت فسیلی یا هسته‌ای تهیه‌کرده و به کمک آن آب را از مخزن پایین به مخزن ذخیره‌ی سطح بالاتر پمپاژ کرد. [۵] در ساعات حداکثر تقاضا و یا مواقعی که نیاز اضطراری به وجود می‌آید به آب اجازه داده می‌شود که تحت نیروی جاذبه جریان یابد و از هد هیدرولیکی آن برای تولید برق استفاده شود. بدین وسیله استفاده‌ی شایانی از بهترین نیروگاه‌های حرارتی موجود در سیستم به عمل می‌آید و برق در زمان‌های حداکثر تقاضا با هزینه‌ی کمتری تهیه می‌شود. در غیر این صورت می‌بایست با استفاده از نیروگاه‌های کم بازده‌تر تولید می‌شد، در واقع مقدار سوختی که صرفه‌جویی می‌شود بیشتر از مقدار سوختی است که برای تهیه‌ی انرژی جهت پمپاژ آب مصرف می‌شود. به دلیل کمتر پیچیده بودن طراحی، این نیروگاه‌ها هزینه‌ی احداث کمتری نسبت به نیروگاه حرارتی دارند و هزینه‌ی کارکنانی[1] آن‌ها نیز کمتر است؛ اما از آنجا که به صورت بالقوه نمی‌توانند برق تولید کند، در شرایط عادی شبکه مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. از این رو این‌گونه واحدها معمولاً به عنوان ظرفیت ذخیره چرخان در نظر گرفته می‌شوند. در واقع در طول دوره‌ای زمانی که هزینه تولید واحدهای حرارتی به حداکثر می‌رسد، واحدهای آبی تلمبه ذخیره‌ای مورد استفاده واقع می‌شوند و در سایر اوقات، به عنوان ظرفیت ذخیره‌ای که به سهولت می‌تواند در دسترس قرار گیرد مورد نظر می‌باشند. [۹]

1 - Personnel Cost

## ۲-۲-۳- نیروگاه‌های هسته‌ای

این نیروگاه‌ها بر پایه‌ی فناوری هسته‌ای، با کنترل فرآیند شکافت هسته‌ای از گرمای تولید شده‌ی انرژی هسته‌ای اقدام به تولید انرژی الکتریکی می‌کند. کنترل انرژی هسته‌ای با حفظ تعادل در فرآیند شکافت هسته‌ای همراه است که با استفاده از گرمای تولیدی برای تولید بخار آب اقدام به چرخاندن توربین‌های بخار و به دنبال آن ژنراتورها می‌کند. سوخت این نیروگاه‌ها اورانیوم غنی‌شده می‌باشد که به صورت میله‌های سوختی استفاده می‌شود. مسائل امنیتی پیرامون این نیروگاه همواره سایه‌ای بزرگ بر روی افزایش استفاده از این نیروگاه گذاشته است. چرا که با انفجار نیروگاه محوطه‌ای به شعاع ۲۰ کیلومتر به شدت آلوده می‌شود و هیچ موجود زنده‌ای را باقی نمی‌گذارد و در اثرات تخریبی ژنتیکی تا ۱۰ نسل را بر روی محوطه‌ی بزرگ‌تری در حدود شعاع ۴۰ کیلومتر باقی خواهد گذاشت. به طور مثال این مسئله به خوبی در روند تولیدی برق آمریکا قابل مشاهده است؛ [۳] که در انتهای همین فصل به آن اشاره می‌شود. هزینه احداث در این نیروگاه‌ها شامل هزینه ساخت راکتور، هزینه ساخت مراکز معدنی، هزینه ساخت مراکز تبدیل مواد خام به سوخت هسته‌ای، هزینه مسائل امنیتی، هزینه ساخت مراکز بازپروری هسته‌ای و انبارهای هسته‌ای برای دفن ضایعات هسته‌ای است. از این رو هزینه‌ی اولیه بالاتری نسبت به دیگر نیروگاه دارند.

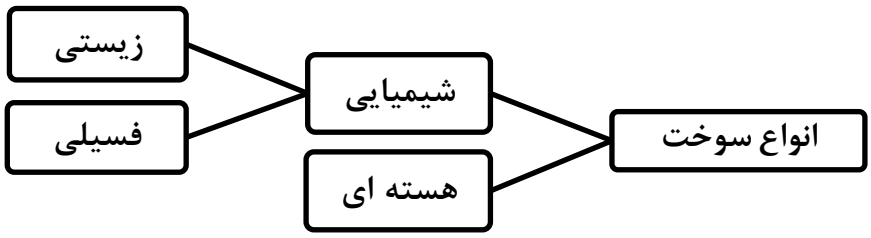
مسئله‌ی مصرف سوخت و چرخه‌ی تعویض میله‌های سوخت با یک ثابت زمانی بزرگ که به دینامیک آهسته نیز بیان می‌شود، همراه است. با توجه به دو دلیل مهم ذکر شده در بالا یعنی عدم مشکل در بحث سوخت‌مصرفی در کوتاه مدت (بخاطر ثابت زمانی بالا در بحث سوخت رسانی) و هزینه‌ی اولیه بالا از این نیروگاه‌ها به عنوان تأمین‌کننده‌ی بار پایه استفاده می‌شود. در برنامه‌ریزی اقتصادی تولید، برق تولیدشده از این نیروگاه‌ها را به عنوان ورودی مستقیم به سیستم انتقال برق در نظر می‌گیرند.

## ۲-۲-۴- نیروگاه تجدید پذیر

به نیروگاه‌هایی اطلاق می‌شود که با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر برق تولید می‌کنند. مزیت عمده‌ی این نیروگاه‌ها نسبت به دیگر نیروگاه‌ها عدم آلودگی زیست‌محیطی و هزینه‌ی سوخت می‌باشد. در حال حاضر در میان این دسته از نیروگاه‌ها، نیروگاه‌های توربین بادی توسعه‌ی بیشتر داشته‌اند. از جمله معایب این دسته از نیروگاه‌ها می‌توان به هزینه‌ی اولیه بالا و عدم قطعیت در تولید اشاره کرد. همچنین مسئله‌ی جا یابی برای برخی از این دسته از نیروگاه باعث محدودیت در مکان احداث آن‌ها می‌شود که به عنوان یک عیب مطرح می‌باشد.

## ۲-۳- منابع سوختی

سوخت ماده‌ای است که در اثر تغییرات (معمولاً شیمیایی) تولید انرژی مفید گرمایی می‌کند. این تغییرات معمولاً با سوختن (ترکیب با اکسیژن) همراه است. از جمله فرایندهای مورد استفاده برای تبدیل سوخت به انرژی عبارتند از : واکنش‌های شیمیایی مختلف و گرمازا و واکنش‌های هسته‌ای مانند شکافت هسته‌ای یا گداخت هسته‌ای. از این رو در حالت کلی منابعی سوختی به دو دسته‌ی شیمیایی و هسته‌ای تقسیم می‌شوند. سوخت‌های شیمیایی خود به دو دسته‌ی سوخت‌های فسیلی و زیستی قابل تقسیم‌اند. شکل ۲-۱ نحوی این تقسیم‌بندی را نشان می‌دهد.




شکل ۲-۱ : تقسیم‌بندی کلی سوخت‌ها از منظر فرایند تبدیل انرژی

مصارف نیروگاهی سوخت‌های زیستی در مقابل سوخت‌های فسیلی بسیار کم است. با این حال این سوخت‌ها جزء انرژی تجدید پذیر به حساب می‌آیند. در ادامه به ذکر خصوصیات برخی از سوخت-های فسیلی مهم می‌پردازیم و مسائل مربوط به حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی‌شان را بیان می‌کنیم.

## ۲-۳-۱- گاز طبیعی [1]

گاز طبیعی که معمولاً به آن گاز گفته می‌شود نوعی سوخت فسیلی گازی شکل است. گازی طبیعی سوختی است که معمولاً اثرات زیان‌آور کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارد. گاز طبیعی بعد از هیدروژن پاک‌ترین نوع سوخت فسیلی برای طبیعت است. هر مترمکعب گاز طبیعی به طور متوسط ده هزار کیلوکالری ارزش حرارتی دارد، امّا این مقدار اسمی است و ارزش حرارتی دقیق گاز طبیعی هر میدان گازی، تابع ترکیبات آن بوده و به طور کلی هر چه درصد متان در گاز طبیعی بیشتر باشد ارزش حرارتی آن پایین‌تر است. ارزش حرارتی یک مترمکعب گاز طبیعی در شرایط استاندارد تقریباً برابر با ارزش حرارتی یک لیتر بنزین می‌باشد. از این رو ذخیره‌سازی این نوع سوخت بسیار هزینه‌بر است و به همین دلیل نیروگاه‌ها آن را به طور مستقیم از طریق خطوط لوله‌ی گاز دریافت کرده و مصرف می‌کنند.

### ۲-۳-۱-۱- دلایل مطلوبیت ویژه‌ی گاز طبیعی

تقاضای جهانی انرژی طی دویست سال اخیر به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی به سمت سوخت‌هایی با محتوای کربن کمتر متمایل شده است. طی این مدت انرژی مورد نیاز انسان از چوب (با محتوای کربن ۱/۲۵ نسبت به هیدروژن موجود در آن) به زغال‌سنگ سپس به نفت و در حال حاضر به گاز طبیعی (گاز متان با میزان کربن ۶۵٪) تغییر نموده است. گاز طبیعی در هر واحد انرژی حدود ۲۴ درصد نسبت به نفت خام و ۴۲ درصد نسبت به زغال‌سنگ گازهای آلاینده کمتری تولید

1 - Natural Gas

می‌کند و این بیان‌گر آن است که می‌توان انرژی بیشتری مصرف و در مقایسه با نفت خام و زغال‌سنگ، آلاینده‌های کمتری تولید کرد. مصرف گاز طبیعی در دهه ۱۹۹۰ در اروپا به شدت افزایش‌یافته، به طوری که در آلمان۳۰ درصد، در ایتالیا ۵۰ درصد و در انگلیس ۱۰۰ درصد رشد داشته است و در مقابل تولید گاز آلاینده $CO_2$ ، به همین نسبت کاهش یافته است[۱].

## ۲-۳-۲- زغال‌سنگ

با توجه به شرایط زمین‌شناسی تشکیل زغال‌سنگ و میزان ترکیبات همراه آن، زغال‌سنگ دارای انواع متنوعی می‌باشد. آنتراسیت بالاترین رتبه از زغال‌سنگ از نظر کیفیت است که مقدار کربن بیش از ۹۰٪ را دارا می‌باشد. این ماده از سوخت‌های که دارای پتانسیل آلودگی بالا هستند به شمار می‌رود. از طرفی به علت محدود بودن ذخایر گاز طبیعی و عدم دسترسی اکثر کشورها به آن و شیوه تشکیل ساده‌تر ذغال‌سنگ، همچنان این ماده یکی از رایج‌ترین نوع سوخت فسیلی مصرفی برای تولید برق می‌باشد[۲].

به دلیل بازده‌ی حرارتی کم این نوع سوخت نسبت به سوخت‌های دیگر مسئله‌ی حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. مخازن مربوط به ذخیره‌سازی این نوع سوخت نسبت به دیگر سوخت‌ها از نظر حجمی بزرگ‌تر بوده و معمولاً از طریق خطوط راه‌آهن مخصوص منتهی به نیروگاه، منتقل می‌شوند. [۵] به دلیل هزینه‌ی بالای ساخت مخازن در بحث ذخیره‌سازی و حجم زیاد مورد نیاز در بحث حمل‌ونقل، معمولاً نیروگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز در نزدیکی معادن زغال‌سنگی احداث شده‌اند. از طرف دیگر به دلیل مقرون به صرفه نبودن بحث ذخیره‌سازی زغال‌سنگ، این نوع سوخت به عنوان سوخت دوم استفاده نمی‌شود و معمولاً به عنوان سوخت اول در نیرگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز مورد استفاده قرار می‌گیرید.

---

۱ - داود کیانی .مشارکت انرژی روسیه-اتحادیه اروپا .پژوهشکده مطالعات راهبردی، ش. ۸ (مرداد ۱۳۸۶): ۱۴۸.

۲ - فرهنگ بزرگ مواد . نوشته مهندس پرویز فرهنگ، چاپ اول ، ۱۳۷۹، انتشارات سپیده سحر

## ۲-۳-۳- نفت کوره یا مازوت

نفت کوره یا مازوت یکی از هیدروکربن‌های نفتی است که در مراحل تصفیه‌ی نفت خام پس از اتر و بنزین به دست می‌آید و چون سیاه رنگ است به نام نفت سیاه نیز شهرت یافته است. این سوخت همچون گازوئیل به صورت مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتقال این نوع سوخت توسط تانکرهای باربری از طریق جاده و یا راه‌های آبی و ریلی صورت می‌پذیرد. مازوت و گازوئیل از جمله سوخت‌های فسیلی مورد استفاده به عنوان سوخت دوم نیروگاه‌های برق می‌باشند.

جدول ۲-۲، مشخصات برخی از سوخت‌های فسیلی رایج را در بر دارد. منظور از محتوای انرژی یک سوخت، مقدار انرژی شیمیایی ذخیره‌شده در یک کیلوگرم از جرم آن است که با سوختن ماده‌ی سوختی، به صورت انرژی گرمایی آزاد می‌شود. با مقایسه تفاوت شاخص‌های یادشده در این جدول به خوبی می‌توان برتری هر یک از سوخت‌ها را نسبت به دیگر سوخت‌ها ارزیابی کرد.

جدول ۲-۲ : مشخصات منابع سوختی مختلف [۱]

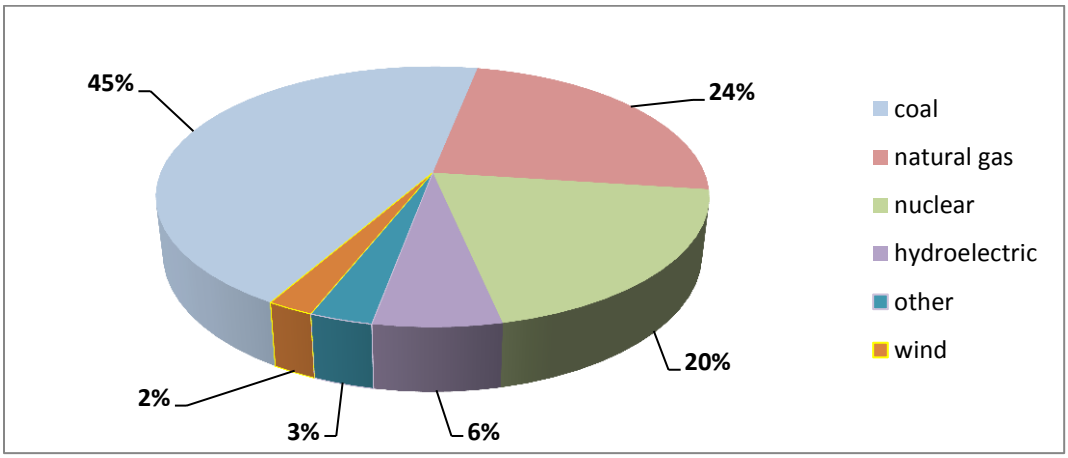
| نام فارسی | نام لاتین | چگالی ($Kg/m^3$) | درصد کربن | محتوای انرژی (MJ/Kg) | واحد اندازه-گیری تجاری |
|---|---|---|---|---|---|
| **گاز طبیعی** | Natural Gas | ۰.۷۱۲[2] | ٪۶۷ | ۴۵ | $m^3$ |
| **گازوئیل** | Gas oil (Diesel) | ۸۲۰ | ٪۸۸ | ۴۳.۲ | *liters* |
| **زغال‌سنگ (آنتراسیت)** | Anthracite | ۱۰۵۰ | ٪۹۲ | ۳۲.۵۶ | *ton* |
| **الکل چوب** | Methanol | ۷۹۲ | ٪۵۲ | ۲۶.۹ | *liters* |

۱ - بر گرفته از سایت www.wolframalpha.com

۲ - در دما و فشار استاندارد (۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۱ اتمسفر)

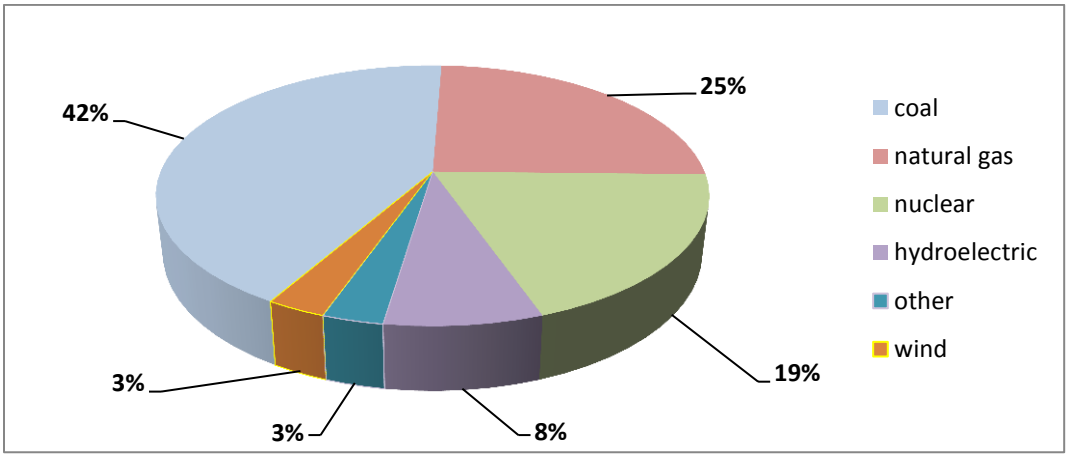
## ۲-۴- تولید در نقاط مختلف

آنچه که در این فصل تا به حال بیان شد مطالبی پیرامون تولید برق توسط نیروگاه‌های مختلف، مزایا و معایب آن‌ها بوده است. همچنین با بیان ویژگی برخی از مهم‌ترین سوخت‌های فسیلی سعی بر آن شد، مسائل مختلف مربوط به انتقال و ذخیره‌سازی هر یک بیان شود. همان طور که اشاره شد نیروگاه‌های سوخت به خاطر مزایایشان همچنان سهم عمده‌ای در تولید برق را دارند. در این قسمت با ذکر اطلاعاتی و آماری که در عمل در تولید برق با آن روبرو هستم، سعی بر آن می‌شود که مطالب بیان‌شده بهتر درک شود. شکل ۲-۲ و ۲-۳ به ترتیب سهم تولید خالص برق به تفکیک منبع انرژی در ایالات‌متحده، برای سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ را نشان می‌دهد. به ترتیب توان تولیدی در این دو سال بالغ به ۴۱۲۵۰۶۰ و ۴۱۰۰۶۵۶ هزار مگاوات ساعت می‌باشد [۳].



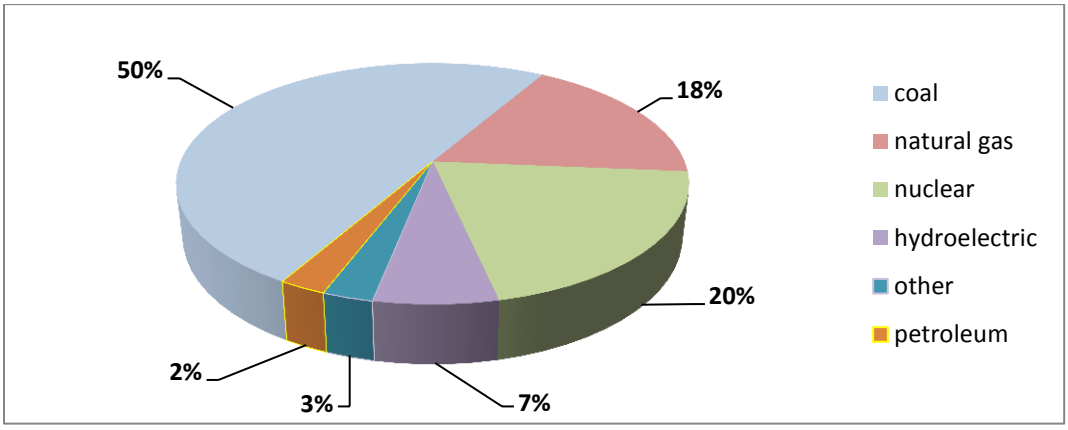

شکل ۲-۲ : سهم تولید خالص برق به تفکیک منبع انرژی در ایالات‌متحده در سال ۲۰۱۰

آنچه که این نمودارها نشان می‌دهند، این است که سبد سرمایه‌گذاری تولید تحت سلطه‌ی سوخت‌های فسیلی است که حدود ۷۰ درصد از کل تولید خالص برق آمریکا را بر عهده‌دارند. زغال‌سنگ و گاز طبیعی مهم‌ترین سوخت‌های فسیلی در این کشور می‌باشند که به ترتیب عهده‌دار تقریباً ۴۲٪ و ۲۵٪ از کل تولید خالص برق می‌باشند




شکل ۲-۳ : سهم تولید خالص برق به تفکیک منبع انرژی در ایالات‌متحده در سال ۲۰۱۱

شکل ۲-۴ سهم تولید خالص برق به تفکیک منبع انرژی در ایالات‌متحده، برای سال ۲۰۰۲ را نشان می‌دهد. [۱۰]




شکل ۲-۴ : سهم تولید خالص برق به تفکیک منبع انرژی در ایالات‌متحده در سال ۲۰۰۲

مقایسه این نمودار با دو نمودار تولید در سال‌های اخیر نکات قابل‌توجهی را به ما نشان می‌دهد که برخی از این نکات عبارتند از:

۱) افزایش سهم گاز طبیعی از ۱۸٪ تولید در سال ۲۰۰۲ به ۲۵٪ در سال ۲۰۱۱.

