دانشگاه سمنان
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله دوره دکتری مهندسی برق- قدرت

# برنامه‌ریزی نیروگاه‌های آبی– حرارتی در بازه کوتاه مدت سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و عوامل عدم قطعیت

**دانشجو:**

**محمدرضا انصاری**

**استاد راهنما:**

**دکتر نیما امجدی**

پاییز 1392

بسم الله الرحمن الرحیم

بسمه تعالی

اینجانب محمدرضا انصاری شهرضا متعهد می‌شوم که محتوای علمی این نوشتار با عنوان " برنامه ریزی نیروگاه‌های آبی- حرارتی در بازه کوتاه مدت سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و عوامل عدم قطعیت" که به عنوان رساله دکتری مهندسی برق گرایش قدرت به گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سمنان ارائه شده، دارای اصالت پژوهشی بوده و حاصل فعالیت‌های علمی اینجانب می‌باشد.

در صورتی که خلاف ادعای فوق در هر زمانی محرز شود، کلیه حقوق معنوی متعلق به این رساله از اینجانب سلب شده و موارد قانونی مرتبط به آن نیز از طرف مراجع ذیربط قابل پیگیری است.

محمدرضا انصاری شهرضا

شماره دانشجویی: 8621114001

امضاء

# تقدیم به همسرم

**همسرم، اسطوره زندگیم، پناه خستگیم و امید بودنم...**

**و تقدیم با بوسه بر دستان پدرم**

**به او که نمی‌دانم از بزرگی‌اش بگویم یا مردانگی،سخاوت،سکوت،مهربانی و...**

**و تقدیم به مادرم**

**مادرم، آنکه آفتاب مهرش در آستانه قلبم، همچنان پابرجاست و هرگز غروب نخواهد کرد...**

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگارم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر اللّه عزّ و جلّ" بسی شایسته است از استاد فرهیخته جناب آقای **پروفسور نیما امجدی** که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند کمال تشکر و قدردانی را بنمایم.

و با سپاس ازسه وجود مقدس:

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

موهایشان سپید شد تا ماروسفید شویم...

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

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

## چکیده

با توجه به اینکه منابع انرژی فسیلی، از منابع برگشت‌ناپذیر و از اصلی‌ترین عناصر محیط زیست هستند، محققین درصدد استفاده از انرژی‌های پاک و برگشت‌پذیری مثل انرژی حاصل از جریان آب برآمده‌اند. با توجه به محدودیت‌هایی که بر روی منابع و مخازن این انرژی حاکم است، تولید برق به صورت دائمی و به هر میزان نیاز از طریق این انرژی امکان پذیر نیست. اما می‌توان از این انرژی به همراه سایر انرژی‌ها مانند انرژی‌های فسیلی به نحوی بهره جست تا با حداکثر بازدهی برای تولید برق همراه باشد. این امر باعث شکل گیری مسئله برنامه‌ریزی نیروگاه- های آبی- حرارتی گردید. این مسئله بهینه‌سازی همراه با محدودیت‌های هیدرولیکی، حرارتی و نیازمندی‌های ایمنی و قابلیت اطمینان می‌باشد. همچنین در حل این مسئله پارامترهایی وجود دارد که داری مقادیر دقیق عددی نبوده و همراه با عدم قطعیت هستند، در نتیجه می‌توان برنامه‌ریزی آبی - حرارتی را با مدل‌های تصادفی نیز ارائه نمود.

بدین منظور در این تحقیق ابتدا مسئله برنامه‌ریزی نیروگاه‌های آبی- حرارتی در بازه کوتاه مدت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی به وسیله روش حل تجزیه بندر در نظر گرفته شد. سپس در گام دوم تحقیق محدودیت پایداری ولتاژ هم به مسئله اضافه گردید. در قسمت سوم با ارائه یک مدل جامع از مسئله مورد نظر و در نظر گرفتن محدودیت‌های کاربردی و با استفاده از یک روش ترکیبی، الگوریتم تجزیه بندر و تقریب بیرونی، مسئله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در بخش پایانی رساله نیز، بر خلاف قسمت‌های قبل که مدل در نظر گرفته شده برای مسئله یک مدل قطعی بوده، یک مدل تصادفی برای مسئله برنامه‌ریزی ارائه گردیده است. لازم به ذکر است در قسمتی از این رساله نیز مسئله پخش بار بهینه به عنوان یک زیرمسئله اساسی از مسئله برنامه‌ریزی نیروگاه‌های آبی- حرارتی با روش ترکیبی جدیدی شامل تجزیه بندر و مجموعه منظم ویژه، حل گردید. مدل‌های مختلف و روش‌های پیشنهادی ارائه شده بر روی سیستم‌های شناخته شده سیستم قدرت تست گردیده و نتایج موثر بودن آن‌ها نشان داده شده است.



