

کاربرد برنامه‌ریزی خطی فازی در بهینه‌سازی بارزدایی و جابه‌جایی تولید

رحمت‌اله هوشمند*، حسین سیفی** و ولی‌اله طحانی***

دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران

دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۷۴/۷/۳ - دریافت نسخه‌نهایی: ۱۳۷۵/۳/۲۳)

چکیده - در این مقاله روش مناسبی برای کنترل شرایط اضطراری سیستم‌های قدرت ارائه می‌شود. بدین منظور و بر اساس یک روش جدید، مبنی بر برنامه‌ریزی خطی فازی، بهینه‌سازی بارزدایی به همراه جابه‌جایی تولید^۱ (LSGR) ارائه شده است. تابع هدف این مسئله بهینه‌سازی، از مقادیر کاهش بارهای سیستم و جابه‌جایی تولید نیروگاهها تشکیل شده است. قیدهای مسئله مذکور، محدودیتهای حاکم بر متغیرهای سیستم قدرت‌اند. با توجه به عدم قطعیت ضریبهای تابع هدف و قیدها، و همچنین دقیق نبودن اکثر کرانه‌های بالا و پایین متغیرها، استفاده از برنامه‌ریزی خطی فازی منطقیتر به نظر می‌رسد. با در نظر گرفتن فرکانس شبکه به عنوان یک متغیر اساسی و استفاده از مدل بارهای الکتریکی، مسئله بهینه‌سازی مورد نظر بر اساس روش بهینه‌سازی فازی حل شده است. نتایج حالت‌های مختلف بهینه‌سازی قطعی^۲ و فازی^۳ مسئله مذکور که حاصل شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه است ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با استفاده از روش بهینه‌سازی فازی از یک طرف، به مدل واقعی سیستم‌های قدرت نزدیکتر شده و از طرف دیگر، مقدار تابع هدف نسبت به روش بهینه‌سازی قطعی کاهش می‌یابد.

Application of Fuzzy Linear Programming in Optimal Load Shedding and Generation Reallocation Problem

R. Hooshmand, H. Seifi, and V. Tahani

Department of Electrical Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz

Department of Electrical Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran

Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology

ABSTRACT- In this article, an effective method to control a power system during emergency conditions is presented. Based on Fuzzy Linear Programming (FLP), a new technique is developed to solve the Load Shedding and Generation Reallocation (LSGR) optimization problem. The objective function consists of terms of load curtailments and deviations in generation schedules. The constraints are power system variables

* استادیار ** دانشیار *** دانشیار

فهرست علائم	
ولتاژ ثابت	V_i
درصد کل بار وابسته به قدرت ثابت	PG, QG
ضریب مشخصات فرکانس هر بار	$VLBi$
ضریبهای ثابت تابع هدف بیشینه اختلاف زاویه ولتاژ شینهای i و j	δ_i
اپراتور تغییرات جزئی مقدار کمینه هر متغیر	t_i
مقدار بیشینه هر متغیر	F
	NB
	NG
	Y_{ij}, θ_{ij}
	Pz, Qz
	PR
	R
	Pc, Qc

limitations. The objective function and constraints coefficients are uncertain, thus it is more appropriate to use fuzzy linear programming. Considering the network frequency as an essential variable, and using the electrical load model, a fuzzy environment is prepared to solve more realistically and successfully the LSGR optimization problem. The results of various cases of fuzzy and crisp modes of the problem are demonstrated. It will be observed that the application of the FLP on one hand, will provide a more realistic model of power systems, and on the other hand, will cause a reduction in the values of the objective function.

۱- مقدمه

محاسبات است. در مراجع [۱، ۳-۵] کنترل فرکانس به عنوان یک متغیر اساسی در روند بهینه سازی مطرح نشده است. همچنین مدل بارهای الکتریکی در مراجع [۱، ۳ و ۴] در نظر گرفته نشده است. اما علاوه بر این مسائل، همه روشهای قبل دارای مشکلات مشترکی اند. یکی از این مشکلات، مشخص نبودن مقدار دقیق ضریبهای تابع هدف است که هیچ معیار کلی و دقیقی برای انتخاب این ضریبها وجود ندارد. به عبارت روشنتر، برای تصمیم گیرنده بسیار مشکل خواهد بود تا نحوه ارتباط بین مقادیر بارزدایی و جابه جایی تولید در تابع هدف را بیان کند. همچنین اکثر کرانه های بالا و پایین محدودیتهای مسئله بهینه سازی، از قطعیت کاملی برخوردار نیستند. به طور نمونه، تعیین دقیق حدود بالا و پایین ولتاژ شینهای سیستمهای قدرت مشکل است. بنابراین در مدلسازی، طبیعی است تا این عدم قطعیت و یا نادقتی حدود را با استفاده از اعداد فازی برطرف کنیم. در نتیجه مناسب است که مسئله بهینه سازی خطی مذکور را به شکل برنامه ریزی خطی فازی، با ضریبهای تابع هدف و قیدهای فازی در نظر گرفت و حل کرد. در این مقاله کاربرد برنامه ریزی خطی فازی برای حل مسئله بهینه سازی بارزدایی و جابه جایی تولید همراه با مدل بارهای

از جمله مشخصه های شرایط اضطراری در سیستمهای قدرت، می توان از کاهش فرکانس و ولتاژ شینهای شبکه، اضافه بار شدن تجهیزات شبکه نظیر خطوط انتقال، ترانسهای قدرت و ژنراتورها نام برد [۱]. یکی از توابع مهم در مراکز دیسپاچینگ ۵، برای کنترل سیستمهای قدرت در شرایط اضطراری، بارزدایی و جابه جایی تولید نیروگاهها است. با توجه به اینکه بارزدایی شبکه باعث نارضایتی مصرف کنندگان و از طرف دیگر، جابه جایی در تولید نیروگاهها باعث خروج سیستم از حالت کارکرد اقتصادی می شود، بایستی سعی کرد تا میزان بارزدایی و جابه جایی تولید به مقدار کمینه خود کاهش یابد. پس می توان نتیجه گرفت که مسئله مذکور یک روند بهینه سازی را به همراه خواهد داشت که تابع هدف آن، مقادیر بارزدایی شبکه و جابه جایی تولید نیروگاهها، و قیدهای مسئله بهینه سازی مذکور، محدودیتهای متغیرهای شبکه است. تا کنون روشهای متفاوتی برای حل قطعی مسئله بارزدایی و جابه جایی تولید ارائه شده است [۱-۵]. در بعضی از روشهای قبلی [۲ و ۴] با استفاده از برنامه ریزی غیر خطی، مسئله مورد نظر مدل شده است که این، خود مستلزم حجم زیاد و زمان طولانی

الکتريکی، تغييرات فرکانس شبکه و ديگر قيدهای اساسی شبکه ارائه می‌شود. به این منظور در ابتدای بخش دوم، روشهای برنامه‌ریزی خطی فازی به‌طور اجمال بررسی می‌شود. در بخش سوم روش مناسب حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی فازی با کلیه ضریب‌های تابع هدف و قيدهای فازی بیان می‌شود [۶]. در بخش چهارم نحوه تشکیل مسئله بارزدایی و جابه‌جایی تولید ارائه می‌شود. دلایل استفاده از برنامه‌ریزی خطی فازی همراه با چگونگی استفاده از روش بهینه‌سازی فازی (ارائه شده در بخش سوم) در مسئله مذکور، در بخش پنجم بیان می‌شود. نهایتاً در بخش ششم، نتایج شبیه‌سازی مدل‌های برنامه‌ریزی خطی قطعی و فازی بر روی یک سیستم‌آزمون با یکدیگر مقایسه شده‌است. مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف در روش بهینه‌سازی فازی از روش بهینه‌سازی قطعی کمتر است. علاوه بر این، مشخص می‌شود که کاربرد بهینه‌سازی فازی در مسئله بارزدایی و جابه‌جایی تولید اجازه می‌دهد تا مدل واقعی سیستم‌های قدرت به نحو مناسب‌تری تحلیل شود.