۲) کاهش سهم سوخت ذغال‌سنگ از ۵۰٪ تولید به ۴۲٪ در سال ۲۰۱۱.

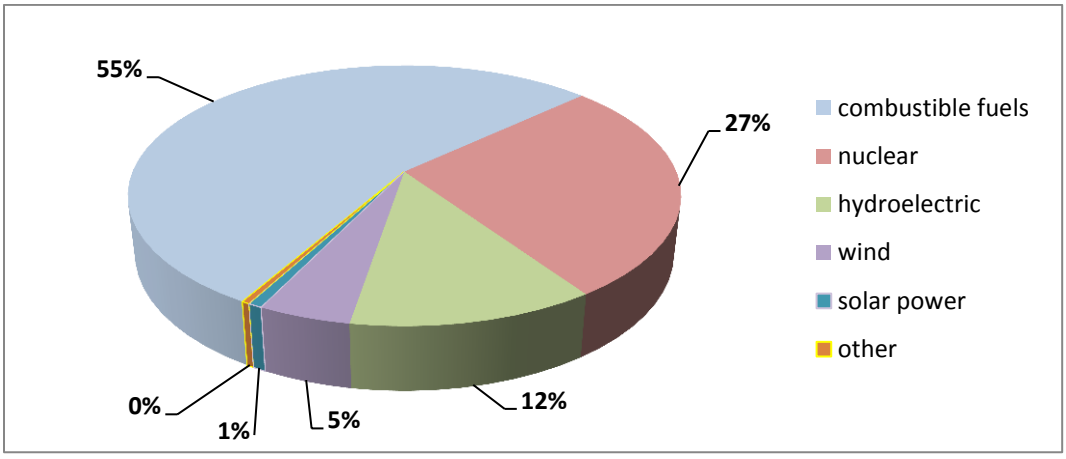
۳) افزایش سهم تولید انرژی‌های نو (انرژی توربین بادی) به ۳٪ در سال ۲۰۱۱.

۴) کاهش اندک ۱٪ در تولید برق از طریق سوخت هسته‌ای.

افزایش سهم تولید از طریق سوخت گاز طبیعی و انرژی تجدید پذیر به علت آلایندگی کم و پاک بودن آن‌ها می‌باشد. از طرف دیگر آلایندگی بالای زغال‌سنگ کاهش سهم تولید این سوخت را در بر داشته است. از آنجا که ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای زمان‌بر و همچنین هزینه‌ی ساخت نسبتاً بالایی دارد توسعه‌ی تولید از طریق این نیروگاه‌ها نه تنها صعودی بلکه نزولی نیز بوده است. از دیگر علت‌های این کاهش می‌توان به آثار سوء و تخریبی زیست‌محیطی به دلیل تولید زباله‌ی هسته‌ای و مسائل امنیتی پیرامون آن نام برد. ترکیب تولید برق در کشورهای مختلف به طور قابل‌توجهی متفاوت است و مهم‌ترین عوامل موثر بر آن عبارتند از: [۱]

۱) وجود ذخایر طبیعی از سوخت‌های فسیلی یا انرژی‌های تجدید پذیر
۲) سیاست و افکار اجتماعی / فرهنگی در رابطه با یارانه‌های بخش انرژی
۳) سیاست و افکار اجتماعی / فرهنگی در رابطه با تولید گازهای گلخانه‌ای، انرژی‌های تجدید پذیر و مسائل مرتبط
۴) زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی
۵) شرایط آب و هوایی

به طور مثال ترکیب تولید انرژی در اروپا در سال ۲۰۱۰ در نمودار شکل ۲-۵ آمده است. به دلیل کمبود منابع سوخت فسیلی در این قاره نسبت به آمریکا سهم تولید نیروگاه‌های سوخت فسیلی در آن کمتر می‌باشد. ولی با این حال در این قاره نیز سوخت‌های فسیلی بیش‌ترین سهم تولیدی را دارند. [۲]




شکل ۲-۵ : ترکیب تولید انرژی در اروپا در سال ۲۰۱۰

در ایران با توجه به ذخایر غنی سوخت فسیلی، سهم نیروگاه‌های سوخت فسیلی بیشتر می-باشد. سهم تولید از نیروگاه‌های مختلف کشور در سال ۱۳۹۱ به شرح زیر است: [۱۱]

۱) تولید نیروگاه‌های بخاری برابر با ۳۶/۱ درصد از کل تولید

۲) تولید نیروگاه‌های چرخه ترکیبی برابر با ۳۱/۷ درصد از کل تولید

۳) تولید نیروگاه‌های گازی برابر با ۲۶/۵ درصد از کل تولید

۴) تولید نیروگاه‌های برقابی برابر با ۴/۹ درصد از کل تولید

۵) تولید نیروگاه اتمی برابر با ۰/۷ درصد از کل تولید

۶) تولید نیروگاه‌های دیزلی و برق بادی و انرژی‌های نو برابر با ۰/۱ درصد از کل تولید

همان طور که از آمار بالا مشخص است، سوخت‌های فسیلی ۹۴٪ از کل تولید برق ایران را شامل بوده‌اند که در این میان سهم گاز طبیعی، نفت کوره و گازوئیل به ترتیب ۶۴٪، ۲۴٪ و ۱۲٪ از کل سوخت‌های مصرفی شبکه قدرت ایران می‌باشد.

# فصل ۳

# مروری بر کار دیگران

## ۳-۱- مقدمه

آنچه در این فصل به دنبال آن هستیم بررسی کلی بر مسائل برنامه‌ریزی سوخت، مدیریت تولید برق و کارهای صورت گرفته در این دو حوضه می‌باشد. همواره مسئله برنامه‌ریزی سوخت و طرح‌های تأمین سوختی به علت درگیری چند سیستمی و گستردگی ابعادی مسئله، جزء مسائل سخت بهره‌برداری بوده‌اند. از طرفی دیگر بهره‌برداران و برنامه‌ریزان سیستم برای دستیابی به یک مدیریت صحیح تولید در شبکه‌ی برق همواره در پی مدلسازی عوامل موثر در تولید برق بوده‌اند. در ابتدا هدف از پخش بار اقتصادی بین نیروگاه‌های سوخت فسیلی حداقل کردن هزینه‌ی بهره‌برداری مطرح می‌شده است اما پس از افزایش تولید و مصرف برق که منجر به گسترده‌تر شدن شبکه‌ی برق[1] شد شناخت بیشتری نسبت به عوامل مختلف شکل گرفت. این عوامل با توجه به نیازهای موجود و همچنین مشکلات به وجود آمده صورت پذیرفت.

در نظر گرفتن این عوامل در تولید و بهره‌برداری برق که منجر به افزایش ابعاد مسئله پخش بار اقتصادی شد، باهدف رفع مشکلات و آثار سو آن‌ها انجام‌شده است. به عنوان مثال به علت حساسیت افکار عمومی نسبت به مسائل زیست‌محیطی و آلودگی، مسئله پخش بار اقتصادی به این صورت تغیر شکل داده است که حداقل کردن آلودگی و حتی‌المقدور حفظ منابع سوختی و درعین‌حال حداقل کردن هزینه، هدف می‌باشد. همچنین با پیشرفت صنعت بالأخص صنایع حساس، نیاز به برق مناسب و خاموشی حداقل، مورد توجه بهره‌برداران قرار گرفته است. اهمیت این موضوع منجر به توجه بیشتر به مسائل امنیتی[2] شبکه شده است تا با در نظر گرفتن این مسائل در مسئله پخش بار اقتصادی قابلیت اطمینان[3] در تولید را بالا برد و ریسک تولید را کاهش داد.

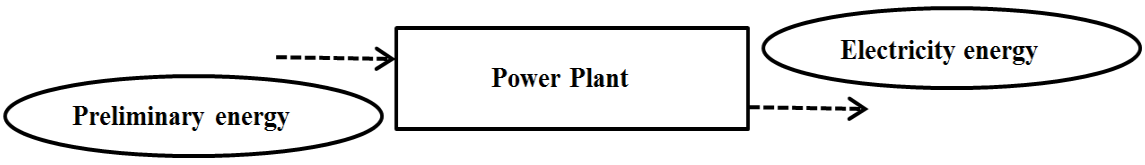
1 - Power Grid
2 - Security
3 - Reliability

## ۳-۲- برنامه‌ریزی سوخت

همواره محدودیت‌های سوخت به عنوان یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های بهره‌برداری نیروگاه‌های حرارتی مد نظر بوده است. [۱۲-۱۳] لازمه‌ی بهره‌برداری اقتصادی از یک سیستم قدرت این است که مصرف سوخت در طی دوره به خصوصی به حداقل برسد. [۹] در محیط تجدید ساختار[۱] محدودیت سوخت-رسانی همواره به شکل قراردادهای تأمین سوخت[۲] در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی مسئله‌ی تأمین سوخت در این محیط را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد، قراردادهای کوتاه مدت و قراردادهای بلند مدت که در قالب برنامه‌ریزی تخصیص بودجه سوخت[۳] مطرح می‌باشد. قراردادهای کوتاه مدت به روش برداشت یا پرداخت[۴] نیروگاه‌ها را ملزم به مصرف حداقلی سوخت می‌کند. این نوع قراردادها به صورت یک محدودیت با عنوان محدودیت سوخت[۵] در حل مسئله‌ی در مدار آمدن نیروگاه‌ها[۶] نیز در نظر گرفته می‌شوند. [۱۴-۱۵]

### ۳-۲-۱- محدودیت‌های سوخت‌رسانی [۷]

در حالت کلی انرژی الکتریکی از تبدیل دیگر انرژی‌های موجود حاصل می‌گردد. از جمله این انرژی می‌توان به انرژی ذخیره‌شده در سوخت‌های فسیلی، انرژی پتانسیل ناشی از اختلاف سطح آب، انرژی جنبشی باد، ... نام برد. از این رو موارد نام‌برده را می‌توان به عنوان ورودی سیستم قدرت و نیروگاه‌های آن دانست. شکل ۳-۱ این موضوع را نشان می‌دهد؛ بنابراین محدودیت‌های آن نیز می‌تواند در مدیریت و برنامه-ریزی تولید برق بسیار تأثیرگذار باشد. [۱۶]




شکل ۳-۱: شمای کلی از ورودی و خروجی نیروگاه‌های برق

1 - Restructuring
2 - Fuel Supply Contract
3 - Fuel Budgeting
4 - Take or Pay
5 - Fuel Constraint
6 - Unit Commitment
7 - Fuel Constraint

این محدودیت‌ها بالأخص در مسائل که دوره‌ای برنامه‌ریزی به صورت روزانه و هفتگی می‌باشد بسیار تأثیرگذار بوده است. [۱۷-۱۸] به طور مثال در مسائل توزیع بار اقتصادی روز پیش[1] و مسئله‌ی در مدار آمدن نیروگاه‌ها[2] این قید همواره در نظر گرفته می‌شود. در [۱۲] محدودیت مصرف سوخت به عنوان یک قید امنیتی به صورت در نظر گرفته شده است:

$$F_{FT}^{\min} \le \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i \in FT} [F_{fi}(P_{it}) \times I_{it} + SU_{f,it} + SD_{f,it}] \le F_{FT}^{\max} \qquad (۱۸-۳)$$

در رابطه ۳-۱۸، $F_{fi}(P_{it})$ تابع مصرف سوخت، $F_{FT}^{\max}$ و $F_{FT}^{\min}$ به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مجاز سوخت مصرفی، $SU_{f,it}$ و $SD_{f,it}$ به ترتیب مقدار مصرف سوخت راه‌اندازی و خاموشی واحد $i$ ام در زمان $t$ ام و $I_{it}$ متغیر تعهد واحدها می‌باشد.

## ۳-۲-۲- طرح‌های سوختی

در [۹] و [۱۹] کار قابل‌توجهی پیرامون برنامه‌ریزی تحویل سوخت و استفاده از منابع آب به منظور بهینه‌سازی تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های حرارتی و آبی صورت گرفته است. توسعه مهمی که در [۲۰] صورت گرفته، گنجاندن محدودیت انتشار آلاینده‌ها در مسئله برنامه‌ریزی سوخت بوده است، در [۲۱-۲۲] عدم قطعیت مرتبط با دسترسی زغال‌سنگ برای خرید و میزان گوگرد تولیدی آن نیز دیده شده است. برنامه‌ریزی سوخت ارائه‌شده توسط [۲۳] که در ارتباط با مصرف گاز طبیعی صنعت برق در ابعاد بزرگ است، با نظارت بر حجم قراردادها و فرمولبندی مناسب استفاده از سوخت برای دوره‌های زمانی آتی، از مجازات سوختی که می‌تواند برای نقض قراردادهای سوخت متصور بود اجتناب می‌کند. در [۲۴] روش برنامه‌ریزی خطی باهدف حداقل رساندن هزینه‌های سوخت در ارتباط با خرید و ذخیره‌سازی آن، برای یک مسئله برنامه‌ریزی بهینه‌سازی بلند مدت ارائه می‌شود. در [۲۵] یک مسئله کوتاه مدت برنامه‌ریزی سوخت با استفاده از الگوریتم ژنتیکی و روش شبیه‌سازی تبرید تدریجی[3] حل شده است. وجه مشترک همه روش‌های های برنامه‌ریزی سوخت مذکور این است که آن‌ها سیستم سوخت را تنها از لحاظ قراردادها و مجازات‌های

1 - Day Ahead
2 - Unit Commitment
3 - Simulated Annealing

مرتبط با نقض احتمالی آن در نظر می‌گیرند. بدین ترتیب یک مدیریت یکپارچه تولید برای حفظ منافع کل سیستم صورت نمی‌گیرد. موضوع مهم دیگری که در شرایط بحران ما با آن روبرو هستیم بحث امنیت و حفظ تولید می‌باشد که یک مدیریت تولید یکپارچه و چند سیستمی را برای مقابله با کمبودها می‌طلبد.

## ۳-۲-۳- برنامه‌ریزی یکپارچه

حرکت به سمت تجدید ساختار و رقابت منجر به افزایش سطح تمرکززدایی در تصمیم‌گیری مربوط به انرژی شده است. بدین ترتیب، سیستم‌های قدرت الکتریکی بدون آگاهی از پیامدهای در سایر زیر سیستم‌های انرژی، به طور مثال بدون در نظر گرفتن دینامیک یکپارچه با بازارهای سوخت و دیگر زیرساخت‌ها، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری می‌شوند. این امر تا حدی به دلیل دشواری فرمولبندی یک مدل کامل برای تجزیه و تحلیل در مقیاس بزرگ، پیچیدگی این مسئله و شدت به هم پیوستگی شبکه‌های انرژی یکپارچه است. در نتیجه، معمولاً هر یک از زیر سیستم‌های از روش‌ها و استراتژی‌های خاص با توجه به اهداف ارزشی خود (به عنوان مثال اهداف اقتصادی، فنی، سیاسی و زیست‌محیطی) پشتیبانی می‌شوند، که ممکن است با روش‌ها و استراتژی‌های لازم برای عملکرد کارآمد کلی سازگار نباشد. به طور مثال مدل بهینه‌سازی برای حمل‌ونقل زغال‌سنگ را می‌تواند در [۲۶] یافت. مدل‌های درجه دوم برنامه‌ریزی با توابع هدف پیچیده‌تر در [۲۷] مشاهده شده است. مدل کامل‌تر با اصلاحات اضافی نیز در [۲۸] منتشر شد. در [۲۹]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی فازی تعمیم‌یافته برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید زغال‌سنگ ارائه شده است.

مدل‌های یکپارچه تأمین انرژی به منظور تجزیه و تحلیل، پیش‌بینی و حمایت از برنامه‌ریزی صحیح انرژی در چهارچوب یک سیستم کلی یا محلی می‌توانند بسیار موثر باشند. مرجع [۳۰] یک مرور کلی از برخی از مهم‌ترین آن‌ها را بیان می‌کند. برای مدیریت یکپارچه مدل‌های همچون مدلسازی ملی سیستم انرژی (مدل سیاست انرژی استفاده‌شده توسط وزارت انرژی ایالات‌متحده) و مدل برنامه‌ریزی یکپارچه (مدل

خط مشی زیست‌محیطی استفاده‌شده توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا EPA[1] ) نیز ارائه‌شده‌اند. [۳۱] همان طور که گفته شد به مرور با افزایش سهم گاز طبیعی در تولید برق، تأثیر و نفوذ شبکه‌ی گاز در شبکه‌ی برق و گستردگی این شبکه را شامل شده است. در پی آن بررسی این تأثیرات از سال ۲۰۰۰ میلادی به بعد بیشتر مورد توجه محققان و بهره‌برداران سیستم برق قرار گرفت. مرجع [۳۲] به بررسی تأثیر متقابل شبکه گاز بر روی شبکه‌ی برق می‌پردازد. در محیط رقابتی بازار[2]، همراه با افزایش تقاضا برای برق و گاز طبیعی در زمان اوج بار، در پی افزایش قیمت گاز باعث افزایش هزینه تولید برق می‌شود. [۳۳] با این وجود تا به حال مدل کاملی از محدودیت‌های سوخت‌رسانی ارائه نشده و برنامه‌ریزی همزمان شبکه‌های برق و سوخت‌رسانی به طور کامل صورت نگرفته است. هر چند در سال‌های اخیر بهره‌برداری یکپارچه از دو شبکه سیستم برق و شبکه‌ی گاز ارائه‌شده است [۳۴]، بررسی کامل برای مدیریت تولید برق در شرایط بحران و کمبود سوخت در یک بازه‌ی کوتاه مدت برای جلوگیری از بحران در شبکه برق باهدف رسیدن به اقتصادی‌ترین حالت صورت نگرفته است.

## ۳-۳- مدیریت تولید

مدیریت تولید در شبکه‌ی برق همواره، همراه با مسائل اقتصادی و قیود امنیتی شبکه صورت می-گیرید. به طور کلی در سیستم‌های قدرت این حوضه به دو شاخه‌ی اصلی یعنی بهره‌برداری و برنامه‌ریزی در تولید تقسیم می‌شود. توزیع اقتصادی بار و پخش بار بهینه از جمله مسائل مهم و کاربردی در این حوضه می‌باشند. هر یک از این دو مسئله خود نیز به دو دسته قابل تقسیم بوده که عبارتند از:

۱) پخش بار و توزیع بار قطعی

۲) پخش بار احتمالاتی و توزیع بار پیشامدی

دسته‌ی دوم نام‌برده از انواع پخش بارها معمولاً برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه مورد استفاده قرارگرفته و از این رو بیشتر در مطالعات بلندمدت طراحی و توسعه‌ی سیستم کاربرد دارند. بدین ترتیب از

1 - Environmental Protection Agency
2 - Competitive Market Environment

آنجا که موضوع این پایان‌نامه، موضوعی در حوضه‌ی بهره‌برداری می‌باشد و از پخش بارهای قطعی استفاده گردیده است، در این قسمت به بیان مختصری از این نوع پخش بارها بسنده می‌کنیم. از طرف دیگر از آنجا که موضوع کارشده در این پروژه را می‌توان به نحوی یک نوع پخش بار توسعه‌یافته دانست، در این قسمت اشاره‌ی کوچکی به سیر توسعه و گسترش مسئله پخش بار و توزیع اقتصادی بار می‌شود. سیر توسعه و گسترش ابعاد مسئله پخش بار ضمن آنکه یک دید روشن در رابطه با این موضوع به خواننده می‌دهد، او را نیز با عوامل و علت‌های که موجب این گسترش ابعادی شده‌اند، آشنا می‌سازد.