**کلمات کلیدی**- برنامه ریزی نیروگاههای آبی و حرارتی-تجزیه بندر – تقریب بیرونی – پخش بار بهینه-عدم قطعیت-محدودیتهای ایمنی

**فهرست مطالب**

عنوان صفحه


فصل اول ..... 1

معرفی مسئله هماهنگی آبی – حرارتی کوتاه مدت سیستم قدرت ..... 1

1-1- برنامه ریزی تولید نیروگاه های آبی- حرارتی ..... 2
1-1-1- برنامه ریزی بلند مدت سیستم‌های آبی- حرارتی ..... 4
1-1-2- برنامه ریزی کوتاه مدت سیستم‌های آبی- حرارتی ..... 4

1-2- ساختار و مشخصات سیستم‌های هیدرولیکی ..... 5
1-2-1- مخازن سیستم‌های هیدرولیکی ..... 5
1-2-2-کانال عبور آب ..... 6
1-2-3- واحد های آبی نیروگاهی تولید برق ..... 8
1-2-4- تبدیل آب به انرژی ..... 8
1-2-5- فلوی ورودی آب ..... 10
1-2-6- مفهوم نیروگاههای آبی پشت سر هم (cascade) ..... 11
1-2-7-توان تولیدی در واحد های آبی ..... 12
1-2-8- مفهوم هزینه مورد انتظار در آینده(EFC) برای سیستم‌های هیدرولیکی ..... 14
1-2-9- هزینه بهره برداری از واحد های آبی ..... 15
1-2-10- محدودیت‌های حاکم بر سیستم‌های هیدرولیکی ..... 15
1-2-10-1-معادله توازن آب در سیستم‌های هیدرولیکی ..... 16
1-2-10-2- محدودیات تولید توان توسط نیروگاه‌های آبی ..... 16
1-2-10-3- محدودیت‌های فیزیکی برای مخازن و ذخیره گاه‌ها ..... 17
1-2-10-4- محدودیت نرخ تخلیه آب ..... 17
1-2-10-5- حداکثر میزان سرریز ..... 17

1-3- مشخصات واحد های حرارتی ..... 17
1-3-1- هزینه بهره برداری از واحد ..... 18
1-3-2- اثر باز شدن شیرهای بخار در هزینه بهره برداری ..... 19

1-3-3- مدلسازی قابلیت انتخاب سوخت‌های متفاوت ..... 19
1-3-4- هزینه های راه اندازی و خاموش کردن واحد ..... 20
1-3-5- قیود حاکم بر عملکرد سیستم‌های حرارتی ..... 21
1-3-5-1- محدودیت ظرفیت تولید ..... 21
1-3-5-2- محدودیت‌های مربوط به نواحی ممنوعه تولید توان ..... 21
1-3 -5-3- محدودیت در نرخ افزایش یا کاهش بارگذاری در طول ساعت‌های افق بهره برداری .. 22
1-3-5-4- محدودیت‌های حداقل زمان در مدار ماندن و حداقل زمان خاموش بودن واحد ..... 22

1-4- کارهای انجام گرفته در این رساله ..... 23
1-4-1- حل مسئله برنامه ریزی نیروگاه‌های آبی- حرارتی در بازه کوتاه مدت (STHTC) سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی ..... 23
1-4-2- حل مسئله برنامه ریزی نیروگاه‌های آبی- حرارتی در بازه کوتاه مدت (STHTC) سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و مسئله پایداری ولتاژ ..... 24
1-4-3- حل مسئله برنامه ریزی نیروگاه‌های آبی- حرارتی در بازه کوتاه مدت (STHTC) سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و محدودیت‌های کاربردی ..... 24
1-4-4- پخش بار بهینه غیرمحدب با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی ..... 25
1-4-5- برنامه ریزی نیروگاه‌های آبی – حرارتی با در نظر گرفتن عوامل عدم قطعیت ..... 25

