

برنامه ریزی کوتاه مدت نیروگاه های آبی و حرارتی در سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت های ایمنی سیستم و مسئله پایداری و لتاژ

نیما امجدی^۱ و محمدرضا انصاری^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: روش تجزیه بندرز، برنامه ریزی کوتاه مدت نیروگاه های آبی-حرارتی، پایداری و لتاژ، محدودیت های ایمنی، شاخص L_r.</p>	<p>در این مقاله یک روش جدید بر اساس تجزیه بندرز برای برنامه ریزی نیروگاه های آبی و حرارتی ارائه شده است. در حل این مسئله محدودیت های ایمنی، پخش بار ac و پایداری و لتاژ سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته است. روش پیشنهادی مسئله را به دو زیر برنامه اصلی و تابع تقسیم بندی می نماید. مسئله اصلی یک مسئله عدد صحیح است که در آن انتخاب واحد نیروگاه های حرارتی و آبی و میزان تولید واحدهای آبی به همراه محدودیت های واحدهای آبی دیده شده است. مسئله تابع نیز یک مسئله غیرخطی می باشد که میزان تولید هر واحد حرارتی در آن تعیین می شود. این در حالی است که در این مسئله از پخش بار ac استفاده شده و محدودیت های ایمنی و پایداری و لتاژ مطلوب سیستم قدرت در نظر گرفته می شود. پایداری و لتاژ سیستم قدرت بوسیله شاخص L_r مورد ارزیابی قرار می گیرد. از آنجایی که ممکن است به علت در نظر گرفتن معادلات پخش بار ac و محدودیت های ایمنی، مسئله تابع غیر قابل حل گردد از ضرایب جریمه در آن استفاده شده است. مدل پیشنهادی بر روی سیستم های ۹ باسه و ۱۱۸ باسه تست شده است که نتایج بدست آمده کارایی این روش را نشان می دهد.</p>

۱- مقدمه

محدودیت های ایمنی و قابلیت اطمینان در نظر گرفته می شود. به علاوه در این مسئله انتخاب واحدهای حرارتی و اختصاص توان تولیدی به آنها باید همزمان با برنامه ریزی واحدهای آبی حل گردد. در تحقیقات سال های اخیر چندین روش مختلف برای حل این مسئله ارائه شده است، که می توان به روش آزادسازی لاگرانژین^۲ (LR)، تجزیه بندرز، برنامه ریزی عدد صحیح مختلط، برنامه ریزی دینامیکی، محاسبات پویا، روش های هوش مصنوعی و نقطه درونی اشاره نمود. روش هایی بر اساس تجزیه مانند آزادسازی لاگرانژین، تکنیک آزادسازی

برنامه ریزی کوتاه مدت نیروگاه های آبی و حرارتی^۱ (STHTC) یک مسئله بهینه سازی پیچیده، غیرخطی و مقیاس بزرگ می باشد. تابع هدف این مسئله حداقل کردن هزینه بهره برداری واحدهای حرارتی در افق برنامه ریزی (برای مثال یک هفته یا یک روز) می باشد. در حل این مسئله محدودیت های متعددی از جمله محدودیت واحدهای آبی، محدودیت واحدهای حرارتی و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: rezaansari_444@yahoo.com

۱. استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۱ Short Term Hydro Thermal Coordination

^۲ Lagrangian relaxation

مثال در مرجع [۲۰] نیز یک برنامه‌ریزی توسعه یافته دینامیکی و روش هماهنگی مرکبی برای جدول‌بندی سیستم آبی حرارتی در یک بازه زمانی کوتاه‌مدت ارائه گردیده است. یک روش آنالیزی برای حل زیربرنامه حرارتی استفاده شده و این درحالی است که از یک روش برنامه‌ریزی توسعه‌یافته دینامیکی برای حل زیرمسئله آبی استفاده شده است. در مراجع [۲۱-۲۲] هم یک روش غیرخطی عدد صحیح جدید برای حل مسئله جدول‌بندی واحدهای آبی در بازار برق بعد ارائه شده است.

روش‌های محاسبات پویا مانند روش الگوریتم ژنتیک [۲۳-۲۵]، SA^۲، [۲۶-۲۷]، PSO^۳ [۲۸]، ارزیابی پویا^۴ (ES) [۲۹]، تکنیک‌های برنامه‌ریزی پویا^۵ (EP) [۳۰-۳۲] و IP^۶ [۳۳] به طور وسیعی در حل مسئله STHTC استفاده شده‌اند. در مرجع [۲۳] واحدهای آبی پشت‌سرهم، واحدهای گرمایی و همچنین حل مسئله انتخاب واحد به همراه مسئله توزیع اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است. محدودیت‌های عملی زیادی نیز مورد توجه قرار گرفته و نتایج خوبی نیز حاصل شده است. اما اندازه مسئله انتخابی کوچک بوده و در نتیجه دلیل محکمی برای آنکه الگوریتم در حل مسائل بزرگ هم موفق باشد وجود ندارد.

همچنین روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی [۳۴-۳۵] و منطق فازی [۳۶] نیز در حل مسئله STHTC مورد استفاده قرار گرفته است.

با بررسی تمام مراجع ذکر شده در بالا نکات زیر مورد توجه قرار گرفت.

۱- در اکثر کارهایی که مدل شبکه را به مسئله هماهنگی آبی-حرارتی اضافه نموده‌اند، برای ساده‌سازی مدل از پخش بار DC استفاده نموده‌اند، که در نتیجه نتایج آن دارای دقت کافی نمی‌باشد.

توسعه یافته، تجزیه بندرز و تجزیه شناخته شده دانترینگ و ولف به طور وسیعی برای حل مسائل بهینه‌سازی مقیاس بزرگ، مانند مسئله STHTC استفاده گردیده است.

در مراجع [۱-۱۱] برای حل مسئله STHTC از روش آزادسازی لاگرانژین استفاده شده است. در تمام این مراجع STHTC به دو زیر برنامه تقسیم‌بندی شده است. در هر کدام از این مراجع جزئیات مختلفی برای مسئله در نظر گرفته شده و راهکارهایی برای غلبه بر مشکلات روش LR ارائه شده است.

در مراجع [۱۲-۱۶] روش‌هایی بر اساس تجزیه بندرز برای حل STHTC ارائه شده است. در مرجع [۱۳] یک روش تجزیه بندرز که محدودیت‌های ایمنی را نیز برای مسئله STHTC در نظر گرفته است، ارائه گردید. در این فرایند سیستم آبی جهت پاسخگویی به بسیاری از جزئیات و ضروریات‌های اضطراری نظیر مخازن پشت‌سرهم و سرریز طرح‌ریزی شده است. در این مقاله تلفات سیستم با مدل DC نشان داده شده و سیستم 118 باسه IEEE مورد آزمایش قرار گرفته است. در مراجع [۱۴-۱۶] از مدل AC برای سیستم انتقال به همراه محدودیت‌های ایمنی ولتاژ و فلوی خطوط در حل مسئله STHTC استفاده شده است و اهمیت مدل کردن معادلات AC نسبت به مدل DC برای سیستم انتقال نشان داده می‌شود. مدیریت ازدحام و کنترل کیفیت سرویس‌ها با حل یک سیستم واقعی در مرجع [۱۶] نشان داده شده، که همگرایی کند روش با تکنیک‌های تسریع، حل گردیده است.

در مرجع [۱۷] نیز، یک الگوریتم بر اساس روش شاخه و محدودیت (B&B)^۱ اصلاح شده معرفی گردیده است. این الگوریتم یک راه حل عدد صحیح و امکان‌پذیر مقدماتی جهت بهبود جستجو در روش B&B ارائه کرده که زمان حل مسئله برنامه‌ریزی آبی و حرارتی را کاهش داده است.