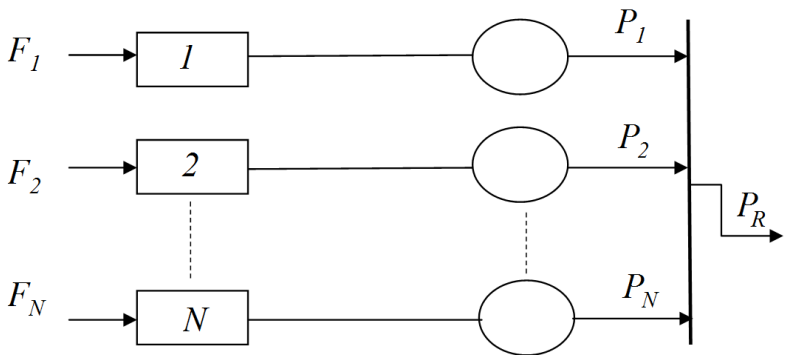
## ۳-۳-۱- مسئله‌ی توزیع اقتصادی بار

شکل ۳-۲ ترکیبی از سیستم قدرت که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. این سیستم شامل $N$ واحد تولید حرارتی است که از طریق یک شین بار الکتریکی $P_R$ را تأمین می‌نماید. ورودی به هر واحد که با $F_i$ نشان داده شده است نمایشگر نرخ هزینه واحد است. خروجی هر واحد که با $P_i$ مشخص شده است در حقیقت توان الکتریکی تولیدی واحد مربوطه می‌باشد. طبعاً نرخ هزینه کل سیستم برابر با مجموع نرخ هزینه‌های واحدها می‌باشد. قید اساسی در بهره‌برداری این سیستم آن است که مجموع توان‌های خروجی باید مساوی بار کل باشد.

از نظر ریاضی مسئله می‌تواند به صورت دقیقی بیان شود، به این ترتیب که تابعی به اسم $F_T$ به عنوان تابع هدف تعریف می‌شود که مساوی با هزینه کل واحدها جهت تغذیه بار می‌باشد. در این صورت مسئله، حداقل کردن $F_T$ است در صورتی که قید مساوی بودن مجموع تولید با بار به طور همزمان اعمال گردد. در ساده‌ترین حالت در نظرگرفته شده از تلفات انتقال صرف‌نظر شده و هیچ‌گونه محدودیت بهره-برداری در مسئله صریحاً ذکر نشده است؛ بنابراین:

$$Min \quad F_T = F_1 + F_2 + ... + F_N = \sum_{i=1}^{N} F_i(P_i) \qquad (۱-۳)$$

$$Subject\ to: \qquad \phi = P_R - \sum_{i=1}^{N} P_i = 0 \qquad (۲-۳)$$




شکل ۳-۲: سیستم شامل $N$ واحد حرارتی جهت تغذیه بار $P_R$

موضوع فوق یک مسئله بهینه‌سازی با وجود قید است که می‌تواند از روش‌های مختلف ریاضی شامل تابع لاگرانژ مورد بررسی قرار گیرد. به منظور تعیین شرایط لازم جهت مقدار حد تابع هدف کافی است که تابع قید را بعد از ضرب در یک ضریب نامشخص با تابع هدف جمع نماییم. تابع حاصل که به تابع لاگرانژ مشهور است در معادله (۳-۳) نشان داده شده است:

$$L = F_T + \lambda.\phi \qquad (۳-۳)$$

شرایط لازم برای تعیین حد تابع هدف به این ترتیب به دست می‌آید که مشتق تابع لاگرانژ نسبت به هر کدام از متغییرهای مستقل را به دست آورده و آن‌ها را مساوی صفر قرار دهیم. در این حالت $N+1$ متغیر وجود دارد که شامل $N$ مقدار توان خروجی $P_i$ به علاوه ضریب نامشخص لاگرانژ $\lambda$ است. مشتق تابع لاگرانژ نسبت به $\lambda$ منجر به همان تابع قید می‌شود. از طرف دیگر مشتق جزئی تابع لاگرانژ نسبت به توان‌های خروجی منجر به مجموعه معادلات (۳-۴) می‌شود.

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0 \;\rightarrow\; \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \qquad (۴-۳)$$

بنابراین شرط لازم برای وجود حداقل جهت هزینه بهره‌برداری یک سیستم قدرت متشکل از نیروگاه‌های حرارتی آن است که نرخ افزایشی هزینه تمام واحدهای مساوی با ضریب نامشخصی به اسم $\lambda$ باشد. علاوه بر این شرط لازم مربوط به معادله قید (۳-۲) را هم باید اضافه کنیم. به علاوه جهت هر واحد دو نامساوی، یکی شامل کوچک‌تر بودن توان از حداکثر توان مجاز و دیگری بزرگ‌تر بودن آن از حداقل توان

مجاز وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. این شرایط و نامساوی‌ها به صورت مجموعه معادلات (۳-۵) الی (۳-۷) خلاصه‌شده‌اند. [۹]

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \qquad (۳-۵)$$

$$P_{i_\min} \le P_i \le P_{i_\max} \qquad (۳-۶)$$

$$\sum_{i=1}^{N} P_i = P_R \qquad (۳-۷)$$

## ۳-۳-۲- گسترش در تابع هزینه

معمولاً تابع هزینه نیروگاه‌های حرارتی به صورت منحنی درجه دوم در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که این نیروگاه‌ها در رنج تولیدی خود، دارای تابع هزینه‌ای با ضریب درجه دوم بسیار کمتری نسبت به ضریب درجه اول و ضریب ثابت می‌باشند، [۳۵] تابع هزینه آن را می‌توان با تقریب مناسبی در بازه‌ی تولیدی به صورت یک منحنی درجه اول در نظر گرفت. در مراجع و مقالات مختلف مباحث گوناگونی پیرامون تشکیل تابع هزینه‌ی مسئله‌ی پخش بار، با اهداف مختلف برای رسیدن به یک مدیریت صحیح تولید صورت گرفته است. در این قسمت به بیان برخی از این موارد کار شده در مقالات و مراجع علمی معتبر می‌پردازیم.

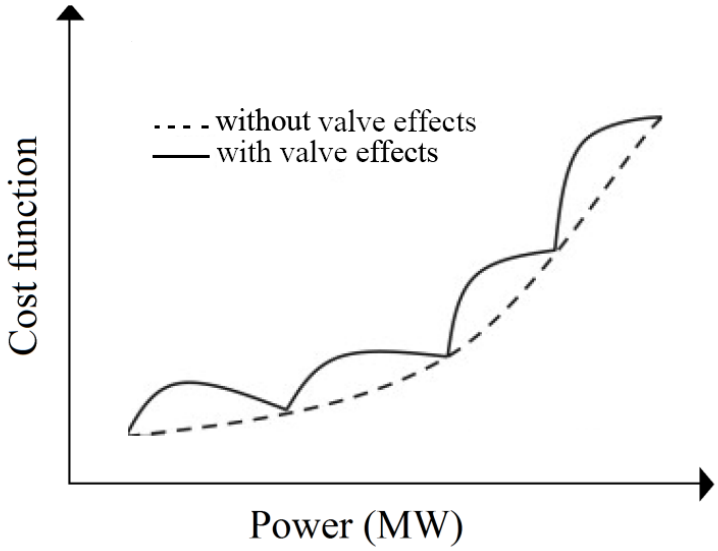
### ۳-۳-۲-۱- تابع هدف ناصاف همراه با تأثیر دریچه‌ی سوخت [۱]

تأثیر دریچه‌ی سوخت به روی تابع هزینه باعث پیچیدگی و غیر محدب شدن آن می‌شود. [۳۶] هنگامی که دریچه باز می‌شود، حرارت به طور ناگهانی افزایش‌یافته و در نتیجه تلفات به سرعت زیاد می‌شود. تأثیر نقاط دریچه‌ی سوخت[۲] به صورت یک موج در منحنی نرخ حرارتی معرفی می‌شود و یک تابع هدف ناپیوسته، غیر محدب[۳] و با چندین کمینه را ایجاد می‌کند. [۳۷] هزینه سوخت واحد $i$ ام را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۳-۱۱ زیر محاسبه کرد:

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + \left| e_i \times \sin(f_i \times (P_{i,\min} - P_i)) \right| \qquad (۳-۱۱)$$

1 - Non-Smooth Cost Functions With Valve-Point Effects
2 - Valve Point Effect
3 - Non-Convex

پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن تأثیر نقاط دریچه توسط روش‌ها هوشمند از جمله برنامه‌ریزی تکاملی (EP) [۳۸]، جستجو تابو (TS) [۳۹]، برنامه‌ریزی تفاضلی (DE) [۴۰]، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) [۴۱-۴۳] حل شده است. منحنی تابع هزینه با در نظر گرفتن تأثیر دریچه‌ی سوخت در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.




شکل ۳-۳ : منحنی تابع هزینه با در نظر گرفتن تأثیر دریچه‌ی سوخت [۴۴]

## ۳-۳-۲-۲- تابع هدف همراه با انتخاب متعدد سوخت [1]

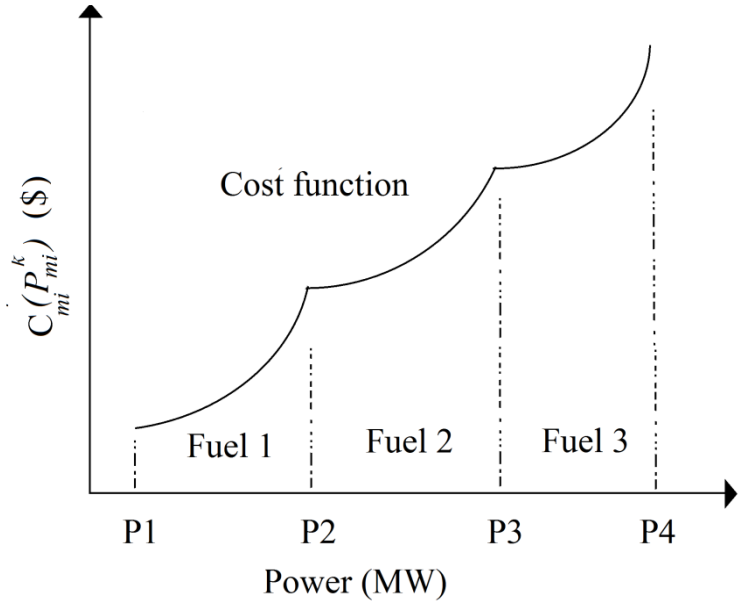
هنگامی که واحدهای تولیدی با منابع سوخت‌های مختلف عرضه می‌شود، هزینه‌های هر واحد با چندین توابع درجه دوم تکه‌ای که منعکس‌کننده اثرات تغییر سوخت است، ارائه می‌شود. تابع هزینه سوخت برای چنین واحدهایی در مرجع [۴۵] به صورت رابطه‌ی ۳-۱۲ نشان داده شده است:

$$F_i(P_i)=\begin{cases} a_{i1}+b_{i1}P_i+c_{i1}P_i^2, & fuel1, \quad P_{i\,\min}\le P_i\le P_{i1} \\ a_{i2}+b_{i2}P_i+c_{i2}P_i^2, & fuel2, \quad P_{i\,1}\le P_i\le P_{i2} \\ \vdots & \\ a_{ik}+b_{ik}P_i+c_{ik}P_i^2, & fuelk, \quad P_{i\,k-1}\le P_i\le P_{i\max} \end{cases} \qquad (۱۲-۳)$$

شکل ۳-۴ منحنی هزینه سوخت این نیروگاه‌ها را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن مسئله‌ی انتخاب-های متعدد سوخت برای واحدهای تولیدی یک تابع هدف ناپیوسته، غیر محدب برای مسئله توزیع بار ایجاد

1 - Economic Dispatch With Multiple Fuel Options

می‌شود. از این رو محققان برای حل این مسئله نیز به روش‌های هوشمند روی آوردند که از جمله‌ی آن می‌توان به استفاده از شبکه‌های عصبی در [۴۶-۴۷]، الگوریتم ژنتیک در [۴۸] و الگوریتم ازدحام ذرات در [۴۹-۵۰] اشاره کرد. همواره برای بهبود عملکرد الگوریتم‌های یادشده سعی شده از روش‌های ترکیبی استفاده شود. [۵۱-۵۳]




شکل ۳-۴ : منحنی هزینه سوخت این نیروگاه‌ها دارای انتخاب‌های مختلف سوخت

## ۳-۳-۳- گسترش در قیود مسئله

### ۳-۳-۳-۱- محدودیت‌های زیست‌محیطی [1]

با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی دیگر نمی‌توان عامل حداقل کردن هزینه‌های تولید را تنها معیار برای توزیع اقتصادی برق در شبکه‌های قدرت در نظر گرفت. [۵۴] از این رو برای جلوگیری از افزایش آلایندگی سوخت‌های فسیلی محدودیت انتشار آلایندگی در مسئله توزیع اقتصادی بار گنجانده شده است. رابطه‌ی ۳-۱۳ این محدودیت را نشان می‌دهد. در این رابطه $F_{ei}(P_i)$ تابع تخمین انتشار آلایندگی واحد $i$ام و $E_S^{\max}$ حداکثر مقدار تولید مجاز آلایندگی برای سیستم می‌باشد.

$$\sum_{i=1}^{NG} F_{ei}(P_i) \le E_S^{\max} \qquad (۱۳-۳)$$

1 - Environmentally Constrained Economic Dispatch

البته این مسئله به صورت یک مسئله‌ی چند تابع هدفه[1] نیز بررسی شده است. [۵۵] بدین ترتیب که با قرار دادن تابع انتشار آلایندگی در تابع هدف مسئله‌ی توزیع اقتصادی بار همراه با یک ضریب وزن دهی به حل آن پرداخته شده است. [۵۶-۵۷] رابطه‌ی ۳-۱۴ فرمول‌بندی این مسئله را نشان می‌دهد.

$$Min \quad C = \sum_{i=1}^{NG} (w_1 . F_i + w_2 . F_{ei}) \qquad (۱۴-۳)$$

تابع تخمین انتشار آلایندگی واحد $i$ام را نیز مانند تابع هزینه‌ی سوخت به صورت تابعی درجه دوم تخمین زده می‌شود. [۵۸] رابطه‌ی ۲ معادله‌ی این تابع را نشان می‌دهد که در آن $d_i$، $e_i$ و $f_i$ پارامترهای مربوط به تابع تخمین انتشار آلایندگی واحد $i$ام که با توجه به آزمایش‌ها عملی قابل حصول می‌باشند. [۵۹] تلاش برای حل این مسئله‌ی پخش بار اقتصادی همراه با کاهش انتشار آلایندگی[2] نیز از سوی محققان همواره مطرح بوده است. [۶۰] تابع تخمین انتشار آلایندگی واحد $i$ام بر حسب توان تولیدی به صورت رابطه‌ی ۳-۱۵ نوشته می‌شود:

$$F_{ei}(P_i) = d_i + e_i . P_i + f_i . P_i^2 \qquad (۱۵-۳)$$

## ۳-۳-۳-۲- محدودیت نرخ تغییرات توان[3]

تمایز پخش بار اقتصادی سنتی (ED) با مسئله پخش بار اقتصادی پویا[4] (DED) این است که در DED محدودیت مکانیکی برای جلوگیری از کوتاه شدن عمر توربین و دیگ بخار برای میزان تغییرات دوره‌ای تولید در نظر گرفته می‌شود. [۶۱] این محدودیت به صورت یک قید در مسئله پخش بار اقتصادی خود را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از تنش‌های حرارتی بر روی دیگ بخار و تجهیزات احتراق، نرخ تغیرات خروجی قدرت هر واحد گرمایی در هنگام افزایش یا کاهش قدرت خروجی هر واحد نباید از یک حد خاص تجاوز کند [۶۲]. رابطه‌ی ریاضی برای این محدودیت به شرح زیر می‌باشد [۶۳]:

$$RDR_i \le \left| P_{i\,h+1} - P_{ih} \right| \le RUR_i \qquad \forall \; i = 1:N \;\; and \;\; h = 1:H-1 \qquad (۱۶-۳)$$

1 - Multi Objective
2 - Economic-Emission Load Dispatch
3 - Ramp Rate Limits
4 - Dynamic Economic Dispatch

این قید بالأخص در حل مسئله‌ی در مدار آمدن نیروگاه‌های حرارتی مورد توجه بوده است. [۶۴] تأثیر این قید به روی مجموعه شدنی و جواب بهینه مسئله در [۶۵] اشاره شده است.

### ۳-۳-۳-۳- محدودیت نواحی ممنوع بهره‌برداری [1]

در برخی موارد، کل محدوده رنج تولیدی یک واحد، با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و عملی در بهره‌برداری، همیشه در دسترس نیست. [۶۶-۶۷] از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به محدودیت قرار ندادن میزان تولید یک واحد در یک رنج خاص برای جلوگیری از تنش‌های دینامیکی آن واحدهای تولیدی با شبکه قدرت اشاره کرد. این محدودیت‌های در مراجع علمی، به عنوان نواحی غیرمجاز تولید واحدها در نظر گرفته که به صورت رابطه‌ی ۳-۱۷ نمایش داده می‌شود. [۶۸]

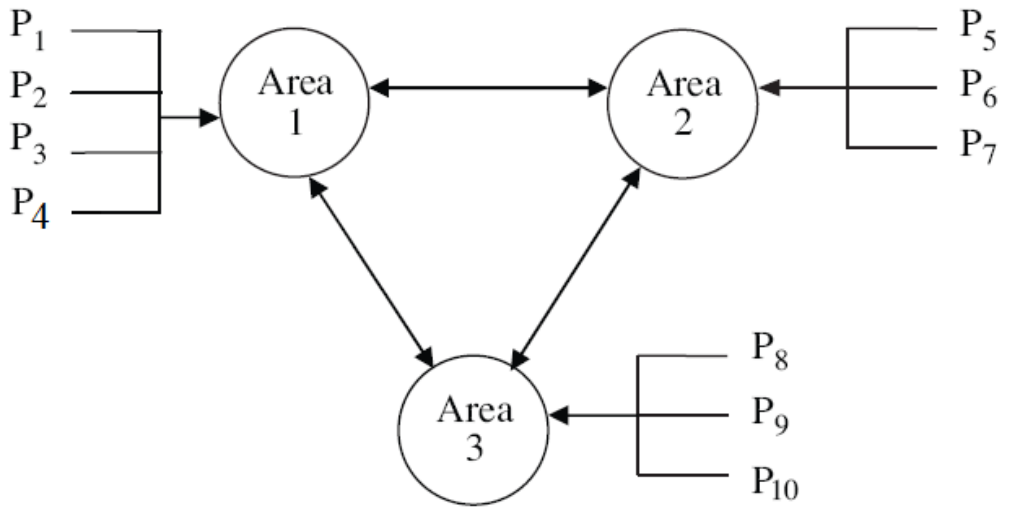
$$P_i \in \begin{cases} P_{i,\min} \le P_i \le P_{i,l}^{l} \\ \quad \vdots \\ P_{i,k-1}^{u} \le P_i \le P_{i,k}^{l} \\ P_{i,pz_i}^{u} \le P_i \le P_{i,\max} \end{cases}, \quad k = 2,3,...,pz_i \quad i = 1,2,...,n_{PZ} \qquad (۱۷-۳)$$

### ۳-۳-۳-۴- محدودیت نواحی چندگانه تولید [2]

در مقایسه با مسئله ED سنتی، مسئله MAED با توجه به محدودیت‌های خطوط ارتباطی[3] و الزامات تعادل قدرت منطقه‌ای، پیچیده‌تر است. [۶۹] فرمول کامل از برنامه‌ریزی تولید مناطق- چندگانه با محدودیت‌های واردات و صادرات در مرجع [۷۰] ارائه شد. شکل ۳-۵ مدل ۳ ناحیه تولید با ۱۰ واحد تولیدی را نشان می‌دهد.