فصل دوم ..... 27

مروری بر پیشینه تحقیق در زمینه حل مسئله برنامه ریزی نیروگاه‌های آبی – حرارتی در بازه کوتاه مدت سیستم قدرت ..... 27

2-1- روش‌های حل مسئله برنامه‌ریزی آبی – حرارتی کوتاه مدت سیستم قدرت ..... 29
2-1-1- روش رها سازی لاگرانژ LR و تجزیه بندر ..... 29
2-1-2-برنامه ریزی عدد صحیح مختلط ..... 34
2-1-3- برنامه ریزی دینامیکی ..... 35
2-1-4- روشهای محاسباتی تکاملی ..... 36
2-1-4-1- الگوریتم ژنتیک ..... 37
2-1-4-2- شبیه ساز حرارتی(SA) ..... 38
2-1-4-3- بهینه سازی ازدحام ذره(PSO) ..... 39
2-1-4-4- استراتژی تکاملی و برنامه ریزی تکاملی ..... 39

2-1-5- تکنیک‌های هوشمند مصنوعی ..... 41
2-1-5-1- شبکه های عصبی ( NN ) ..... 41
2-1-5-2- روش‌های بر مبنای فازی - عددی (FL) ..... 42
2-1-6- روش‌های نقطه درونی ..... 42
2-1-7- مسئله برنامه‌ریزی آبی – حرارتی کوتاه مدت سیستم قدرت و عدم قطعیت ..... 44

فصل سوم ..... 45

حل مدل‌های جدید از مسئله برنامه ریزی نیروگاه‌های آبی - حرارتی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف و با استفاده از روش‌های عددی متنوع ..... 45

3-1- بخش اول : حل مسئله STHTC با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و با استفاده از روش تجزیه بندر ..... 45
3-1-1- مدل پیشنهادی مسئله ..... 47
3-1-1-1- فرمول بندی مسئله STHTC ..... 47
3-1-2- روش حل پیشنهادی ..... 50
3-1-2-1- زیربرنامه اصلی ..... 50
3-1-2-2-زیربرنامه فرعی اولیه ..... 51
3-1-2-3- زیربرنامه فرعی ثانویه ..... 53
3-1-2-4- شرط همگرایی ..... 55
3-1-3- نتایج عددی ..... 57
3-1-3-1- نتایج سیستم 9 باسه ..... 57
3-1-3-2- نتایج سیستم 118 باسه IEEE ..... 60
3-1-3-3- تأثیر تجزیه زمانی زیربرنامه های فرعی بر نتایج حل مسئله STHTC ..... 61

3-2- بخش دوم: حل مسئله STHTC با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و پایداری ولتاژ ..... 62
3-2-1- ارزیابی پایداری ولتاژ ..... 63
3-2-1-1- شاخص $L_j$ ..... 63
3-2-2- مدل مسئله STHTC با در نظر گرفتن شاخص پایداری ولتاژ ..... 65
3-2-3- نتایج عددی ..... 66
3-2-3-1- نتایج سیستم 9 باسه ..... 66
3-2-3-2- نتایج سیستم 118 باسه ..... 70

