PSC 2008
23rd International Power System Conference
بیست و سومین
کنفرانس بین المللی برق
98-F-PSS-0270

برنامه‌ریزی کوتاه مدت تأمین سوخت نیروگاه‌ها در شرایط بحران

محسن اصیلی مصطفی رجبی مشهدی محمد حسین جاویدی
شرکت برق منطقه‌ای خراسان- امور دیسپاچینگ شمال شرق
آزمایشگاه تخصصی مطالعات سیستم و تجدید ساختار- دانشگاه فردوسی مشهد
ایران

واژه‌های کلیدی: بحران سوخت، خاموشی، برنامه‌ریزی کوتاه مدت، امنیت تولید، حمل و نقل، دیسپاچینگ

چکیده

از اواسط دیماه سال گذشته همزمان با برودت بی سابقه دما در بیشتر نقاط کشور و افزایش مصرف گاز سایر مصارف غیر نیروگاهی، تامین گاز در بسیاری از نیروگاههای کشور با محدودیتهای جدی روبرو شد و حتی به صورت کامل قطع گردید. در این شرایط نیروگاههای حرارتی با سوخت دوم خود که عمدتاً گازوئیل و یا مازوت می‌باشد بهره‌برداری شدند. در محدوده تحت پوشش شرکت برق منطقه‌ای خراسان با توجه به حجم مخازن و محدودیتهای تامین و انتقال سوخت دوم به نیروگاهها و همچنین مصرف برق منطقه، سطح مخازن ذخیره سوخت به شدت کاهش یافت، به طوریکه حتی در برخی از نیروگاهها با توجه به تامین روزانه سوخت توسط شرکت نفت میزان سوخت پاسخگوی یک روز کامل نبود و امکان خاموشی اجباری بخشی از بارها قریب الوقوع می‌نمود. در چنین شرایطی، مدیریت انتقال سوخت به نیروگاهها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مقاله ضمن تعریف مسئلهٔ برنامه‌ریزی کوتاه مدت تحویل سوخت دوم به نیروگاهها، حل آن را برای یک منطقه فرضی و همچنین برای یک مورد واقعی (استانهای خراسان) مد نظر قرار داده است. نتایج نشان می‌دهد که این برنامه‌ریزی ابزار کارآمدی در مدیریت بحران کمبود سوخت نیروگاهها و در نتیجه تأمین برق مشترکین می‌باشد.

۱- مقدمه

در زمستان سال گذشته همزمان با استقرار سامانه پر فشار در سطح زمین و گسترش هوای سرد در لایه های فوقانی، هوای سردی در استانهای خراسان استقرار یافت. در این شرایط میانگین دمای هوای دیماه در مشهد نسبت به سال گذشته (سال ۱۳۸۵) حدود ۶,۵- درجه و نسبت به متوسط دوره زمانی سالهای قبل (۱۳۸۶-۱۳۴۰) حدود ۸,۸ درجه سانتیگراد سردتر بوده است. حداقل دمای ثبت شده در مشهد حدود ۲۱- درجه بوده که نسبت به سال گذشته ۱۱,۴ درجه سردتر بوده است. ضمن اینکه در برخی نقاط استان دمای هوا تا ۳۰- درجه سانتیگراد کاهش یافت. آمارها بیانگر آن است که میانگین دمای حداقل دیماه سال ۱۳۸۶ پس از سال ۱۳۴۲ تاکنون بی‌سابقه بوده است. همچنین در این دوره آماری وقوع

و تداوم دمای حداکثر زیر صفر، در مورد دیماه ۱۳۸۶ بی‌سابقه و در بهمن ماه نیز کم سابقه بوده است.

در چنین شرایط دمایی با افزایش مصرف گاز در شهرها و قطع گاز ورودی از کشور ترکمنستان، گاز مورد نیاز نیروگاهها که سوخت اول نیروگاهها بوده به شکل جدی محدود شد و حتی در برخی از هفته ها با قطع کامل روبرو گردید. با ادامه این روند ذخیره تانک های سوخت دوم هر نیروگاه به شدت کاهش یافت و در اغلب روزها سوخت تحویلی روزانه به هر نیروگاه از سوخت مصرفی آن کمتر بوده و شرایط را به بحران نزدیک‌تر می‌نمود. در حالی که شرکت نفت با تمام قوا و با توجه به برودت هوا و لغزندگی سطح جاده‌ها و از آن مهمتر موجودی ذخایر سوخت، امکان تامین سوخت بیشتری را نداشت، در برخی روزها سوخت مفید هر نیروگاه توان تأمین تنها ۶۰ درصد تولید انرژی مورد نیاز را داشت. بنابراین بحران به شکل فزاینده‌ای سایه خود را بر اعمال خاموشی‌های برنامه‌ریزی شده انداخت.

در چنین شرایطی مدیریت و برنامه‌ریزی کوتاه مدت جهت سوخت تحویلی به نیروگاهها تأثیر بسزائی در استفاده مؤثر از سوخت گرانقیمت دوم نیروگاهها، کاهش خاموشیها و به تبع آن کاهش بحرانهای اجتماعی و سیاسی ناشی از خاموشی دارد. این مقاله با هدف برنامه ریزی کوتاه مدت سوخت نیروگاهها و با توجه به قیود شبکه و محدودیت های سوخت تدوین شده است.

می‌توان گفت آنچه در مورد برنامه‌ریزی سوخت نیروگاهها انجام پذیرفته است بیشتر در ارتباط با شرایط عادی سوخت‌رسانی به نیروگاههای می‌باشد [1-7] خصوصاً نیروگاههای با سوخت زغال سنگ که سوخت باید توسط وسایل حمل و نقل انتقال یابد [1,2]. مسئله برنامه‌ریزی سوخت را می‌توان همراه با مسئله پخش بار اقتصادی[1] مورد تحلیل قرار داد [5]. همچنین علاوه بر برنامه‌ریزی خطی که روش رایج برای برنامه‌ریزی سوخت می‌باشد استفاده از روشهای دیگر مانند شبکه‌های عصبی نیز مورد بررسی قرار گرفته است[6]. در مرجع [7] به مسئله پخش بار اقتصادی چند ناحیه‌ای پرداخته شده که در آن استفاده از سوختهای مختلف برای ژنراتورها لحاظ شده است.

تفاوت عمده این مقاله با مقالات مشابه در زمینه برنامه‌ریزی سوخت، برنامه‌ریزی تأمین سوخت دوم نیروگاهها است آن هم در شرایطی است که ممکن است سوخت اول دارای محدودیت یا قطع کامل باشد. این شرایط منطبق بر وضعیتی است که در زمستان سال گذشته (۱۳۸۶) بر تولید برق کشور سابه افکنده بود. در این مقاله ضمن شرح و تعریف دقیق مسئله، محدودیتهای متنوعی که عملا در شرایط بحران وجود دارد در نظر گرفته شده و سپس مسئله برای یک نمونه فرضی و یک نمونه عملی(نیروگاههای موجود در استانهای خراسان) حل شده است.