مسئله پخش بار اقتصادی نواحی چندگانه تولیدی با واحدهای دارای انتخاب‌های مختلف سوخت یک مسئله گسترده و پیچیده می‌باشد. [۷۱] از آنجا که این پیچیدگی چالشی برای رسیدن جواب بهینه محسوب می‌شود، همواره محققان برای حل این مسئله و رسیدن به بهینه‌ی سراسری از روش‌های مختلف استفاده کردند. [۷۲-۷۳]

1 - Prohibited Operating Zones
2 - Multi Area
3 - Tie Line




شکل ۳-۵: مدل نواحی تولید چندگانه برای ۳ ناحیه تولیدی [۷۴]

## ۳-۴- خلاصه‌ی فصل

همان طور که در این فصل به آن اشاره شد پخش بار بخش مهمی از تجزیه و تحلیل سیستم قدت را تشکیل می‌دهد. برای مدیریت تولید صحیح همواره بهره‌برداران سیستم برق مکلف به استفاده از دو ابزار مهم (توزیع اقتصادی بار و پخش بار) در ارتباط با شبکه‌ی خود می‌باشند. توزیع اقتصادی بار به عنوان ورودی مسئله‌ی پخش بار در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر حل همزمان توزیع اقتصادی بار و پخش بار سیستم قدرت را پخش بار بهینه[1] در نظر می‌گیرند که ضمن رعایت قیود سیستم قدرت در قالب یک مسئله‌ی حداقل سازی هزینه‌ها مطرح می‌باشد.

دغدغه برای حفظ امنیت سیستم و رسیدن به یک جواب صحیح در عمل، در گروی مدلسازی دقیق‌تر مسائل پیرامون تولید می‌باشد. سیر تکمیل مسئله‌ی توزیع اقتصادی بار توسط محققان و گسترش ابعادی این مسئله برای نیل به اهداف ذکرشده در این فصل آورده شده است تا ضمن آشنایی با این مسائل و مدلسازی آن، اهمیت آن درک گردد.

1 - Optimal Power Flow

# فصل ۴

# فرمول‌بندی مسئله‌ی برنامه‌ریزی مورد بررسی

## ۴-۱- مقدمه

در شرایط سخت زمستان همزمان با کاهش دما که افـزایش تقاضـای مصـرف گـاز را از سـوی مصرف‌کننده‌های غیر نیروگاهی به همراه دارد، تأمین گاز مصـرفی بسـیاری از نیروگـاه‌هـای سـوخت فسیلی گازسوز با محدودیت‌های جدی روبرو می‌شود. در نظر نگرفتن این محدودیت‌ها می‌تواند منجـر به خاموشی بعضی از واحدهای تولیدی برق گردد و امنیت شبکه‌ی برق را به خطر بی انـدازد. در ایـن شرایط، معمولاً شبکه گاز قادر به تأمین گاز مصرفی تمام نیروگـاه‌هـا نیسـت و نیروگـاه‌هـای سـوخت فسیلی با سوخت دوم خود که عمدتاً گازوئیل و یا مازوت می‌باشد، بهره‌بـرداری مـی‌شـوند. بـه دلیـل محدودیت‌هایی که در ذخیره‌سازی سوخت دوم وجود دارد، اگر به هر علتی زمان اسـتفاده از سـوخت دوم طولانی شود نیروگاه‌ها با کمبود سوخت و خطر خاموشی مواجه خواهند شد. این شـرایط بحرانـی عملاً در برودت دی‌ماه سال ۱۳۸۶ در ایران به وجود آمد.

در این زمان هدف از برنامه‌ریزی سوخت این نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های شـبکه انتقال، تعیین درست میزان انرژی تولیدی و مقدار سوخت دوم جابجا شده بین مخازن شرکت نفـت و این نیروگاه‌ها می‌باشد. این برنامه‌ریزی به منظور به دست آوردن کمترین هزینه‌ی سوخت و هزینـه‌ی انتقال آن از مخازن شرکت نفت به مخازن نیروگاهی با رعایت قیود و محدودیت‌های انتقال سـوخت و محدودیت تولید نیروگاه‌ها و محدودیت‌های شبکه انتقال برق صورت گرفته اسـت. ایـن مسـئله بـرای برون‌رفت از بحران و حفظ امنیت شبکه گاز و شبکه‌ی برق مطرح شده است.

در این فصل فرمول‌بندی مسئله‌ی برنامه‌ریزی مورد نظر ارائه می‌شود. بـا برنامـه‌ریـزی صـورت گرفته ضمن اینکه می‌توان انرژی الکتریکی مورد نیاز منطقه را با حداقل هزینه تأمین نمود بلکه مـی-توان از به خطر انداختن امنیت شبکه جلوگیری کـرد. فرمـول‌بنـدی مسـئله در ۲ بخـش بـه تفضـیل توضیح داده‌شده است. در بخش اول تابع هدف مسئله‌ی برنامه‌ریزی مطرح‌شده و در بخش دوم قیـود مربوط به آن بیان می‌شود.

## ۴-۲- تابع هزینه

برای این مسئله تابع هدف از دو بخش تشکیل می‌شود. بخش اول مربوط به هزینه‌ی کل سوخت مصرفی نیروگاه‌ها حرارتی در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی می‌باشد که به صورت $C_f$ نمایش داده‌شده است. با توجه به میزان تولید هر نیروگاه از روی تابع مصرف سوخت آن و قیمت سوخت مصرفی، می‌توان هزینه‌ی کل سوخت مصرفی نیروگاه را در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی محاسبه کرد. هزینه‌ی کل سوخت مصرفی تمام نیروگاه‌ها در کل دوره‌ی برنامه‌ریزی به صورت تعریف می‌شود:

$$C_f = \sum_{k=1}^{N} 24*(\alpha_O \sum_{i\in n_{BO}} FC_i(\overline{P}_i^k) + \alpha_H \sum_{i\in n_{BH}} FC_i(\overline{P}_i^k) + \alpha_G \sum_{i\in n_{BG}} FC_i(\overline{P}_i^k)) \qquad (۱-۴)$$

در رابطه‌ی (۴-۱)، پارامترهای $\alpha_O$، $\alpha_H$ و $\alpha_G$ به ترتیب قیمت سوخت گازوئیل، مازوت و گاز، متغیر $\overline{P}_i^k$ توان متوسط تولیدی نیروگاه $i$ ام در روز $k$ ام و $FC_i$ تابع مصرف سوخت آن می‌باشد. تابع مصرف سوخت نیروگاه‌ها معمولاً برای پرهیز از پیچیدگی به صورت خطی یا درجه دوم در نظر گرفته می‌شود که از روی آن با توجه به میزان توان تولیدی ساعتی، مصرف ساعتی سوخت برای آن توان تولید مشخص است.

از جمله مزایای بهره‌برداری توأم دو شبکه مدیریت صحیح سوخت جهت کاهش هزینه‌ها بوده و بخش بعدی تابع هدف مسئله مربوط به این قسمت می‌باشد که برای سوخت‌های قابل ذخیره‌سازی درنظرگرفته می‌شود. برای محاسبه هزینه‌ی حمل‌ونقل در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی باید ابتدا میزان سوخت منتقل‌شده از مخازن شرکت نفت به مخازن نیروگاهی را محاسبه کرد. متغیر $x_{Fij}^k$ میزان سوخت فسیلی جابجا شده بین مخزن $j$ ام و نیروگاه حرارتی $i$ ام در روز $k$ ام می‌باشد. برای محاسبه‌ی هزینه حمل‌ونقل باید مسافت آن را نیز در نظر گرفت. از این رو $d_{Fij}$ مسافت پیمایشی مسیر مرتبط ما بین مخزن $j$ ام و نیروگاه حرارتی $i$ ام در روز $k$ ام می‌باشد. هزینه‌ی کل حمل‌ونقل سوخت در طول دوره برنامه‌ریزی را با $C_t$ نمایش می‌دهیم. این هزینه به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$C_t = \beta \sum_{k=1}^{N} (\sum_{j\in n_{AO}} \sum_{i\in n_{BO}} d_{Oij} x_{Oij}^k + \sum_{j\in n_{AH}} \sum_{i\in n_{BH}} d_{Hij} x_{Hij}^k) \qquad (۲-۴)$$

در رابطه‌ی (۴-۲)، پارامتر $\beta$ هزینه‌ی حمل‌ونقل سوخت فسیلی به ازای هر مترمکعب سوخت در هر یک کیلومتر جابجایی می‌باشد. بدین ترتیب با محاسبه‌ی هزینه‌ی کل سوخت مصرفی و جابجایی آن در کل دوره‌ی برنامه‌ریزی تابع هدف مسئله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C = C_f + C_t \qquad (۴-۳)$$

## ۴-۳- محدودیت‌ها و قیود

### ۴-۳-۱- شبکه‌های سوخت‌رسانی

به طور کلی سیستم‌های سوخت‌رسانی به نیروگاه‌های برق را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد. این دو سیستم عبارتند از: سیستم حمل‌ونقل سوخت‌های قابل ذخیره‌سازی مانند زغال‌سنگ، گازوئیل و مازوت و سیستم شبکه‌ی گاز طبیعی. دسته‌ی اول از سوخت‌های فسیلی مطرح‌شده از طریق سیستم حمل‌ونقل انتقال می‌یابند و از این نظر انتقال آن‌ها با انتقال گاز طبیعی که از طریق شبکه‌ی گاز صورت می‌گیرد متفاوت است. از این رو می‌توان سیستم انتقال این دو را از هم متمایز کرد.

#### ۴-۳-۱-۱- شبکه‌ی گاز طبیعی

همان طور که اشاره شد امروزه به دلیل آلایندگی کم و قیمت مناسب، گاز طبیعی به عنوان یکی از مهم‌ترین سوخت فسیلی مطرح می‌باشد. البته میزان استفاده از این سوخت در مناطق مختلف با توجه به عوامل تعیین‌کننده و قابلیت دسترسی به منابع مختلف، متفاوت است. به طور مثال همان طور که پیش‌تر گفته شد، در سال ۲۰۱۱ میلادی سوخت‌های فسیلی ۹۴٪ از کل تولید برق ایران را شامل بوده‌اند که در این میان سهم گاز طبیعی بالغ بر ۶۴٪ از کل سوخت‌های مصرفی شبکه قدرت ایران می‌باشد. [۱۱] این سهم عمده گاز طبیعی در تولید برق باعث می‌شود، بروز حوادث پیش‌بینی‌نشده در شبکه گاز به طور مستقیم موجب ایجاد محدودیت در بهره‌برداری از شبکه برق شود. در مواردی این حوادث می‌تواند باعث خروج چندین واحد تولیدی از مدار شده و به دنبال آن به

خطر افتادن امنیت شبکه را به همراه داشته باشد. از طرف دیگر با توجه به اینکه نیروگاه‌های گازسوز از مصرف‌کنندگان عمده شبکه گاز هستند، بهره‌برداری مناسب از آن‌ها در مواقع پیک مصرف گاز می‌تواند نقش مهمی در حفظ پایداری شبکه گاز ایفا کند. [۷۵] مدلسازی کامل شبکه‌ی گاز با توجه به معادلات سیالات گاز موجود در خطوط لوله‌ی در [۳۴] آمده است.

حداکثر مقدار گاز دهی در روزهای مختلف توسط بهره‌بردار شبکه‌ی گاز به نیروگاه‌ها اعلام می‌شود. با توجه به مشخص بودن حداکثر دبی جریان گاز ورودی مجاز به نیروگاه‌ها می‌توان حداکثر میزان سوخت مصرفی (حجم سوخت) را محاسبه کرد. از طرفی دیگر نیز می‌توان یک حداقل میزان سوخت گاز تحویلی با توجه به مسائل اقتصادی و قراردادهای سوختی متصور شد. هر چند متناسب بودن حداقل میزان سوخت گاز تحویلی با حداقل ظرفیت تولید نیروگاه برق به نفع نیروگاه برق می‌باشد اما در بازارهای رقابتی سوخت ممکن است این مقدار متناسب با حداقل ظرفیت تولید نیروگاه برق نباشد. رابطه‌ی (۴-۴) محدودیت شبکه‌ی گاز را نشان می‌دهد.

$$LF_{i_\min}^{k} \le FC_i^k \le LF_{i_\max}^{k} \qquad (۴-۴)$$

در رابطه‌ی (۴-۴) $LF_{i_\max}^{k}$ و $LF_{i_\min}^{k}$ به ترتیب حداکثر و حداقل سوخت مجاز مصرفی نیروگاه گازسوز $i$ ام می‌باشد. همچنین $FC_i^k$ میزان سوخت مصرف‌شده نیروگاه حرارتی $i$ ام در روز $k$ ام می‌باشد. مقدار $FC_i^k$ با استفاده از رابطه‌ی (۴-۵) محاسبه می‌شود.

$$FC_i^k = 24 * FC_i(\overline{P}_i^k) \qquad (۴-۵)$$

## ۴-۳-۱-۲- شبکه‌ی سوخت‌رسانی سوخت‌های قابل ذخیره‌سازی

از جمله دیگر سوخت‌های مهم فسیلی، زغال‌سنگ، گازوئیل و مازوت می‌باشد. این سوخت‌ها که به عنوان سوخت‌های قابل ذخیره اشاره‌شده‌اند، ابتدا توسط تانکرها، قطارها و کشتی‌ها به نیروگاه‌ها منتقل‌شده و سپس در مخازن نیروگاهی ذخیره می‌شوند. از جمله‌ی محدودیت‌های این شبکه می‌توان به محدودیت‌های جاده‌ای، محدودیت‌های مخازن نیروگاهی و محدودیت‌هایی از این دست اشاره کرد،

در این قسمت به فرمول‌بندی این محدودیت‌ها می‌پردازیم. فرمول‌بندی صورت گرفته برای نیروگاه‌های سوخت فسیلی دارای قابلیت استفاده از سوخت‌های مختلف با سوخت دوم گازوئیل و مازوت می‌باشد که به طور مشابه برای نیروگاه‌های سوخت فسیلی که از دیگر سوخت‌های قابل ذخیره‌سازی استفاده می‌کنند نیز بیان می‌شود.

### ۴-۳-۱-۲-۱- محدودیت‌های حداکثر و حداقل سوخت در مخازن نیروگاهی

مجموع ظرفیت‌های مخازن یک نیروگاه گازوئیلی را به عنوان حداکثر ظرفیت سوخت آن نیروگاه در نظر گرفته و با $X_{BOi}^{\max}$ نشان می‌دهیم و نیز $X_{BOi}^{\min}$ حداقل ظرفیت سوخت مخازن این نیروگاه برای اطمینان در تأمین سوخت مصرفی واحدهای این نیروگاه می‌باشد. این مقدار معمولاً در مواردی که نیروگاه در شرایط عادی کار می‌کند حفظ می‌شود تا در بروز هر گونه حادثه‌ی ناگهانی برای دریافت سوخت اول نیروگاه بتواند برای مدتی با سوخت دوم خود به تولید ادامه دهد. رابطه‌ی زیر میزان سوخت ذخیره‌شده در مخازن یک نیروگاه گازوئیل سوز را در روز $k$ام دوره‌ی برنامه‌ریزی نشان می‌دهد:

$$\sum_{k'=1}^{k}\sum_{j\in n_{AO}} x_{Oij}^{k} - \sum_{k'=1}^{k} FC_{Oi}^{k} \qquad (۶-۴)$$

اگر میزان سوخت اولیه مخازن یک نیروگاه گازوئیل سوز در شروع دوره‌ی برنامه‌ریزی را با $X_{BOi}^{0}$ نشان دهیم، میزان سوخت ذخیره‌شده در مخازن یک نیروگاه گازوئیل سوز را در روز $k$ام باید روابط (۴-۷) و (۴-۸) را برآورده سازد.

$$\sum_{k'=1}^{k}\sum_{j\in n_{AO}} x_{Oij}^{k} - \sum_{k'=1}^{k} FC_{Oi}^{k} \geq X_{BOi}^{\min} - X_{BOi}^{0} \qquad (۷-۴)$$

$$\sum_{k'=1}^{k}\sum_{j\in n_{AO}} x_{Oij}^{k} - \sum_{k'=1}^{k} FC_{Oi}^{k} \leq X_{BOi}^{\max} - X_{BOi}^{0} \qquad (۸-۴)$$

روابط بالا نیز برای یک نیروگاه مازوت سوز نیز برقرار بوده و قیود حداکثر و حداقل سوخت در مخازن یک نیروگاه مازوت سوز همانند روابط (۴-۹) و (۴-۱۰) به صورت زیر می‌باشد.

$$\sum_{k'=1}^{k}\sum_{j\in n_{AH}} x_{Hij}^{k} - \sum_{k'=1}^{k} FC_{Hi}^{k} \geq X_{BHi}^{\min} - X_{BHi}^{0} \qquad (۹-۴)$$

$$\sum_{k'=1}^{k}\sum_{j\in n_{AH}} x_{Hij}^{k} - \sum_{k'=1}^{k} FC_{Hi}^{k} \leq X_{BHi}^{\max} - X_{BHi}^{0} \qquad (۱۰-۴)$$

### ۴-۳-۱-۲-۲- محدودیت میزان سوخت تحویلی از مخازن شرکت نفت

با توجه به ظرفیت محدود مخازن شرکت نفت، از هر کدام از این مخازن هر روزه می‌توان میزان مشخصی سوخت برداشت کرد. این میزان سوخت از طرف شرکت نفت برای هر یک از این مخازن برای هر روز، اعلام می‌شود. پارامتر $X_{AOj}^{k}$ را حداکثر گازوئیل تحویلی از مخزن $A_{Oj}$ در روز $k$ام و $X_{AHj}^{k}$ را حداکثر مازوت تحویلی از مخزن $A_{Hj}$ در روز $k$ام در نظر می‌گیریم آنگاه محدودیت میزان سوخت تحویلی از مخازن شرکت نفت به صورت زیر می‌باشد:

$$\sum_{i\in n_{BO}} x_{Oij}^{k} \leq X_{AOj}^{k} \qquad (۱۱-۴)$$

$$\sum_{i\in n_{BH}} x_{Hij}^{k} \leq X_{AHj}^{k} \qquad (۱۲-۴)$$

### ۴-۳-۱-۲-۳- محدودیت روزانه انتقال کل سوخت

قید مقدار کل سوخت انتقالی روزانه ناشی از محدودیت ظرفیت مسیرهای مرتبط بین مخازن شرکت نفت و نیروگاه‌ها، شرایط آب و هوایی و محدودیت در پایانه‌های بارگیری و تخلیه می‌باشد. پارامتر $X^{k}$ را حداکثر میزان سوخت انتقالی در کل منطقه برای روز $k$ام در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب محدودیت روزانه انتقال کل سوخت در روز $k$ام به صورت زیر می‌باشد:

$$\sum_{j\in n_{AO}}\sum_{i\in n_{BO}} x_{Oij}^{k} + \sum_{j\in n_{AH}}\sum_{i\in n_{BH}} x_{Hij}^{k} \leq X^{k} \qquad (۱۳-۴)$$

### ۴-۳-۱-۲-۴- محدودیت در میزان سوخت منتقل‌شده

با توجه به اینکه سوخت‌های منتقل‌شده از مخازن شرکت نفت به مخازن نیروگاهی جزء جواب مسئله می‌باشند، متغیرهای $x_{Oij}^{k}$ و $x_{Hij}^{k}$ که میزان انتقال سوخت بین مخازن و نیروگاه‌ها را در هر روز

نشان می‌دهند نمی‌توانند از یک حد کمتر باشند. در واقع به صرفه نیست یک نیروگاه حجم کمی از سوخت را درخواست دهد. بالأخص در محیط‌های رقابتی و بازارهای سوخت این مسئله حائز اهمیت است. همچنین می‌توان یک حداکثر حجم سوخت مبادله شده برای هر مسیر متصور شد. محدودیت در میزان سوخت منتقل‌شده به صورت زیر می‌باشد:

$$I_{Oij}^{k} \times x_{Oij_\min}^{k} \le x_{Oij}^{k} \le I_{Oij}^{k} \times x_{Oij_\max}^{k} \qquad (۱۴-۴)$$

$$I_{Hij}^{k} \times x_{Hij_\min}^{k} \le x_{Hij}^{k} \le I_{Hij}^{k} \times x_{Hij_\max}^{k} \qquad (۱۵-۴)$$

در روابط بالا متغیرهای باینری $I_{Oij}^{k}$ و $I_{Hij}^{k}$ به ترتیب نشان دهنده‌ی درخواست سوخت گازوئیل و مازوت نیروگاه $i$ام از مخزن $j$ام شرکت نفت در روز $k$ام می‌باشد.