3- 3- بخش سوم: حل مسئله STHTC با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و محدودیت‌های کاربردی 71
3-3-1-مدل پیشنهادی مسئله STHTC 72
3-3-2-روش حل پیشنهادی 76
3-3-3-کاربرد روش پیشنهادی در حل مسئله STHTC 80
3-3-4- الگوریتم قدم به قدم حل مسئله STHTC 83
3-3-5- نتایج عددی 85
3-3-5-1- نتایج بدست آمده برای سیستم 9 باسه 85
3-3-5-2- نتایج بدست آمده برای سیستم تست 118 باسه 86
3-4- نتیجه گیری 90
فصل چهارم 92
پخش بار بهینه غیرمحدب با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و با استفاده از روش تجزیه بندرز و مجموعه منظم ویژه 92
4-1- معرفی کوتاه مسئله OPF، روش‌های حل آن و کارهای گذشته در این زمینه 93
4-2- حل مسئله OPF غیرمحدب با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و کاربردی (SCOPF)، با استفاده از روش SOS 96
4-2-1- فرمول بندی SCOPF 97
4-2-2- روش حل پیشنهادی 100
4-2-2-1- الگوریتم تجزیه بندرز و مجموعه منظم خاص 101
4-2-2-2- تقریب SOS 103
4-2-3- اجرای الگوریتم پیشنهادی BD-SOS 106
4-2-4- به کار گیری روش پیشنهادی برای حل مسئله SCOPF 108
4-2-5- نتایج عددی حاصل از حل مسئله SCOPF 108
4-2-5-1-نتایج بدست آمده برای سیستم تست 30 باسه 109
4-2-5-2- نتایج بدست آمده برای سیستم تست 118 باسه 112
4-2-5-3- نتایج بدست آمده برای سیستم تست 300 باسه 115
4-3- نتیجه گیری 115

فصل پنجم ..... 117

حل مسئله برنامه ریزی نیروگاه‌های آبی – حرارتی در بازه کوتاه مدت سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی و عوامل عدمقطعیت ..... 117

5-1- مدل SSTHTC دوحالته پیشنهادی ..... 118

5-2- الگوریتم تجزیه ترکیبی پیشنهادی ..... 121

5-3- نتایج عددی ..... 130
5-3-1- نتایج سیستم 9 باسه ..... 130
5-3-2- نتایج سیستم 118 باسه ..... 131
5-3-3- حساسیت مسئله SSTHTC به منابع عدم قطعیت ..... 132

5-4- نتیجه گیری ..... 134

فصل ششم ..... 135

نتیجه گیری و پیشنهادات ..... 135

6-1- نتیجه گیری ..... 135

6-2- پیشنهادات ..... 138

مراجع ..... 140

پیوستها ..... 148

A : مقالات مستخرج از پایان نامه ..... 148

B: اطلاعات سیستمهای 9 و 118 باسه ..... 149
B.۱ : اطلاعات سیستم 9 باسه ..... 149
B.۲ : اطلاعات سیستم 118 باسه ..... 151

## فهرست اشکال

عنوان صفحه


شکل 1-1- ساختار یک سیستم هیدرو الکتریکی نوعی ..... 7
شکل 1-2- تغییرات تولید توان الکتریکی نسبت به نرخ تخلیه آب ..... 9
شکل 1-3- اجزای یک سیستم هیدرولیکی ..... 10
شکل 1-4- میزان فلوی ورودی به ذخیره گاه های فنلاند در طول سال ..... 11
شکل 1-5 یک نمونه از دیاگرام‌های HILL ..... 13
شکل 1-6- منحنی FCF و ICF ..... 15
شکل 1-7- منحنی هزینه بهره برداری برای واحد حرارتی ..... 18
شکل 1-8- اثر باز شدن شیرهای بخار بر تابع هزینه ..... 19
شکل 3-1- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی ..... 56
شکل 3-2- ارزیابی گرافیکی از نرخ تغییرات $UB$ و $LB$ در سیستم 9 باسه ..... 59
شکل 3-3- پروفایل ولتاژ در باس 7 در آزمایش 1 ..... 67
شکل 3-4- پروفایل ولتاژ در باس 7 در آزمایش 2 ..... 68
شکل 3-5- پروفایل ولتاژ در باس 7 در آزمایش 3 ..... 69
شکل 3-6- ارزیابی $UB$ و $LB$ در الگوریتم BD برای نمونه 3 در سیستم 118 باسه ..... 89
شکل 3-7- ارزیابی $UB$ و $LB$ در الگوریتم OA برای نمونه 3 در سیستم 118 باسه ..... 90
شکل 3-8- ارزیابی $UB$ و $LB$ در الگوریتم پیشنهادی OA+BD برای نمونه 3 در سیستم 118 باسه ..... 90
شکل 4-1- شبکه دوبعدی ساخته شده به وسیله 4 نقطه شکست برای $X$ و $Y$ ..... 105
شکل 5-1- ساختار مدل پیشنهادی ..... 123
شکل 5-2- ساختار الگوریتم پیشنهادی ..... 129