روش‌های بهینه‌سازی دینامیکی نیز به‌طور وسیعی در حل مسئله هماهنگی آبی-حرارتی به خاطر پیچیدگی و وجود متغیرهای دینامیکی، استفاده شده است [۱۸-۲۰]. برای

^۱ Branch and Bound

^۲ Simulated annealing

^۳ Particle swarm optimization

^۴ Evolutionary strategies

^۵ Evolutionary programming

^۶ Interior Point

۲- مدل پیشنهادی مسئله

در این مقاله یک فرمول‌بندی جدید براساس روش تجزیه بندرز^۱ (BD) برای حل مسئله STHTC ارائه شده است. این روش مسئله را به یک زیربرنامه اصلی^۲ و یک زیربرنامه تابع^۳، تقسیم‌بندی می‌نماید. برنامه اصلی از یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۴ (MIP) برای پیدا کردن حالات روشن و خاموش واحدهای آبی و حرارتی و میزان تولید واحدهای آبی استفاده می‌نماید. این در حالی است که زیربرنامه تابع توسط برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) حل گردیده و میزان تولید واحدهای حرارتی را در حالی به دست می‌آورد که معادلات پخش بار ac برای شبکه انتقال همراه با محدودیت‌های ایمنی ولتاژ و فلووی خطوط و پایداری ولتاژ، در نظر گرفته شده است. به خاطر حل معادلات ac زیر برنامه تابع ممکن است غیرقابل حل^۵ گردد. برای حل این موضوع در هر زیر برنامه معادلات ac را با در نظر گرفتن متغیرهای پنالتی برآورده می‌نماییم که در نتیجه قابل حل^۶ می‌گردد.

پس از حل این زیربرنامه کات‌های بندرز^۷ تولید شده و به زیربرنامه اصلی در تکرار بعد اضافه می‌شود. مرحله حل این مسئله در یک فرایند تکراری تا رسیدن به فاصله قابل قبول تعریف شده و همگرایی حل بین زیر برنامه اصلی و زیربرنامه تابع ادامه می‌یابد.

۲-۱- مسئله STHTC

تابع هدف مسئله STHTC می‌تواند به صورت زیر ارائه گردد:

$$Cost = Min \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \left[(F^n (P_t^n) u_t^n) + (SU^n \cdot y_t^n) + (SD^n \cdot x_t^n) \right] \right\} \quad (1)$$

¹ Benders decomposition

² Master

³ sub-problem

⁴ Mixed Integer

⁵ infeasible

⁶ feasible

⁷ Benders cut

۲- کارهای قبلی که مسئله هماهنگی آبی- حرارتی را با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی به همراه مدل پخش بار ac در گرفته اند، نیز دارای اشکالات زیر می‌باشند:

الف) زمان محاسباتی روش‌های پیشنهادی به علت پیچیدگی زیاد ناشی از خود مسئله و همچنین پخش بار، بالا می‌باشد. در کارهایی هم که از تکنیک‌های سرعت‌بخشی استفاده شده است، دقت نتایج کاهش یافته است، به عبارتی جواب‌ها بدتر شده است.

ب) هیچکدام از کارهای گذشته در مدلی که پیشنهاد می‌نمایند، نتوانسته اند محدودیت‌های ایمنی در نظر گرفته شده را به طور کامل تامین نمایند. در نتیجه ضرایب پنالتی که به محدودیت‌ها اضافه شده است مخصوصاً در تست سیستم‌های بزرگ، به طور کامل صفر نگردیده است. ۳- در هیچ یک از کارهایی که در گذشته در این زمینه انجام شده، پایداری ولتاژ سیستم قدرت به طور مشخص در نظر گرفته نشده است.

در نتیجه در این مقاله، یک روش جدید برای حل مسئله هماهنگی آبی- حرارتی با در نظر گرفتن پخش بار ac و محدودیت‌های ایمنی و همچنین پایداری ولتاژ پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی روشی مبتنی بر روش تجزیه بندرز می‌باشد و مسئله را به دو زیر برنامه اصلی و تابع تقسیم‌بندی می‌نماید؛ و سعی شده با انتخاب کات‌های قدرتمند بندرز سرعت همگرایی روش به یک جواب کاملاً بهینه با حاشیه مناسب پایداری، بهبود بخشیده شود. همچنین به منظور ارزیابی پایداری ولتاژ سیستم قدرت در حل مسئله STHTC شاخص معروف L_r مورد استناد قرار گرفته است.

در قسمت‌های بعدی مقاله ابتدا مدل پیشنهادی مسئله STHTC و فرمول‌بندی آن، سپس جزئیات روش پیشنهادی حل و در آخر حل دو سیستم نمونه با این روش و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

$$P_{n,t}^{r,\min} = \max \{P_{\min}^n, P_{t-1}^n - DR^n\} \quad (14)$$

$$P_{n,t}^{r,\max} = \min \{P_{\max}^n, P_{t-1}^n + UR^n\} \quad (15)$$

$$u_t^n \cdot P_{n,t}^{r,\min} \leq P_t^n \leq u_t^n \cdot P_{n,t}^{r,\max} \quad (16)$$

$$u_t^n \cdot Q_{\min}^n \leq Q_t^n \leq u_t^n \cdot Q_{\max}^n \quad (17)$$

- محدودیت موازنه‌ی توان (پخش بار AC)

موازنه گره ای برای هر باس $k \in I$ (هم اکتیو وهم راکتیو) برای هر دوره از زمان $t \in T$ به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\sum_{n \in S_k^n} P_t^n + \sum_{h \in S_k^h} P_t^h - Pload_t^k = v_t^k \sum_{i=1}^I v_t^i (G_{ki} \cos \theta_t^{ki} + B_{ki} \sin \theta_t^{ki}) \quad (18)$$

$$\sum_{n \in S_k^n} Q_t^n + \sum_{h \in S_k^h} Q_t^h - Qload_t^k = v_t^k \sum_{i=1}^I v_t^i (G_{ki} \sin \theta_t^{ki} - B_{ki} \cos \theta_t^{ki}) \quad (19)$$

- محدودیت‌های ایمنی

محدودیت ولتاژ هر باس در هر دوره زمانی t

$$V_{\min}^i \leq v_t^i \leq V_{\max}^i \quad (20)$$

محدودیت ظرفیت هر خط انتقال در هر دوره زمانی t

$$|BF_t^l| \leq BF_{\max}^l \quad (21)$$

۲-۲- ارزیابی پایداری ولتاژ

«پایداری ولتاژ» عبارتست از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در تمام شین‌های سیستم در شرایط عادی عملکرد و بعد از اینکه تحت یک اغتشاش قرارگرفت. زمانی که حضور اغتشاش، افزایش تقاضای بار، یا تغییر در وضعیت سیستم باعث افت فزاینده و غیرقابل کنترل در ولتاژ گردد، سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ می‌شود. دلیل اصلی ناپایداری، عدم توانایی سیستم قدرت در تامین توان راکتیو موردتقاضا است [۳۷].

- شاخص L_j

در این مقاله برای ارزیابی پایداری ولتاژ سیستم قدرت از شاخص اندازه گیری L_j [۳۸-۳۹] استفاده می‌گردد. این

(لیست سمبل‌ها در پایان مقاله آمده است)

تابع هدف شامل هزینه های راه اندازی و خاموش نمودن وهمچنین $F^n(P_t^n)$ می‌باشد، که $F^n(P_t^n)$ به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$F^n(P_t^n) = A^n \cdot (P_t^n)^2 + B^n \cdot P_t^n + C^n \quad (2)$$

محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر می‌باشد.