## ۴-۳-۲- محدودیت‌های شبکه‌ی برق

به دست آوردن جواب درست برای انرژی تولیدی نیروگاه‌ها مستلزم رعایت قیود فنی شبکه‌ی برق می‌باشد. از جمله مسائلی که شبکه در این شرایط با آن روبروست کاهش تولید ژنراتورهای کم بازده و افزایش تولید ژنراتورهای پر بازده به منظور کاهش مصرف سوخت است. این امر می‌تواند منجر به اضافه‌بار در برخی از خطوط گردد. محدودیت‌های در نظر گرفته شده‌ی شبکه‌ی برق در این پایان نامه عبارتند از:

۱) محدودیت در ظرفیت تولید هر نیروگاه

۲) محدودیت در توان عبوری از خطوط انتقال شبکه‌ی برق

۳) محدودیت تعادل تولید و مصرف

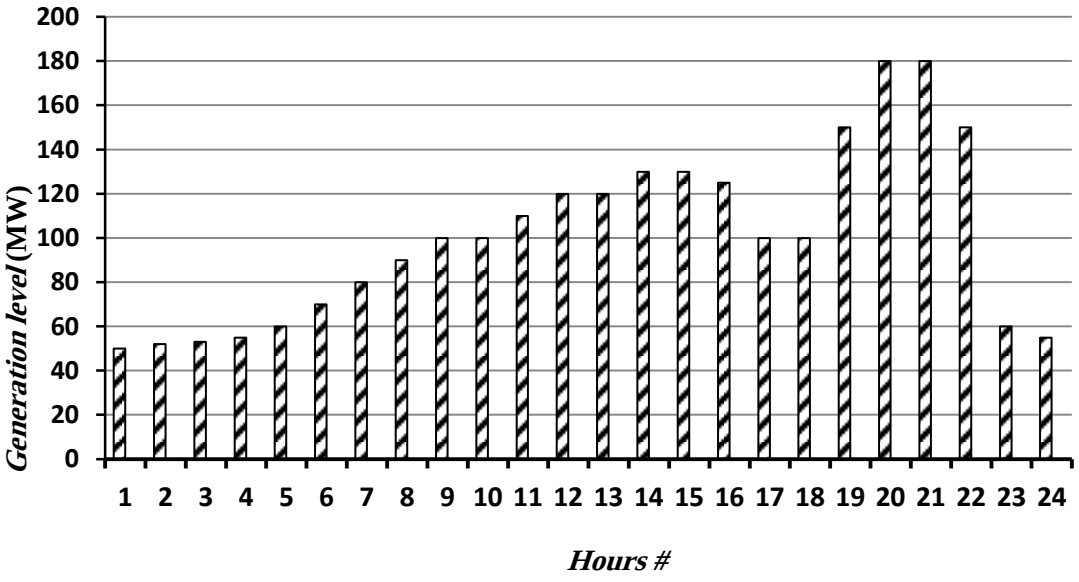
از جمله مسائل مهم در بهره‌برداری زمان کوتاه برای رسیدن به پاسخ می‌باشد. از آنجا که مسئله‌ی بهره‌برداری توأم دو شبکه‌ی برق و سوخت‌رسانی دارای ابعاد گسترده و متغیرهای فراوانی است، از این رو ایده‌ی استفاده‌شده در این پایان‌نامه برای کاهش ابعاد این مسئله، این است که از پخش بار مستقیم در هر روز یک‌بار و آن هم در بدترین شرایط شبکه یعنی زمانی که خطوط دچار پرباری می-

شوند، برای محاسبه‌ی توان‌های تولیدی نیروگاه‌ها و توان‌های تزریقی به خطوط استفاده شود.

با توجه به الگوهای مصرف و تولید در روزهای مختلف سال می‌توان رابطه‌ای بین توان تولیدی متوسط روزانه‌ی نیروگاه‌ها ( $\overline{P}_i^k$ ) و توان تولیدی نیروگاه‌ها برای بدترین شرایط شبکه در هر روز برقرار کرد. بدین ترتیب $\lambda_i^k$ را به صورت رابطه‌ی (۴-۱۶) تعریف می‌کنیم:

$$\lambda_i^k = \frac{P_i^k}{\overline{P}_i^k} \qquad (۱۶-۴)$$

که در آن $P_i^k$ توان تولیدی نیروگاه حرارتی $i$ ام در بدترین شرایط شبکه و $\overline{P}_i^k$ توان متوسط تولیدی آن در روز $k$ ام می‌باشند. شکل ۴-۱ الگوی تولید روزانه را برای هر واحد تولیدی را نشان می-دهد.




شکل ۴-۱: الگوی تولید روزانه پیش‌بینی شده

با توجه به الگوهای مصرف و تولید در روزهای مختلف سال ضریب تولید برای $\lambda_i^k$ هر نیروگاه در هر روز قابل محاسبه است. شایان‌ذکر است حتی اگر الگو مصرف در دوره‌ی برنامه‌ریزی مورد مطالعه در دسترس باشد می‌توان با استفاده از یک توزیع اقتصادی بار ابتدا الگوی تولید روزانه‌ی واحدها در روزهای دوره‌ی برنامه‌ریزی را محاسبه کرد و سپس ضریب تولید روزانه را برای هر واحد به دست آورد.

با محاسبه‌ی این ضریب می‌توانیم رابطه‌ی بین $P_i^k$ توان تولیدی نیروگاه حرارتی $i$ ام در بدترین شرایط شبکه و $\overline{P}_i^k$ توان متوسط تولیدی آن در روز $k$ ام ایجاد کنیم:

$$\overline{P}_i^k = \frac{P_i^k}{\lambda_i^k} \qquad (۱۷-۴)$$

از آنجا که نیروگاه‌هایی که دارای راندمان بالاتری هستند و یا هزینه‌ی تولید آن‌ها کمتر است، دارای تولید تقریباً ثابت در ساعات مختلف روز هستند می‌توان گفت این ضریب رابطه‌ی معکوس با عوامل نام‌برده دارد.

## ۴-۳-۲-۱- محدودیت‌های ظرفیت تولید هر نیروگاه

با توجه به محدودیت‌های عملی و فیزیکی هر نیروگاه قادر به تولید حداکثر توان مشخصی است. همچنین به دلیل محدودیت‌های فنی و اقتصادی برای جلوگیری از خاموش و روشن شدن آن برای هر نیروگاه حداقل توان تولیدی در نظر گرفته می‌شود. محدودیت‌های ظرفیت تولید برای نیروگاه $B_{Oi}^k$ و نیروگاه $B_{Hi}^k$ به صورت زیر می‌باشد:

$$P_{Oi_\min}^k \le P_{Oi}^k \le P_{Oi_\max}^k \qquad (۱۸-۴)$$

$$P_{Hi_\min}^k \le P_{Hi}^k \le P_{Hi_\max}^k \qquad (۱۹-۴)$$

## ۴-۳-۲-۲- تعادل توان تولیدی و مصرفی

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های شبکه‌ی برق محدودیت تعادل تولید و مصرف می‌باشد. با توجه به پخش بار مستقیم این محدودیت را به صورت رابطه‌ی (۴-۲۰) نشان می‌دهند. در این رابطه $B_{ij}$ درایه‌ی $i \times j$ ماتریس سوسپتانس شبکه و $\delta_i^k$ زاویه‌ی ولتاژ شین $i$ ام در روز $k$ ام می‌باشد.

$$P_i^k - P_{Di}^k = \sum_{j=1}^{n} B_{ij}\delta_i^k \qquad (۲۰-۴)$$

### ۴-۳-۲-۳- محدودیت توان عبوری از خطوط انتقال شبکه‌ی برق

رابطه‌ی (۴-۲۱) فرم ماتریسی قید محدودیت توان عبوری از خطوط می‌باشد. در این رابطه‌ی، $H$ ماتریس ضرایب توزیع انتقال توان می‌باشد.

$$-P_{L_{\max}} \le H\delta^k \le P_{L_{\max}} \qquad (۴-۲۱)$$

فرم خطی رابطه (۴-۲۱)، به صورت زیر می‌باشد که در آن $P^l_{L_{\max}}$ حداکثر توان مجاز عبوری از خط $l$ ام و $x_{ij}$ راکتانس این خط و $\delta^k_i$ و $\delta^k_j$ به ترتیب زاویه ولتاژ شین ورود و خروجی دو سر این خط در روز $k$ام می‌باشد.

$$-P^l_{L\max} \le \frac{\delta^k_i - \delta^k_j}{x_{ij}} \le P^l_{L\max} \qquad (۴-۲۲)$$

## ۴-۴- فرمولبندی کلی مسئله

در این قسمت با توجه به مطالب توضیح داده شده فرمولبندی کامل مسئله مورد نظر ارائه می‌شود.

$$Min \quad C = \sum_{k=1}^{N} 24*(\alpha_O \sum_{i\in n_{BO}} FC_i(\overline{P}_i^{\,k}) + \alpha_H \sum_{i\in n_{BH}} FC_i(\overline{P}_i^{\,k}) + \alpha_G \sum_{i\in n_{BG}} FC_i(\overline{P}_i^{\,k})) +$$

$$\beta \sum_{k=1}^{N} (\sum_{j\in n_{AO}} \sum_{i\in n_{BO}} d_{Oij} x^k_{Oij} + \sum_{j\in n_{AH}} \sum_{i\in n_{BH}} d_{Hij} x^k_{Hij})$$

Subject to:

$$LF^k_{i_\min} \le 24*FC_i(\overline{P}_i^{\,k}) \le LF^k_{i_\max} \qquad for \quad i \in n_{AG}$$

$$\sum_{k'=1}^{k} \sum_{j\in n_{AF}} x^k_{Fij} - \sum_{k'=1}^{k} FC^k_{Fi} \ge X^{\min}_{BFi} - X^0_{BFi} \qquad for \quad F = O,H$$

$$\sum_{k'=1}^{k} \sum_{j\in n_{AF}} x^k_{Fij} - \sum_{k'=1}^{k} FC^k_{Fi} \le X^{\max}_{BFi} - X^0_{BFi} \qquad for \quad F = O,H$$

$$\sum_{i\in n_{BF}} x^k_{Fij} \le X^{\,k}_{AFj} \qquad for \quad F = O,H$$

$$\sum_{j\in n_{AO}} \sum_{i\in n_{BO}} x^k_{Oij} + \sum_{j\in n_{AH}} \sum_{i\in n_{BH}} x^k_{Hij} \le X^{\,k}$$

$$I_{Fij}^{k} \times x_{Fij_\min}^{k} \le x_{Fij}^{k} \le I_{Fij}^{k} \times x_{Fij_\max}^{k} \qquad for \qquad F = O, H$$

$$P_i^k = \lambda_i^k . \overline{P}_i^k$$

$$P_{i_\min}^{k} \le P_i^k \le P_{i_\max}^{k}$$

$$P_i^k - P_{Di}^k = \sum_{j=1}^{n} B_{ij} \delta_i^k$$

$$-P_{L_{\max}} \le H\delta^k \le P_{L_{\max}}$$

$$-P_{L\max}^{l} \le \frac{\delta_i^k - \delta_j^k}{x_{ij}} \le P_{L\max}^{l}$$

# فصل ۵

# آنالیز عددی و مطالعه موردی

## ۵-۱- مقدمه

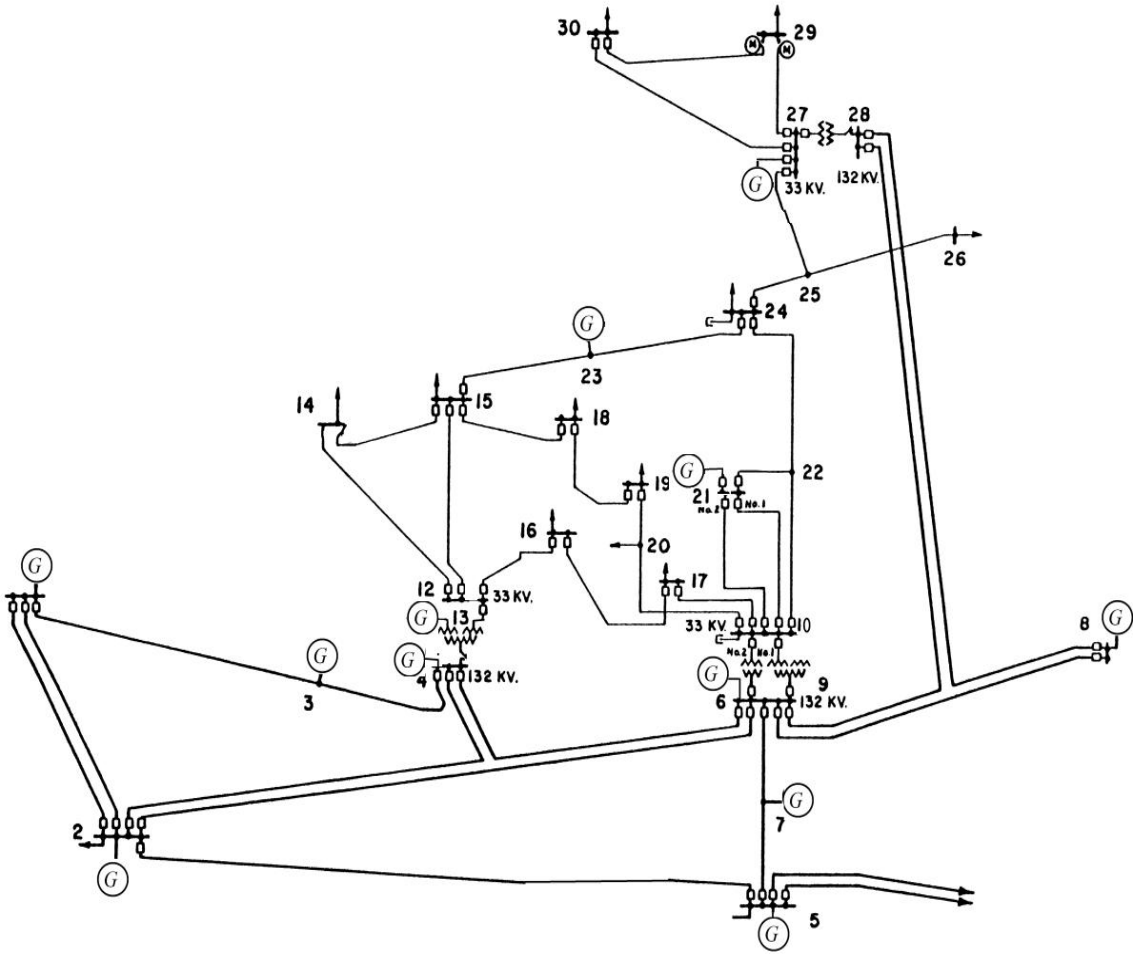
در این فصل به مطالعه‌ی موردی مسئله‌ی برنامه‌ریزی مطرح‌شده می‌پردازیم. در ابتدا به معرفی شبکه مورد نظر پرداخته و در ادامه آنالیز عددی و نتایج حاصل بیان می‌شود. برای بررسی کارایی مسئله‌ی برنامه‌ریزی مطرح‌شده، آنالیز عددی به روی شبکه‌ی مورد مطالعه در دو حالت مختلف صورت گرفته است. در حالت اول مطالعه موردی بر روی شبکه مورد نظر با برنامه‌ریزی تولید مرسوم و پخش بار بهینه مستقیم انجام می‌شود. در این حالت محدودیت‌های سوخت‌رسانی در نظر گرفته نمی-شود. در حالت دوم مدیریت و بهره‌برداری تولید به وسیله‌ی برنامه‌ریزی مطرح‌شده در این پایان‌نامه با در نظر گرفتن محدودیت‌های سوخت‌رسانی انجام می‌شود. در این قسمت با در نظر گرفتن محدودیت و کمبود در شبکه‌ی سوخت‌رسانی شرایط بحران سوخت مدل گردیده است. در ادامه نیز نتایج به دست آمده در هر یک از این دو حالت باهم مقایسه شده و تأثیرگذاری برنامه‌ریزی مطرح‌شده در برنامه‌ریزی دقیق و صحیح تولید مشاهده می‌شود.

با توجه به فرمول‌بندی مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید و تأمین سوخت دوم نیروگاه‌های حرارتی در شرایط بحران، با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه انتقال که در فصل قبل اشاره شد، این مسئله به صورت یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی خطی مخلوط عدد صحیح[1] مطرح شده است. از جمله قوی‌ترین نرم-افزارهای کاربردی برای حل مسائل بهینه‌سازی نرم‌افزار تخصصی GAMS می‌باشد که مخصوصاً برای مسائل بهینه‌سازی با ابعاد گسترده بسیار مناسب بوده است. در این پایان‌نامه برای حل مسئله مطرح‌شده از برنامه‌ی GAMS و الگوریتم CPLEX استفاده شده است.

1 - Mixed Integer Linear Programing

## ۵-۲- مطالعه‌ی موردی

مسئله‌ی برنامه‌ریزی برای یک شبکه‌ی ۳۰ باسه اصلاح‌شده‌ی IEEE انجام‌شده است. شکل ۵-۱ این شبکه را نشان می‌دهد. برای این شبکه ۱۲ واحد تولیدی فرض شده است. فرض شده که شبکه‌ی گاز در شرایط سخت زمستانی نمی‌تواند گاز مصرفی ۶ نیروگاه را برای ۳ روز تأمین کند. به منظور تأمین بار شبکه‌ی برق در این ۳ روز، این ۶ نیروگاه باید با سوخت دوم خودکار کنند.




شکل ۵-۱ : شبکه‌ی ۳۰ باسه نمونه مورد مطالعه

پارامترهای مربوط به نیروگاه‌های شبکه‌ی برق در جداول ۵-۱ تا ۵-۳ آمده است. به ترتیب جداول ۵-۱ و ۵-۲ مربوط به حداقل و حداکثر ظرفیت تولید نیروگاه‌ها در روزهای مختلف و همچنین جدول ۵-۳ ضرایب تولید در نظر گرفته‌شده مربوط به هر یک از آن‌ها می‌باشد.

جدول ۵-۱ : اطلاعات مربوط به حداقل انرژی تولیدی نیروگاه‌ها

| روز ۳ | روز ۲ | روز ۱ | (*MW*) |
|---|---|---|---|
| ۵۰ | ۵۰ | ۵۰ | $P_{O1}^{\min k}$ |
| ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | $P_{O2}^{\min k}$ |
| ۵۰ | ۵۰ | ۰ | $P_{O3}^{\min k}$ |
| ۵۰ | ۳۳ | ۱۰۰ | $P_{H1}^{\min k}$ |
| ۳۰ | ۵۰ | ۵۰ | $P_{H2}^{\min k}$ |
| ۳۰ | ۵۰ | ۱۰۰ | $P_{H3}^{\min k}$ |
| ۵۰ | ۵۰ | ۵۰ | $P_{G1}^{\min k}$ |
| ۵۰ | ۵۰ | ۵۰ | $P_{G2}^{\min k}$ |
| ۵۰ | ۵۰ | ۵۰ | $P_{G3}^{\min k}$ |
| ۵۰ | ۵۰ | ۵۰ | $P_{G4}^{\min k}$ |
| ۵۰ | ۵۰ | ۵۰ | $P_{G5}^{\min k}$ |
| ۵۰ | ۵۰ | ۵۰ | $P_{G6}^{\min k}$ |

جدول ۵-۲ : اطلاعات مربوط به حداکثر انرژی تولیدی نیروگاه‌ها

| روز ۳ | روز ۲ | روز ۱ | (*MW*) |
|---|---|---|---|
| ۴۰۰ | ۵۰۰ | ۵۲۰ | $P_{O1}^{\max k}$ |
| ۵۰۰ | ۵۰۰ | ۵۰۰ | $P_{O2}^{\max k}$ |
| ۳۰۰ | ۱۰۰ | ۰ | $P_{O3}^{\max k}$ |
| ۳۵۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ | $P_{H1}^{\max k}$ |
| ۶۰۰ | ۴۰۰ | ۲۰۰ | $P_{H2}^{\max k}$ |
| ۷۰۰ | ۵۰۰ | ۵۰۰ | $P_{H3}^{\max k}$ |
| ۲۰۰ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | $P_{G1}^{\max k}$ |
| ۲۵۰ | ۳۵۰ | ۴۰۰ | $P_{G2}^{\max k}$ |
| ۲۵۰ | ۳۵۰ | ۴۰۰ | $P_{G3}^{\max k}$ |
| ۴۰۰ | ۳۵۰ | ۴۰۰ | $P_{G4}^{\max k}$ |
| ۳۰۰ | ۳۰۰ | ۴۰۰ | $P_{G5}^{\max k}$ |
| ۳۰۰ | ۳۰۰ | ۳۰۰ | $P_{G6}^{\max k}$ |

جدول ۵-۳ : ضریب تولید برای شین‌های تولیدی

| شماره شین | روز ۱ | روز ۲ | روز ۳ |
|---|---|---|---|
| $B_1$ | ۱.۲ | ۱.۵ | ۱.۱۵ |
| $B_2$ | ۱.۳ | ۱.۱ | ۱.۲۴ |
| $B_3$ | ۱.۶ | ۱.۴ | ۱.۵ |
| $B_4$ | ۱.۱ | ۱.۲ | ۱.۲۵ |
| $B_5$ | ۱.۱ | ۱.۵ | ۱.۳ |
| $B_6$ | ۱.۳ | ۱.۵ | ۱.۳ |
| $B_7$ | ۱.۱۲ | ۱.۳ | ۱.۲۴ |
| $B_8$ | ۱.۲۲۳ | ۱.۲۲ | ۱.۲۱ |
| $B_{13}$ | ۱.۵ | ۱.۲۱ | ۱.۲ |
| $B_{22}$ | ۱.۲۴ | ۱.۱۴ | ۱.۵ |
| $B_{23}$ | ۱.۲۵ | ۱.۱۲ | ۱.۵ |
| $B_{27}$ | ۱.۶ | ۱.۵ | ۱.۵ |

جدول ۵-۴ : ضریب خطی تابع مصرف سوخت برای واحدهای مختلف

| شماره شین | C(P) | شماره شین | C(P) | شماره شین | C(P) |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰.۳۱۴ | ۵ | ۰.۲۹۸ | ۱۳ | ۰.۲ |
| ۲ | ۰.۲۳۷ | ۶ | ۰.۲ | ۲۲ | ۰.۱۸ |
| ۳ | ۰.۲۴ | ۷ | ۰.۳ | ۲۳ | ۰.۲ |
| ۴ | ۰.۲۸ | ۸ | ۰.۴ | ۲۷ | ۰.۱۶ |

ضریب خطی تابع مصرف سوخت برای واحدهای مختلف در جدول ۵-۴ آورده شده است. حداکثر توان عبوری از خطوط شبکه ۳۶۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به خطوط شبکه-ی انتقال سیستم مورد مطالعه در جداول ۵-۵ آورده شده است. این جدول مقدار راکتانس خطوط شبکه را نشان می‌دهد. بار پیش‌بینی‌شده برای روزه‌های اول، دوم و سوم دوره‌ی برنامه‌ریزی برای شبکه‌ی مورد مطالعه به ترتیب در جداول ۵-۶، ۵-۷ و ۵-۸ آورده شده است.