## فهرست جداول

عنوان صفحه


جدول 2-1- مروری بر مقالات ارائه شده در سالهای اخیر برای حل مسئله STHTC ..... 44
جدول 3-1- نتایج بدست آمده برای سیستم 9 باسه ..... 58
جدول 3-2- ارزیابی روش پیشنهادی در حل مسئله 9 باسه ..... 59
جدول 3-3- جزئیات نتایج سیستم 9 باسه ..... 59
جدول 3-4- نتایج بدست آمده از اجرای روش پیشنهادی برای سیستم 118 باسه ..... 60
جدول 3-5- ارزیابی روش پیشنهادی در حل مسئله 118 باسه ..... 61
جدول 3-6- نتایج بدست آمده برای "با" و "بدون" تجزیه ساعتی زیربرنامه های فرعی ..... 62
جدول 3-7- نتایج شاخص $L_j$ در سیستم 9 باسه آزمایش 1 ..... 66
جدول 3-8- نتایج سیستم 9 باسه با روش BD پیشنهادی در آزمایش 2 ..... 67
جدول 3-9- نتایج سیستم 9 باسه با روش BD پیشنهادی در آزمایش 3 ..... 69
جدول 3-10- تلفات شبکه برای هر 3 آزمایش در 24 ساعت ..... 69
جدول 3-11- نتایج هر 3 آزمایش سیستم 118 باسه با روش BD پیشنهادی ..... 71
جدول 3-12- نتایج سیستم 9 باسه ..... 85
جدول 3-13- نتایج سیستم 118 باسه در نمونه 1 ..... 87
جدول 3-14- نتایج سیستم 118 باسه در نمونه 2 ..... 87
جدول 3-15- نتایج سیستم 118 باسه در نمونه 3 ..... 88
جدول 4-1- مروری بر مقالات جدیدی که قیود تکمیلی را در نظر گرفته‌اند ..... 96
جدول 4-2- مشخصات سیستم‌های تست ..... 109
جدول 4-3- نتایج سیستم 30 باسه در مقایسه با 4 روش عددی دیگر ..... 110
جدول 4-4- نتایج سیستم 30 باسه در مقایسه با 9 روش تکاملی دیگر ..... 111
جدول 4-5-زمان محاسبه سیستم 30 باسه ..... 111
جدول 4-6- جزئیات نتایج بدست آمده برای سیستم 30 باسه توسط روش پیشنهادی ..... 112
جدول 4-7- نتایج سیستم 118 باسه در نمونه 1 در مقایسه با 4 روش عددی دیگر ..... 113
جدول 4-8- نتایج سیستم 118 باسه در نمونه 1 در مقایسه با 4 روش تکاملی دیگر ..... 113
جدول 4-9- نتایج سیستم 118 باسه در نمونه 2 در مقایسه با 2 روش عددی دیگر ..... 114
جدول 4-10- نتایج سیستم 118 باسه در نمونه 3 در مقایسه با 2 روش عددی دیگر ..... 114
جدول 4-11- نتایج سیستم 300 باسه در مقایسه با 4 روش عددی دیگر ..... 115
جدول 5-1- نتایج سیستم 9 باسه و مقایسه با 9 روش دیگر ..... 131

جدول 5-2- نتایج سیستم 118 باسه و مقایسه با 9 روش دیگر ..... 132
جدول 5-3- هزینه تولید برای مقادیر FOR مختلف واحدها ..... 133
جدول 5-4- هزینه تولید بدست آمده با MAPE مختلف برای پیش بینی بار ..... 133
جدول 5-5- هزینه تولید بدست آمده با MAPE مختلف برای پیش بیتی مقدار جریان ورودی به مخازن 133

## فهرست اختصارهای به کار رفته در متن

| | |
|---|---|
| Alternative Current | AC |
| Benders Decomposition | BD |
| Direct Current | DC |
| Economic Dispatch | ED |
| Forced Outage Rate | FOR |
| Future Cost Function | FCF |
| Generalized Benders Decomposition | GBD |
| Linear Programming | LP |
| Lower Bound | LB |
| Mean Absolute Percentage Error | MAPE |
| Mixed-Integer Linear Programming | MILP |
| Mixed-Integer Nonlinear Programming | MINLP |
| Nonlinear Programming | NLP |
| Optimal Power Flow | OPF |
| Outer Approximation | OA |
| Outer Approximation/Equality Relaxation | OA/ER |
| Prohibited Discharge Zones | PDZ |
| Prohibited Operating Zone | POZ |
| Security Constraint OPF | SCOPF |
| Security-Constrained Hydrothermal Unit Commitment | SCHTUC |
| Security-Constrained Unit Commitment | SCUC |
| Short Term Hydrothermal Coordination | STHTC |
| Special Ordered Set | SOS |
| Stochastic STHTC | SSTHTC |
| Unit Commitment | UC |
| Upper Bound | UB |