- حداقل on/off بودن واحدهای حرارتی

$$y_t^n \geq u_t^n - u_{t-1}^n \quad (3)$$

$$\sum_{m=0}^{T_n^{ON}-1} u_{t+m}^n \geq y_t^n T_n^{ON} \quad (4)$$

$$x_t^n \geq u_{t-1}^n - u_t^n \quad (5)$$

$$\sum_{m=0}^{T_n^{OFF}-1} (1-u_{t+m}^n) \geq x_t^n T_n^{OFF} \quad (6)$$

- حداقل و حداکثر توان اکتیو و راکتیو خروجی واحدهای هیدرولیکی

$$r_t^h \cdot P_{\min}^h \leq P_t^h \leq r_t^h \cdot P_{\max}^h \quad (7)$$

$$r_t^h \cdot Q_{\min}^h \leq Q_t^h \leq r_t^h \cdot Q_{\max}^h \quad (8)$$

P_t^h به صورت یک تابع خطی از نرخ خروج آب در نظر گرفته می‌شود.

- موازنه دینامیکی آب

$$Vol_t^h = Vol_{t-1}^h + In_t^h - qout_t^h - Sh_t^h + \sum_{re=1}^{UP_h} (qout_{t-\tau_{re,h}}^{re} + Sh_{t-\tau_{re,h}}^{re}) \quad (9)$$

- حداقل و حداکثر حجم هر مخزن

$$Vol_{\min}^h \leq Vol_t^h \leq Vol_{\max}^h \quad (10)$$

- حداقل و حداکثر نرخ خروج آب

$$r_t^h \cdot qout_{\min}^h \leq qout_t^h \leq r_t^h \cdot qout_{\max}^h \quad (11)$$

- محدودیت حجم نهایی آب

$$Vol_T^h = Vol_{end}^h \quad (12)$$

- محدودیت ذخیره چرخان^۱

$$\sum_{h=1}^H (r_t^h \cdot P_{\max}^h) + \sum_{n=1}^N (u_t^n \cdot P_{\max}^n) \geq SR_t + \sum_{i=1}^I Pload_t^i \quad (13)$$

ظرفیت تولید توان اکتیو و راکتیو و محدودیت نرخ تغییرات^۲ افزایشی و کاهش‌ی واحدهای حرارتی

² Ramp rate

¹ Spinning reserve

$$\dot{S}'_j = \left(\sum_{i \in L} \frac{Z_{ji}^* \dot{S}'_i}{Z_{jj} V_i} \right) \dot{V}'_j = \dot{S}'_j + \left(\sum_{\substack{i \in L \\ i \neq j}} \frac{Z_{ji}^* \dot{S}'_i}{Z_{jj} V_i} \right) \dot{V}'_j \quad (29)$$

مشاهده می‌شود که ولتاژ در باس بار j ام هم تحت تاثیر مقدار توان مختلط \dot{S}'_j و هم قسمت ژنراتوری \dot{V}'_{0j} می‌باشد.

با مقایسه معادلات می‌توانیم شاخص پایداری ولتاژ در سیستم‌های چند ماشینه را در باس بار j به صورت زیر نشان دهیم.

$$L_j = \left| 1 + \frac{\dot{V}'_{0j}}{\dot{V}'_j} \right| = \left| \frac{\dot{S}'_j}{V_j^2 Y_{jj}^*} \right| = \frac{S'_j}{V_j^2 Y_{jj}} \quad (30)$$

و می‌توان شاخص کل سیستم را بزرگترین شاخص در بین باس‌های بار در نظر گرفت.

شاخص L_j مقداری بین صفر تا یک را دارا می‌باشد. از اینرو برای سیستمی با پایداری ولتاژ بالا این شاخص کمتر از واحد باید باشد. مقدار شاخص L_j فاصله سیستم تا فروپاشی ولتاژ را نیز نشان می‌دهد. در نتیجه هر چه مقدرا آن به صفر نزدیکتر باشد، سیستم قدرت دارای پایداری ولتاژ بهتری می‌باشد.

۲-۳- مدل مسئله هماهنگی-آبی حرارتی با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ

برای حل مسئله هماهنگی آبی-حرارتی می‌توان به دو صورت زیر عمل نمود.

۱- تابع هدف مسئله، تابع هدف (۱) و محدودیت‌ها نیز به همان صورت تعریف شود. فقط در اینجا با محاسبه شاخص L_j ، آن را نیز به عنوان یک محدودیت به مسئله SHTC اضافه می‌نماییم. در اینجا با در نظر گرفتن یک مقدار مشخص برای کران بالای شاخص L_j (که حاشیه پایداری ولتاژ مناسب را تامین نماید)، یک محدودیت به مدل قبلی اضافه می‌گردد، در نتیجه مسئله هماهنگی

شاخص نشان‌دهنده نزدیکی به نقطه ناپایداری ولتاژ در سیستم قدرت بوده و براساس اطلاعات پخش بار و قوانین کیرشلف به دست می‌آید و مسئله ناپایداری ولتاژ را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌نماید.

- روش محاسبه شاخص پایداری ولتاژ در سیستم‌های بزرگ

برای بدست آوردن شاخص پایداری در سیستم‌های بزرگ، ابتدا باس‌ها را در سیستم قدرت به دودسته عمده، باس‌های ژنراتوری (باس‌های PV و باس اسلاک^۱) و باس‌های بار (PQ)، تقسیم می‌نماییم. از آنجایی که مشکل ناپایداری ولتاژ مرتبط با توان راکتیو بوده و باس‌های ژنراتوری تولیدکننده توان راکتیو برای نگهداری و تنظیم ولتاژ می‌باشند، در نظر گرفتن همه باس‌ها به صورت مجزا ضروری است.

سیستم قدرت را می‌توان بنابر قانون کیرشلف به صورت زیر در نظر گرفت.

$$I_{system} = \begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{LL} & Y_{LG} \\ Y_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} = Y_{system} V_{system} \quad (22)$$

$$Z_{LL} = Y_{LL}^{-1} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & -Z_{LL} Y_{LG} \\ Y_{GL} Z_{LL} & Y_{GG} - Y_{GL} Z_{LL} Y_{LG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix}$$

در نتیجه برای باس بار $j \in L$ ، ولتاژ در باس به صورت زیر می‌باشد.

$$\dot{V}'_j = \sum_{i \in L} Z_{ji} \dot{I}'_i + \sum_{k \in G} A_{jk} \dot{V}'_k \quad (24)$$

$$A = -Z_{LL} Y_{LG} \quad (25)$$

$$V_j^2 + V_{0j} \dot{V}'_j = \frac{S'_j}{Y_{jj}^*} \quad (26)$$

که:

$$\dot{V}'_{0j} = - \sum_{k \in G} A_{kj} \dot{V}'_k \quad (27)$$

$$Y_{jj} = \frac{1}{Z_{jj}} \quad (28)$$

¹ Slack

تقریب خطی از زیربرنامه تابع را در حول نقطه حل پیدا شده در زیربرنامه اصلی نشان می‌دهند. بنابراین زیربرنامه اصلی باید به صورت موفقیت آمیزی به همراه کات‌های بندرز و زیربرنامه فرعی حل گردد تا به همگرایی مورد نظر دست یابیم.

۳-۱- مدل زیر برنامه اصلی

زیربرنامه اصلی در روش پیشنهادی یک مدل MILP می‌باشد که تابع هدف آن به صورت زیر است:

$$\mu_M = \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^T \left[\sum_{n=1}^N \left((C^n \cdot u_t^n) + (SU^n \cdot y_t^n) + (SD^n \cdot x_t^n) \right) + \eta_t \right] \right\} \quad (32)$$

ترم η_t از کات‌های بندرز بدست می‌آید.

محدودیت‌های زیربرنامه اصلی شامل حداقل و حداکثر on/off (روشن و خاموش بودن) بودن واحدهای حرارتی (۳، ۴، ۵ و ۶)، حداقل و حداکثر توان اکتیو خروجی واحدهای آبی (۷)، ذخیره چرخان مورد نیاز سیستم (۱۳) و محدودیت‌های واحدهای هیدرولیکی (۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲)، می‌باشد.