۲- معرفی متغیرها و پارامترها

α_O	قیمت گازوئیل تحویلی به تانکرهای سوخت ($Rial / m^3$)
α_H	قیمت سوخت مازوت تحویلی به تانکرهای سوخت ($Rial / m^3$)
β	قیمت حمل و نقل سوخت ($Rial / m^3.Km$)
η_{Oj}	مصرف سوخت نیروگاه B_{Oj} برای تولید ۱ مگاوات ساعت برق- (m^3 / MWh)
η_{Hj}	مصرف سوخت نیروگاه B_{Hj} برای تولید ۱ مگاوات ساعت برق- (m^3 / MWh)
A_{Oi}	مخزن i ام گازوئیل شرکت نفت
B_{Oj}	نیروگاه j ام گازوئیل سوز
A_{Hi}	مخزن i ام مازوت شرکت نفت
B_{Hj}	نیروگاه j ام مازوت سوز
C	هزینه کل در طول دوره برنامه‌ریزی
C_f	هزینه کل سوخت مصرفی توسط نیروگاهها در طول دوره برنامه‌ریزی
C_t	هزینه کل حمل و نقل سوخت در طول دوره برنامه‌ریزی

1. Economic load dispatch

d_{Oij} فاصله بین مخزن A_{Oi} و نیروگاه B_{Oj} (Km)

d_{Hij} فاصله بین مخزن A_{Hi} و نیروگاه B_{Hj} (Km)

N دوره برنامه‌ریزی (روز)

n_{AO} تعداد مخازن گازوئیل

n_{BO} تعداد نیروگاههای گازوئیل سوز

n_{AH} تعداد مخازن مازوت سوز

n_{BH} تعداد نیروگاههای مازوت سوز

w_{Oj}^{k} انرژی تولیدی توسط نیروگاه B_{Oj} در روز k ام (MWh)

w_{Hj}^{k} انرژی تولیدی توسط نیروگاه B_{Hj} در روز k ام (MWh)

$W_{Oj}^{\min k}$ حداقل انرژی تولیدی توسط نیروگاه B_{Oj} در روز k ام (MWh)

$W_{Oj}^{\max k}$ حداکثر انرژی تولیدی توسط نیروگاه B_{Oj} در روز k ام (MWh)

$W_{Hj}^{\min k}$ حداقل انرژی تولیدی توسط نیروگاه B_{Hj} در روز k ام (MWh)

$W_{Hj}^{\max k}$ حداکثر انرژی تولیدی توسط نیروگاه B_{Hj} در روز k ام (MWh)

W_{d}^{k} مصرف کل انرژی منطقه در روز k ام (MWh)

W_{t}^{k} تبادل کل انرژی با مناطق اطراف در روز k ام (ورود انرژی به منطقه مثبت درنظر گرفته می‌شود) (MWh)

W_{g}^{k} میزان تولید کل انرژی توسط نیروگاههایی که گاز مصرفی آنها تأمین شده است در روز k ام (MWh)

W^{k} مصرف کل انرژی منطقه در روز k (MWh)

x_{Oij}^{k} سوخت گازوئیل جابجا شده بین مخزن A_{Oi} و نیروگاه B_{Oj} در روز k ام (m^3)

x_{Hij}^{k} سوخت مازوت جابجا شده بین مخزن A_{Hi} و نیروگاه B_{Hj} در روز k ام

X_{AOi}^{k} حداکثر گازوئیل تحویلی مخزن A_{Oi} در روز k ام

X_{AHi}^{k} حداکثر مازوت تحویلی مخزن A_{Hi} در روز k ام

X_{BOj}^{0} سوخت اولیه گازوئیل در مخازن نیروگاه B_{Oj}

X_{BHj}^{0} سوخت اولیه مازوت در مخازن نیروگاه B_{Hj}

$X_{BOj}^{\max}$ حداکثر گنجایش گازوئیل مجموع مخازن سوخت نیروگاه B_{Oj}

$X_{BOj}^{\min}$ حداقل گنجایش گازوئیل مجموع مخازن سوخت نیروگاه B_{Oj}

$X_{BHj}^{\max}$ حداکثر گنجایش مازوت مجموع مخازن سوخت نیروگاه B_{Hj}

$X_{BHj}^{\min}$ حداقل گنجایش مازوت مجموع مخازن سوخت نیروگاه B_{Hj}

X^{k} **محدودیت کل انتقال سوخت در روز k (m^3)**

۳- شرح مسئله

هدف از این بخش توصیف مسئله برنامه ریزی سوخت در منطقه‌ای است که شامل تعدادی نیروگاه می‌باشد. این منطقه با مناطق اطراف خود در طول روز تبادل انرژی الکتریکی دارد. سوخت اصلی نیروگاهها گاز می‌باشد که در شرایط بحران کمبود گاز باید از سوخت دوم آنها که مازوت[1] و یا گازوئیل[2] است جهت تولید برق استفاده کرد.

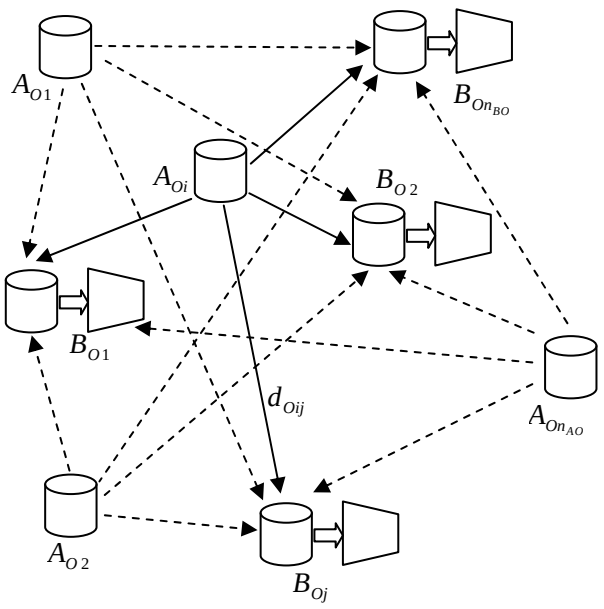
فرض می‌کنیم گاز تعداد مشخصی از نیروگاهها در هر روز تأمین می‌شود و برای الباقی نیروگاهها شرکت نفت موظف به تامین سوخت دوم باشد.