## لیست سمبلها

| | |
|---|---|
| $T$ | مدت زمان برنامه ریزی(hr) |
| $N, H$ | تعداد واحدهای آبی و حرارتی به ترتیب |
| $I$ | تعداد باسهای سیستم |
| $L$ | تعداد خطوط سیستم |
| $S_k^n$ | مجموعه واحدهای حرارتی متصل به باس $k$ |
| $S_k^h$ | مجموعه واحدهای آبی متصل به باس $k$ |
| $F^n(P_t^n)$ | تابع هزینه سوخت واحد حرارتی $n$ |
| $A^n, B^n, C^n$ | ضرایب تابع هزینه سوخت واحد حرارتی $n$ |
| $SU^n$ | هزینه روشن کردن واحد حرارتی $n$ |
| $SD^n$ | هزینه خاموش کردن واحد حرارتی $n$ |
| $Pload_t^i, Qload_t^i$ | بارهای اکتیو و راکتیو در باس $i$ درزمان $t$ به ترتیب |
| $SR_t$ | رزرو ذخیره چرخان در زمان $t$ (MW) |
| $P_{\min}^n, Q_{\min}^n$ | مینیمم توان اکتیو وراکتیو تولیدی واحد حرارتی $n$ به ترتیب |
| $P_{\max}^n, Q_{\max}^n$ | ماکزیمم توان اکتیو وراکتیو تولیدی واحد حرارتی $n$ به ترتیب |
| $UR^n$ | محدودیت نرخ بالا رفتن واحد حرارتی $n$ (MW/hr) |
| $DR^n$ | محدودیت نرخ پایین رفتن واحد حرارتی $n$ (MW/hr) |
| $T_n^{ON}, T_n^{OFF}$ | حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد حرارتی $n$ (hr) به ترتیب |
| $P_{\max}^h, Q_{\max}^h$ | ماکزیمم توان اکتیو وراکتیو تولیدی واحد آبی $h$ به ترتیب |
| $P_{\min}^h, Q_{\min}^h$ | مینیمم توان اکتیو و راکتیو تولیدی واحد آبی $h$ به ترتیب |
| $G_{ik}, B_{ik}$ | کندوکتانس و سوسپتانس مابین باس $i$ و باس $k$ به ترتیب |
| $V_{\min}^i, V_{\max}^i$ | مینمم و ماکزیمم دامنه ولتاژ در باس $i$ به ترتیب |
| $BF_{\max}^l$ | ماکزیمم محدودیت فلوی خط $l$ (MVA) |
| $Vol_{\min}^h, Vol_{\max}^h$ | مینیم وماکزیمم حجم ذخیره آب مخزن $h$ به ترتیب |

$qout^{h}_{\min}, qout^{h}_{\max}$ مینیم و ماکزیمم نرخ خروج آب ($m^3/hr$) مخزن $h$ به ترتیب

$Vol^{h}_{end}$ حجم ذخیره آب ($m^3$) مخزن $h$ در پایان مدت زمان برنامه ریزی

$UP_h$ تعداد مخازن بالاسری مخزن $h$

$u^{n}_{t}$ حالت انتخاب واحد حرارتی $n$ در زمان $t$ (۱=ON, ۰=OFF)

$P^{n}_{t}, Q^{n}_{t}$ توان اکتیو (MW) و راکتیو (MVAR) تولیدی واحد حرارتی $n$ در زمان $t$ به ترتیب

$\theta^{ik}_{t}$ اختلاف زاویه مابین باسهای $i$ و باس $k$ درزمان $t$

$v^{i}_{t}$ دامنه ولتاژ در باس $i$ در زمان $t$

$BF^{l}_{t}$ فلوی خط $l$ در زمان $t$

$r^{h}_{t}$ حالت انتخاب واحد آبی$h$ در زمان $t$ (۱=ON, ۰=OFF)