قسمت‌های باقی‌مانده از تابع هزینه (۱) در تابع هدف زیر برنامه تابع در نظر گرفته شده است. فرمول‌بندی زیربرنامه تابع در قسمت بعدی معرفی می‌گردد.

۳-۲- زیربرنامه تابع

در زیربرنامه تابع یک الگوریتم توزیع اقتصادی میزان توان خروجی هر واحد گرمایی را که در زیربرنامه اصلی انتخاب شده است، تعیین می‌نماید. تابع هدف این زیربرنامه به صورت زیر می‌باشد.

$$\mu_S = \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \left[\left[(B^n) \cdot p_t^n + A^n \cdot (p_t^n)^2 \right] \cdot u_t^n \right] \right\} \quad (33)$$

آبی-حرارتی در حالی حل می‌شود که حاشیه مناسبی برای پایداری ولتاژ در نظر گرفته شده است.

$$L_j \leq L_{j \max} \quad (31)$$

۲- اما در اینجا ما یک تابع هدف چند قسمتی را پیشنهاد می‌نماییم. قسمت اصلی تابع هدف همان تابع هدف (۱) می‌باشد که در اینجا قسمت دیگری نیز به آن اضافه شده

است، که شامل شاخص L_j می‌باشد $(\sum_{j=1}^J L_j) \cdot W$

(البته در حالی که وزن دار شده است). در نتیجه حداقل کردن تابع هزینه همراه با حداقل کردن شاخص L_j صورت می‌پذیرد.

۳- روش حل پیشنهادی

مسئله SHTC به خاطر تابع هدف آن و معادلات پخش بار AC یک مسئله غیرخطی می‌باشد. همچنین انتخاب حالت واحدهای هیدرولیکی و حرارتی متغیرهای باینری می‌باشد. در نتیجه SHTC یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) می‌باشد. در اینجا یک راه حل جدید براساس روش BD برای حل مسئله SHTC ارائه گردیده است. روش GBD در یک پروسه تکراری زیربرنامه اصلی را که یک برنامه‌ریزی خطی (MILP) می‌باشد را همراه با زیربرنامه تابع که برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) می‌باشد، حل می‌نماید (با متغیرهای صحیح ثابت شده). در حل SHTC زیربرنامه اصلی متغیرهای باینری u_t^n, r_t^h و متغیرهای پیوسته P_t^h, η_t را شامل می‌شود.

زیربرنامه تابع نیز تنها قسمتی از تابع هدف را شامل می‌شود که متغیرهای پیوسته را دربر می‌گیرد. بعد از حل زیربرنامه تابع یک مجموعه از متغیرهای دوگانه^۱ به زیربرنامه اصلی برگردانده می‌شود و کات‌های بندرز از این متغیرهای دوگانه تولید می‌گردد. کات‌های بندرز یک

¹ dual

(۳۷)

همچنین برای در نظر گرفتن محدودیت پایداری ولتاژ معادلات (۲۲-۳۰) به زیربرنامه تابع ساعتی اضافه می‌گردد و شاخص L_r برای تمام باس‌های بار در هر ساعت محاسبه می‌گردد. برای داشتن یک حاشیه پایداری مناسب می‌توان این شاخص را هم به صورت قسمتی از تابع هدف و هم یک محدودیت به این زیربرنامه اضافه نمود.

بعد از حل زیربرنامه ساعتی کات‌های بندرز زیر برای هر ساعت تولید خواهد شد و به زیربرنامه اصلی در تکرار بعد اضافه می‌گردد (تکرار B ام):

$$\begin{aligned} \eta_t \geq & \mu_{S,t,b} + \sum_{n \in N} \lambda u_{t,b}^n (u_t^n - \bar{u}_{t,b}^n) \\ & + \sum_{h \in H} \lambda r_{t,b}^h (r_t^h - \bar{r}_{t,b}^h) \\ & + \sum_{h \in H} \lambda p_{t,b}^h (p_t^h - \bar{p}_{t,b}^h) \quad b=1, \dots, B \end{aligned} \quad (38)$$

$\mu_{S,t,b}$ همان $\mu_{S,t}$ نشان داده شده در (۳۷) در تمام تکرارهای قبلی بوده و $\lambda u_{t,b}^n$ ، $\lambda r_{t,b}^h$ و $\lambda p_{t,b}^h$ متغیرهای دوگان یا ضرایب لاگرانژی است که با توجه به محدودیت‌های (۳۴، ۳۵، ۳۶) از زیربرنامه تابع (به ترتیب) در تمام تکرارهای قبلی به دست آمده است. $\bar{r}_{t,b}^h$ ، $\bar{u}_{t,b}^n$ و $\bar{p}_{t,b}^h$ نیز مقادیر به دست آمده از حل مسئله اصلی در تمام تکرارهای قبلی می‌باشد. b نیز تکرارها را از تکرار یکم تا B ام نشان می‌دهد. توجه به این نکته مهم می‌باشد که در هر تکرار بعد از پایان حل زیربرنامه تابع معادله ۳۸ اصلاح می‌گردد و مقادیر به دست آمده از تکرار جاری به بندرز کات مسئله بعدی اضافه می‌گردد. در نظر گرفتن همه تکرارهای قبل در تولید کات بندرز موجب ایجاد یک بندرز کات قدرتمند می‌گردد که به طور چشمگیری همگرایی روش را افزایش می‌دهد و این نکته قابل توجهی است که در کارهای قبلی در این زمینه دیده نمی‌شود، در نتیجه سرعت همگرایی در آن‌ها کند بوده و زمان حل افزایش می‌یابد.

u_t^n متغیری است که در زیربرنامه اصلی قبلاً تعیین شده است و در اینجا یک عدد ثابت می‌باشد. در نتیجه زیربرنامه بالا یک برنامه‌ریزی بهینه غیرخطی است اما عدد صحیح نمی‌باشد.

حداقل کردن زیربرنامه NLP بالا، مطابق با قیود محدودیت توان راکتیو واحدهای آبی (۸)، محدودیت توان خروجی واحدهای گرمایی (۱۷-۱۴)، موازنه توان راکتیو برای هر باس در دوره زمانی t (۱۸ و ۱۹)، محدودیت ولتاژ باس‌ها (۲۰) و محدودیت ظرفیت خطوط در دوره زمانی t (۲۱) می‌باشد.

همچنین متغیرهای تصمیم گیرنده ای که در زیربرنامه اصلی تعیین گردیدند به عنوان اطلاعات ورودی برای زیربرنامه تابع به کار می‌روند:

$$u_t^n = \bar{u}_t^n \quad (34)$$

$$r_t^h = \bar{r}_t^h \quad (35)$$

$$P_t^h = \bar{P}_t^h \quad (36)$$

\bar{u}_t^n ، \bar{r}_t^h و \bar{P}_t^h نتایج به دست آمده از زیربرنامه اصلی در همین تکرار می‌باشند. همچنین از آنجایی که متغیرهای \bar{u}_t^n ، \bar{r}_t^h و \bar{P}_t^h در این زیر برنامه ثابت گردیده اند ممکن است زیربرنامه تابع غیرقابل حل گردد. برای حل این مشکل معادلات (۱۸) و (۱۹) را با ضرایب پنهالی در نظر می‌گیریم.