۲ - مروری سریع بر روش‌های برنامه‌ریزی خطی فازی (MFLP)^۶

بعد از ارائه تئوری مشهور مجموعه‌های فازی [۷]، زاده و بلمن ایده تصمیم‌گیری در محیط فازی را ارائه دادند [۸] که این مقاله، پایه و اساس کارهای بعدی محققان است که اولین این کارها، توسط آقای زیمرمن [۹] و به منظور بهینه‌سازی فازی و بر اساس برنامه‌ریزی خطی انجام گرفته است. در این میان، روش‌های متفاوت و متنوعی، در زمینه برنامه‌ریزی خطی با کلیه ضریب‌های فازی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به کارهای [۶ و ۸-۱۲] اشاره کرد. در مرجع [۱۰]، روشی برای حل MFLP با کلیه ضریب‌های فازی ارائه شده که در نهایت مدل به شکل یک برنامه‌ریزی پارامتری تبدیل شده است. در این روش قيدهای تساوی در مدل در نظر گرفته نشده است. اسلونسکی [۱۱] روش دیگری را برای حل MFLP ارائه داده است که مشابه روش قبل، قيدهای تساوی در نظر گرفته نشده است. همچنین تعداد قيدهای نامساوی در مدل برنامه‌ریزی نهایی، به دو برابر قيدهای نامساوی مدل فازی تبدیل می‌شود که این روش برای مسائل با قيدهای زیاد، نامناسب است. در سال ۱۹۸۹ در مرجع [۱۲] روش دیگری

ارائه شده است که همان مشکلات روش ارائه شده در مرجع [۱۱] را به همراه دارد. اما روش مناسبی در سال ۱۹۹۱ در مرجع [۶] ارائه شده است که مدل MFLP را با کلیه ضریب‌های فازی، برای قيدهای مساوی و نامساوی حل کرده است. در این روش، برخلاف کلیه روش‌های قبلی، تعداد قيدهای نامساوی مدل مذکور ثابت باقی مانده ولی قيدهای تساوی فازی، به دو برابر آن در مدل نهایی تبدیل شده است. در این مقاله، این روش با جزئیات بیشتری بیان می‌شود. در بخش پنجم هم، روش حل جدیدی برای مسئله LSQR و بر پایه برنامه‌ریزی خطی فازی مذکور ارائه می‌شود و برتريها و مزایای این روش نسبت به حل قطعی آن بیان خواهد شد.

۳ - برنامه‌ریزی خطی فازی با توابع هدف چند گانه

همان‌گونه که در بخش قبلی اشاره شد، در این مقاله مسئله بارزدایی و جابه‌جایی تولید بر اساس روش‌های بهینه‌سازی قطعی و فازی مطالعه می‌شود. با توجه به اینکه در مرجع [۶] روش مناسبی برای بهینه‌سازی فازی بیان شده است در این بخش، خلاصه این روش ارائه می‌شود.

۳-۱- ارائه مدل مورد نظر

در ابتدا مدل مطلوب را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned} \text{Min}_X \quad & \tilde{Z}_j = \tilde{C}_j \cdot X \quad j = 1, \dots, K \\ & \text{به طوری که} \\ (I) \quad & \begin{cases} \tilde{a}_i \cdot X \leq \tilde{b}_i & i = 1, \dots, m \\ \tilde{a}_i \cdot X = \tilde{b}_i & i = m + 1, \dots, n \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

که در رابطه فوق، بردار X بیانگر بردار L بعدی متغیرهای تصمیم‌گیری، بردارهای \tilde{C}_1 تا \tilde{C}_K بردارهای ضریب‌های توابع هدف \tilde{Z}_1 تا \tilde{Z}_K بردار \tilde{a}_i ، \tilde{b}_i امین سطر از ماتریس ضریب‌های قيدها و نهایتاً \tilde{b}_i هم اعداد فازی سمت راست قيدهاست. ضریب‌های رابطه (۱) اعداد فازی دوزنقه‌ای هستند. در حالت کلی، یک عدد فازی دوزنقه‌ای \tilde{m} به صورت چهارتایی $(m^L, m^U, \sigma_m^L, \sigma_m^U)$ مشخص می‌شود که پارامترهای آن بیانگر تابع عضویت دوزنقه‌ای^۷ طبق شکل (۱)

زبه دست آمده و در نتیجه:

$$g_j^{(1)} = C_j \cdot X^{*(1)}, \dots, g_j^{(j)} = C_j \cdot X^{*(j)}, \dots, g_j^{(K)} = C_j \cdot X^{*(k)} \quad (4)$$

که نهایتاً خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \bar{g}_j = g_j^{(j)} \\ g_j^* = \max_{i, i \neq j} (g_j^{(i)}) \\ \sigma_{g_j^U}^* = \text{درصدی از } \bar{g}_j - g_j^* \text{ (معمولاً } 10\% \text{)} \end{cases} \quad (5)$$

اکنون با مشخص شدن توابع عضویت آرمان توابع هدف، چگونگی تبدیل قیدها و توابع هدف فازی به قطعی بیان می شود.

۳-۲- تبدیل قیدهای فازی به قطعی

برای این منظور، ابتدا رابطه نامساوی بین اعداد فازی بیان می شود. تاکنون مقایسه های مختلفی بین اعداد فازی ارائه شده است [۹-۱۲]، که در اینجا یکی از روشهای مناسب بیان می شود. برای این منظور فرض کنید که:

$$\tilde{a} = (a^L, a^U, \sigma_a^L, \sigma_a^U) \quad (6)$$

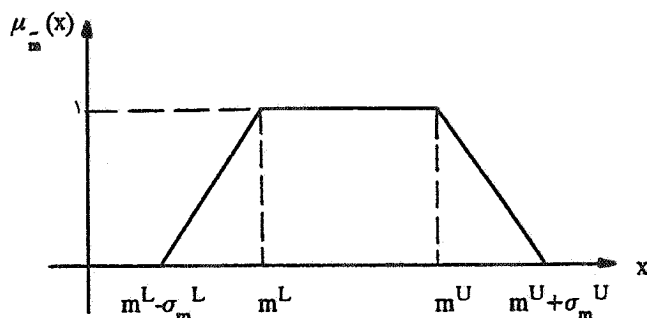
$$\tilde{b} = (b^L, b^U, \sigma_b^L, \sigma_b^U) \quad (7)$$

اکنون برای بیان رابطه نامساوی بین اعداد فازی \tilde{a} ، \tilde{b} و با توجه به شکل (۲) بایستی مقدار $\text{hgt}(\inf \tilde{b} \cap \sup \tilde{a})$ را تعریف کرد.

تعریف ۱: مقدار hgt ، معرف بیشترین مقدار از اشتراک سمت چپ افزایشی^۹ تابع عضویت \tilde{b} ، با سمت راست کاهششی^{۱۰} از تابع عضویت \tilde{a} است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{hgt}(\inf \tilde{b} \cap \sup \tilde{a}) = \max \left\{ \frac{a^U - b^L}{\sigma_a^U + \sigma_b^L} + 1, 0 \right\} = \begin{cases} \geq 1 & \text{if } a^U \geq b^L \\ \leq 1 & \text{if } a^U \leq b^L \end{cases} \quad (8)$$

تعریف ۲: درجه امکان غالب بودن^{۱۱} (PD) عدد فازی \tilde{a} از \tilde{b} به



شکل ۱- تابع عضویت دوزنقه ای عدد فازی \tilde{m}

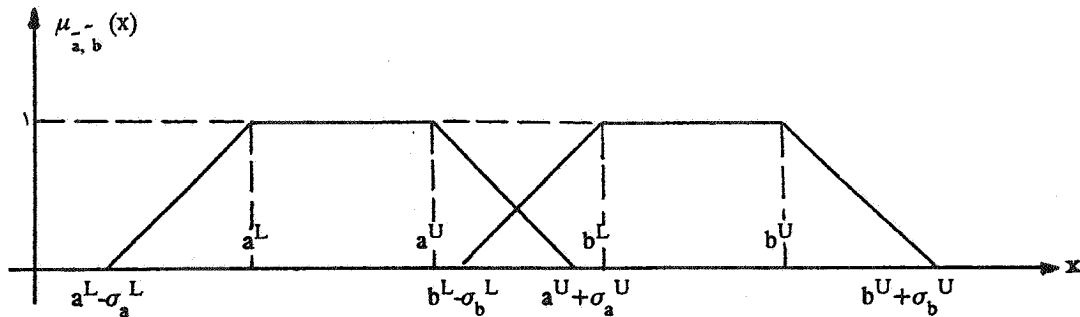
است. در صورتی که $m^L = m^U = m$ باشد آن گاه تابع عضویت مذکور بیانگر تابع عضویت عدد فازی مثلثی خواهد بود. همچنین بایستی برای هر تابع هدف، یک آرمان^۸ بیان شود که با توجه به دقیق نبودن این مقدار، آن را به صورت عدد فازی و به شکل زیر می توان در نظر گرفت:

$$\tilde{g}_j = (\bar{g}_j, g_j^*, 0, \sigma_{g_j^U}^*) \quad (2)$$

با توجه به اینکه هدف، کمینه کردن مقادیر توابع هدف است، حد پایین عدد فازی \tilde{g}_j صفر است. در صورتی که تصمیم گیرنده نتواند پارامترهای آرمانهای فازی را معین کند، بایستی مقادیر \bar{g}_j و $\sigma_{g_j^U}^*$ را به گونه ای دیگر محاسبه کرد. برای این منظور، بایستی هر تابع هدف از مدل رابطه (۱) را با ضریبهای متوسط $\frac{1}{2}(c_{ij}^L + c_{ij}^U)$ و قیدهای (I) کمینه کرد که نهایتاً مقدار تابع هدف Z ام، معرف \bar{g}_j خواهد بود. همچنین $\sigma_{g_j^U}^*$ هم درصدی از اختلاف $\bar{g}_j - g_j^*$ (معمولاً ۱۰٪ انتخاب می شود [۹]) در نظر گرفته می شود که $\sigma_{g_j^U}^*$ معرف مقدار بیشینه تابع هدف Z ، به ازای کلیه حل های مختلف K تابع هدف است. برای دستیابی به این منظور، ابتدا بایستی K مدل برنامه ریزی فازی زیر را با ضریبهای قطعی تابع هدف حل کرد:

$$\begin{aligned} \text{Min}_X \quad & g_j = C_j \cdot X \\ \text{به طوری که} \quad & \begin{cases} \tilde{a}_i \cdot X \leq \tilde{b}_i & i = 1, \dots, m \\ \tilde{a}_i \cdot X = \tilde{b}_i & i = m+1, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

که با حل K مدل فوق، مجموعه جوابهای $X^{*(j)}$



شکل ۲ - توابع عضویت اعداد فازی \tilde{a} , \tilde{b}

که \circ بیانگر اپراتور عملکرد ضرب فازی است. در نهایت می توان قیدهای (I) را به شکل قطعی زیر تبدیل کرد:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_i \cdot X \leq \theta \tilde{b}_i &\Rightarrow \sum_j [a_{ij}^L - (1 - \theta) \cdot \sigma_{a_{ij}}^L] \cdot x_j \\ &\leq b_i^U + (1 - \theta) \cdot \sigma_{b_i}^U \end{aligned} \quad (15)$$

$$\tilde{a}_i \cdot X \approx \theta \tilde{b}_i \Rightarrow \begin{cases} \sum_j [a_{ij}^U + (1 - \theta) \cdot \sigma_{a_{ij}}^U] \cdot x_j \\ \geq b_i^L - (1 - \theta) \cdot \sigma_{b_i}^L \\ \sum_j [a_{ij}^L - (1 - \theta) \cdot \sigma_{a_{ij}}^L] \cdot x_j \\ \leq b_i^U + (1 - \theta) \cdot \sigma_{b_i}^U \end{cases} \quad (16)$$

۳-۳ - تبدیل تابع هدف فازی به قطعی و مدل نهایی

برای هر یک از توابع هدف، مشابه رابطه (۱۶) می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \text{Min } \tilde{C}_j \cdot X &= \sum_j \tilde{c}_{j1} \cdot x_1 = (\sum_j c_{j1}^L \cdot x_1, \sum_j c_{j1}^U \cdot x_1, \\ &(\sum_j \sigma_{c_{j1}}^L \cdot x_1, \sum_j \sigma_{c_{j1}}^U \cdot x_1)) \end{aligned} \quad (17)$$

که در ارتباط با هر یک از توابع هدف مذکور، یک آرمان فازی $(\bar{g}_j, \bar{g}_j, 0, \sigma_{g_j}^U)$ به دست می آید که تابع عضویت آن همراه با تابع عضویت $X \cdot \tilde{C}_j$ و به منظور کمیته سازی تابع هدف، در شکل (۳) آورده شده است.

اکنون با توجه به شکل (۳) می توان گفت که بهترین تطابق بین توابع هدف و آرمانهای مربوطه هنگامی است که درجه غالب بودن زیر بیشینه شود:

شکل زیر تعریف می شود [۱۳]:

$$\begin{aligned} PD(\tilde{a}, \tilde{b}) &= \max_x \min_{x \geq y} [\mu_{\tilde{a}}(x), \mu_{\tilde{b}}(y)] \\ &= \min [1, \text{hgt}(\inf \tilde{b} \cap \sup \tilde{a})] \end{aligned} \quad (9)$$

اما برای درجه صدقیت θ ($0 \leq \theta \leq 1$) می توان نوشت:

$$\tilde{a} \leq_{\theta} \tilde{b} \quad \text{iff} \quad PD(\tilde{a}, \tilde{b}) \leq \theta \quad (10)$$

$$\tilde{a} \approx_{\theta} \tilde{b} \quad \text{iff} \quad PD(\tilde{a}, \tilde{b}) \geq \theta$$

$$PD(\tilde{b}, \tilde{a}) \geq \theta \quad (11)$$

اکنون با استفاده از محاسبه مقدار $\text{hgt}(\inf \tilde{b} \cap \sup \tilde{a})$ و

درجه صدقیت θ به روابط نهایی زیر خواهیم رسید:

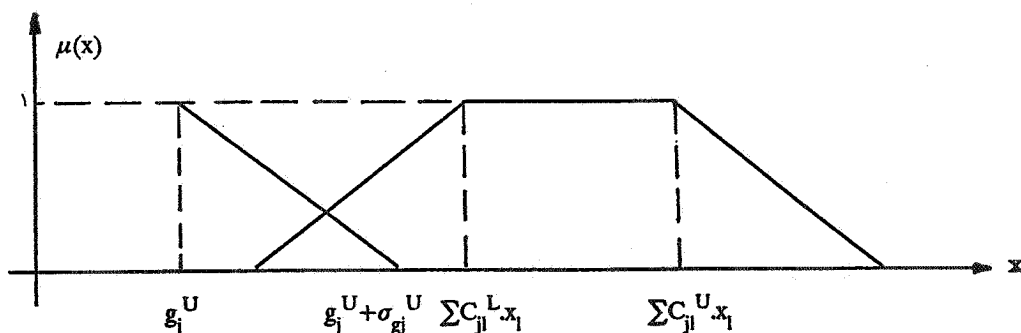
$$\tilde{a} \leq_{\theta} \tilde{b} \quad \text{iff} \quad a^L - (1 - \theta) \cdot \sigma_a^L \leq b^U + (1 - \theta) \cdot \sigma_b^U \quad (12)$$

$$\tilde{a} \approx_{\theta} \tilde{b} \quad \text{iff} \quad \begin{cases} b^U + (1 - \theta) \cdot \sigma_b^U \geq a^L - (1 - \theta) \cdot \sigma_a^L \\ a^U + (1 - \theta) \cdot \sigma_a^U \geq b^L - (1 - \theta) \cdot \sigma_b^L \end{cases} \quad (13)$$

حال با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳) می توان قیدهای مدل

برنامه ریزی خطی (I) ارائه شده در رابطه (۱) را به قیدهای قطعی تبدیل کرد. برای این منظور می توان نوشت:

$$\begin{cases} \tilde{a}_i \cdot X = \sum_j \tilde{a}_{ij} \cdot x_j = \tilde{a}_{i1} \circ x_1 + \dots + \tilde{a}_{in} \circ x_n = \\ = (\sum_j a_{ij}^L \cdot x_j, \sum_j a_{ij}^U \cdot x_j, \sum_j \sigma_{a_{ij}}^L \cdot x_j, \\ \sum_j \sigma_{a_{ij}}^U \cdot x_j) \end{cases} \quad (14)$$



شکل ۳- تابع عضویت تابع هدف و آرمان آن

$$Y = \frac{X}{\sum \sigma_{c_{ji}}^L \cdot x_1 + \sigma_{g_j}^U} \quad (21)$$

$$t = \frac{1}{\sum \sigma_{c_{ji}}^L \cdot x_1 + \sigma_{g_j}^U} \quad (22)$$

$$PD(\tilde{g}_j, \tilde{C}_j \cdot X) = h_j = 1 + \frac{\bar{g}_j - \sum c_{ji}^L \cdot x_1}{\sigma_{g_j}^U + \sum \sigma_{c_{ji}}^L \cdot x_1} \quad (18)$$

این به آن معناست که می توان مدل برنامه ریزی فازی رابطه (۱) را به شکل زیر تبدیل کرد:

$$\text{Max } PD(\tilde{g}_j, \tilde{C}_j \cdot X) \quad j = 1, \dots, K$$

به طوری که،

$$(I) \begin{cases} PD(\tilde{a}_i \cdot X, \tilde{b}_i) \geq \theta & i = m+1, \dots, n \\ PD(\tilde{b}_i, \tilde{a}_i \cdot X) \geq \theta & i = 1, \dots, m \end{cases} \quad (19)$$