$P^{h}_{t}, Q^{h}_{t}$ توان اکتیو (MW) و راکتیو (MVAR) تولیدی واحد آبی$h$ در زمان $t$ به ترتیب

$Vol^{h}_{t}$ حجم ذخیره آب مخزن $h$ در زمان $t$

$qout^{h}_{t}$ نرخ خروج آب مخزن $h$ در زمان $t$

$In^{h}_{t}, Sh^{h}_{t}$ نرخ جریان طبیعی وسرریز مخزن $h$ در زمان $t$ به ترتیب

# فصل اول

## معرفی مسئله هماهنگی آبی – حرارتی کوتاه مدت سیستم قدرت[1]

نیاز امروزه بشر به استفاده از ذخایر انرژی به حدی رسیده است که تصور روزی بدون انرژی تقریباً محال است. تصور کنید دریک روز تمامی پمپ‌های بنزین سراسر یک شهر با مشکل عرضه بنزین مواجه شوند، این مشکل را همراه با قطعی برق در یک هفته در نظر بگیرید، همین دو موردکافیست تا برای آن شهر یک فاجعه به وجود آید. با مصرف بدون کنترل و نابهینه انرژی نمی‌توان رسیدن چنین روزهایی را چندان دور دانست.

با استفاده از انرژی حاصل از شکافتن اتم، انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های آبی، بادی، انرژی حاصل از گرمایش درونی زمین و غیره و تبدیل آن‌ها به انرژی الکتریکی می‌توان نیروی برق مورد نیاز را بدست آورد. از آنجایی که ذخایر انرژی‌های فسیلی تقریباً برگشت ناپذیر هستند، امروزه محققین درصدد استفاده از انرژی‌های برگشت پذیر برای کمک به بقای انرژی‌های برگشت ناپذیر برآمده‌اند. علاوه بر کمبود انرژی‌های تجدید ناپذیر امر دیگری که ما را امروزه ملزم به استفاده از انرژی‌های دیگر می‌کند، وجود آلایندگی در تولید نیروی برق توسط انرژی‌های فسیلی و انرژی‌های اتمی است. در جوامع پیشرفته کاهش آلایندگی های زیست محیطی از قوانین محکمی برخوردار است، بطوریکه محققین را به سمت استفاده از انرژی‌های پاک سوق می‌دهد. یکی از انرژی‌های برگشت پذیر و پاک، انرژی حاصل از جریان

[1] Short-term hydrothermal coordination (STHTC)

آب است. استفاده بشر از این انرژی به سال‌های دور بر می‌گردد، حتی در زمان‌هایی که نیروی برق به شکل امروزی وجود نداشت. استفاده از انرژی آب روان برای تولید برق در هر منطقه بسته به شرایط جوی آن می‌تواند اشکال مختلفی را داشته باشد. به طور مثال در کشورهای آبخیزی مثل برزیل یا کانادا نیروگاه های تولید برق آبی، بار پایه روزانه را تأمین می‌کنند، در صورتی که در کشور ایران معمولاً استفاده از انرژی نیروگاه های برق آبی در زمان اوج بار[1] است. از این رو استفاده از نیروگاه های برق آبی و هماهنگ کردن آن‌ها در تولید برق به همراه دیگر نیروگاه‌ها از اهمیت ویژه ای برای شرکت‌های برق برخوردار است.

با توجه به شرایط محلی هر منطقه مسئله هماهنگ سازی با مدل‌های خاصی ارائه می‌گردد. هدف از هماهنگ سازی نیروگاه های آبی - حرارتی تعیین سهم تولید توان برای هر واحد آبی و حرارتی است که یک بار مشخصی را در یک ساعت مشخص تغذیه می‌نمایند. نکته ای که باید در این هماهنگ سازی رعایت گردد این است که این تعیین سهم توان نباید هیچ یک از قیود حاکم بر سیستم اعم از قیود حاکم بر واحد های آبی، قیود مربوط به مخازن آب، قیود مربوط به واحد های حرارتی، قیود مربوط به شبکه و غیره را نقض کند. با توجه به مطالب بالا درمی یابیم که مسئله هماهنگ سازی آبی- حرارتی یک مسئله بهینه سازی[2] همراه با قیود است که برای درک مسئله باید جزئیاتی را از سیستم‌های آبی و حرارتی بدانیم.