جدول ۵-۵ : مقدار راکتانس خطوط

| شماره‌ی خط | $x_l$ | شماره‌ی خط | $x_l$ | شماره‌ی خط | $x_l$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $L_1$ | ۰.۰۵۷۵ | $L_{16}$ | ۰.۱۴ | $L_{31}$ | ۰.۱۷۹ |
| $L_2$ | ۰.۱۶۵۲ | $L_{17}$ | ۰.۲۵۵۹ | $L_{32}$ | ۰.۲۷ |
| $L_3$ | ۰.۱۷۳۷ | $L_{18}$ | ۰.۱۳۰۴ | $L_{33}$ | ۰.۳۲۹۲ |
| $L_4$ | ۰.۰۳۷۹ | $L_{19}$ | ۰.۱۹۸۷ | $L_{34}$ | ۰.۳۸ |
| $L_5$ | ۰.۱۹۸۳ | $L_{20}$ | ۰.۱۹۹۷ | $L_{35}$ | ۰.۰۲۰۸ |
| $L_6$ | ۰.۱۷۶۳ | $L_{21}$ | ۰.۱۹۲۳ | $L_{36}$ | ۰.۳۹۶ |
| $L_7$ | ۰.۰۴۱۴ | $L_{22}$ | ۰.۲۱۸۵ | $L_{37}$ | ۰.۰۴۱۵ |
| $L_8$ | ۰.۱۱۶ | $L_{23}$ | ۰.۱۲۹۲ | $L_{38}$ | ۰.۰۶۰۲ |
| $L_9$ | ۰.۰۸۲ | $L_{24}$ | ۰.۰۶۸ | $L_{39}$ | ۰.۰۴۵۳ |
| $L_{10}$ | ۰.۰۴۲ | $L_{25}$ | ۰.۲۰۹ | $L_{40}$ | ۰.۲ |
| $L_{11}$ | ۰.۲۰۸ | $L_{26}$ | ۰.۰۸۴۵ | $L_{41}$ | ۰.۰۵۹۹ |
| $L_{12}$ | ۰.۵۵۶ | $L_{27}$ | ۰.۰۷۴۹ | | |
| $L_{13}$ | ۰.۲۰۸ | $L_{28}$ | ۰.۱۴۹۹ | | |
| $L_{14}$ | ۰.۱۱ | $L_{29}$ | ۰.۰۲۳۶ | | |
| $L_{15}$ | ۰.۲۵۶ | $L_{30}$ | ۰.۲۰۲ | | |

جدول ۵-۶ : بار پیش‌بینی‌شده در روز اول

| شماره شین | $P_{Di}^1$ | شماره شین | $P_{Di}^1$ | شماره شین | $P_{Di}^1$ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۵۰۰ | ۱۱ | ۰ | ۲۱ | ۱۷۵ |
| ۲ | ۲۱۷ | ۱۲ | ۱۱۲ | ۲۲ | ۰ |
| ۳ | ۲۴۰ | ۱۳ | ۰ | ۲۳ | ۳۰ |
| ۴ | ۴۰۰ | ۱۴ | ۶۲ | ۲۴ | ۲۷ |
| ۵ | ۹۴.۲ | ۱۵ | ۸۲ | ۲۵ | ۰ |
| ۶ | ۰ | ۱۶ | ۱۵۰ | ۲۶ | ۳۵۰ |
| ۷ | ۲۲.۸ | ۱۷ | ۹۰ | ۲۷ | ۰ |
| ۸ | ۳۰ | ۱۸ | ۳۲ | ۲۸ | ۰ |
| ۹ | ۰ | ۱۹ | ۹۵ | ۲۹ | ۲۴ |
| ۱۰ | ۱۹۰ | ۲۰ | ۲۲ | ۳۰ | ۱۰۶ |

جدول ۵-۷ : بار پیش‌بینی‌شده در روز دوم

| شماره شین | $P_{Di}^2$ | شماره شین | $P_{Di}^2$ | شماره شین | $P_{Di}^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۶۰۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۲۱ | ۱۸ |
| ۲ | ۲۵۰ | ۱۲ | ۱۲۰ | ۲۲ | ۵۰ |
| ۳ | ۲۳۰ | ۱۳ | ۱۰ | ۲۳ | ۵۰ |
| ۴ | ۳۰۰ | ۱۴ | ۵۰ | ۲۴ | ۲۵ |
| ۵ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۹۰ | ۲۵ | ۵۰ |
| ۶ | ۱۰ | ۱۶ | ۱۲۰ | ۲۶ | ۳۵۰ |
| ۷ | ۱۰ | ۱۷ | ۱۰۰ | ۲۷ | ۲۰ |
| ۸ | ۲۰ | ۱۸ | ۱۰۰ | ۲۸ | ۲۰۰ |
| ۹ | ۱۰ | ۱۹ | ۱۲۰ | ۲۹ | ۲۵ |
| ۱۰ | ۱۵۰ | ۲۰ | ۲۰ | ۳۰ | ۵۰ |

جدول ۵-۸ : بار پیش‌بینی‌شده در روز سوم

| شماره شین | $P_{Di}^3$ | شماره شین | $P_{Di}^3$ | شماره شین | $P_{Di}^3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۴۰۰ | ۱۱ | ۱۰ | ۲۱ | ۲۰ |
| ۲ | ۲۵۰ | ۱۲ | ۱۰۰ | ۲۲ | ۱۰ |
| ۳ | ۳۰۰ | ۱۳ | ۵۰ | ۲۳ | ۱۰۰ |
| ۴ | ۲۰۰ | ۱۴ | ۵۰ | ۲۴ | ۲۰ |
| ۵ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۱۰۰ | ۲۵ | ۱۵ |
| ۶ | ۲۰ | ۱۶ | ۱۵۰ | ۲۶ | ۰ |
| ۷ | ۳۰ | ۱۷ | ۱۰۰ | ۲۷ | ۵۰ |
| ۸ | ۲۰ | ۱۸ | ۳۰۰ | ۲۸ | ۱۵۰ |
| ۹ | ۲۰ | ۱۹ | ۱۵۰ | ۲۹ | ۲۰ |
| ۱۰ | ۱۵۰ | ۲۰ | ۱۰۰ | ۳۰ | ۱۵۰ |

## ۵-۲-۱- حالت اول

همان طور که اشاره شد، در این قسمت مطالعه‌ی موردی به روی شبکه‌ی مورد نظر با برنامه-ریزی‌های تولید مرسوم و پخش بار مستقیم برای یک دوره‌ی برنامه‌ریزی ۳ روزه و بدون در نظر

گرفتن شرایط سوخت‌رسانی انجام می‌شود. نتایج حاصل از این قسمت در جدول‌های ۵-۹ و ۵-۱۰ آمده است. که به ترتیب هر کدام از این جدول‌ها نتایج تولید نیروگاه‌ها، اسامی و ضرایب لاگرانژ مربوط به قیود خطوطی که در دوره‌ی برنامه‌ریزی دچار پرباری شده‌اند، را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۹ : نتایج تولید شین‌های تولیدی در دوره‌ی برنامه‌ریزی در حالت اول

| شماره شین | روز ۱ | روز ۲ | روز ۳ |
|---|---|---|---|
| $B_1$ | ۶۸ | ۱۱۷ | ۵۰ |
| $B_2$ | ۳۵۷ | ۳۰۵ | ۲۲۸ |
| $B_3$ | ۰ | ۱۰۰ | ۵۰ |
| $B_4$ | ۳۰۰ | ۲۵۰ | ۳۵۰ |
| $B_5$ | ۵۰ | ۵۰ | ۲۵۷ |
| $B_6$ | ۱۰۰ | ۳۸۸ | ۵۰۰ |
| $B_7$ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۲۰۰ |
| $B_8$ | ۳۱۶ | ۳۵۰ | ۲۵۰ |
| $B_{13}$ | ۳۶۰ | ۳۵۰ | ۲۵۰ |
| $B_{22}$ | ۴۰۰ | ۳۵۰ | ۴۰۰ |
| $B_{23}$ | ۴۰۰ | ۳۰۰ | ۳۰۰ |
| $B_{27}$ | ۳۰۰ | ۳۰۰ | ۴۰۰ |

جدول ۵-۱۰ : اسامی خطوطی که دچار پرباری شده‌اند، در حالت اول

| شماره‌ی خط | شماره‌ی روز | ضریب لاگرانژ مربوط به قید فعال‌شده‌ی خط |
|---|---|---|
| $L_1$ | ۱ | ۳/۲۴۵۸ e+۶ |
| $L_1$ | ۲ | ۲/۷۷۵۹ e+۷ |
| $L_7$ | ۱ | ۶/۸۰۳۴ e+۷ |
| $L_7$ | ۲ | ۲/۵۹۳۵ e+۷ |
| $L_7$ | ۳ | ۱/۲۶۱۲ e+۶ |
| $L_{16}$ | ۱ | ۲/۹۷۹۹ e+۷ |

همان طور که مشاهده می‌شود در طول دوره‌ی برنامه‌ریـزی در نظـر گرفتـه شـده در بـدترین شرایط شبکه، خطوط ۶ بار دچار پرباری می‌شوند. مقدار کل هزینه سوخت در طول ۳ روز برنامه‌ریزی در این حالت برابر با ۱۶۱/۱۰۳میلیارد ریال بدست آمده‌است.

## ۵-۲-۲- حالت دوم

در این قسمت مدیریت تولید نیروگاه‌های سوخت فسیلی با در نظر گرفتن محدودیت شبکه‌های برق و سوخت‌رسانی صورت می‌گیرد. از این رو مطالعه‌ی موردی به روی شبکه‌ی مـورد نظـر بـا مـدل مطرح‌شده برای یک دوره‌ی برنامه‌ریزی ۳ روزه، انجام می‌شود. همان طـور کـه در قسـمت مطالعـه‌ی موردی اشاره شد، فرض شده که شبکه‌ی گاز در شرایط سـخت زمسـتانی نمـی‌توانـد گـاز مصـرفی ۶ نیروگاه را برای ۳ روز تأمین کند. به منظور تأمین بار شبکه‌ی برق در این ۳ روز، این ۶ نیروگاه باید با سوخت دوم خودکار کنند. سوخت دوم نیروگاه‌های ۱،۲،۳ گازوئیل و نیروگاه‌های ۴،۵،۶ مازوت فـرض شده است. شرکت نفت موظف به تأمین سوخت این نیروگاه‌ها می‌باشد. طبق نیاز نیروگاه‌ها در هر روز سوخت مورد نظر آن‌ها را از مخازن شرکت نفت به مخازن نیروگاهی منتقل مـی‌شـود. تعـداد مخـازن گازوئیل و مازوت شرکت نفت به ترتیب ۳ و ۲ مخزن در نظر گرفته شده است.

اطلاعات مربوط به شبکه‌ی سوخت‌رسانی سیستم مورد مطالعه در جداول ۵-۱۱ و ۵-۱۲ آمده است. جدول ۵-۱۱ فواصل مخازن مختلف شرکت نفت را از نیروگاه‌های شبکه‌ی برق نشان می‌دهـد و جدول ۵-۱۲ شامل اطلاعات مربوط به حجم اولیه سوخت، حداکثر ظرفیت و حداقل حد مجاز مخازن سوخت نیروگاه‌های برق سیستم مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۵-۱۱ : فواصل مخازن و نیروگاه‌ها

| *(Km)* | | *(Km)* | |
|---|---|---|---|
| ۱۲۰ | $d_{H11}$ | ۱۰۰ | $d_{O11}$ |
| ۸۰ | $d_{H12}$ | ۱۲۰ | $d_{O12}$ |
| ۷۰ | $d_{H21}$ | ۱۵۰ | $d_{O13}$ |
| ۱۰۰ | $d_{H22}$ | ۱۰۰ | $d_{O21}$ |
| ۹۰ | $d_{H31}$ | ۱۳۰ | $d_{O22}$ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| $d_{O23}$ | ۵۰ | $d_{H32}$ | ۱۲۰ |
| $d_{O31}$ | ۱۲۵ | | |
| $d_{O32}$ | ۱۶۰ | | |
| $d_{O33}$ | ۶۰ | | |

جدول ۵-۱۲ : اطلاعات مربوط به مخازن نیروگاه‌های

| | $(m^3)$ | | $(m^3)$ |
|---|---|---|---|
| $X^0_{BO1}$ | ۴۰۰۰ | $X^0_{BH1}$ | ۵۰۰۰ |
| $X^0_{BO2}$ | ۵۰۰۰ | $X^0_{BH2}$ | ۴۰۰۰ |
| $X^0_{BO3}$ | ۲۰۰ | $X^0_{BH3}$ | ۳۰۳۰ |
| $X^{min}_{BO1}$ | ۱۰۰۰ | $X^{min}_{BH1}$ | ۲۰۰۰ |
| $X^{min}_{BO2}$ | ۱۰۰۰ | $X^{min}_{BH2}$ | ۳۰۰۰ |
| $X^{min}_{BO3}$ | ۱۰۰ | $X^{min}_{BH3}$ | ۲۵۰۰ |
| $X^{max}_{BO1}$ | ۲۰۰۰۰ | $X^{max}_{BH1}$ | ۵۰۰۰۰ |
| $X^{max}_{BO2}$ | ۲۵۰۰۰ | $X^{max}_{BH2}$ | ۴۰۰۰۰ |
| $X^{max}_{BO3}$ | ۲۰۰۰۰ | $X^{max}_{BH3}$ | ۲۵۰۰۰ |

جدول ۵-۱۳ : محدودیت تحویل سوخت از مخازن شرکت نفت

| | روز ۱ | روز ۲ | روز ۳ |
|---|---|---|---|
| $X^k_{AO1}$ | ۳۰۰۰ | ۱۰۰۰ | ۱۰۰۰ |
| $X^k_{AO2}$ | ۴۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۴۰۰۰ |
| $X^k_{AO3}$ | ۳۰۰۰ | ۳۰۰۰ | ۳۰۰۰ |
| $X^k_{AH1}$ | ۴۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۴۰۰۰ |
| $X^k_{AH2}$ | ۳۰۰۰ | ۳۰۰۰ | ۳۰۰۰ |

جدول ۵-۱۳ مقدار محدودیت تحویل سوخت از مخازن شرکت نفت برای روزهای مختلف دوره‌ی برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. قیمت هر لیتر گازوئیل و هر لیتر مازوت و هر متر مکعب گاز تحویلی به ترتیب ۵۰۰۰ و ۳۵۰۰ و ۱۳۵۰ریال و قیمت حمل‌ونقل سوخت به ازای جابجایی یک کیلومتر برای هر ۱ مترمکعب سوخت ۵۰ ریال فرض شده است. همچنین حداکثر میزان سوخت انتقالی در کل منطقه برای این ۳ روز به ترتیب ۱۰۰۰۰، ۱۲۰۰۰، ۵۰۰۰۰ متر مکعب در نظر گرفته

شده است. [۴] حداقل حجم سوخت انتقالی از هر مسیر برابر بـا ۱۰۰ متـر مکعـب و حـداکثر حجـم سوخت انتقالی برای تمام مسیرها برابر با ۱۰۰۰ متر مکعب فـرض شـده اسـت. نتـایج حاصـل تولیـد نیروگاه‌ها برای رسیدن به مقرون به صرفه‌ترین حالت تولیـد و همچنـین اسـامی خطـوطی کـه دچـار پرباری شده‌اند، در حالت دوم مطالعه‌ی موردی به ترتیب در جداول ۵-۱۴ و ۵-۱۵ آورده شده اسـت. مقدار کل هزینه سوخت و حمل‌ونقل آن در طول ۳ روز برنامه‌ریزی به ترتیب برابر با ۴۸/۸۱۷ میلیون و ۱۶۳/۹۳۶ میلیارد ریال بوده است.