و با در نظر گرفتن درجه صدقیت θ و با استفاده از شکل (۳) و روابط (۱۵) و (۱۶)، نهایتاً خواهیم داشت:

$$\text{Min } \frac{\sum c_{ji}^L \cdot x_1 - \bar{g}_j}{\sum \sigma_{c_{ji}}^L \cdot x_1 + \sigma_{g_j}^U} \quad j = 1, \dots, K$$

به طوری که،

$$\begin{aligned} \sum [a_{ii}^U + (1-\theta) \cdot \sigma_{a_{ii}}^U] \cdot x_1 &\geq b_i^L \\ &- (1-\theta) \cdot \sigma_{b_i}^L \quad i = m+1, \dots, n \\ \sum [a_{ii}^L - (1-\theta) \cdot \sigma_{a_{ii}}^L] \cdot x_1 &\leq b_i^U \\ &+ (1-\theta) \cdot \sigma_{b_i}^U \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (20)$$

که این مدل برنامه ریزی کسری ۱۳، با دو تغییر متغیر ساده زیر:

تبدیل به مدل برنامه ریزی خطی با پارامتر θ به صورت زیر خواهد شد:

$$\text{Min } \sum c_{ji}^L \cdot y_1 - \bar{g}_j \cdot t \quad j = 1, \dots, k$$

$$\sum [a_{ii}^U + (1-\theta) \cdot \sigma_{a_{ii}}^U] \cdot y_1 \quad \text{به طوری که،}$$

$$- [b_i^L - (1-\theta) \cdot \sigma_{b_i}^L] \cdot t \geq 0 \quad i = m+1, \dots, n$$

$$\sum [a_{ii}^L - (1-\theta) \cdot \sigma_{a_{ii}}^L] \cdot y_1$$

$$- [b_i^U + (1-\theta) \cdot \sigma_{b_i}^U] \cdot t \leq 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum \sigma_{c_{ji}}^L \cdot y_1 + \sigma_{g_j}^U \cdot t = 1 \quad (23)$$

در نهایت می توان گفت که با حل مسئله برنامه ریزی خطی فوق، مدل برنامه ریزی فازی ارائه شده در رابطه (۱) قابل حل خواهد بود.

۴- بهینه سازی قطعی بارزدایی و جابه جایی تولید

همان گونه که در مقدمه عنوان شد، مسئله LSQR یک مسئله بهینه سازی خطی است که قیدهای متعددی را شامل می شود. تابع هدف این مسئله، مجموعه ای از تغییرات در تولید نیروگاهها و

$$0 \leq \Delta P_i^{\sim} \leq (1 - \gamma_i) \cdot \Delta P_i^{\min} \quad (28)$$

$$0 \leq \Delta P_i^{\sim\sim} \leq \gamma_i \cdot \Delta P_i^{\min} \quad (29)$$

$$0 \leq \Delta P_i^{\sim\sim\sim} \leq \beta_i \cdot \Delta P_i^{\max} \quad (30)$$

$$0 \leq \Delta P_i^{\sim\sim\sim\sim} \leq (1 - \beta_i) \cdot \Delta P_i^{\max} \quad (31)$$

لازم به ذکر است که در شکل (۴)، ΔP_i معرف متغیرهای ΔPG_i

، ΔQG_i ، ΔPL_i و ΔQL_i است و α_i هم معرف متغیرهای a_i ، b_i ، c_i و d_i است. به راحتی می توان اثبات کرد که بهترین تقریب خطی در شکل (۴)، هنگامی است که $\gamma_i = \beta_i = 0.5$ باشد.

۴-۲- تشکیل محدودیت‌های بهینه سازی

کمینه کردن شکل خطی شده تابع هدف (۲۵) با در نظر گرفتن محدودیت‌های زیر انجام می شود:

الف) محدودیت توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها: توان اکتیو خروجی ژنراتورها توسط پاسخ گاورنر تعیین می شود که می توان آن را به صورت زیر نشان داد:

$$PG_i = PG_{set_i} - \frac{P_{R_i}}{R_i} \cdot \Delta F \quad (32)$$

که در نتیجه توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها به صورت زیر محدود می شوند:

$$PG_i^{\min} \leq PG_i \leq PG_i^{\max} \quad (33)$$

$$QG_i^{\min} \leq QG_i \leq QG_i^{\max} \quad (34)$$

ب) محدودیت بارهای مصرفی: اکثر بارهای یک سیستم قدرت، داری مشخصه‌هایی هستند که به فرکانس و ولتاژ سیستم بستگی دارند و در نتیجه مدل بارهای مذکور را می توان به صورت زیر در نظر گرفت [۱۴]:

$$PL_i = PL_{set_i} \cdot (1 + k_{p_i} \cdot \Delta F) \cdot \left[P_{p_i} + P_{c_i} \cdot \left(\frac{V_i}{V_{LB_i}} \right)^{N_i} + P_{z_i} \cdot \left(\frac{V_i}{V_{LB_i}} \right)^2 \right] \quad (35)$$

بارهای مصرفی است که با ضریبهایی با یکدیگر ترکیب می شوند. قیدهای این مسئله هم، شامل محدودیت‌های توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها و بارها، محدودیت‌های ولتاژ و فرکانس شبکه، محدودیت‌های پایداری خطوط انتقال، قیدهای پخش بار شبکه و محدودیت‌های تپ ترانسها، همراه با مدل بارهای الکتریکی است.

۴-۱- تشکیل تابع هدف بهینه سازی

با توجه به اینکه هدف، بهینه سازی مقادیر کاهش بارهای سیستم و جابه‌جایی تولید نیروگاههاست، در نتیجه در حالت کلی تابع هدف زیر در نظر گرفته می شود:

$$(24)$$

$$J = \sum_{i=1}^{NG} g_i (\Delta PG_i, \Delta QG_i) + \sum_{i=1}^{NB} l_i (\Delta PL_i, \Delta QL_i)$$

که در رابطه فوق، جمله اول به منظور کمینه کردن میزان جابه‌جایی در تولید نیروگاهها و جمله دوم، مبین مقادیر بارزدایی در توان اکتیو و راکتیو بارهاست. یکی از بهترین توابع هدف، تابع هدف درجه دوم^{۱۴} است [۴،۱]، که در نتیجه خواهیم داشت:

$$J = \sum_i a_i \cdot \Delta PG_i^2 + \sum_i b_i \cdot \Delta QG_i^2 + \sum_i c_i \cdot \Delta PL_i^2 + \sum_i d_i \cdot \Delta QL_i^2 \quad (25)$$

با توجه به اینکه تابع هدف مذکور، برای برنامه ریزی خطی مناسب نیست، در نتیجه می توان با استفاده از تقریب چهار تکه خطی مطابق شکل (۴) به تابع هدف خطی رسید. به این منظور، هر جزء از رابطه (۲۵) که به صورت $\alpha_i \cdot \Delta P_i^2$ در نظر گرفته شده است، تبدیل به چهار جزء دیگر بر حسب متغیرهای $\Delta P_i''$ ، $\Delta P_i'$ و $\Delta P_i'''$ است. در نتیجه جزء $\alpha_i \cdot \Delta P_i^2$ (بر اساس شکل (۴)) به صورت خطی شده

$$\rho_{i_1} \cdot \Delta P_i^{\sim} + \rho_{i_2} \cdot \Delta P_i^{\sim\sim} + \rho_{i_3} \cdot \Delta P_i^{\sim\sim\sim} + \rho_{i_4} \cdot \Delta P_i^{\sim\sim\sim\sim} \quad (26)$$

تغییر می کند که:

$$\Delta P_i = \Delta P_i^{\sim\sim\sim\sim} + \Delta P_i^{\sim\sim\sim} - \Delta P_i^{\sim} - \Delta P_i^{\sim\sim} \quad (27)$$

و همچنین

$$Q_i(V, \delta) = V_i \cdot \sum_{j=1}^{NB} V_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (42)$$

د) محدودیت ولتاژ شینهای شبکه: ولتاژ شینهای شبکه بایستی در محدوده زیر قرار گیرند:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (43)$$

ه) حد تغییرات فرکانس شبکه: با توجه به مهم بودن تغییرات فرکانس شبکه، بایستی داشته باشیم:

$$F^{\min} \leq F \leq F^{\max} \quad (44)$$

و) محدودیت تپ ترانسها: تپ ترانسها در یک محدوده مشخصی قابل تغییر است. در نتیجه:

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad (45)$$

ز) حد پایداری خطوط انتقال: این قید بر روی خطوط انتقال بسیار مهم است و به صورت زیر نمایش داده می شود:

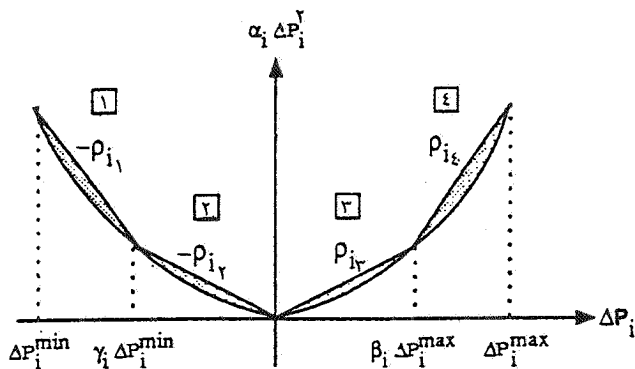
$$0 \leq |\delta_i - \delta_j| \leq \Psi_{ij}^{\max} \quad (46)$$

۴-۳-۳- ارائه مدل کامل خطی شده مسئله LSGR

در بخش ۴-۱ نحوه خطی سازی تابع هدف را بیان کردیم، ولی محدودیتهای ارائه شده در بخش ۴-۲ مناسب برای برنامه ریزی خطی نیستند. به عبارت دیگر، قیدهای روابط (۳۹)، (۴۰) و (۴۶) به شکل غیر خطی هستند و سایر قیدها هم به شکل مناسبی نیستند. با توجه به معلوم بودن مقدارهای اولیه متغیرهای شبکه می توان $(F^0, t_i^0, \delta_i^0, V_i^0, QL_i^0, PL_i^0, QG_i^0, PG_i^0)$ تغییرات متغیرهای شبکه را به صورت $\Delta PL_i, \Delta QG_i, \Delta PG_i$ در نظر گرفت که مناسب برای برنامه ریزی خطی اند. در نتیجه مدل نهایی را می توان به شکل زیر به دست آورد:

خطی شده تابع هدف معادله (۲۵)

$$PG_i^{\min} - PG_i^0 \leq \Delta PG_i \leq PG_i^{\max} - PG_i^0$$



شکل ۴ - خطی سازی تابع هدف درجه دوم

$$QL_i = QL_{set_i} \cdot (1 + k_{qi} \cdot \Delta F) \cdot \left[q_{P_i} + q_{C_i} \cdot \left(\frac{V_i}{V_{LB_i}} \right)^{N_T} + q_{Z_i} \cdot \left(\frac{V_i}{V_{LB_i}} \right)^2 \right] \quad (36)$$

که در مدل مذکور، هر باری را می توان ترکیبی از بار با قدرت ثابت، امپدانس ثابت، و بار متناسب با توان N ام ولتاژ (عموماً با توان یکم) و وابسته به فرکانس در نظر گرفت. نهایتاً خواهیم داشت:

$$PL_i^{\min} \leq PL_i \leq PL_i^{\max} \quad (37)$$

$$QL_i^{\min} \leq QL_i \leq QL_i^{\max} \quad (38)$$

ج) روابط پخش بار شبکه: با توجه به شرایط اضطراری، معرفی کردن مشخصه های فرکانسی در روابط پخش بار ضروری به نظر می رسد. برای رسیدن به نقطه تعادل در هر شین i، بایستی روابط زیر تأمین شوند:

$$PG_i(F) - PL_i(V, F) - P_i(V, \delta) = 0 \quad (39)$$

$$QG_i - QL_i(V, F) - Q_i(V, \delta) = 0 \quad (40)$$

که در این دو رابطه، $P_i(V, \delta)$ و $Q_i(V, \delta)$ به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$P_i(V, \delta) = V_i \cdot \sum_{j=1}^{NB} V_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (41)$$

ارتباط توانهای اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرفی در تابع هدف را بیان کرد. یکی از راههای مؤثر در رفع عدم قطعیت ضریبهای تابع هدف رابطه (۲۵) (ضریبهای a_i ، b_i ، c_i و d_i)، استفاده از اعداد فازی \tilde{a}_i ، \tilde{b}_i ، \tilde{c}_i و \tilde{d}_i با توابع عضویت مربوطه است. در نتیجه برای هر جزء ΔP_i^2 با ضریب فازی، ضریبهای ρ_{i1} تا ρ_{i4} در رابطه خطی شده (۲۶) به صورت اعداد فازی تبدیل می شوند که نحوه به دست آوردن توابع عضویت این ضریبها با استفاده از تابع عضویت $\tilde{\alpha}_i$ در پیوست (الف) بیان شده است.

ب) در سیستمهای قدرت، اکثر کرانه‌های بالا و پایین محدودیتهای متغیرها را نمی توان به طور قطعی و دقیق تعیین کرد. به عنوان مثال، کرانه‌های بالا و پایین ولتاژ شینهای شبکه‌های قدرت از قطعیت کاملی برخوردار نیستند. همچنین اکثر ضریبهای قیدهای مسئله بهینه سازی که در بخش قبل ارائه شد با عدم قطعیت در مقدار دقیق آنها مواجه ایم. این موضوع، تصمیم گیرنده را به استفاده از محدودیتهای فازی هدایت می کند.

ج) استفاده از الگوریتم فازی در مدل‌های برنامه ریزی خطی باعث می شود که قابلیت انعطاف پذیری مسئله بیشتر شود و ناحیه قابل قبول^{۱۶} حل مسئله افزایش یابد. در نتیجه در مواردی که حل قطعی مسئله، حل قابل قبولی را نداشته باشد، احتمالاً دارای یک حل قابل قبولی در محیط فازی خواهد بود.

در نهایت، با توجه به دلایل فوق، مناسب است که مسئله بهینه سازی بارزدایی به همراه جابه جایی تولید را بر مبنای برنامه ریزی خطی فازی ارائه و حل کنیم. به این منظور، با توجه به اینکه در رابطه (۴۷)، عدم قطعیتی در کلیه ضریبهای تابع هدف و قیدهای برنامه ریزی، و همچنین اکثر کرانه‌های بالا و پایین محدودیتهای وجود دارد، در نتیجه می توان مدل مذکور را بر اساس برنامه ریزی خطی رابطه (۲۳) (که ناشی از مدل برنامه ریزی خطی فازی است) بیان کرد و با استفاده از روشهای متداول برنامه ریزی خطی، آن را حل کنیم.

۶ - نتایج شبیه سازی

روش پیشنهادی در این مقاله، برای بهینه سازی LSQR و بر اساس الگوریتم فازی، بر روی شبکه آزمون شکل (۵) اجرا شده است. کلیه اطلاعات و داده‌های قطعی و فازی متغیرها، اعم از اطلاعات خطوط انتقال، شینها، ژنراتورها، ترانسهای تپ چنجردار،

$$\begin{aligned} QG_i^{\min} - QG_i^{\circ} &\leq \Delta QG_i \leq QG_i^{\max} - QG_i^{\circ} \\ PL_i^{\min} - PL_i^{\circ} &\leq \Delta PL_i \leq PL_i^{\max} - PL_i^{\circ} \\ QL_i^{\min} - QL_i^{\circ} &\leq \Delta QL_i \leq QL_i^{\max} - QL_i^{\circ} \\ V_i^{\min} - V_i^{\circ} &\leq \Delta V_i \leq V_i^{\max} - V_i^{\circ} \\ t_i^{\min} - t_i^{\circ} &\leq \Delta t_i \leq t_i^{\max} - t_i^{\circ} \\ F^{\min} - F^{\circ} &\leq \Delta F \leq F^{\max} - F^{\circ} \\ -\Psi_{ii}^{\max} - \delta_i^{\circ} + \delta_i^{\circ} &\leq \Delta \delta_i - \Delta \delta_i \leq \Psi_{ii}^{\max} - \delta_i^{\circ} + \delta_i^{\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta PG \\ \Delta PL \\ \Delta QG \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta PL \\ \Delta QL \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & J_5 & J_V \\ J_3 & J_4 & J_6 & J_8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta F \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

لازم به ذکر است که محدودیت پایداری خطوط انتقال با استفاده از نحوه خطی سازی رابطه قدر مطلق، و محدودیت پخش بار شبکه با استفاده از جمله اول بسط سری تیلور (حول نقطه کار اولیه شبکه) صورت می گیرد که در رابطه مذکور، J_1 تا J_8 زیر ماتریسهای ماتریس ژاکوبین بوده و خواهیم داشت [۱۴]:

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{\partial P}{\partial \delta} , J_2 = \frac{\partial P}{\partial V} , J_3 = \frac{\partial Q}{\partial \delta} , J_4 = \frac{\partial Q}{\partial V} \\ J_5 &= \frac{\partial P}{\partial F} , J_6 = \frac{\partial Q}{\partial F} , J_7 = \frac{\partial P}{\partial T} , J_8 = \frac{\partial Q}{\partial T} \quad (48) \end{aligned}$$

۵ - محیط فازی^{۱۵} مسئله بهینه سازی بارزدایی و جابه جایی تولید

در دنیای واقعی مسایل بهینه سازی، بسیاری از قواعد، داده‌های ورودی و همچنین محدودیتهای موجود، به منظور تشکیل مدل‌های برنامه ریزی به شکل قطعی و صریح نیستند. در نتیجه استفاده از خواص و ابزارهای مجموعه‌های فازی بسیار مفید به نظر می رسد. به همین منظور، مسئله LSQR هم از این مشکلات مستثنی نیست که می توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) همان گونه که در بخش قبل بیان شد، تابع هدف مسئله بهینه سازی مذکور، از متغیرهای بارزدایی شبکه و جابه جایی تولید نیروگاهها تشکیل شده است که بایستی این متغیرها، با ضریبهای مناسبی به یکدیگر مرتبط شوند. اما برای تصمیم گیرنده تعیین دقیق این ضریبها کار بسیار مشکلی است و به راحتی نمی توان نحوه

بارها و ضریبهای تابع هدف در پیوست (ب) آورده شده است. خطاهای در نظر گرفته شده در این روش و در یک سیستم الکتریکی، قطع خطوط انتقال، قطع ژنراتور، کاهش تولید نیروگاهها، و افزایش بار مصرفی شینها هستند. در این بخش، دو مثال عددی بیان شده است که نتایج شبیه سازی آنها در جدولهای (۱) و (۲) آورده شده است. در این دو مثال فرض شده است که قبل از وقوع هر گونه خطایی، سیستم در حالت کارکرد اقتصادی است.

مثال ۱: در این مثال فرض می شود که در شین شماره ۲، باری با توان اکتیو ۰/۲ پریونیت و ضریب قدرت ۰/۹ پس فاز (توان راکتیو ۰/۱ پریونیت) افزوده شود. برای این منظور، ابتدا پخش بار شبکه قبل از وقوع خطا انجام می پذیرد که نتایج آن در حالت اول از جدول (۱) آمده است. با در نظر گرفتن اضافه بار مورد نظر، نتایج پخش بار آن در حالت دوم (از جدول (۱)) بیان شده است و مشاهده می شود که ولتاژ شین ۲ از محدوده مجاز خود خارج شده است. نتایج پخش بار شبکه، که در حالت سوم ارائه شده است نشان می دهد که سیستم مذکور، پس از ۲ مرحله تکرار بهینه سازی قطعی جابه جایی تولید، به حالت عادی منتقل می شود. متوجه می شویم که برای رفع این مشکل نیازی به بارزدایی نیست. اما وقتی از بهینه سازی فازی جابه جایی تولید استفاده گردد، مشاهده می شود که پس از یک مرحله تکرار برنامه ریزی خطی فازی، سیستم به حالت نرمال انتقال می یابد. نتایج پخش بار این روش، در حالت چهارم از جدول (۱) آورده شده است. با استفاده از این روش، مقدار تابع هدف بهینه سازی (با ضریبهای قطعی)، $4/721$ است که نسبت به مقدار تابع هدف در روش بهینه سازی قطعی ($4/737$) کمتر است. با توجه به اینکه مقدار تابع هدف در مسئله مذکور، بیانگر میزان انحراف مقادیر تولید نیروگاهها از حالت کارکرد اقتصادی خود است، در نتیجه کاهش این مقدار در روش بهینه سازی فازی بسیار مطلوب است.

اکنون فرض می شود که هنگام وقوع اضافه بار مورد نظر، بار شین ۶ به گونه ای است که با تغییر ولتاژ و فرکانس شبکه، مقدار توان اکتیو و راکتیو آن بر اساس مدل بارهای الکتریکی ارائه شده در رابطه های (۳۵) و (۳۶) تغییر کند. ضریبهای مدل بار مذکور به صورت زیر انتخاب شده است [۱۴]:

$$\begin{aligned} k_{p_6} &= 0/03, & p_{p_6} &= 0/2, & p_{c_6} &= 0/3, & p_{z_6} &= 0/5 \\ k_{q_6} &= 0/00, & q_{p_6} &= 0/2, & q_{c_6} &= 0/3, & q_{z_6} &= 0/5 \end{aligned} \quad (49)$$

برای رفع این مشکل، الگوریتم بهینه سازی قطعی و فازی جابه جایی تولید به اجرا درمی آید که نتایج پخش بار این دو روش (همراه با مدل بار شین ۶) در حالت های پنجم و ششم بیان شده است. نتایج شبیه سازی این دو روش نشان می دهد که سیستم پس از یک مرحله تکرار برنامه ریزی خطی به حالت عادی منتقل می شود، ولی مقدار تابع هدف در روش بهینه سازی فازی $4/524$ است که نسبت به مقدار تابع هدف در روش قطعی ($4/846$) کم تر است.

مثال ۲: در این مثال فرض می شود که خط شماره ۶ از مدار خارج شود که مشابه مثال قبل، نتایج پخش بار شبکه، قبل و بعد از وقوع خطا در حالت های اول و دوم جدول (۲) آورده شده است. از نتایج پخش بار شبکه (حالت دوم) مشاهده می شود که ولتاژ شینهای ۳، ۴، ۵، ۶، اختلاف زاویه (پایداری) خطوط انتقال ۷ و ۸، فرکانس سیستم، و توان راکتیو شین مینا از محدوده مجاز خود خارج شده اند. مشابه مثال قبل، برای رفع شرایط اضطراری حاکم بر سیستم قدرت، از روش بارزدایی و جابه جایی تولید، و بر اساس بهینه سازی قطعی و فازی، استفاده می شود که نتایج پخش بار این دو روش در حالت های سوم و چهارم جدول (۲) بیان شده است. از نتایج این دو حالت متوجه می شویم که در روش قطعی، سیستم قدرت پس از ۳ مرحله تکرار برنامه ریزی خطی، و در روش فازی پس از ۲ مرحله تکرار برنامه ریزی خطی فازی به حالت عادی منتقل می شود. همچنین مقدار تابع هدف بهینه سازی فازی $94/536$ است که نسبت به مقدار مشابه آن در روش قطعی ($112/535$) کمتر است. در نتیجه با استفاده از روش بهینه سازی فازی، میزان انحراف مقادیر تولید نیروگاهها و بارهای سیستم از حالت کارکرد اقتصادی و اولیه خود نسبت به روش قطعی کمتر است.

اکنون، خارج شدن خط ۶ از سیستم مذکور را همراه با مدل بار الکتریکی شین ۵ با ضریبهای مدل ارائه شده در مثال ۱ بررسی می کنیم. برای رفع شرایط اضطراری، از روش بارزدایی و جابه جایی تولید، و بر اساس بهینه سازی قطعی و فازی، استفاده می شود که نتایج پخش بار این دو روش، در حالت های پنجم و ششم جدول (۲) آورده شده است. از نتایج این دو حالت مشاهده می شود که مقدار تابع هدف در روش بهینه سازی قطعی $116/983$ است و این در حالی است که با استفاده از روش بهینه سازی فازی، این مقدار به