## 1-1- برنامه ریزی تولید نیروگاه های آبی- حرارتی

به دلیل وجود منابع انرژی آبی و انرژی‌های حاصل از منابع سوختی و همچنین به دلیل تفاوت در هزینه و محدودیت‌های مرتبط با تولید انرژی الکتریکی در هر دو منبع، ملزم به استفاده از این دو منبع انرژی برای تأمین بارهای الکتریکی به گونه ای هستیم که، استفاده بهینه از هردو با حفظ تمامی محدودیت‌ها حاکم بر آن‌ها همراه گردد. از این امر به عنوان برنامه ریزی تولید نیروگاه های آبی حرارتی[3] یاد می‌شود.

---

[1] Load Shaving

[2] Optimization problem

[3] Hydrothermal Generation Scheduling Problem

در حقیقت برنامه‌ریزی سیستمی که متشکل از نیروگاه های آبی و حرارتی باشد معمولاً از برنامه‌ریزی سیستمی که فقط متشکل از نیروگاه های حرارتی است به مراتب پیچیده تراست. دلیل این امر ساده است، به این معنا که نیروگاه‌های آبی بر خلاف نیروگاه‌های حرارتی می‌توانند چه از نظر الکتریکی (که همه یک بار را تغذیه کنند) و چه از نظر هیدرولیکی (که آب خروجی از یک واحد به نیروگاه آبی واقع در رودخانه بالا دست خود وابسته باشد) به یکدیگر تزویج شده، می‌باشند[1].

از طرف دیگر از نقطه نظر امکانات طبیعی ذخیره آب (مثلاً حجم مخازن ساخته شده مصنوعی یا طبیعی)، عناصر هدایت کننده آب خروجی و نیز محدودیت‌های متنوع طبیعی یا مصنوعی، هیچ دو سیستم هیدرولیکی در دنیا عیناً مثل هم نیستند. سیستم‌های رودخانه‌ای ممکن است ساده یا پشت سرهم[1] باشند و یا اینکه مرزهای رودخانه‌ها به چند کشور مجاور برسد که از این رو باعث می‌شوند که سیستم‌های ذخیره آب با ترکیبات پیچیده‌ای همراه گردد.

به هر حال مشخصه بارزی که برنامه‌ریزی نیروگاه های آبی- حرارتی را از سایر نیروگاه‌ها متمایز می‌سازد تعداد زیاد و در عین حال تنوع محدودیت‌ها موجود است. در بسیاری از سیستم‌های هیدرولیکی تولید برق در کنار کنترل آب‌های سیلابی و نیز آبیاری زمین‌های مجاور سد است. مراکز تفریحی عموماً در کناره های یک حوضچه بزرگ سد ایجاد می‌شود که در نتیجه اجازه تغییر در سطح آب را محدود می‌سازد. از طرفی تخلیه آب باید به گونه ای باشد که آب در تمامی طول سال قابل کشتی‌رانی باشد. از تخلیه ناگهانی آب با حجم زیاد عموماً باید اجتناب کرد تا از تولید امواج و اثرات مخرب در پایین حوضچه جلوگیری گردد. ممکن است حوضچه های کمکی جهت عبور آبزیان از بالا به پایین سد ایجاد گردد، یا شاید تخلیه آب از طریق قرارداد های بین‌المللی تحت کنترل باشد (جهت کشور های مجاور). این قبیل مسائل باعث پیچیدگی سیستم‌های نیروگاه های آبی می‌گردد.

تا قبل از اینکه شرکت‌های برقی وارد تجدید ساختار[2] شوند مسئله هماهنگی در محیط سنتی[3] به گونه ای حل می‌شد که هزینه تمام شده انرژی حاصل از تولید برق حداقل شود و در عین حال محدودیت‌های حاکم بر سیستم‌های الکتریکی، هیدرولیکی و حرارتی رعایت گردد. حضور نیروگاه های

[1] Cascade

[2] Restructuring

[3] Traditional Environment