نیروگاهها را بسته به نوع سوخت دوم مورد استفاده به دو دسته گازوئیل‌سوز و مازوت‌سوز تفکیک می‌نماییم. ممکن است در بعضی نیروگاههای خاص، هم واحدهای مازوت‌سوز و هم واحدهای گازوئیل‌سوز موجود باشد. در این صورت برای فرمول‌بندی بهتر، کل ظرفیت واحدهای گازوئیل‌سوز را به عنوان یک نیروگاه و تمام ظرفیت واحدهای مازوت سوز را به عنوان نیروگاه مستقل دیگری درنظر می‌گیریم.

1. Heavy oil
2. Oil

معمولاً مخازن سوخت شرکت نفت اعم از مازوت و گازوئیل مانند نیروگاهها از نظر جغرافیایی در منطقه پراکنده‌اند. در شرایط بحران، شرکت نفت با استفاده از موجودی این مخازن توسط تانکرهای سوخت‌رسان، سوخت را به نیروگاهها ارسال و در مخازن نیروگاهی تخلیه می‌کند.

فرض کنید در منطقه مورد نظر در تعداد n_{AO} نقطه مشخص مخازن سوخت گازوئیل وجود دارد. همچنین در n_{BO} نقطه مجزا نیروگاههای گازوئیل‌سوز قرار می‌گیرند. در مورد مخازن مازوت و نیروگاههای مازوت‌سوز نیز فرض می‌شود که به ترتیب در n_{AH} و n_{BH} نقطه مجزا قرار داشته باشند. کوتاهترین فاصله جاده‌ای بین هر مخزن سوخت گازوئیل A_{Oi} تا هر نیروگاه B_{Oj} را با d_{Oij} نشان می‌دهیم. (شکل ۱). همچنین کوتاهترین فاصله جاده‌ای بین هر مخزن سوخت مازوت A_{Hi} تا هر نیروگاه B_{Hj} را با d_{Hij} نشان داده می‌شود و می‌توان شکلی مشابه با شکل ۱ برای مخازن و نیروگاههای مازوت‌سوز نیز درنظر گرفت.



شکل ۱: نمایش موقعیت مخازن سوخت و نیروگاهها و فاصله بین آنها (سوخت گازوئیل)

مسئله برنامه‌ریزی کوتاه مدت سوخت‌رسانی در شرایط بحران را می‌توان به صورت خلاصه به شرح زیر تعریف کرد: بدست آوردن حداقل هزینه سوخت و نقل و انتقال آن از مخازن شرکت نفت به نیروگاهها در یک دوره زمانی مشخص با توجه به قیود تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز، قیود ظرفیت مخازن، محدودیتهای انتقال سوخت و سایر محدودیتهایی که در صورت لزوم می‌توان آنها را به مسئله اضافه نمود.

۳-۱ تابع هزینه

تابع هزینه (C) را می‌توان متشکل از دو بخش اصلی دانست: هزینه سوخت مصرفی کل نیروگاهها در طول دوره برنامه‌ریزی (C_f) بعلاوه هزینه حمل و نقل سوخت از مخازن شرکت نفت توسط تانکر و تخلیه در مخازن سوخت نیروگاهی در طول همین مدت (C_t):

$$C = C_f + C_t \qquad (۱)$$

طول دوره برنامه‌ریزی را در حالت کلی N روز فرض می‌کنیم.

۲-۱-۱ هزینه سوخت مصرفی در طول دوره برنامه‌ریزی

فرض می‌کنیم انرژی تولیدی توسط نیروگاه B_{Oj} در روز k ام برابر با w_{Oj}^{k} مگاوات ساعت باشد. همچنین مگاوات ساعت انرژی تولیدی متوسط توسط واحدهای این نیروگاه به‌ازای مصرف ۱ مترمکعب سوخت (بازده حرارتی متوسط نیروگاه) را با η_{Oj} نشان می‌دهیم. در این صورت سوخت مصرف‌شده توسط این نیروگاه در روز k ام مقدار $\eta_{Oj} w_{Oj}^{k}$ خواهد بود. بنابراین سوخت مصرفی در کل نیروگاههای موجود (اعم از مازوت و گازوئیل) در روز k ام از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sum_{j=1}^{n_{BO}} \eta_{Oj} w_{Oj}^{k} + \sum_{j=1}^{n_{BH}} \eta_{Hj} w_{Hj}^{k} \qquad (۲)$$

اگر قیمت گازوئیل و مازوت (تحویلی در محل مخازن شرکت نفت به تانکرهای حمل سوخت) به ترتیب α_O و α_H باشد در اینصورت قیمت سوخت برای کل دوره N روزه برنامه‌ریزی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_f = \sum_{k=1}^{N} \left(\alpha_O \sum_{j=1}^{n_{BO}} \eta_{Oj} w_{Oj}^{k} + \alpha_H \sum_{j=1}^{n_{BH}} \eta_{Hj} w_{Hj}^{k} \right) \qquad (۳)$$

۳-۱-۲ هزینه حمل و نقل در طول دوره برنامه‌ریزی

با توجه به شکل ۱ میزان سوخت جابجا شده بر حسب مترمکعب بین مخزن A_{Oi} و نیروگاه B_{Oj} در روز k ام برنامه‌ریزی را x_{Oij}^{k} می‌نامیم. فرض می‌کنیم هزینه حمل و نقل برای ۱ متر مکعب سوخت برای ۱ کیلومتر β ریال باشد. بنابراین هزینه انتقال سوخت گازوئیل بین این مخزن و نیروگاه مشخص $\beta d_{Oij} x_{Oij}^{k}$ خواهد بود. هزینه انتقال سوخت از تمام مخازن سوخت گازوئیل به نیروگاه مذکور در روز k ام طبق این رابطه قابل محاسبه است:

$$\beta \sum_{i=1}^{n_{AO}} d_{Oij} x_{Oij}^{k} \qquad (۴)$$

و هزینه انتقال سوخت گازوئیل از کلیه مخازن به کلیه نیروگاههای گازوئیل‌سوز عبارتست از:

$$\beta \sum_{j=1}^{n_{BO}} \sum_{i=1}^{n_{AO}} d_{Oij} x_{Oij}^{k} \qquad (۵)$$

و نهایتا کل هزینه حمل و نقل در دوره N روزه برنامه‌ریزی برای تمام نیروگاهها شامل گازوئیل و مازوت به شکل زیر بیان می‌شود:

$$C_t = \beta \sum_{k=1}^{N} \left(\sum_{j=1}^{n_{BO}} \sum_{i=1}^{n_{AO}} d_{Oij} x_{Oij}^{k} + \sum_{j=1}^{n_{BH}} \sum_{i=1}^{n_{AH}} d_{Hij} x_{Hij}^{k} \right) \qquad (۶)$$

۳-۲ محدودیتها

۳-۲-۱ محدودیت حداکثر و حداقل سوخت در مخازن نیروگاهی

واضح است که ظرفیت کل تانکهای سوخت هر نیروگاه محدود است. همچنین میزان سوخت مفید قابل استفاده از مخازن نیز محدودیت دارد. از هر تانک ذخیره تا میزان مشخصی می‌توان برداشت کرد و معمولا حداقلی از سوخت در درون تانک باقی می‌ماند. در نیروگاههایی که مخزن سوخت آنها متشکل از چند تانک است در شرایط بحران جهت افزایش ظرفیت مفید معمولا کلیه سوختها به یک تانک انتقال می‌یابد. بنابراین محدودیت حداقل سوخت این تانک به عنوان مرز درنظر گرفته می‌شود.