جدول (۱): نتایج حالت‌های مختلف مثال ۱ با استفاده از جابه‌جایی تولید قطعی و فازی

حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم	حالت ششم	
قبل از وقوع خطا	بعد از وقوع خطا	بهینه سازی قطعی	بهینه سازی فازی	بهینه سازی قطعی	بهینه سازی فازی	
مدل بار شین ۶						
توان اکتیو ژنراتور ۱	۰/۳۱۱	۰/۴۹۳	۰/۴۹۵	۰/۴۸۶	۰/۴۸۸	بله
توان اکتیو ژنراتور ۷	۰/۸۰۰	۰/۸۰۳	۰/۷۹۵	۰/۸۰۴	۰/۸۰۲	بله
توان اکتیو ژنراتور ۸	۰/۶۰۰	۰/۶۰۲	۰/۶۱۲	۰/۶۰۸	۰/۶۱۶	بله
توان راکتیو ژنراتور ۱	۰/۴۴۷	۰/۴۰۱	۰/۴۵۵	۰/۳۸۳	۰/۴۰۶	بله
توان راکتیو ژنراتور ۷	-۰/۱۶۵	-۰/۱۲۱	-۰/۱۲۹	-۰/۱۱۳	-۰/۱۲۰	بله
توان راکتیو ژنراتور ۸	-۰/۰۲۸	۰/۰۶۹	۰/۰۷۳	۰/۰۷۴	۰/۰۷۱	بله
توان اکتیو بار ۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	بله
توان اکتیو بار ۲	۰/۱۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	بله
توان اکتیو بار ۳	۰/۴۵۰	۰/۴۵۰	۰/۴۵۰	۰/۴۵۰	۰/۴۵۰	بله
توان اکتیو بار ۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	بله
توان اکتیو بار ۵	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	بله
توان اکتیو بار ۶	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰	بله
توان اکتیو بار ۷	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	بله
توان اکتیو بار ۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	بله
توان راکتیو بار ۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	بله
توان راکتیو بار ۲	۰/۰۵۰	۰/۱۵۰	۰/۱۵۰	۰/۱۵۰	۰/۱۵۰	بله
توان راکتیو بار ۳	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	بله
توان راکتیو بار ۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	بله
توان راکتیو بار ۵	۰/۱۸۰	۰/۱۸۰	۰/۱۸۰	۰/۱۸۰	۰/۱۸۰	بله
توان راکتیو بار ۶	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	بله
توان راکتیو بار ۷	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	بله
توان راکتیو بار ۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	بله
اندازه ولتاژ شین ۱	۱/۰۹۰	۱/۰۹۰	۱/۱۰۰	۱/۰۷۵	۱/۰۹۰	بله
اندازه ولتاژ شین ۲	۱/۰۵۵	۰/۹۳۹	۰/۹۵۲	۰/۹۵۰	۰/۹۴۱	بله
اندازه ولتاژ شین ۳	۰/۹۸۷	۰/۹۹۲	۱/۰۵۲	۱/۰۳۹	۰/۹۹۱	بله
اندازه ولتاژ شین ۴	۱/۰۰۳	۱/۰۰۳	۱/۰۰۳	۰/۹۸۹	۱/۰۰۳	بله
اندازه ولتاژ شین ۵	۰/۹۷۲	۰/۹۸۲	۱/۰۰۳	۰/۹۷۸	۰/۹۸۱	بله
اندازه ولتاژ شین ۶	۰/۹۷۴	۰/۹۷۶	۰/۹۸۰	۰/۹۶۸	۰/۹۷۵	بله
اندازه ولتاژ شین ۷	۱/۰۱۰	۱/۰۱۰	۱/۰۱۳	۱/۰۰۹	۱/۰۱۰	بله
اندازه ولتاژ شین ۸	۱/۰۸۰	۱/۰۸۰	۱/۱۰۰	۱/۰۸۳	۱/۰۸۱	بله
زاویه ولتاژ شین ۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	بله
زاویه ولتاژ شین ۲	۱۰/۸۰۲	۳/۸۳۶	۴/۲۱۲	۳/۸۴۱	۴/۰۳۵	بله
زاویه ولتاژ شین ۳	-۱/۳۴۹	-۳/۵۹۷	-۳/۳۱۷	-۳/۵۴۸	-۳/۴۹۶	بله
زاویه ولتاژ شین ۴	۰/۳۰۰	-۱/۵۸۰	-۱/۴۵۸	-۱/۶۳۴	-۱/۵۱۴	بله
زاویه ولتاژ شین ۵	-۴/۵۹۴	-۷/۱۹۸	-۶/۷۲۳	-۷/۰۸۷	-۷/۰۶۲	بله
زاویه ولتاژ شین ۶	-۵/۲۸۲	-۷/۰۱۳	-۶/۷۳۴	-۷/۰۹۵	-۶/۹۵۷	بله
زاویه ولتاژ شین ۷	۱۶/۷۲۹	۱۲/۹۷۵	۱۳/۰۶۵	۱۲/۹۴۶	۱۳/۰۷۵	بله
زاویه ولتاژ شین ۸	۷/۷۲۹	۲/۸۸۰	۳/۴۳۸	۲/۷۹۸	۳/۱۸۷	بله
فرکانس شبکه (HZ)	۵۰/۰۰۰	۴۹/۹۹۲	۴۹/۹۶۷	۴۹/۹۹۷	۴۹/۹۹۴	بله
اندازه تپ ترانس ۱	۱/۰۵۰	۱/۰۵۰	۱/۰۶۸	۱/۰۵۰	۱/۰۵۰	بله
اندازه تپ ترانس ۲	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۶۵	۱/۰۶۷	۱/۰۰۰	بله
تعداد تکرار	-	-	۲	۱	۱	بله
مقدار تابع هدف	-	-	۴/۷۳۷	۴/۷۲۱	۴/۵۲۴	بله
حالت‌های اضطراری شبکه	-	ولتاژ شین ۲	-	-	-	بله

جدول (۲): نتایج حالت‌های مختلف مثال ۲ با استفاده از بار زدایی و جابه‌جایی تولید قطعی و فازی

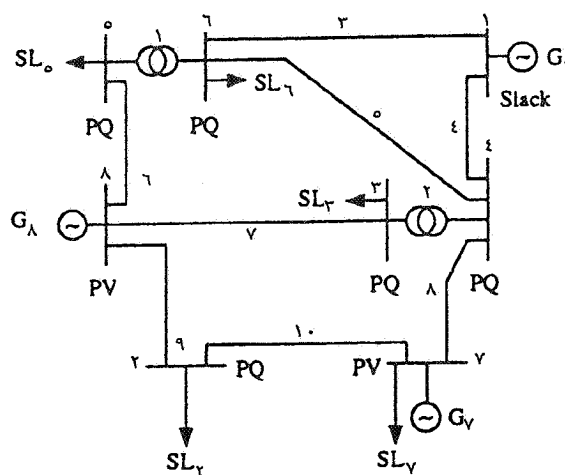
حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم	حالت ششم	
قبل از وقوع خطا	بعد از وقوع خطا	بهینه‌سازی قطعی	بهینه‌سازی فازی	بهینه‌سازی قطعی	بهینه‌سازی فازی	
مدل بار شین ۵						
توان اکتیو ژنراتور ۱	۰/۳۱۱	۰/۳۵۴	۰/۳۰۰	۰/۳۰۱	۰/۳۰۰	بله
توان اکتیو ژنراتور ۷	۰/۸۰۰	۰/۹۱۰	۰/۲۵۱	۰/۳۲۲	۰/۴۷۲	
توان اکتیو ژنراتور ۸	۰/۶۰۰	۰/۶۸۳	۰/۳۸۱	۰/۳۹۱	۰/۵۰۵	
توان راکتیو ژنراتور ۱	۰/۴۴۷	۱/۰۶۱	۰/۳۹۲	۰/۴۰۴	۰/۵۴۸	
توان راکتیو ژنراتور ۷	-۰/۱۶۵	-۰/۱۰۰	-۰/۱۷۱	-۰/۱۳۷	-۰/۱۱۳	
توان راکتیو ژنراتور ۸	-۰/۰۲۸	۰/۰۱۷	-۰/۰۱۵۰	-۰/۰۱۳۲	-۰/۰۱۷۳	
توان اکتیو بار ۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
توان اکتیو بار ۲	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۰۷۸	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	
توان اکتیو بار ۳	۰/۴۵۰	۰/۴۵۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
توان اکتیو بار ۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
توان اکتیو بار ۵	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۲۵۴	۰/۳۷۰	۰/۳۲۴	
توان اکتیو بار ۶	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰	۰/۳۰۴	۰/۴۹۸	۰/۵۰۰	
توان اکتیو بار ۷	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	
توان اکتیو بار ۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
توان راکتیو بار ۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
توان راکتیو بار ۲	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۳۹	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	
توان راکتیو بار ۳	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
توان راکتیو بار ۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
توان راکتیو بار ۵	۰/۱۸۰	۰/۱۸۰	۰/۱۵۳	۰/۲۲۲	۰/۱۹۵	
توان راکتیو بار ۶	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۳۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	
توان راکتیو بار ۷	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	
توان راکتیو بار ۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
اندازه ولتاژ شین ۱	۱/۰۹۰	۱/۰۹۰	۱/۰۶۷	۱/۱۰۰	۱/۱۱۵	
اندازه ولتاژ شین ۲	۱/۰۵۵	۱/۰۲۹	۰/۹۵۱	۱/۰۲۸	۱/۰۶۶	
اندازه ولتاژ شین ۳	۰/۹۸۷	۰/۸۷۶	۰/۹۹۹	۱/۰۳۶	۱/۰۲۷	
اندازه ولتاژ شین ۴	۱/۰۰۳	۰/۹۱۶	۰/۹۹۵	۱/۰۳۸	۱/۰۳۸	
اندازه ولتاژ شین ۵	۰/۹۷۲	۰/۸۳۱	۱/۰۴۹	۱/۰۳۹	۱/۰۳۹	
اندازه ولتاژ شین ۶	۰/۹۷۴	۰/۸۵۹	۰/۹۵۲	۰/۹۶۴	۰/۹۵۶	
اندازه ولتاژ شین ۷	۱/۰۱۰	۱/۰۱۰	۰/۹۰۹	۱/۰۱۱	۱/۰۴۸	
اندازه ولتاژ شین ۸	۱/۰۸۰	۱/۰۸۰	۱/۰۳۴	۱/۱۰۰	۱/۱۱۵	
زاویه ولتاژ شین ۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
زاویه ولتاژ شین ۲	۱۰/۸۰۲	۲۷/۱۹۶	۸/۹۹۵	۸/۱۰۵	۱۴/۱۱۶	
زاویه ولتاژ شین ۳	-۱/۳۴۹	۴/۲۴۸	۲/۶۰۹	۲/۱۷۴	۴/۸۹۹	
زاویه ولتاژ شین ۴	۰/۳۰۰	۳/۹۵۵	۰/۹۲۱	۰/۹۸۳	۲/۵۲۹	
زاویه ولتاژ شین ۵	-۴/۵۹۴	-۱۶/۳۲۶	-۱۰/۳۱۶	-۱۲/۳۶۵	-۱۳/۲۹۶	
زاویه ولتاژ شین ۶	-۵/۲۸۲	-۹/۴۳۱	-۷/۵۱۱	-۷/۸۴۴	-۸/۵۰۸	
زاویه ولتاژ شین ۷	۱۶/۷۲۹	۲۹/۸۷۹	۸/۲۴۰	۸/۱۲۴	۱۳/۷۱۴	
زاویه ولتاژ شین ۸	۷/۷۲۹	۲۸/۲۹۳	۱۳/۶۶۲	۱۲/۲۹۱	۱۸/۶۰۹	
فرکانس شبکه (HZ)	۵۰/۰۰۰	۴۹/۶۵۶	۴۹/۸۸۴	۴۹/۹۹۵	۴۹/۸۷۷	
اندازه تپ ترانس ۱	۱/۰۵۰	۱/۰۵۰	۱/۱۵۰	۱/۱۵۰	۱/۱۵۰	
اندازه تپ ترانس ۲	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۱۵	۱/۰۰۲	۱/۰۰۰	
تعداد تکرار	-	-	۳	۳	۲	
مقدار تابع هدف	-	-	۱۱۲/۵۳۵	۱۱۶/۹۸۳	۹۴/۵۲۵	
حالت‌های اضطراری شبکه	-	-	-	-	-	
توان راکتیو ژنراتور ۱	-	-	-	-	-	