جدول ۵-۱۴ : نتایج تولید شین‌های تولیدی در دوره‌ی برنامه‌ریزی در حالت دوم

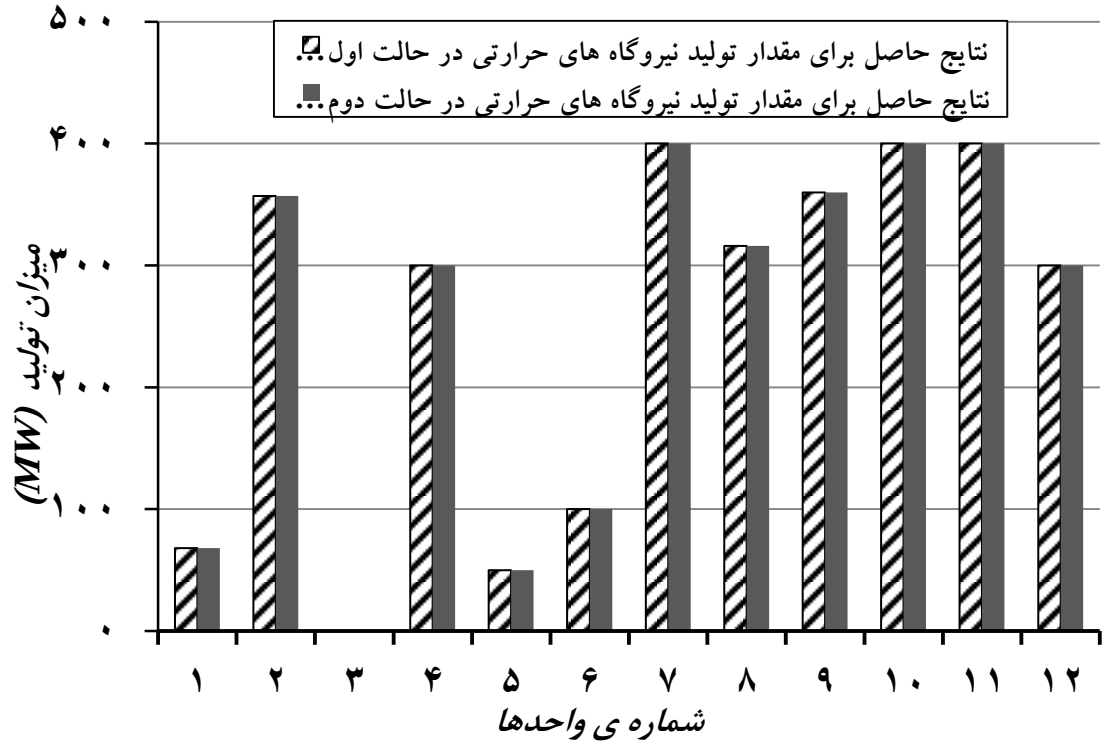
| شماره شین | روز ۱ | روز ۲ | روز ۳ |
|---|---|---|---|
| $B_1$ | ۶۸ | ۱۳۳ | ۵۰ |
| $B_2$ | ۳۵۷ | ۳۵۴ | ۳۴۹ |
| $B_3$ | ۰ | ۱۰۰ | ۵۰ |
| $B_4$ | ۳۰۰ | ۲۵۰ | ۳۵۰ |
| $B_5$ | ۵۰ | ۵۸ | ۲۸۷ |
| $B_6$ | ۱۰۰ | ۳۱۵ | ۳۴۹ |
| $B_7$ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۲۰۰ |
| $B_8$ | ۳۱۶ | ۳۵۰ | ۲۵۰ |
| $B_{13}$ | ۳۶۰ | ۳۵۰ | ۲۵۰ |
| $B_{22}$ | ۴۰۰ | ۳۵۰ | ۴۰۰ |
| $B_{23}$ | ۴۰۰ | ۳۰۰ | ۳۰۰ |
| $B_{27}$ | ۳۰۰ | ۳۰۰ | ۴۰۰ |

جدول ۵-۱۵: اسامی خطوطی که دچار پرباری شده‌اند، در حالت دوم

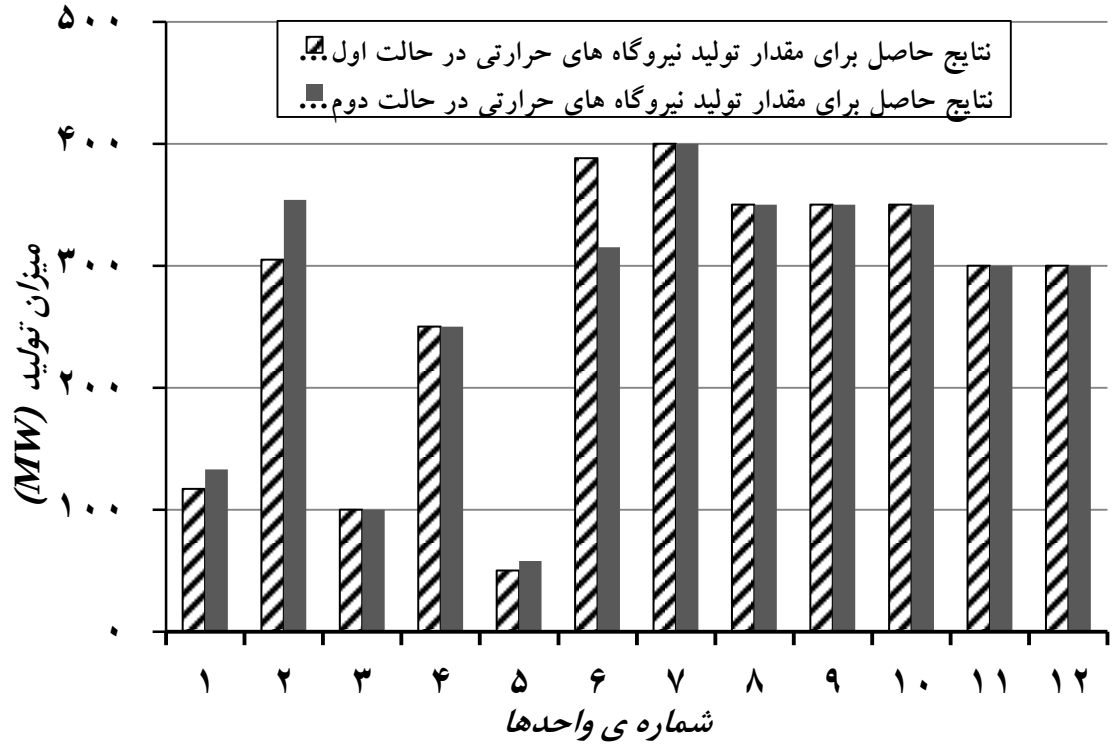
| شماره‌ی خط | شماره‌ی روز | ضریب لاگرانژ مربوط به قید فعال‌شده‌ی خط |
|---|---|---|
| $L_1$ | ۱ | ۳/۲۴۵۸ e+۶ |
| $L_1$ | ۲ | ۶/۸۲۴۳ e+۷ |
| $L_7$ | ۱ | ۶/۸۰۳۴ e+۷ |
| $L_{16}$ | ۱ | ۲/۹۷۹۹ e+۷ |

## ۵-۳- مقایسه‌ی دو حالت مورد بررسی در مطالعه‌ی موردی

جدول ۵-۱۵ خطوطی که در حالت دوم دچار پرباری شده‌اند را نشان می‌دهند. قیود مربوط به حداکثر توان عبوری با توجه به ضریب لاگرانژ به دست آمده برای هر یک از این خطوط به شدت فعال شده است و بروی جواب مسئله تأثیر می‌گذارد. همچنین در حالت اول در بدترین شرایط شبکه خطوط ۶ بار دچار پرباری شدن ولی در حالت دوم ۴ بار این مسئله رخ می‌دهد. علت این امر جابجایی تولید صورت گرفته بین نیروگاه شبکه به خاطر شرایط بحران به وجود آمده می‌باشد. این نشان می‌دهد مسئله‌ی برنامه‌ریزی تأمین سوخت دوم نیروگاه‌ها بدون در نظر گرفتن قیود شبکه‌ی برق ما را به یک جواب عملی نمی‌رساند. عدم رعایت این قیود خود ممکن است باعث ایجاد بحران جدید شود و امنیت شبکه‌ی برق را به خطر بی اندازد. شکل‌های ۵-۲ الی ۵-۴ به ترتیب مقایسه‌ی نتایج حاصل برای مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی در دو حالت مختلف مطالعه‌ی موردی صورت گرفته در این پایان نامه را نشان می‌دهد.




شکل ۵-۲ : مقایسه‌ی نتایج حاصل مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی در دو حالت مختلف مطالعه‌ی موردی در روز اول




شکل ۵-۳ : مقایسه‌ی نتایج حاصل مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی در دو حالت مختلف مطالعه‌ی موردی در روز دوم

شکل ۵-۴ : مقایسه‌ی نتایج حاصل مقدار تولید نیروگاه‌های حرارتی در دو حالت مختلف مطالعه‌ی موردی در روز سوم

همان طور که در شکل ۵-۲ مشخص است، تولید محاسبه‌شده‌ی نیروگاه‌ها در روز اول برای هر یک از دو حالت برابر بوده و تفاوتی نکرده‌است. علت این امر بخاطر آن است کـه ذخـایر نیروگـاه‌هـای سوخت دوم برای شروع دوره‌ی برنامه‌ریزی مناسب بوده و جواب‌گوی تولید بار می‌باشد و محـدودیتی در تولید ایجاد نمی‌کند. در شکل ۵-۲ و ۵-۳ جابجایی تولید به طور محسوس قابل مشاهده است. این جابجایی تولید به دلیل محدودیت‌های سوخت‌رسانی می‌باشد. محدودیت‌های سوخت‌رسـانی بـالأخص در شرایط کمبود سوخت بر روی جواب پخش بار اقتصادی شبکه‌ی برق بسیار تأثیرگـذار بـوده اسـت. جابجایی تولید صورت گرفته شرایط مسئله‌ی پخش بار را عوض می‌کند و این شرایط جدید امکان پـر باری بعضی از خطوط را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر ممکن است خطوطی که دچار پـر بـاری مـی-شوند مسئله‌ی حبس تولید را برای نیروگاه‌ها پر بازده ایجاد کنند.

## ۵-۴- تحلیل نتایج با توجه به رفتار قیود

در این قسمت با توجه به مقدار و ضرایب لاگرانژ بدست آمده‌ی قیـود کـه بـه عنـوان خروجـی برنامه‌ی GAMS مطرح می‌باشند به تحلیل نتایج بدست آمده می‌پردازیم. جـداول ۵-۱۶، ۵-۱۷ و ۵-۱۸ به ترتیب اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربـوط بـه محـدودیت حـداقل حجـم سـوخت ذخیره شده‌ی مخازن نیروگاهی در روز اول ، دوم و سوم دوره‌ی برنامه‌ریزی را نشان می‌دهند.

جدول ۵-۱۶: اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداقل حجم سوخت ذخیره شده‌ی مخازن نیروگاهی در روز اول دوره‌ی برنامه‌ریزی

| **شماره شین** | کران پایین | مقدار | کران بالا | ضریب لاگرانژ |
|---|---|---|---|---|
| $B_1$ | -۳۰۰۰ | -۶۱۷/۵۸۳ | INF | ۰ |
| $B_2$ | -۴۰۰۰ | -۲۶۴۲/۱۸ | INF | ۰ |
| $B_3$ | -۱۰۰ | ۰ | INF | ۰ |
| $B_4$ | -۳۰۰۰ | -۲۲۱۷/۶ | INF | ۰ |
| $B_5$ | -۲۰۰۰ | -۳۹۳/۳۶ | INF | ۰ |
| $B_6$ | -۵۳۰ | -۵۲۴ | INF | ۰ |

جدول ۵-۱۷: اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداقل حجم سوخت ذخیره شده‌ی مخازن نیروگاهی در روز دوم دوره‌ی برنامه‌ریزی

| شماره شین | کران پایین | مقدار | کران بالا | ضریب لاگرانژ |
|---|---|---|---|---|
| $B_1$ | -۳۰۰۰ | -۳۰۰۰ | INF | ۱/۳۸۳۹ e+۶ |
| $B_2$ | -۴۰۰۰ | -۴۰۰۰ | INF | ۱/۲۵۰۰ e+۳ |
| $B_3$ | -۱۰۰ | -۱۰۰ | INF | ۱/۵۰۰۰ e+۳ |
| $B_4$ | -۳۰۰۰ | -۳۰۰۰ | INF | ۲/۰۰۰۰ e+۳ |
| $B_5$ | -۲۰۰۰ | -۱۲۵۰/۴ | INF | ۰ |
| $B_6$ | -۵۳۰ | -۵۳۰ | INF | ۱/۲۹۰۶ e+۶ |

همانطور که در قسمت قبل در شکل ۵-۲ مشاهده شد، به علت آن که ذخایر نیروگاه‌های سوخت دوم برای شروع برنامه‌ریزی مناسب بوده و محدودیتی در تولید ایجاد نشد، این امر به وضوح در اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداقل سوخت در مخازن نیروگاهی در روز اول دوره‌ی برنامه‌ریزی که در جدول ۵-۱۶ آورده شده است، نیز مشاهده می‌شود. این جدول نشان می‌دهد که سوخت مصرفی برای روز اول جواب‌گوی تولید بار می‌باشد.

رابطه‌ی بین جدول ۵-۱۷ با شکل ۵-۳ بسیار جالب بوده است. همان طوری که در جدول ۵-۱۷ مشخص است نیروگاه ۶ در روز دوم دچار کمبود سوخت می‌شود و به ناچار با تولید کمتری باید کار کند. (همان طور که در شکل ۵-۳ مشخص است) این محدودیت سوخت باعث حبس تولید این نیروگاه می‌شود و به ناچار نیروگاه یا نیروگاه‌های دیگری که راندمان کمتری دارند باید کسری توان تولیدی این نیروگاه را جبران کنند. نیروگاه شماره‌ی ۵ دارای هزینه‌ی کمتری نسبت به نیروگاه‌های ۱ و ۲ می‌باشد و همین طور در روز دوم با توجه به جدول ۵-۱۷ این نیروگاه دچار محدودیت سوخت نمی‌باشد ولی از آنجا که دچار حبس تولید شده است تنها مقداری از این کسری تولید را جبران می‌کند، حبس تولید این نیروگاه به خاطر محدودیت خطوط انتقال بوده است. این مطلب اهمیت موضوع در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه‌ی انتقال را برای یک برنامه‌ریزی صحیح نشان می‌دهد. به ناچار جبران مابقی کسری تولید نیروگاه ۶ به روی نیروگاه ۲ میافتد، این نیروگاه نیز بخشی از تولید را

جبران کرده و چون با محدودیت سوخت مواجه می‌شود (جدول ۵-۱۷) مابقی تولید به دوش نیروگـاه شماره‌ی ۱ که هزینه‌ی بالاتری دارد میافتد.

جدول ۵-۱۸: اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداقل حجم سوخت ذخیره شده‌ی مخازن نیروگاهی در روز سوم دوره‌ی برنامه‌ریزی

| **شماره شین** | کران پایین | مقدار | کران بالا | ضریب لاگرانژ |
|---|---|---|---|---|
| $B_1$ | -۳۰۰۰ | -۱۲۹۹/۹ | INF | ۰ |
| $B_2$ | -۴۰۰۰ | -۴۰۰۰ | INF | ۱/۶۶۶۰ e+۳ |
| $B_3$ | -۱۰۰ | -۱۰۰ | INF | ۱/۰۰۰۰ e+۳ |
| $B_4$ | -۳۰۰۰ | -۳۰۰۰ | INF | ۲/۰۰۰۰ e+۳ |
| $B_5$ | -۲۰۰۰ | -۲۰۰۰ | INF | ۹۸/۹۲۳ e+۳ |
| $B_6$ | -۵۳۰ | -۵۳۰ | INF | ۷/۱۹۰۶ e+۵ |

جدول ۵-۱۸ اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حـداقل سـوخت در مخازن نیروگاهی در روز سوم دوره‌ی برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول و شـکل ۵-۴ مشخص است که کسری تولید مربوط به نیروگاه ۶ به علت محدودیت سوخت را نیروگاه ۵ و ۲ جبران می‌کند. در این روز نیروگاه شماره‌ی ۱ دچار کمبود سوخت نمی‌شود ولی از آنجا کـه دارای هزینـه‌ی تولید بالایی است بیش از این تولید نمی‌کند.

جدول ۵-۱۹: اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداکثر سوخت در مخازن نیروگاهی در روز اول دوره‌ی برنامه‌ریزی

| **شماره شین** | کران پایین | مقدار | کران بالا | ضریب لاگرانژ |
|---|---|---|---|---|
| $B_1$ | -INF | -۶۱۷/۵۸۳ | ۱۶۰۰۰ | ۰ |
| $B_2$ | -INF | -۲۶۴۲/۱۸ | ۲۰۰۰۰ | ۰ |
| $B_3$ | -INF | ۰ | ۱۹۸۰۰ | ۰ |
| $B_4$ | -INF | -۲۲۱۷/۶ | ۴۵۰۰۰ | ۰ |
| $B_5$ | -INF | -۳۹۳/۳۶ | ۳۶۰۰۰ | ۰ |
| $B_6$ | -INF | -۵۲۴ | ۲۱۹۷۰ | ۰ |

جدول ۵-۱۹ اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت حداکثر سوخت در مخازن نیروگاهی در روز اول دوره‌ی برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. هیچ کدام از قیود مربوط به محدودیت حداکثر سوخت در مخازن نیروگاهی برای دیگر روزها هم به حد خود نرسیده‌است. این مطلب دور از ذهن نمی‌باشد، چون برای نیروگاه‌ها به صرفه نیست مازاد بر نیاز تولید، سوخت ذخیره کنند. البته علت این امر را باید در جا دیگری جستجو کرد، چون مطلب ذکر شده همواره مطلوب نیست. بطور مثال اگر شرایط آب و هوایی مناسب نباشد و امکانات حمل‌ونقل در یک یا چند روز محدود شود مطلوب آن است که در روزهای قبل سوخت مصرفی در مخازن ذخیره شود. جدول ۵-۲۰ اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت روزانه انتقال کل سوخت (محدودیت حمل‌ونقل سوخت) نشان می‌دهد.

جدول ۵-۲۰ : اطلاعات خروجی بدست آمده برای قید مربوط به محدودیت روزانه انتقال کل سوخت

| **شماره روز** | کران پایین | مقدار | کران بالا | ضریب لاگرانژ |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | -INF | ۱۰۰ | ۱۰۰۰۰ | ۰ |
| ۲ | -INF | ۳۴۹۰/۰۷۴ | ۱۲۰۰۰ | ۰ |
| ۳ | -INF | ۷۴۶۹/۴۳۱ | ۵۰۰۰۰ | ۰ |

از جمله دیگر مزیت‌های مسئله‌ی برنامه‌ریزی مطرح‌شده می‌توان به مدیریت صحیح انتقال سوخت‌های قابل ذخیره‌سازی باهدف کاهش هزینه‌ها اشاره کرد. همانطور که اشاره شد به دلیل ذخیره‌سازی مناسب در روز اول مسئله سوخت از طرف نیروگاه‌ها درخواست نشد. جدول ۵-۲۱ نتایج میزان انتقال سوخت در سه روز دوره‌ی برنامه‌ریزی مطرح‌شده را نشان می‌دهد. برنامه‌ریزی صورت گرفته برای انتقال سوخت دوم (سوخت‌های قابل ذخیره‌سازی) با توجه به در نظر گرفتن توأمان دو شبکه‌ی برق و سوخت‌رسانی امنیت دو سیستم را حفظ کرده و از ایجاد بحران جدید جلوگیری می‌کند.

جدول ۵-۲۱ : نتایج میزان انتقال سوخت در سه روز دوره‌ی برنامه‌ریزی

| $(m^3)$ | | $(m^3)$ | | $(m^3)$ | |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱۰۰۰ | $x_{H12}^3$ | ۱۰۰۰ | $x_{H32}^2$ | ۱۰۰ | $x_{H21}^1$ |
| ۱۰۰۰ | $x_{H21}^3$ | ۱۳۱ | $x_{O21}^3$ | ۲۱۸ | $x_{O23}^2$ |
| ۱۰۰۰ | $x_{H22}^3$ | ۱۰۰۰ | $x_{O23}^3$ | ۷۵۶ | $x_{O33}^2$ |
| ۱۰۰۰ | $x_{H31}^3$ | ۳۹۹ | $x_{O33}^3$ | ۵۱۶ | $x_{H12}^2$ |
| ۱۰۰۰ | $x_{H32}^3$ | ۹۴۰ | $x_{H11}^3$ | ۱۰۰۰ | $x_{H31}^2$ |

# فصل ۶

# نتیجه‌گیری

## ۶-۱- نتیجه‌گیری

همان طور که از مقایسه‌ی مدل مطرح‌شده با برنامه‌ریزی‌های تولید مرسوم مشاهده شده است، عدم در نظر گرفتن شرایط سوخت‌رسانی ما از مدیریت صحیح تولید برق و برنامه‌ریزی درست آن دور می‌کند. این محدودیت‌ها بالأخص در شرایط بحران کمبود سوخت بسیار تأثیرگذار می‌باشند تا جایی که توجه نکردن به آن در پی برنامه‌ریزی اشتباه، باعث از دست دادن بخشی از تولید شده و امنیت شبکه را به خطر می‌اندازد. در واقع مدیریت صحیح انتقال سوخت و تعیین درست میزان تولید نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه انتقال بالأخص در شرایط بحران کمبود سوخت، علاوه بر اینکه هزینه تولید را کم می‌کند، با حفظ امنیت شبکه باعث جلوگیری از ایجاد بحران در شبکه‌ی برق می‌شود.

مدل مطرح‌شده در این پایان‌نامه را می‌توان یک برنامه‌ریزی کامل تولید نیروگاه‌های حرارتی با در نظر گرفتن محدودیت‌های سوخت‌رسانی و محدودیت‌های شبکه‌ی برق دانست. محدودیت‌های سوخت‌رسانی در نظر گرفته‌شده، محدودیت‌های شبکه‌های مختلف سوخت‌رسانی اعم از شبکه‌ی گاز طبیعی و شبکه‌های حمل‌ونقل دیگر سوخت‌های فسیلی را شامل می‌شود. از طرفی با توجه به اینکه اصلی‌ترین بخش هزینه‌ی تولید نیروگاه‌ها، هزینه‌ی سوخت آن‌ها بوده است، برنامه‌ریزی صحیح تأمین سوخت دوم نیروگاه‌های حرارتی در شرایط بحران کمبود گاز، می‌تواند اهمیت فراوانی داشته باشد و با در نظر گرفتن این مسئله می‌توان صرفه‌جویی قابل‌توجهی عاید سیستم کرد.

در مطالعه‌ی موردی صورت گرفته در این پروژه دیده شد به دلیل بحران و کمبود سوخت که منجر به جابجایی در تولید نیروگاه‌ها شد، برخی از خطوط دچار اضافه‌بار می‌شوند. قیود مربوط به مقدار مجاز توان عبوری از این خطوط به شدت فعال‌شده و بروی مجموعه‌ی شدنی[1] مسئله تأثیرگذار می‌باشد. در این حالت برای حفظ ظرفیت انتقالی خطوط و امنیت شبکه برق، به ناچار برخی از نیروگاه‌های پربازده در ظرفیت تولید کمتری بهره‌برداری شوند و حبس تولید برای این دسته از نیروگاه‌ها رخ می‌دهد.