اگر $X_{BOj}^{\max}$ و $X_{BOj}^{\min}$ به ترتیب حداکثر و حداقل گنجایش گازوئیل مجموع تانکهای سوخت نیروگاه B_{Oj} باشد، همچنین $X_{BHj}^{\max}$ و $X_{BHj}^{\min}$ به ترتیب حداکثر و حداقل گنجایش مازوت مجموع مخازن سوخت نیروگاه B_{Hj}، در این صورت میزان سوخت ذخیره در هر نیروگاه در هر روز باید بین این دو مقدار قرار داشته باشد.

میزان سوخت ذخیره شده در نیروگاه B_{Oj} در روز k ام از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$X_{BOj}^{0} + \sum_{k'=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_{AO}} x_{Oij}^{k'} - \sum_{k'=1}^{k} \eta_{Oj} w_{Oj}^{k'} \qquad (۷)$$

در عبارت بالا X_{BOj}^{0} سوخت اولیه موجود در مخازن نیروگاه در ابتدای دوره برنامه‌ریزی می‌باشد. دومین عبارت میزان سوخت وارد شده به مخازن را از ابتدای دوره برنامه‌ریزی تا روز k ام نشان می دهد و آخرین عبارت، سوخت مصرف شده در نیروگاه تا روز k ام می‌باشد.

با توجه به (۷) باید دسته نامعادلات زیر به ترتیب برای نیروگاههای با سوخت گازوئیل و سوخت مازوت برقرار باشد:

$$\sum_{k'=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_{AO}} x_{Oij}^{k'} - \sum_{k'=1}^{k} \eta_{Oj} w_{Oj}^{k'} \geq X_{BOj}^{\min} - X_{BOj}^{0} \qquad (۸)$$

$$\sum_{k'=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_{AO}} x_{Oij}^{k'} - \sum_{k'=1}^{k} \eta_{Oj} w_{Oj}^{k'} \leq X_{BOj}^{\max} - X_{BOj}^{0} \qquad (۹)$$

و

$$\sum_{k'=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_{AH}} x_{Hij}^{k'} - \sum_{k'=1}^{k} \eta_{Hj} w_{Hj}^{k'} \geq X_{BHj}^{\min} - X_{BHj}^{0} \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{k'=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_{AH}} x_{Hij}^{k'} - \sum_{k'=1}^{k} \eta_{Hj} w_{Hj}^{k'} \leq X_{BHj}^{\max} - X_{BHj}^{0} \qquad (۱۱)$$

۳-۲-۲ محدودیت میزان سوخت در مخازن تأمین کنندهٔ سوخت (شرکت نفت)

شرکت تأمین کننده سوخت (شرکت نفت) معمولا بطور روزانه، با توجه به ذخیره خود، میزان سوخت تحویلی را اعلام می‌کند. زیرا تأمین کننده باید سوخت لازم برای پخش را در مخازن خود ذخیره کند که این امر معمولا با استفاده از شبکه لوله‌های سوخت انجام می‌شود. اگر X_{AOi}^{k} حداکثر

گازوئیل تحویلی مخزن A_{Oi} در روز k باشد می‌توان محدودیت توصیف شده را به صورت زیر به رابطه تبدیل کرد:

$$\sum_{j=1}^{n_{BO}} x_{Oij}^{k} \le X_{AOi}^{k} \qquad (۱۲)$$

مشابه با آن برای مخازن مازوت می‌توان نوشت:

$$\sum_{j=1}^{n_{BH}} x_{Hij}^{k} \le X_{AHi}^{k} \qquad (۱۳)$$

۳-۲-۳- محدودیت روزانه انتقال کل سوخت

به علت مشکلات آب و هوایی، بارندگی، محدودیت وسایل حمل و نقل و محدودیت در پایانه‌های بارگیری و تخلیه، انتقال هر میزان سوخت از مخازن به نیروگاه‌ها امکان پذیر نیست.

با صرف نظر کردن از محدودیت در بارگیری و تخلیه سوخت در پایانه‌ها، فرض می‌کنیم به علت مشکلات آب و هوا و تعداد وسایل نقلیه، در هر روز تنها بر روی حمل و نقل کل سوخت محدودیت وجود دارد.

اگر X^{k} حداکثر میزان سوخت انتقالی در کل منطقه برای روز k باشد[1]، در این صورت محدودیت انتقال کل سوخت در روز k عبارتست از:

$$\sum_{i=1}^{n_{AO}} \sum_{j=1}^{n_{BO}} x_{Oij}^{k} + \sum_{i=1}^{n_{AH}} \sum_{j=1}^{n_{BH}} x_{Hij}^{k} \le X^{k} \qquad (۱۴)$$

۴-۲-۳ محدودیت در انتقال سوخت بین مخازن و نیروگاهها

در حل مسئله، متغیرهای x_{Oij}^{k} و x_{Hij}^{k} که میزان انتقال سوخت بین مخازن و نیروگاهها را در هر روز نشان می‌دهند نباید عددی منفی باشند. در این تحقیق حد بالایی برای این متغیرها فرض نشده است.

$$x_{Oij}^{k} \ge 0 \qquad (۱۵)$$

$$x_{Hij}^{k} \ge 0 \qquad (۱۶)$$

۱. این مقدار برای N روز با توجه به پیش‌بینی وضعیت آب و هوا و جاده‌ها در ابتدای دوره برنامه‌ریزی مشخص می‌شود.