نکته مهم دیگر در حل زیربرنامه تابع آن است که، از آنجایی که زیربرنامه فرعی در ساعت‌های مختلف از همدیگر مستقل می‌باشد می‌توان به جای حل هر ۲۴ ساعت با همدیگر آن‌ها را به صورت جداگانه برای هر ساعت حل نمود. از آنجایی که ساعت‌ها پشت‌سرهم حل می‌گردند محدودیت نرخ تغییرات افزایشی و کاهش‌ی واحدهای حرارتی نیز به مانند دیگر محدودیت‌ها در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن این مسئله زیربرنامه تابع ساعتی به صورت زیر اصلاح می‌گردد.

$$\mu_{S,t} = \text{Min} \left\{ \sum_{n=1}^N \left[\left[(B^n) \cdot p_t^n + A^n \cdot (p_t^n)^2 \right] \cdot u_t^n \right] \right\}$$

۳-۳- شرط همگرایی

شرط همگرایی و پایان مسئله

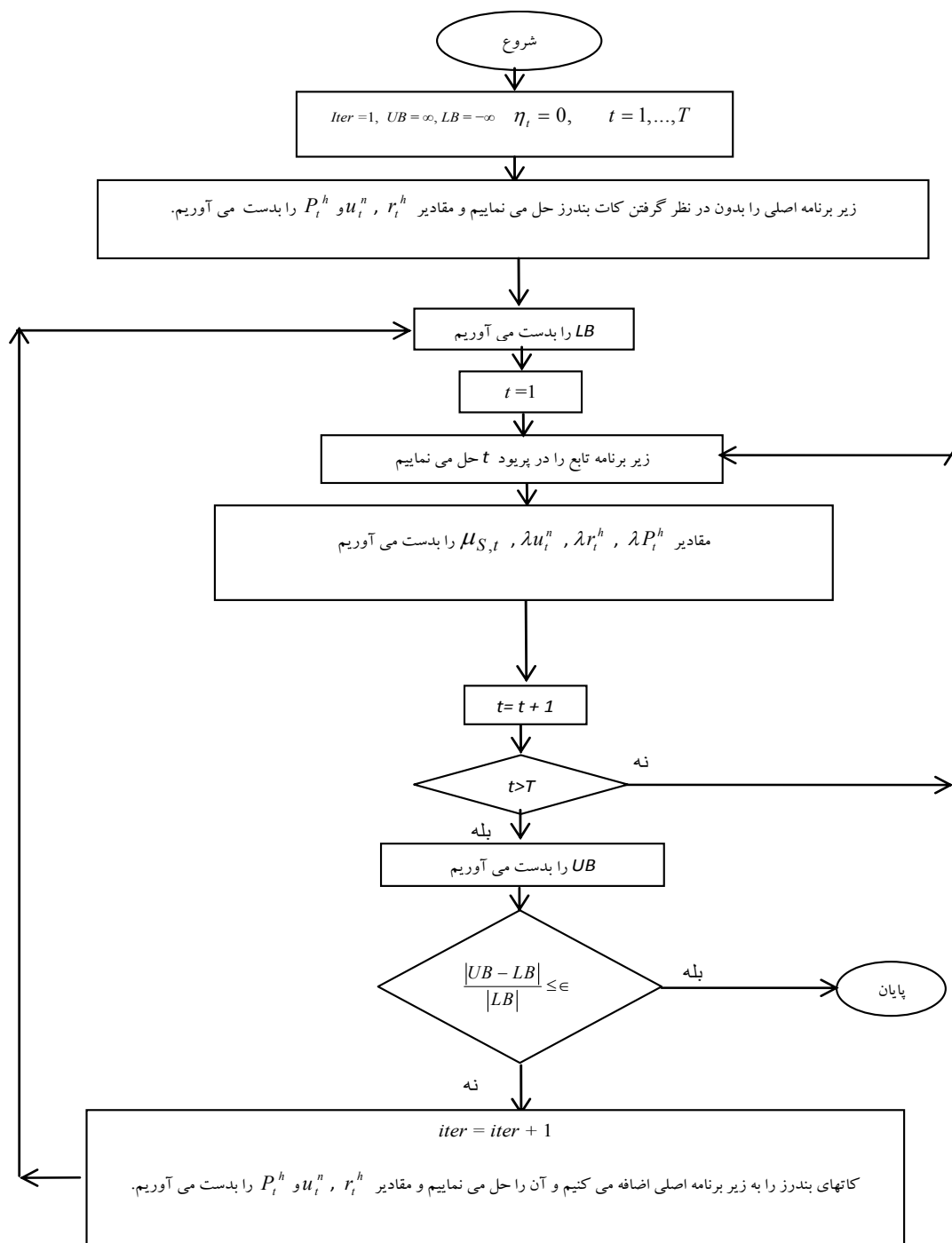
$$\frac{|UB - LB|}{|LB|} \leq \epsilon \quad (41)$$

با محاسبه محدوده بالایی UB و محدوده پایینی LB بعد از پایان هر تکرار شرط همگرایی را به صورت زیر چک می‌نماییم:

$$LB = \mu_M \quad (39)$$

$$UB = \mu_M + \sum_{t=1}^T \mu_{S,t} - \sum_{t=1}^T \eta_t \quad (40)$$

فلوچارت اجرای الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

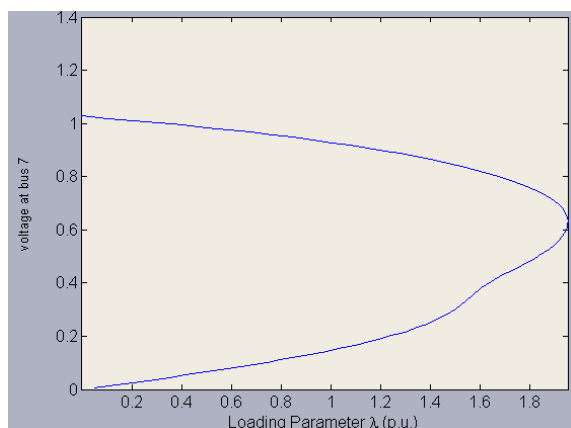
که ساعت پیک بار می‌باشد نشان داده است. پروفایل ولتاژ باس ۷ نیز در شکل ۲ آمده است (برای ساعت ۲۱). در رسم این پروفایل و بدست آوردن ضریب بارگذاری از نرم‌افزار PSAT استفاده شده است.

جدول ۱- نتایج سیستم ۹ باسه آزمایش ۱

روش حل	هزینه	زمان (s)	تعداد تکرار
DICOPT	73663	143	-
GBD [14], [15]	73435	57	15
روش پیشنهادی	73418	31	8

جدول ۲- نتایج شاخص L_j در سیستم ۹ باسه آزمایش ۱

ضریب بارگذاری	L_0 در $t=21$	L_7 در $t=21$
1.9519	0.168	0.183



شکل ۲- پروفایل ولتاژ در باس ۷ در آزمایش ۱

آزمایش ۲- حل سیستم ۹ باسه با در نظر گرفتن شاخص L_j برای پایداری ولتاژ به صورت یک محدودیت

در این آزمایش همان مسئله آزمایش ۱ را به علاوه محدودیت (۳۱) برای شاخص پایداری ولتاژ L_j در نظر گرفته ایم. به عبارتی محدودیت $L_j \leq L_{j,max}$ را به مسئله اضافه کرده ایم. نتایج این آزمون با استفاده از روش BD پیشنهادی در جدول ۳ نشان داده شده است. در اینجا نیز

۴- نتایج عددی

به منظور نشان دادن موثر بودن روش پیشنهادی در حل مسئله STHTC از سیستم شناخته شده ۹ باسه و ۱۱۸ باسه استفاده شده است. سیستم ۹ باسه ۳ واحد حرارتی، یک واحد آبی، ۹ خط انتقال و سه بار دارد. سیستم ۱۱۸ باسه نیز ۵۴ واحد حرارتی، ۷ واحد آبی، ۱۸۶ خط انتقال و ۹۱ بار دارد. اطلاعات این دو سیستم از [۱۴،۴۰] انتخاب شده است.