1 - Feasible Set

همان طور که اشاره شد مدل مطرح‌شده را می‌توان یک مدل بهره‌برداری یکپارچه در نظر گرفت. از جمله مزایای مدل یکپارچه ارائه‌شده در این پایان‌نامه عبارتند از:

۱) مدیریت صحیح تولید برق در شرایط بحران با در نظر گرفتن محدودیت‌های سوخت‌رسانی و کاهش هزینه (اقتصادی‌ترین حالت تولید با حفظ امنیت شبکه‌ی برق).

۲) می‌توان با انجام این برنامه نیز به مدیریت صحیح انتقال سوخت‌های قابل ذخیره‌سازی باهدف کاهش هزینه‌ها دست یافت. این نکته می‌توان در بازارهای سوخت مدرن و رقابتی نیز حائز اهمیت باشد.

۳) ارائه‌ی یک مدل یکپارچه با در نظر گرفتن تمامی شبکه‌های سوخت‌رسانی در چهارچوب یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی خطی همراه با عدد صحیح و پرهیز از گسترش ابعادی و پیچیدگی غیرضروری در طرح مسئله.

۴) اطلاعات ورودی مسئله به سادگی از طریق سازمان‌های زیر بط (امور دیسپاچینگ، شرکت نفت، اداره‌ی راه و ترابی و سازمان هواشناسی) قابل حصول می‌باشد و از آنجا که برنامه‌ریزی صورت گرفته به صورت روزانه می‌باشد، با توجه داده‌های جدید پیش‌بینی می‌توان برنامه را دوباره اجرا کرد و به بهترین راهبُرد تولید در شرایط جدید رسید. بدین صورت می‌توان موارد پیش‌بینی‌نشده در ابتدای دوره‌ی برنامه‌ریزی را برای مدیریت صحیح در نظر گرفت.

از جمله پیشنهاداتی که می‌توان در رابطه با موضوع انجام‌شده در این پایان نامه ارائه داد و این جانب ضمن فعالیت و تحقیق در مورد آن‌ها قصد مطالعه و تحقیق بیشتری به روی آن را دارم، عبارتند از:

۱) بررسی مسئله‌ی مطرح شده در قالب یک مسئله درمدار آمدن واحدها. از آنجا که همواره محدودیت‌های سوخت‌رسانی جزء قیود مهم این نوع مسئله می‌باشد (به علت مدت دوره‌ی برنامه‌ریزی) مدل‌سازی کامل محدودیت‌های سوخت‌رسانی می‌تواند حائز اهمیت باشد.

۲) می‌توان مدل ارائه‌شده را در محیط تجدید ساختار و بازارهای رقابتی سوخت‌رسانی بررسی کرد و به مکانیزم صحیح جهت تعیین قیمت سوخت دست یافت.

۳) مدل ارائه شده می‌تواند راهبردی صحیح و دیدی درست جهت توسعه مخازن نیروگاهی به بهره‌برداران و برنامه‌ریزان سیستم بدهد.

۴) از آنجا که مسئله‌ی مطرح شده به عنوان یکی مسئله‌ی عملی و همچنین یک مسئله‌ی محلی برای شبکه‌هایی برقی که وابستگی شدیدی به شبکه‌ی گاز دارند مطرح می‌شود، ارائه‌ی آن به عنوان یک برنامه‌ی کامل در قالب یک طرح پژوهشی می‌تواند کمک شایانی به صنعت برق ایران که وابستگی عمیق به شبکه‌ی گاز دارد برساند.

# مراجع


[1] Chris Harris, "Electricity Markets Pricing, Structures and Economics" John Wiley & Sons Ltd, the Atrium, Southern Gate, Chi Chester, West Sussex PO19 8SQ, England, 1999.

[2] Eurostat-European commission, Electricity production, consumption and market over view-(September 2012) - http://epp.eurostat.ec.europa.eu

[3] Energy Information Administration, Electric Power Annual 2011, DOE/EIA-(January 2013) - http://www.eia.gov/

[۴] محسن اصیلی، مصطفی رجبی مشهدی، محمد حسین جاویدی،"برنامه‌ریزی کوتاه مدت تأمین سوخت نیروگاه‌ها در شرایط بحران"، بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق PSC – 2008

[5] P.C. Martin, "Modern Power Station Practices Volume a Station Planning and Design", British Electricity International (1993)

[۶] مصطفی رجبی مشهدی، حبیب رجبی مشهدی " اعمال محدودیت سوخت زمستانه در تحلیل و توزیع بهینه بار بین بلوک‌های یک نیروگاه سیکل ترکیبی"، بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق، PSC – 2006

[7] Nikolai I. Voropai, "Use of New Energy Technologies in the Asian Part of Russia," IEEE Power Engineering Review, Vol. 21, No. 7, July 2001.

[8] S. K. Tong, S. M. Shahidehpour, "An innovative approach to generaton scheduling in large-scale hydro-thermal power systems with fuel constraind unit," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 2, May 1990.

[9] Wood, A. J., Wollenberg, B. F.: 'Power Generation Operation and Control'. (John Wiley & sons, New York, 1996)

[10] Energy Information Administration, Electric Power Annual 2004, DOE/EIA-(November 2005) - http://www.eia.gov/

[۱۱] آمار تفضیلی صنعت برق ایران، اطلاعات تولید نیروی برق سال ۱۳۹۱، شرکت توانیر، معاونت منابع انسانی و تحقیقات- دفتر فن آوری اطلاعات و آمار- معاون آمار و اطلاع‌رسانی- (خردادماه ۱۳۹۲) - http://amar.tavanir.org.ir

[12] Yong Fu, Mohammad Shahidehpour, and Zuyi Li, "AC Contingency Dispatch Based on Security-Constrained Unit Commitment," IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 21, No. 2, MAY 2006.

[13] K. Tong, Mohammad Shahidehpour, “An Innovative Approach to Generation Scheduling in Large-Scale Hydro-Thermal Power Systems with Fuel Constrained Units,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 2, May 1990.

[14] K.H. Abdul-Rahman, Mohammad Shahidehpour, M. Aganagic S. Mokhtari, “A Practical resource Scheduling With OPF Constraints,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, February 1996

[15] K. Tong, Mohammad Shahidehpour, “Combination of Lagrangian-relaxation and I i near-programm ing approaches for fuel-constrained unit-commitment problems,” IEE PROCEEDINGS, Vol. 136, Pt. C, No. 3, MAY 1989.

[16] D. Zhai, W. Snyder, J. Waight, J. Farah, A. Gonzalez, and P. Vallejo, “Fuel constrained unit commitment with fuel mixing and allocation,” in Proc. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Innovative Computing for Power—Electric Energy Meets the Market, pp. 11–16, May 2001.

[17] Bo Lu, and Mohammad Shahidehpour, “Unit Commitment With Flexible Generating Units,” IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 20, NO. 2, MAY 2005.

[18] Tao Li, and Mohammad Shahidehpour, “Price-Based Unit Commitment: A Case of Lagrangian Relaxation versus Mixed Integer Programming,” IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 20, No. 4, NOVEMBER 2005.

[19] S. Vermuru and L. Lemonidis ,“Fuel scheduling”, a paper in the IEEE Power Engineering Society tutorial special publication 90EH0238-5-PWR, “Application of optimization methods for economy/security functions in power system operations”, IEEE Power Engineering Society, 1990.

[20] V. Vickers, W. Hobbs, S. Vemuri, and D. Todd, “Fuel resource scheduling with emission constraints,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1531-1538, August 1994.

[21] M. Djukanovic, B. Babic, and B. Milosevic, “Fuzzy linear programming based optimal fuel scheduling incorporating blending/transloading facilities,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 1017-1023, May 1996.

[22] J. S. Shih and H. C. Frey, “Coal blending optimization under uncertainty,” in Proceedings of the Tenth Annual International Pittsburgh Coal Conference, pp. 1110-1115, September 1993.

[23] L. D. Rosenberg, D. A. Williams, and J. D. Campbell, “Fuel scheduling and accounting,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 682-688, May 1990.

[24] K.Moslehi, V. R. Sherkat, and F. Cacho Ruiz, “Optimal scheduling of long-term fuel purchase, distribution, storage and consumption,” in Proceedings of the Power Industry Computer Application Conference, pp. 98-104, 1991.

[25] K. P. Wong and Y. W. Wong, “Hybrid genetic/simulated annealing approach to shortterm multiple-fuel-constrained generation scheduling,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 776-784, May 1997.

[26] J. D. Libbin and M. D. Boehije, “Interregional structure of the U.S. coal economy,” American Journal of Agricultural Economics, Vol. 59, No.3, pp. 456-466, 1977.

[27] T.Takayama and G. Judge, “Spatial and Temporal Price Allocation Models. Amsterdam,” The Netherlands: North-Holland, 1971.

[28] C. J. Chang, R. D. Miles, and K. C. Sinha, “A regional railroad network optimization model for coal transportation,” Transportation Research Part B, Vol. 15B, pp. 227-238, 1981.

[29] P. C. Pendharkar, “A fuzzy linear programming model for production planning in coal mines,” Computers & Operations Research, Vol. 24, No. 12, pp. 1141-1149, 1997.

[30] N. van Beeck, “Classification of energy models,” in Tilburg University and Eindhoven University of Technology. : , 1999.

[31] Ana Quelhas, Esteban Gil, James D. McCalley, Sarah M. Ryan, “A Multiperiod Generalized Network Flow Model of the U.S. Integrated Energy System: Part I—Model Description,” IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 22, NO. 2, MAY 2007

[32] Cem Sahin, Zuyi Li, Mohammad Shahidehpour, Ismet Erkmen, “Impact of Natural Gas System on Risk-Constrained Midterm Hydrothermal Scheduling,” IEEE Trans on Power Systems, Vol. 26, No. 2, MAY 2011.

[33] Tao Li, Mircea Eremia, Mohammad Shahidehpour, “Interdependency of Natural Gas Network and Power System Security,” IEEE Trans on Power Systems, Vol. 23, No. 4, NOVEMBER 2008.

[34] C. Unsihuay, J.W.M. Lima, A.C.Z. de Souza, “Modeling the Integrated Natural Gas and Electricity Optimal Power Flow,” IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, Power Engineering Society General Meeting, 2007.

[35] Chowdhury B H and Rahman SA, “Review of recent advances in economic dispatch,” IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5 (4), p.p. 1248-1259, 1990.

[36] David C, Walters and Gerald B. Sheble, “Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, 1993.

[37] LIN W.M., CHENG F.S., TSAY M.T., "An improved Tabu search for economic dispatch with multiple minima," IEEE Trans Power System, Vol 17, pp. 108–112, 2002.

[38] Nidul Sinha, R. Chakrabarti, and P. K. Chattopadhyay, "Evolutionary programming techniques for economic load dispatch," IEEE Transactions on Evolution Computation, Vol. 7, pp. 83-94, 2003.

[39] S. Khamsawang, C. Boonseng and S. Pothiya, "Solving the economic dispatch problem with Tabu search algorith," IEEE Int Conf Ind Technol, Vol. 1, pp. 274–8, 2002

[40] N. Noman and H. Iba, "Differential evolution for economic load dispatch problems," Electric Power Systems Research, Vol. 78, p.p. 1322-31, 2008

[41] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," IEEE International Conference on Neural Networks Proceedings.USA, 1942-8, 1995

[42] J. Park, K. Lee and J. Shin, "A particle swarm optimization for economic dispatch with non-smooth cost functions," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, pp. 34-42, 2005.

[43] T. Aruldoss Albert Victoire and A. Ebenezer Jeyakumar, "Hybrid PSO-SQP for economic dispatch with valve-point effect," Electric Power Systems Research, Vol. 71, pp. 51-9, 2004

[44] S. Duman, U. Guvenc, N. Yorukeren, "Gravitational Search Algorithm for Economic Dispatch with Valve-Point Effects," International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 5, N. 6, November-December 2010.

[45] C. E. Lin, G. L. Viviani, "Hierarchical Economic Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Functions," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 6, June 1984.

[46] K. Y. Lee, A. Sode-Yome and J. H. Park, "Adaptive Hopfiled Neural Network for Economic Load Dispatch," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 13, pp. 519-526, 1998.

[47] S. C. Lee and Y. H. Kim, "An Enhanced Lagrangian Neural Network for the ELD Problems with Piecewise Quadratic Cost Functions and Nonlinear Constraints," Electric Power Systems Research, Vol. 60, No. 3, 2002.

[48] J.R. Won, Y.M. Park, "Economic Dispatch Solutions with Piecewise Quadratic Cost Functions Using Improved Genetic Algorithm," Electric Power Energy Systems, Vol. 25, No. 5, pp. 355-361, 2003.

[49] J.B. Park, K.S. Lee, J.R. Shin, K. Y. Lee, "A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 1, pp. 34-42, 2005.

[50] D. N. Jeyakumar, T. Jayabharathi and T. Raghunathan, "Particle Swarm optimization for Various Types of Economic Dispatch Problems," Electric Power Energy Sys-tems, Vol. 28, No. 1, pp. 36-42, 2006.

[51] Y.M. Park, J.R. Won and J.B. Park, "A New Approach to Economic Load Dispatch Based on Improved Evolu-tionary Programming," Engineering Intelligent Systems Electrical Engineering Communication, Vol. 6, 1998, pp. 103-110, 1998.

[52] S. Baskar, P. Subbaraj, M.V.C. Rao; "Hybrid Real Coded Genetic Algorithm Solution to Economic Dispatch Problem," Computers Electrical Engineering, Vol. 29, No. 3, pp. 407-419, 2003.

[53] Anandhakumar R., Subramanian S., "Economic Dispatch with Multiple Fuel Options Using CCF," Energy and Power Engineering, Vol. 3, (2), pp. 113-119, 2011.

[54] Talaq J H, El Hawary F and El Hawary M E. A; "Summary of environmental/economic dispatch algorithms," IEEE Trans on Power Systems, Vol. 9 , p.p. 1508-1516, 1994.

[55] Yalcinoz T. , Altun H. , "Environmentally constrained economic dispatch via a genetic algorithm with arithmetic crossover," Africon Conference in Africa, 2002. IEEE AFRICON 6th, p.p. 923 – 928, Vol.2, 2002.

[56] Bhattacharya, A. , Jadavpur Univ., Kolkata, India , Chattopadhyay, P.K., "Oppositional Biogeography-Based Optimization for multi-objective Economic Emission Load Dispatch," India Conference (INDICON), 2010 Annual IEEE , p.p. 1 – 6, 2010.

[57] Osman, M.S. , High Inst. of Technol., 10th Ramadan City, Egypt , Abo-Sinna, M.A. , Mousa, A.A., "Epsilon-dominance based multiobjective genetic algorithm for economic emission load dispatch optimization problem," IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, Vol. 2 , p.p. 576 – 581, 2006.

[58] Dhillon J.S. , Kothari D.P. , "Economic emission load dispatch using binary successive approximation based evolutionary search," IET JOURNALS & MAGAZINES, Vol. 3 , Issue: 1, p.p. 1-16 , 2009.

[59] J. Nanda, D.P. Kothari, K.S. Lingamurthy, "Economic emission load dispatch through goal programming techniques," IEEE JOURNALS & MAGAZINES, Vol. 3, Issue: 1, p.p. 26-32, 1988.

[60] Nanda J. , Hari L. , Kothari M.L. " Economic emission load dispatch with line flow constraints using a classical technique," IET JOURNALS & MAGAZINES, p.p. 1-10 , Vol. 141 , Issue: 1, 1994.

[61] Almoataz Y. Abdelaziz Said F. Mekhamer Mohamed Z. Kamh Mohamed A. L. Badr, "A Hybrid Hopfield Neural Network-Quadratic Programming Approach for Dynamic Economic Dispatch Problem", IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, p.p. 565 - 570, 2008.

[62] D. W. Ross and S. Kim, "Dynamic Economic Dispatch of Generation," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, pp.2060–2067, Nov./Dec. 2002.

[63] S. F. Mekhamer, A. Y. Abdelaziz, M. A. L. Badr and M. Z. Kamh, "Enhancing The Performance Of Hopfield Neural Network Applied To The Economic Dispatch Problem", Proceedings of the Eleventh International Middle East Power System Conference, MEPCON'06, pp. 347-352, Dec. 2006.

[64] F. N. Lee, L. Lemonidis and K. Liu, "Price-Based Ramp-Rate Model for Dynamic Dispatch and Unit Commitment," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp.1233–1242, Aug. 1994.

[65] X. S. Han, H. B. Gooi, and D. S. Kirschen, "Dynamic Economic Dispatch: Feasible and Optimal Solutions," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 1, pp.22–28, Feb. 2002.

[66] Jong-Bae Park,Yun-Won Jeong, Joong-Rin Shin, and Kwang Y. Lee, "An Improved Particle Swarm Optimization for Nonconvex Economic Dispatch Problems," IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 25, No. 1, FEBRUARY 2010.

[67] Amjady N. , Nasiri-Rad H. , "Nonconvex Economic Dispatch With AC Constraints by a New Real Coded Genetic Algorithm," Power Systems, IEEE Transactions on Vol. 24 , Issue: 3 , p.p. 1489 - 1502 , 2009.

[68] Zwe-Lee Gaing , "Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints," Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 18 , Issue: 3 , p.p. 1187 – 1195, 2003.

[69] D. Streiffert, "Multi-Area Economic Dispatch with Tie Line Constraints", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 4, pp.1946-1651, 1995.

[70] R.R. Shoults, S.K. Chang, S. Helmick, W.M. Grady, "A Practical Approach to Unit Commitment, Economic Dispatch and Savings Allocation for Multiple-Area Pool Operation with Import/Export Constraints," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No.2, pp.625-635, 1980.

[71] Manisha Sharma, Manjaree Pandit, Laxmi Srivastava, "Multi-area economic dispatch with tie-line constraints employing evolutionary approach", International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 132-149, 2010.

[72] C. Wang, S.M. Shahidehpour, "A Decomposition Approach to Non-Linear Multi-Area Generation Scheduling with Tie-Line Constraints Using Expert Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp.1409-1418, 1992.

[73] S.D. Helmick, R.R. Shoults, "A Practical Approach to an Interim Multi-Area Economic Dispatch Using Limited Computer Resources" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 6, pp.1400-1404, 1985.

[74] P. S. Manoharan, P. S. Kannan, V. Ramanathan, "A Novel EP Approach for Multi-area Economic Dispatch with Multiple Fuel Options", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 16, No.2, 2008.

[۷۵] سارا محتشمی، حبیب رجبی مشهدی، " بهره‌برداری از نیروگاه‌های حرارتی در شرایط پیک زمستانی گاز با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه انتقال گاز و تلفات انرژی دو شبکه گاز و برق" ، بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق، PSC – 2008

# Abstract

Energy required to run of different affairs has always been considered one of the major concerns of human. Gradually with the progress of industry and the increasing need for safe and clean energy, electrical energy has found a particular role in the realm of the world energy. Advantages of electrical energy have increased its applications in different affairs, so that it is be remembered as interface energy for better usage of other available energy now. Fuel consumption has always been considered as one of important factors electricity generates. With the development of power systems, its dependence on fueling systems is undeniable. So that crisis and shortage in this system is directly threat to the security of the power system. The other hand, complete and correct scheduling of these two systems addition are provide electric grid security, costs reduction are included too. In harsh winter conditions while reducing the temperature leads to an increase in gas demands of consumers of non-power-plant, supplying the consuming Gas of most power-plants faces serious limitations. Ignoring these limitations could result in the shutdown of some power generating units and compromise the network security. In these conditions, usually a gas network cannot supply required gas of all power-plants, and thermal power plants operate with second fuel sources which are mostly gasoline and fuel-oil. Because there are limitations in the second fuel storage, if for any reason the usage time of second fuel prolonged, power-plants would face with fuel shortages and the threat of blackouts. This crisis actually occurred in December of 2007 in IRAN.

To obtain an actual answer we must keep in mind the constraints of power network together with fuel transmission limitations. This Thesis aims to attain an integrated model in order to achieve the most economical of generation state with maintaining security electricity network, by various fueling system modeling and considering their limitation as generation restrictions. The effectiveness of model presented for an accurate generation planning has been expressed by its evaluation with conventional generation scheduling.



**Keywords**: Fuel crisis, Short time planning, Generation management, Fuel transport, DC power flow

Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Thesis Title:

# Generation management and planning the fuel supplement for power plant in gas shortage crisis

By: Mohammad Ali Lasemi

Supervisor: Mohsen Asili

A thesis submitted to the Graduate Studies Office
in partial fulfillment of the requirements for
the degree of Master Science
in Electrical Engineering

September 2013