۵-۲-۳ محدودیت در انرژی تولیدی توسط هر نیروگاه

هر نیروگاه با توجه به ظرفیت تولیدی، همچنین آمادگی برای تولید، قادر به تولید حداکثری از انرژی در روز است که باید در محاسبات درنظر گرفته شود ($W_{Oj}^{\max k}$ و $W_{Hj}^{\max k}$). همچنین باید قیدی بر روی حداقل تولید روزانه انرژی نیز برای هر نیروگاه در نظر گرفت ($W_{Oj}^{\min k}$ و $W_{Hj}^{\min k}$)[2]. این قید یکی از قیود مهم و تاثیرگذار در مسئله برنامه‌ریزی می‌باشد. انتظاری که ما از نتایج برنامه داریم آنست که نیروگاههای کم بازده (که سوخت بیشتری بازای تولید مقدار معینی الکتریسیته مصرف می‌کنند)، تولید کمتری داشته باشند و در قبال آن نیروگاههای با بازده بالا، با تولید بیشتر، تقاضا را جبران کنند. این امر ممکن است سبب اضافه بار برخی از خطوط شبکه شود. زیرا نیاز است توان منطقه نیروگاه پر بازده به منطقه نیروگاه کم بازده منتقل شود تا بارهای موجود در آن منطقه تأمین شوند. برای جلوگیری از اضافه بار در شبکه لازم است تمام نیروگاهها حداقلی از تولید را داشته باشند. این میزان، از حداقل تولید هر واحد نیروگاهی در شرایط متعارف بیشتر خواهد بود. بنابراین برای تعیین قید حداقل تولید هر نیروگاه، بجای حداقل تولید اسمی نیروگاهها، باید حداقلی که شرایط اضافه بار خطوط را تعدیل کند مد نظر قرار گیرد.

محدودیت انرژی تولیدی هر نیروگاه در روز k دوره برنامه‌ریزی را می‌توان با روابط زیر نشان داد:

نیروگاههای گازوئیل‌سوز:

$$w_{Oj}^{k} \le W_{Oj}^{\max k} \qquad (۱۷)$$

$$w_{Oj}^{k} \ge W_{Oj}^{\min k} \qquad (۱۸)$$

نیروگاههای مازوت‌سوز:

$$w_{Hj}^{k} \le W_{Hj}^{\max k} \qquad (۱۹)$$

$$w_{Hj}^{k} \ge W_{Hj}^{\min k} \qquad (۲۰)$$

۲. برای نیروگاهی که در روز مزبور آمادگی تولید انرژی ندارد مقادیر حداکثر و حداقل صفر می‌باشد.

۳-۲-۶ تعادل انرژی تولیدی با مصرف

فرض کنید مقادیر زیر برای دوره N روزه برنامه‌ریزی در ابتدای دوره پیش‌بینی شود:

- مصرف کل روزانه انرژی منطقه (W_d^k)
- تبادل کل روزانه انرژی با مناطق اطراف (W_t^k) (ورود انرژی به منطقه مثبت درنظر گرفته می‌شود)
- میزان تولید کل روزانه انرژی توسط نیروگاههایی که گاز مصرفی آنها تأمین شده است (W_g^k)

در این صورت برای تعادل تولید و مصرف باید رابطهٔ زیر برقرار باشد:

$$\sum_{j=1}^{n_{BO}} w_{Oj}^k + \sum_{j=1}^{n_{BH}} w_{Hj}^k = W_d^k - W_t^k - W_g^k \qquad (۲۱)$$

در واقع تولید روزانه توسط نیروگاههایی که با سوخت گازوئیل و مازوت کار می‌کنند باید بتواند میزان مصرفی را که مقداری از آن توسط انرژی ورودی به منطقه و تولید نیروگاههای گازسوز، تأمین شده است بپوشاند.

۴- روش حل مسئله

با توجه به روابطی که برای توصیف مسئله در بخش قبل پیشنهاد شد، مسئله برنامه‌ریزی سوخت در شرایط بحران کاملاً در چهارچوب روش برنامه‌ریزی خطی قابل حل می‌باشد.

یک مسئله برنامه‌ریزی خطی در حالت کلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\min \ \mathbf{f}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} \qquad s.t. \begin{cases} \mathbf{Ax} \le \mathbf{b} \\ \mathbf{Cx} = \mathbf{d} \\ \mathbf{lb} \le \mathbf{x} \le \mathbf{ub} \end{cases} \qquad (۲۲)$$

اگر تعداد n متغیر برنامه‌ریزی، p محدودیت نامساوی و q محدودیت مساوی داشته باشیم در این صورت بردار $\mathbf{f}$ و $\mathbf{x}$ دارای بعد n، ماتریسهای $\mathbf{A}$ و $\mathbf{C}$ به ترتیب دارای ابعاد $p \times n$ و $q \times n$ و بردارهای $\mathbf{b}$ و $\mathbf{d}$ به ترتیب دارای بعد p و q می‌باشند. برای هر کدام از متغیرهای برنامه‌ریزی نیز می‌توان مقدار حداقل و حداکثری در نظر گرفت که توسط بردارهای n بعدی $\mathbf{lb}$ و $\mathbf{ub}$ نشان داده شده است.

جدول ۱ : تعداد معادلات و نامعادلات بکار رفته در مسئله برنامه‌ریزی خطی

محدودیتها	تعداد
محدودیت حداکثر و حداقل سوخت در مخازن نیروگاهی	$2N\left(n_{BO}+n_{BH}\right)$
محدودیت میزان سوخت در مخازن تأمین کننده سوخت	$N\left(n_{AO}+n_{AH}\right)$
محدودیت روزانه انتقال کل سوخت	N
محدودیت در انتقال سوخت بین مخازن و نیروگاهها	$N\left(n_{AO}n_{BO}+n_{AH}n_{BH}\right)$
محدودیت در انرژی تولیدی روزانه توسط هر نیروگاه	$2N\left(n_{BO}+n_{BH}\right)$
تعادل انرژی تولیدی با مصرف	N

در این تحقیق متغیرهای برنامه‌ریزی، x_{Oij}^k و x_{Hij}^k و w_{Oj}^k و w_{Hj}^k انتخاب شده‌اند. تعداد این متغیرها که بعد بردار $\mathbf{x}$ را مشخص می‌کند از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Nn_{BO}\left(n_{AO}+1\right)+Nn_{BH}\left(n_{AH}+1\right) \qquad (۲۳)$$

در جدول ۱ تعداد معادلات و نامعادلات مسئله را آورده‌ایم.

۵- مطالعه موردی

جهت مطالعه و بررسی موردی، منطقه‌ای فرض شده است که دارای سه مخزن سوخت گازوئیل و دو مخزن سوخت مازوت می‌باشد. برق مورد نیاز این منطقه توسط تعدادی نیروگاه تامین می‌شود که در شرایط بحران سه نیروگاه روی سوخت گازوئیل و سه نیروگاه روی سوخت مازوت هستند. فواصل مخازن سوخت با نیروگاههای در جداول ۲ و ۳ آمده است.