۴-۱- نتایج سیستم ۹ باسه

آزمایش ۱- حل سیستم ۹ باسه بدون در نظر گرفتن شاخص L_j (نه به عنوان محدودیت نه به عنوان قسمتی از تابع هدف)

نتایج بدست آمده از روش BD پیشنهادی برای سیستم ۹ باسه در جدول ۱ ارائه شده است و با نتایج دیگر روش‌ها مقایسه گردیده است. روش اول گزارش شده در جدول DICOPT یکی از حل‌کننده های^۱ نرم‌افزار GAMS [۴۱] می‌باشد. سطر دوم جدول نتایج مراجع (۱۴) و (۱۵) را نشان می‌دهد. سطر سوم جدول نیز نتایج روش پیشنهادی را نیز نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده در جدول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی بهترین نتایج را هم در هزینه و هم در زمان نسبت به روش‌های دیگر دارد. نتایج روش پیشنهادی با استفاده از یک کامپیوتر با 2 GB RAM و 2 GHz بدست آمده است.

همچنین در روش پیشنهادی همه ترم‌های پنالتی صفر شده و همه محدودیت‌ها به طور کامل ارضا شده است. لازم به ذکر است که زیربرنامه اصلی با استفاده از حل‌کننده CPLEX و زیربرنامه‌های تابع با استفاده از حل‌کننده SNOPT از نرم‌افزار GAMS حل شده‌اند.

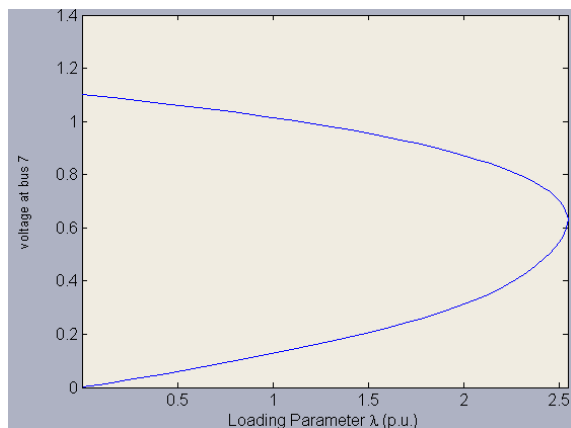
جدول ۲ به طور نمونه شاخص L_j در دو باس بار ۹ و باس بار ۷ و همچنین ضریب بارگذاری سیستم را در ساعت ۲۱

¹ Solver

۳۱ درصد افزایش و هزینه تولید نیز به طور مشابه حدود ۱۱/۵ درصد افزایش یافته است.

جدول ۴- نتایج سیستم ۹ با سه باروش BD پیشنهادی در آزمایش ۳

تعداد تکرار	زمان (s)	هزینه	L_7 در $t=21$	L_9 در $t=21$	ضریب بارگذاری
20	80	81825	0.154	0.144	2.544



شکل ۴- پروفایل ولتاژ در باس ۷ در آزمایش ۳

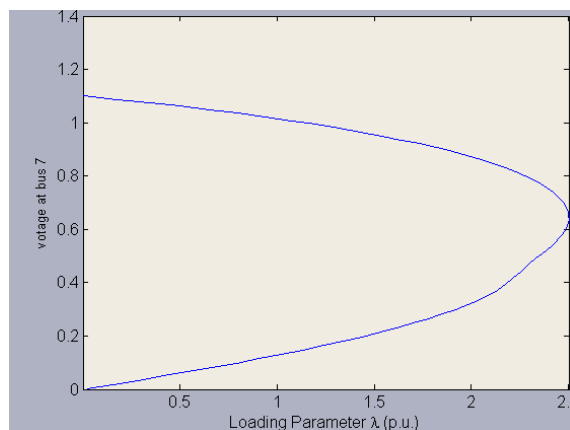
با بررسی نتایج عددی ارائه شده در جداول ۳ و ۴ مشخص می‌گردد که اضافه کردن مسئله پایداری ولتاژ به مسئله هماهنگی آبی-حرارتی (در هر دو صورت) باعث افزایش تقریبی ۱۱/۵ درصدی در تابع هزینه می‌گردد (در هر دو آزمایش ۲ و ۳ نزدیک به هم و حدود ۱۱/۵ درصد می‌باشد). در ازای این افزایش هزینه تولید، ضریب بارگذاری سیستم که نشان دهنده حاشیه پایداری ولتاژ می‌باشد، در حدود ۳۱ درصد افزایش یافته است. به عبارت دیگر در ازای افزایش ۱ درصدی به حاشیه پایداری ولتاژ حدود ۰/۳۶ درصد به هزینه تولید اضافه می‌گردد.

همچنین با مقایسه تعداد تکرارها و زمان محاسباتی در هر دو جدول ۳ و ۴ به نظر می‌رسد افزودن شاخص L_j برای ارزیابی پایداری ولتاژ به صورت یک محدودیت به زیر برنامه های تابع، روش موثرتر و بهتری می‌باشد، چون در آزمون ۲ زمان حل مسئله و تعداد تکرارها نسبت به آزمون ۳ کمتر می‌باشد و این در حالیست که بقیه نتایج دوآزمون تقریباً مشابه می‌باشد.

شاخص L_j در همان دو باس بار ۹ و باس ۷ و همچنین ضریب بارگذاری سیستم در باس ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با محدود کردن L_j ضریب بارگذاری سیستم به ۲/۵۷ افزایش یافته است (حدود ۳۱ درصد افزایش). در مقابل این بهبود بارگذاری، هزینه تولید نیز افزایش داشته است (حدود ۱۱/۵ درصد افزایش). همچنین زمان حل مسئله و تعداد تکرارها نیز نسبت به آزمایش ۱ افزایش می‌یابد. شکل ۳ پروفایل ولتاژ در باس ۷ را در این آزمون نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج سیستم ۹ با سه باروش BD پیشنهادی در آزمایش ۲

تعداد تکرار	هزینه	زمان (s)	L_7 در $t=21$	L_9 در $t=21$	ضریب بارگذاری
11	81842	56	0.154	0.144	2.57



شکل ۳- پروفایل ولتاژ در باس ۷ در آزمایش ۲

آزمایش ۳- حل مسئله هماهنگی آبی - حرارتی با در نظر گرفتن شاخص L_j برای پایداری ولتاژ به صورت قسمتی از تابع هدف

در این آزمون شاخص L_j به صورت قسمتی از تابع هدف به تابع هدف آزمایش ۱ اضافه شده است. $W \cdot (\sum_{j=1}^J L_j)$ با وزن مناسب). نتایج در جدول ۴ و پروفایل ولتاژ باس ۷ در شکل ۴ نشان داده شده است. در اینجا نیز ضریب بارگذاری تقریباً به همان مقدار آزمون قبل یعنی حدود

محدودیت به مسئله STHTC اضافه شده است. جدول ۶ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. ردیف اول جدول نتایج سیستم ۱۱۸ باسه را بدون در نظر گرفتن مسئله پایداری ولتاژ و شاخص L_j در روند حل تابع هدف STHTC نشان می‌دهد. ردیف دوم جدول با اضافه کردن شاخص L_j به عنوان یک محدودیت به مسئله STHTC بدست آمده است. در این آزمایش شاخص L_j برای همه باس‌های بار در همه ۲۴ ساعت حداکثر برابر 0.2 در نظر گرفته شده است. ردیف سوم جدول نیز نتایج را با در نظر گرفتن شاخص L_j به صورت قسمتی از تابع هدف با وزن مناسب نشان می‌دهد. در هر سه آزمون محدودیت‌ها به طور کامل برآورده شده و تمام ضرایب پنالتی صفر شده‌اند.

جدول ۶- نتایج هر ۳ آزمایش سیستم ۱۱۸ باسه باروش BD پیشنهادی

تعداد تکرار	زمان (s)	هزینه	ضریب بارگذاری در ساعت ۱۵	آزمایش
5	347	832461	2.12	آزمایش ۱ بدون در نظر گرفتن شاخص L_j
8	453	912056	2.61	آزمایش ۲ در نظر گرفتن شاخص L_j به صورت محدودیت
11	603	942350	2.87	آزمایش ۳ در نظر گرفتن شاخص L_j به صورت قسمتی از تابع هدف

تلفات شبکه انتقال نیز برای هر ۳ آزمایش در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در نظر گرفتن مسئله پایداری ولتاژ (به هر دو صورت) در حل مسئله STHTC موجب کاهش تلفات کل شبکه در ۲۴ ساعت می‌گردد.