جدول۲: فواصل مخازن و نیروگاهها (سوخت گازوئیل)

(Km)	نیروگاه B_{O1}	نیروگاه B_{O2}	نیروگاه B_{O3}
مخزن A_{O1}	۱۰۰	۱۰۰	۱۲۵
مخزن A_{O2}	۱۲۰	۱۳۰	۱۶۰
مخزن A_{O3}	۱۵۰	۵۰	۶۰

جدول۳: فواصل مخازن و نیروگاهها (سوخت مازوت)

(Km)	نیروگاه B_{H1}	نیروگاه B_{H2}	نیروگاه B_{H3}
مخزن A_{H1}	۱۲۰	۷۰	۹۰
مخزن A_{H2}	۸۰	۱۰۰	۱۲۰

قیمت هر لیتر گازوئیل و هر لیتر مازوت تحویل در محل مخازن سوخت شرکت نفت به ترتیب ۵۰۰۰ و ۳۵۰۰ ریال فرض می‌شود. همچنین قیمت حمل و نقل سوخت بوسیله تانکر برای ۱۰۰۰ لیتر (۱ متر مکعب) سوخت بازای هر کیلومتر، ۵۰ ریال در نظر گرفته شده است.

برنامه‌ریزی سوخت برای یک دوره ۳ روزه انجام شده است که البته این دوره در عمل می‌تواند تا یک هفته نیز درنظر گرفته شود.

اطلاعات پیش‌بینی شده در مورد میزان تقاضای انرژی، تبادل و تولید توسط نیروگاههایی از منطقه که روی سوخت گاز هستند در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول حداکثر ظرفیت کل انتقال سوخت را نیز برای روزهای مختلف نشان داده‌ایم.

جدول ۴: اطلاعات انرژی و سوخت

روز	W_d^k (MWh)	W_t^k (MWh)	W_g^k (MWh)	X^k (m^3)
۱	۳۴۰۰۰	۲۰۰۰	۵۲۰۰	۱۰۰۰۰
۲	۳۵۰۰۰	۲۲۰۰	۴۵۰۰	۱۱۰۰۰
۳	۳۳۰۰۰	۳۰۰۰	۰	۵۰۰۰

همانطور که در این جدول ملاحظه می‌شود در روز سوم به علت برودت و مشکلات سوخت‌رسانی حجم کل سوخت ارسال شده به نیروگاهها کاهش پیدا کرده است. ضمنا برای جبران کاهش فشار گاز، هیچ نیروگاهی روی سوخت گاز نیست. سایر اطلاعات مورد نیاز از جمله مصرف سوخت نیروگاهها، ظرفیت حداقل و حداکثر مخازن سوخت آنها، حجم سوخت اولیه این مخازن وهمچنین پیش‌بینی میزان انرژی تولیدی هر نیروگاه در دوره برنامه‌ریزی در جداول ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول ۵: سایر اطلاعات لازم (نیروگاههای با سوخت گازوئیل)

		نیروگاه B_{O1}	نیروگاه B_{O2}	نیروگاه B_{O3}
η_{Oj} (m^3/MWh)		۰,۳۰	۰,۲۵	۰,۲۸
X^{0}_{BOj} (m^3)		۴۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰
$X^{\min}_{BOj}$ (m^3)		۳۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰
$X^{\max}_{BOj}$ (m^3)		۲۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	۲۰۰۰۰
$W_{Oj}^{\min k}$ (MWh)	روز ۱	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
	روز ۲	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
	روز ۳	۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
$W_{Oj}^{\max k}$ (MWh)	روز ۱	۱۲۰۰۰	۸۰۰۰	۶۰۰۰
	روز ۲	۹۰۰۰	۹۰۰۰	۸۰۰۰
	روز ۳	۰	۱۰۰۰۰	۶۰۰۰

اطلاعات مربوط به محدودیت تحویل سوخت در مخازن در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است.

در این تحقیق برای حل مسئله برنامه‌ریزی کوتاه مدت سوخت از تابع linprog نرم‌افزار MATLAB استفاده کرده‌ایم. این تابع برای حل مسئله برنامه‌ریزی خطی طراحی گردیده است.

طبق رابطه (۲۳) تعداد متغیرهای برنامه‌ریزی این مسئله خاص ۶۳ عدد می‌باشد. نتایج حاصله از حل مسئله با روش برنامه‌ریزی خطی را در جداول ۹ تا ۱۱ نشان داده‌ایم.

مقدار کل هزینه سوخت و حمل و نقل (تابع هدف) در طول سه روز ۱۰۱,۵۷ میلیارد ریال (معادل ۱۰,۱۵۷ میلیون دلار با احتساب قیمت ۱۰۰۰۰ ریال به ازای هر دلار) محاسبه می‌شود.

جدول ۶: سایر اطلاعات لازم (نیروگاههای با سوخت مازوت)

		نیروگاه B_{H1}	نیروگاه B_{H2}	نیروگاه B_{H3}
$\eta_{Hj}\ (m^3/MWh)$		۰,۲۹	۰,۳۰	۰,۳۵
$X^{0}_{BHj}\ (m^3)$		۵۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰
$X^{\min}_{BHj}\ (m^3)$		۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰
$X^{\max}_{BHj}\ (m^3)$		۵۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۲۵۰۰۰
$W^{\min k}_{Hj}$ (MWh)	روز ۱	۳۰۰۰	۰	۳۰۰۰
	روز ۲	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
	روز ۳	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
$W^{\max k}_{Hj}$ (MWh)	روز ۱	۶۰۰۰	۰	۸۰۰۰
	روز ۲	۶۰۰۰	۸۰۰۰	۶۰۰۰
	روز ۳	۵۰۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰

جدول ۷: محدودیت تحویل سوخت از مخازن گازوئیل

روز	مخزن A_{O1} (m^3)	مخزن A_{O2} (m^3)	مخزن A_{O2} (m^3)
۱	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰
۲	۱۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰
۳	۱۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰

جدول ۸: محدودیت تحویل سوخت از مخازن مازوت

روز	مخزن A_{H1} (m^3)	مخزن A_{H2} (m^3)
۱	۴۰۰۰	۳۰۰۰
۲	۴۰۰۰	۳۰۰۰
۳	۴۰۰۰	۳۰۰۰

جدول ۹: نتایج برنامه‌ر یزی برای روز اول

$x^{1}_{Oij}\ (m^3)$	نیروگاه B_{O1}	نیروگاه B_{O2}	نیروگاه B_{O3}
مخزن A_{O1}	۵۳۸	۰	۰
مخزن A_{O2}	۰	۰	۰
مخزن A_{O3}	۰	۴۶۰	۱۲۲۱
w^{1}_{Oj} (MWh)	۳۰۰۰	۶۸۰۰	۳۰۰۰
$x^{k}_{Hij}\ (m^3)$	نیروگاه B_{H1}	نیروگاه B_{H2}	نیروگاه B_{H3}
مخزن A_{H1}	۰	۶۰۳	۲۱۲۹
مخزن A_{H2}	۷۹۴	۰	۰
w^{1}_{Hj} (MWh)	۶۰۰۰	۰	۸۰۰۰