جدول ۵- تلفات شبکه برای هر ۳ آزمایش در ۲۴ ساعت

تلفات شبکه در آزمایش ۳ (MW)	تلفات شبکه در آزمایش ۲ (MW)	تلفات شبکه در آزمایش ۱ (MW)	ساعت
3.8	6.9	6.8	1
9.3	5.9	8.1	2
7.7	5.9	8.2	3
7	5.3	7.2	4
5.1	5.4	7.3	5
7.2	6.4	6.5	6
8.5	6.4	6.4	7
4.5	6.7	6.6	8
4.5	6.6	9.6	9
4.9	7.3	7.3	10
4.9	7.2	7.2	11
9.2	8	7.9	12
5.1	7.6	7.6	13
4.8	7.1	7	14
4.8	4.3	7	15
4.8	5.1	7.1	16
4.8	4.3	7	17
4.7	5	10.1	18
6.9	6.3	11	19
7.4	7	12.3	20
11.5	7.2	12.5	21
7	7.6	11.5	22
10.2	6	8.5	23
4	4.4	7.2	24
152.6	149.9	197.9	مجموع

۴-۲- نتایج سیستم ۱۱۸ باسه

برای سیستم ۱۱۸ باسه نیز ۳ آزمون به صورت آزمون‌های سیستم ۹ باسه در نظر گرفته‌ایم. در اینجا نیز شاخص L_j هم به صورت قسمتی از تابع هدف و هم به عنوان

سیستم‌های قدرت کوچک و هم در حل سیستم‌های نسبتاً بزرگ (سیستم ۱۱۸ باسه) نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر است مسئله STHTC را همزمان با مسئله پایداری ولتاژ نیز حل نماید. شاخص پایداری ولتاژ در این مقاله هم به صورت یک محدودیت وهم قسمتی از تابع هدف به مسئله STHTC اضافه شد. اضافه شدن مسئله پایداری ولتاژ به مسئله STHTC منجر به افزایش هم تابع هزینه وهم زمان حل مسئله گردید. اما در ازای آن نقطه کار بهینه‌ای برای سیستم بدست می‌آید که حاشیه پایداری ولتاژ قابل قبولی را تامین نموده و تلفات کل شبکه را نیز کاهش می‌دهد. به عبارتی با اضافه شدن مسئله پایداری، آرایش تولید واحدهای آبی و حرارتی به گونه‌ای تغییر می‌یابد که پایداری ولتاژ افزایش و تلفات شبکه کاهش می‌یابد، اما این نتایج با افزایش هزینه تولید همراه می‌باشد.

۶- لیست سمبلها

مدت زمان برنامه ریزی (hr)	T
تعداد واحدهای آبی و حرارتی به ترتیب	N, H
تعداد باس‌های سیستم	I
تعداد خطوط سیستم	L
مجموعه واحدهای حرارتی متصل به باس k	S_k^n
مجموعه واحدهای آبی متصل به باس k	S_k^h
تابع هزینه سوخت واحد حرارتی n	$F^n(P_i^n)$
ضرایب تابع هزینه سوخت واحد حرارتی n	A^n, B^n, C^n
هزینه روشن کردن واحد حرارتی n	SU^n
هزینه خاموش کردن واحد حرارتی n	SD^n
بارهای اکتیو و راکتیو در باس i در زمان t به ترتیب	$Pload_i^t, Qload_i^t$
رزرو ذخیره چرخان در زمان t (MW)	SR_t
مینیم توان اکتیو و راکتیو تولیدی واحد حرارتی n به ترتیب	P_{min}^n, Q_{min}^n
ماکزیم توان اکتیو و راکتیو تولیدی واحد حرارتی n به ترتیب	P_{max}^n, Q_{max}^n
محدودیت نرخ بالا رفتن واحد حرارتی n	UR^n
	(MW/hr)

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که در سیستم ۱۱۸ باسه نیز اضافه کردن شاخص L_r هم در آزمون ۲ و هم آزمون ۳ موجب افزایش تابع هزینه و همچنین افزایش حاشیه پایداری (ضریب بارگذاری) می‌گردد. نتیجه دیگر این جدول آن است که اضافه شده شاخص L_r به عنوان قسمتی از تابع هدف نسبت به اضافه شدن شاخص به عنوان محدودیت حاشیه پایداری را بیشتر افزایش می‌دهد اما در مقابل زمان حل، تعداد تکرارها و هزینه را نیز افزایش می‌دهد. به عبارتی کاملاً مشخص است که بهبود حاشیه پایداری رابطه مستقیمی با تابع هزینه مسئله و زمان حل آن دارد.

لازم به ذکر است که نویسندگان کار تحقیقی دیگری را برای مقایسه نتایج در سیستم ۱۱۸ باسه پیدا نکرده‌اند.

۵- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله مسئله هماهنگی نیروگاه‌های آبی و حرارتی با در نظر گرفتن معادلات پخش بار AC، محدودیت‌های ایمنی همچنین شاخص پایداری ولتاژ L_r حل گردیده است. روش حل پیشنهادی روشی بر اساس روش تجزیه بندرز می‌باشد که مسئله را به دو زیر مسئله اصلی و تابع تبدیل نموده است. مسئله پایداری ولتاژ نیز هم به صورت یک محدودیت و هم به صورت قسمتی از تابع هدف به زیر مسئله تابع اضافه گردیده است و مدل پیشنهادی بر روی دو سیستم ۹ باسه و ۱۱۸ باسه تست شد.

در اکثر کارهایی که قبلاً مسئله STHTC را حل نموده‌اند، معادلات پخش بار ac در نظر گرفته نشده است. همچنین در کارهایی هم که معادلات پخش بار ac در نظر گرفته شده به زمان زیادی برای حل مسئله هماهنگی نیاز بوده و مخصوصاً در سیستم‌های بزرگ محدودیت‌های مسئله به طور کامل ارضا نگردیده‌اند. اما نتایج مقاله نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن کات‌های بندرز قدرتمند مسئله STHTC با معادلات پخش بار AC را با زمان کمتر، جواب بهینه‌تر و ارضا شدن کامل محدودیت‌ها حل می‌نماید. این قابلیت هم در حل

محدودیت نرخ پایین رفتن واحد حرارتی n	DR^n	مینیم و ماکزیمم حجم ذخیره آب مخزن h به ترتیب	Vol_{min}^h, Vol_{max}^h
حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد حرارتی n (hr) به ترتیب	T_n^{ON}, T_n^{OFF}	مینیم و ماکزیمم نرخ خروج آب مخزن (m^3/hr)	$qout_{min}^h, qout_{max}^h$
ماکزیمم توان اکتیو و راکتیو تولیدی واحد آبی	P_{max}^h, Q_{max}^h	حجم ذخیره آب (m^3) مخزن h در پایان مدت زمان برنامه ریزی	Vol_{end}^h
مینیمم توان اکتیو و راکتیو تولیدی واحد آبی	P_{min}^h, Q_{min}^h	تعداد مخازن بالاسری مخزن h	UP_h
کندوکتانس و سوسپتانس مابین باس i و باس k	G_{ik}, B_{ik}	حالت انتخاب واحد حرارتی n در زمان t (1=ON, 0=OFF)	u_i^n
مینیمم و ماکزیمم دامنه ولتاژ در باس i به ترتیب	V_{min}^i, V_{max}^i	توان اکتیو (MW) و راکتیو (MVAR) تولیدی واحد حرارتی n در زمان t به ترتیب	P_i^n, Q_i^n
ماکزیمم محدودیت فلو خط (MVA)	BF_{max}^l	اختلاف زاویه مابین باس‌های i و باس k در زمان t	θ_t^{ik}