جدول ۱۰: نتایج برنامه‌ریزی برای روز دوم

$x^{1}_{Oij}\ (m^3)$	نیروگاه B_{O1}	نیروگاه B_{O2}	نیروگاه B_{O3}
مخزن A_{O1}	۲۶۲	۰	۰
مخزن A_{O2}	۰	۰	۰
مخزن A_{O3}	۰	۳۹۹	۶۲۳
w^{1}_{Oj} (MWh)	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
$x^{k}_{Hij}\ (m^3)$	نیروگاه B_{H1}	نیروگاه B_{H2}	نیروگاه B_{H3}
مخزن A_{H1}	۰	۶۱۳	۱۵۴۱
مخزن A_{H2}	۶۸۳	۰	۰
w^{1}_{Hj} (MWh)	۶۰۰۰	۸۰۰۰	۵۳۰۰

جدول ۱۱: نتایج برنامه‌ر یزی برای روز سوم

$x^{1}_{Oij}\ (m^3)$	نیروگاه B_{O1}	نیروگاه B_{O2}	نیروگاه B_{O3}
مخزن A_{O1}	۰	۰	۰
مخزن A_{O2}	۰	۰	۰
مخزن A_{O3}	۰	۳۴۱	۳۷۵
w^{1}_{Oj} (MWh)	۰	۷۰۰۰	۳۰۰۰
$x^{k}_{Hij}\ (m^3)$	نیروگاه B_{H1}	نیروگاه B_{H2}	نیروگاه B_{H3}
مخزن A_{H1}	۰	۵۸۴	۹۳۵
مخزن A_{H2}	۴۵۳	۰	۰
w^{1}_{Hj} (MWh)	۵۰۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰

۶- برنامه‌ریزی سوخت برای نیروگاههای استان خراسان

علاوه بر مطالعه موردی که در بخش قبل انجام شد برنامه‌ریزی کوتاه مدت سوخت را برای نیروگاههای استان خراسان و با داده‌های واقعی برای دوره‌ای یک هفته‌ای اعمال کرده‌ایم. اطلاعات نیروگاهها و شبکه در پیوست مقاله آمده است. سعی شده است داده‌ها و اطلاعات مطابق با شرایط واقعی نیروگاهها، مخازن و شبکه در هفته اول دیماه سال ۱۳۸۶ باشد که مقارن با اوج دوره بحران کمبود گاز در این سال است[8]. در این شرایط بحرانی تمام نیروگاههای استان با سوخت دوم مشغول به فعالیت بوده‌اند و عملاً برای جلوگیری از افت فشارگاز سوخت گاز تمام نیروگاهها قطع شده بود.

تامین سوخت ۶ نیروگاه بزرگ در این منطقه توسط ۶ مخزن عمده سوخت شرکت نفت و توسط تانکرهای سوخت‌رسان انجام پذیرفته است. در جدول ۱۲ نتایج برنامه‌ریزی سوخت و تولید در شبکه خراسان در یک دوره هفت روزه در شرایط بحران آمده است.

جدول ۱۲: نتایج برنامه ریزی سوخت در شرایط بحران برای شبکه خراسان

		نیشابور	شریعتی	شیروان	مشهد	فردوسی	توس
A	روز ۱		1546	-	87	-	-
B		2868	-	-	-	-	-
C		-	-	403	-	-	-
D		-	-	-	-	-	-
E		-	-	-	-	-	-
F		-	-	-	-	-	444
مگاوات ساعت تولیدی		17000	7000	3000	1500	1000	10000

		نیشابور	شریعتی	شیروان	مشهد	فردوسی	توس
A	روز ۲	-	1429	-	104	-	-
B		2865	-	-	-	-	-
C		-	-	366	-	-	-
D		-	-	-	-	-	-
E		-	-	-	-	-	-
F		-	-	-	-	-	450
مگاوات ساعت تولیدی		17000	6200	3000	1500	1000	10000

		نیشابور	شریعتی	شیروان	مشهد	فردوسی	توس
A	روز ۳	-	1287	-	113	-	-
B		2860	-	-	-	-	-
C		-	-	327	-	-	-
D		-	-	-	-	-	-
E		-	-	-	-	-	-
F		-	-	-	-	-	441
مگاوات ساعت تولیدی		17000	4900	3000	1500	1000	10000

		نیشابور	شریعتی	شیروان	مشهد	فردوسی	توس
A	روز ۴	-	1143	-	113	-	-
B		2852	-	-	-	-	-
C		-	-	287	-	-	-
D		-	-	-	-	-	-
E		-	-	-	-	-	-
F		-	-	-	-	-	420
مگاوات ساعت تولیدی		17000	6400	3000	1500	1000	10000

		نیشابور	شریعتی	شیروان	مشهد	فردوسی	توس
A	روز ۵	-	950	-	107	-	-
B		2841	-	-	-	-	-
C		-	-	245	-	-	-
D		-	-	-	-	-	-
E		-	-	-	-	-	-
F		-	-	-	-	394	-
مگاوات ساعت تولیدی		17000	7200	3000	1500	1000	10000

		نیشابور	شریعتی	شیروان	مشهد	فردوسی	توس
A	روز ۶	-	6762	-	97	-	-
B		2821	-	-	-	-	-
C		-	-	201	-	-	-
D		-	-	-	-	-	-
E		-	-	-	-	-	-
F		-	-	-	-	359	-
مگاوات ساعت تولیدی		17000	6700	3000	1500	1000	10000

		نیشابور	شریعتی	شیروان	مشهد	فردوسی	توس
A	روز ۷	-	319	-	82	-	-
B		2764	-	-	-	-	-
C		-	-	153	-	-	-
D		-	-	-	-	-	-
E		-	-	-	-	-	-
F		-	-	-	-	-	302
مگاوات ساعت تولیدی		17000	3300	3000	1500	1000	10000

جمع هزینه‌های سوخت و حمل و نقل در طول دوره ۷ روزه برنامه ریزی (میلیارد ریال)	286.78

۷- نتایج

در این مقاله راهکاری برای مدیریت و برنامه‌ریزی سوخت و انتقال آن به نیروگاهها در شرایط بحران ارائه شد. این روش با توجه به بحران افت فشار گاز و مشکلات تأمین گاز نیروگاهها در سال گذشته و احتمال وقوع مجدد آن می‌تواند کمک مؤثری به مدیریت بحران و کاهش خاموشیها بنماید.