مراجع

- [1] Yan, H., Luh, P. B., Guan, X., Rogan, P.M. (1993). "Scheduling of hydrothermal power systems". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 8, No. 3, pp. 1358–1365.
- [2] Guan, X., Luh, P.B., Yen, H., Rogan, P. (1994). "Optimization-based scheduling of hydrothermal power systems with pumped-storage units". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 9, No. 2, pp. 1023–1031.
- [3] Guan, X., Luh, P.B., Zhang, L. (1995). "Nonlinear approximation method in Lagrangian relaxation-based algorithms for hydrothermal scheduling". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 10, No. 2, pp. 772–778.
- [4] Salam, M.S., Nor, K.M., Hamdam, A.R. (1998). "Hydrothermal scheduling based Lagrangian relaxation approach to hydrothermal coordination". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 13, No. 1, pp. 226–235.
- [5] Guan, X., Ni, E., Li, R., Luh, P.B. (1997). "An optimization-based algorithm for scheduling hydrothermal power systems with cascaded reservoirs and discrete hydro constraints". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 12, No. 4, pp. 1775–1780.
- [6] Zhang, D., Luh, P.B., Zhang, Y. (1999). "A bundle method for hydrothermal scheduling". IEEE Trans. Power Syst, Vol. 14, No. 4, pp. 1355–1361.
- [7] Ruzic, S., Rajakovic, R. (1998). "Optimal distance method for Lagrangian multipliers updating in short-term hydro-thermal coordination". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 13, No. 4, pp. 1439–1444.
- [8] Redondo, N.J., Conejo, A.J. (1999). "Short-term hydro-thermal coordination by Lagrangian relaxation: solution of the dual problem". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 14, No. 1, pp. 89–95.
- [9] Xi, E., Guan, X., Li, R. (1999). "Scheduling hydrothermal power systems with cascaded and head-dependent reservoirs". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 14, No. 3, pp. 1127–1132.
- [10] Al-Agtash, S., (2001). "Hydrothermal scheduling by augmented Lagrangian: consideration of transmission constraints and pumped-storage units". IEEE Trans. Power Syst, Vol. 16, No. 4, pp. 750–756.
- [11] Salam, M.S. (2004). "Comparison of Lagrangian relaxation and truncated dynamic programming methods for solving hydrothermal coordination problems". Proceedings of International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing, pp. 265–270.
- [12] Santos, T.N., Diniz, A.L. (2009). "A new multiperiod stage definition for the multistage Benders decomposition approach applied to hydrothermal scheduling". IEEE Trans. Power Syst, Vol. 24, No. 3, pp. 1383–1392.
- [13] Diniz, A.L., Santos, T.N., Maceira, M.E.P. (2006). "Short term security constrained hydrothermal scheduling considering transmission losses". Proceedings of IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition, pp. 1–6.

- [14] Sifuentes, W., Vargas, A. (2007). "Short-term hydrothermal coordination considering an AC network modeling". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 29, No. 6, pp. 488–496.
- [15] Sifuentes, W.S., Vargas, A. (2007). "Hydrothermal scheduling using benders decomposition: accelerating techniques". *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 22, No. 3, pp. 1351–1359.
- [16] Sifuentes, W., Vargas, A. (2007). "Short-term hydrothermal optimization with congestion and quality of service constraints". *IET Gener. Transm. Distrib*, Vol. 1, No. 4, pp. 574–583.
- [17] Parrilla, E., Garca-Gonzalez, J. (2006). "Improving the B&B search for large-scale hydro thermal weekly scheduling problems". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 28, No. 5, pp. 339–348.
- [18] Ruzic, S., Rajakovic, N., Vuckovic, A. (1996). "A flexible approach to short-term hydrothermal coordination. I. Problem formulation and general solution procedure". *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 11, No. 3, pp. 1564–1571.
- [19] Tang, J., Luh, P.B. (1995). "Hydrothermal scheduling via extended differential dynamic programming and mixed coordination". *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 10, No. 4, pp. 2021–2028.
- [20] Li, C.A., Svoboda, A.J., Tseng, C.L., Johnson, R.B., Hsu, E. (1997). "Hydro unit commitment in hydro-thermal optimization". *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 12, No. 2, pp. 764–769.
- [21] Catalao J.P.S., Pousinho, H.M.I., Mendes, V.M.F. (2010). "Scheduling of head-dependent cascaded reservoirs considering discharge ramping constraints and start/stop of units". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, No. 8, pp. 904–910.
- [22] Catalão, J.P.S., Pousinho, H.M.I., Mendes, V.M.F. (2011). "Hydro energy systems management in Portugal: Profit-based evaluation of a mixed-integer nonlinear approach". *Energy*, Vol. 36, No. 1, pp. 500–507.
- [23] Wu, Y., Ho, C., Wang, D. (2000). "A diploid genetic approach to short-term scheduling of hydro-thermal system". *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 15, No. 4, pp. 1268–1274.
- [24] Gil, E., Bustos, J., Rudnick, H. (2003). "Short-term hydrothermal generation scheduling model using a genetic algorithm". *IEEE Trans, Power Syst.*, Vol. 18, No. 4, pp. 1256–1264.
- [25] Zoumas, C.E., Bakirtzis, A.G., Theocharis, J.B., Petridis, V. (2004). "A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem". *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 19, No. 2, pp. 1356–1364.
- [26] Wong, K.P., Wong, Y.W. (1994). "Short-term hydrothermal scheduling part. I. Simulated annealing approach". *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib*, Vol. 141, No. 5, pp. 497–501.
- [27] Rajan, C., Christober, A. (2011). "Hydro-thermal unit commitment problem using simulated annealing embedded evolutionary programming approach". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.33, No. 4, pp. 939–946.
- [28] Chen, P.H. (2008). "Pumped-storage scheduling using evolutionary particle swarm optimization". *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 23, No. 1, pp. 294–301.
- [29] Werner, T.G., Verstege, J.F. (1999). "An evolution strategy for short-term operation planning of hydrothermal power systems". *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 14, No. 4, pp. 1362–1368.
- [30] Sinha, N., Chakrabarti, R., Chattopadhyay, P.K. (2003). "Fast evolutionary programming techniques for short-term hydrothermal scheduling". *Electric Power Systems Research*, Vol. 66, No. 2, pp. 97–103.
- [31] Sinha, N., Chakrabarti, R., Chattopadhyay, P.K. (2003). "Fast evolutionary programming techniques for short-term hydrothermal scheduling". *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 18, No. 1, pp. 214–220.
- [32] Lakshminarasimman, L., Subramanian, S., (2006). "Short-term scheduling of hydrothermal power system with cascaded reservoirs by using modified differential evolution". *IEE Proc. Gener. Transm, Distrib*, Vol. 153, No. 6, pp. 693–700.
- [33] Oliveira, A.R.L., Soares, S., Nepomuceno, L. (2005). "Short term hydroelectric scheduling combining network flow and interior point approaches". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 27, No. 2, pp. 91–99.

- [34] Naresh, R., Sharma, J. (1999). Two-phase neural network based solution technique for short term hydrothermal scheduling". IEE Proc. Gener. Transm. Distrib, Vol. 146, No. 6, pp. 657–663.
- [35] Dieu, V.N., Ongsakul, W. (2008). "Enhanced merit order and augmented Lagrange Hopfield network for hydrothermal scheduling". International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 30, No. 2, pp 93–101.
- [36] Dhillon, J.S., Parti, S.C., Kothari, D.P. (2002). "Fuzzy decision-making in stochastic multiobjective short-term hydrothermal scheduling". IEE Proc.