از مزیتهای این روش آنست که می‌توان آن را بطور روزانه با توجه به داده‌های جدید پیش‌بینی، برای هفت روز آینده اجرا کرد. نتایج برنامه کاملا اجرایی است و قادر خواهد بود با یک استراتژی بهینه دقیقاً تعداد تانکرهای سوخت مورد نیاز که باید به هر نیروگاه از هر مخزن سوخت شرکت نفت ارسال گردد تعیین کند.

علاوه بر محدودیت‌های اجرایی که بر انتقال سوخت حاکم است، این برنامه با در نظر گرفتن بازده نیروگاهها، سوخت را به گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌کند که نیروگاههای پربازده زمان بیشتری مشغول به کار باشند تا بدین ترتیب در مصرف

سوخت صرفه‌جویی گردد. همچنین محدودیتهای شبکه بـا در نظر گرفتن کف تولید برای هر نیروگاه مرتفع شده است.

روابط پیشنهاد شده برای مسئله برنامه‌ریزی طوری سازماندهی شده‌اند که علاوه بر کارایی براحتی با برنامه‌ریزی خطـی قابـل حل می‌باشند.

برای درک کارایی و قابلیتهای این روش، برنامه‌ریزی سـوخت برای یک مسئله فرضی شامل شش نیروگاه و پـنج مخـزن در شرایط بحران حل شده است. همچنین برای یک مسئلهٔ واقعی (شبکه خراسان) و با اطلاعـات سـوخت و شـرایط شـبکه در زمان بحران مورد آزمایش قرار گرفته است.

پر واضح است که ایـن روش بـا هـدایت مـؤثر سـوخت بـه نیروگاهها در شرایط بحران، نقش قابل تأثیری در تامین انرژی و کاهش خاموشی‌ها و در نتیجه پایداری شبکه خواهد داشت. ضمن اینکه با بهینه‌کردن مصـرف سـوخت دوم و گرانقیمـت نیروگاهها، صرفه‌جویی قابل توجهی در ابعاد ملی عاید کشـور خواهد شد.

همچنـین از مزایـای دیگـر روش پیشـنهادی، اسـتفاده از آن بصورت غیر متمرکز برای مناطق مختلف است. به این معنا که می‌توان با منطقه بندی کردن کل کشور و تعیین میـزان تولیـد، مصـرف و تبـادل در هـر منطقـه، بـرای نیروگاههـا و مخـازن سوخت منطقه مورد نظر برنامه‌ریزی را انجام داد.

۸- مراجع

[1] Wood A. J., Wollenberg B. F., "Power Generation, Operation, and Control", second edition, Wiley, 1996.

[2] Shih L., " A cost minimization model for coal import strategy", International Journal of Production Economics, Vol. 51, 1997, pp. 243-249.

[3] Seymore, G. F., "Fuel Scheduling for Electric Power Systems," in A. M. Erisman, K.W.Noves, M. H. Dwarakanath (eds.), Electric Power Problems: The Mathematical Challenge, SIAM, Philadelphia, 1980, pp. 378-392.

[4] Rosenberg, L.D., Williams, D.A., Campbell, J.D., "Fuel scheduling and accounting", IEEE Transactions on Power Systems, vol 5, 1990, pp. 682-688.

[5] Trefny, F.J., Lee, K.Y., "Economic Fuel Dispatch", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-100, 1981, pp. 3468-3477.

[6] Basu, M., Chattopadhyay, P. K., Chakrabarti, R. N., Ghoshal, T. K., "Economic Fuel Scheduling by Hopfield Neural Networks", Journal- Institution of Engineers India Part EL Electrical Engineering Division, vol. 86, 2006, pp. 305-311.

[7] Manoharan, P.S., Kannan, P.S., Ramanathan, V., "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.

[۸] آمار و اطلاعات فنی دیسپاچینگ شمال شرق

پیوست : اطلاعات ورودی برنامه برای شبکه خراسان

فاصله بین مخازن سوخت و نیروگاهها به کیلومتر		نیروگاهها*						حداکثر سوخت قابل تحویل از مخازن شرکت نفت در روز (متر مکعب)						
		گازوئیل					مازوت							
		نیشابور	شریعتی	شیروان	مشهد	فردوسی	توس	روز ۱	روز ۲	روز ۳	روز ۴	روز ۵	روز ۶	روز ۷
مخازن گازوئیل شرکت نفت	A	120	10	170	10	35	-	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	B	10	120	270	120	155	-	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	C	120	240	150	240	275	-	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	D	120	230	400	230	265	-	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	E	630	520	340	510	495	-	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
مخزن مازوت	F	-	-	-	-	-	35	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
مصرف سوخت (مترمکعب به ازای هر مگاوات ساعت)		0.209	0.253	0.261	0.305	0.261	0.233							
سوخت اولیه مخازن نیروگاه (مترمکعب)		7000	4000	8000	4000	15836	18000							
حداقل سوخت مفید در مخزن (متر مکعب)		2000	800	4500	1500	2500	4500							
گنجایش مخزن (مترمکعب)		20000	10080	60000	20000	20000	61000							
حداقل انرژی تولیدی (مگاوات ساعت)	روز ۱	3500	3000	3000	1500	1000	2000							
	روز ۲	3500	3000	3000	1500	1000	2000							
	روز ۳	3500	3000	3000	1500	1000	2000							
	روز ۴	3500	3000	3000	1500	1000	2000							
	روز ۵	3500	3000	3000	1500	1000	2000							
	روز ۶	3500	3000	3000	1500	1000	2000							
	روز ۷	3500	3000	3000	1500	1000	2000							
حداکثر انرژی تولیدی (مگاوات ساعت)	روز ۱	17000	8000	16000	5000	2600	10000							
	روز ۲	17000	8000	16000	5000	2600	10000							
	روز ۳	17000	8000	16000	5000	2600	10000							
	روز ۴	17000	8000	16000	5000	2600	10000							
	روز ۵	17000	8000	16000	5000	2600	10000							
	روز ۶	17000	8000	16000	5000	2600	10000							
	روز ۷	17000	8000	16000	5000	2600	10000							

اطلاعات انرژی و سوخت		نیاز مصرف منطقه (مگاوات ساعت)	محدودیت انتقال سوخت در کل منطقه (مترمکعب)
روز	1	39500	10000
	2	38700	10000
	3	37400	10000
	4	38900	10000
	5	39700	10000
	6	39200	10000
	7	35800	10000

قیمت گازوئیل (میلیون ریال بر متر مکعب)	5
قیمت مازوت (میلیون ریال بر متر مکعب)	3.5
قیمت حمل و نقل (ریال بر مترمکعب در کیلومتر)	50

* در مطالعه نیروگاه کوچک قائن با ظرفیت نهایی ۷۵ مگاوات در نظر گرفته نشده است. به علت تأمین مستقیم از مخازن جنوب خراسان مشکل سوخت برای این نیروگاه وجود ندارد.