محدودیت‌های موجود در سیستم‌های قدرت از قطعیت مناسبی برخوردار نیستند، در نتیجه استفاده از برنامه‌ریزی فازی روش مناسبی به نظر می‌رسد.

نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهاد شده نشان می‌دهد که روش حل فازی از قابلیت و انعطاف بیشتری نسبت به روش حل قطعی برخوردار است. به عبارت دیگر، با ایجاد محیط فازی برای مسئله بهینه‌سازی بارزدایی و جابه‌جایی تولید می‌توان رفتار عملی سیستم‌های قدرت را به طور مناسبتری بیان کرد. همچنین از نتایج شبیه‌سازی چنین می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر تابع هدف در روش بهینه‌سازی فازی (همراه با ضریبهای قطعی)، کمتر از بهینه‌سازی قطعی است. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از بهینه‌سازی فازی در مسئله مورد نظر، روش کاربردی عملی‌تری را برای کنترل شرایط اضطراری ارائه می‌دهد.

قدردانی

بدین وسیله از داوران محترم مقاله که با نظریات اصلاحی خود باعث ارتقاء کیفی مقاله شده‌اند سپاسگزاری می‌شود.



شکل ۵ - سیستم آزمون هشت شینه

۹۴/۵۲۵ کاهش می‌یابد که مزیت بهینه‌سازی فازی را نسبت به بهینه‌سازی قطعی بیان می‌کند.

۷ - نتیجه‌گیری

در این مقاله، بهینه‌سازی بارزدایی و جابه‌جایی تولید بر اساس روش جدیدی که با استفاده از برنامه‌ریزی خطی فازی است، پیشنهاد شده است. با توجه به این مطلب که در مسئله بهینه‌سازی مذکور، کلیه ضریبهای تابع هدف و قیدها و اکثر کرانه‌های

واژه‌نامه

- | | | |
|--|------------------------------------|------------------------------|
| 1. load shedding and generation reallocation | 7. trapezoidal membership function | 11. possibility of dominance |
| 2. crisp optimization | 8. goal | 12. degree of satisfaction |
| 3. fuzzy optimization | 9. increasing left-hand side | 13. fractional programming |
| 4. rated regulation | 10. decreasing right-hand side | 14. quadratic function |
| 5. dispatching center | | 15. fuzzy environment |
| 6. multi-objective fuzzy linear programming | | 16. feasible solution |

مراجع

۱. هوشمند، ر. و سیفی، ح.، "بهینه‌سازی بارزدایی به همراه جابه‌جایی تولید در شبکه‌های قدرت"، مجموعه مقالات سومین کنفرانس مهندسی برق ایران، ص ۱۸۵-۱۹۳، اردیبهشت ۱۳۷۴.

2. Palaniswamy, K. A., and Sharma, J., "Optimum Load Shedding Taking into account of Voltage and Frequency Characteristic of Loads," *IEEE Trans*, Vol. PAS-104, No. 6, pp. 1342-1348, June 1985.

3. Bui, R. T., and Ghaderpanah, S., "Real Power Rescheduling and Security Assessment," *IEEE Trans*, Vol. PAS-101, No. 8, pp. 2906-2915, August 1982.

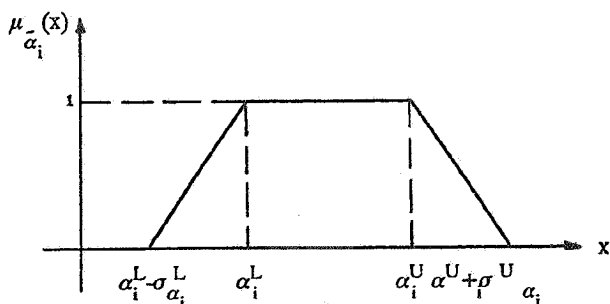
4. Medicherla, T. K. P., Billinton, R., and Sachdev, M.S., "Generation Rescheduling and Load Shedding to Alleviate Line over Loads-Analysis," *IEEE Trans*, Vol. PAS-98, No. 6, pp. 1876-1884,

Nov./Dec. 1979.

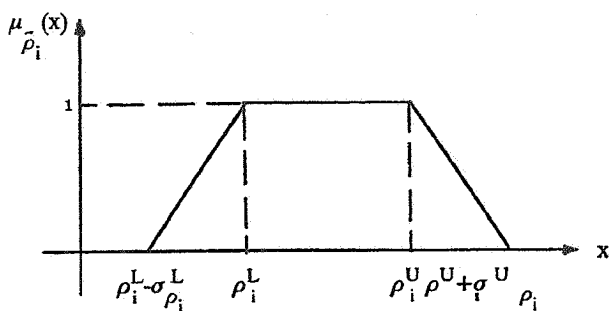
5. Chan, S. M., and Schweppe, F.C., "A Generation Reallocation and Load Shedding Algorithm," *IEEE Trans*, Vol. PAS-98, No. 1, pp. 1876-1884, Jan./Feb. 1979.
6. Roubens, M., and Teghem, T.J., "Comparison of Methodologies for Fuzzy and Stochastic Multi-Objective Programming," *Fuzzy Sets and Systems* 42, pp. 119-132, 1991.
7. Zadeh, L. A., "Fuzzy sets," *Information and Control* 8, pp. 338-353, 1965.
8. Bellman, R., and Zadeh, L. A., "Decision Making in a Fuzzy Environment," *Management Science* 17, pp. 141-164, 1970.
9. Zimmermann, H. J., "Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objective Function," *Fuzzy Sets and Systems* 1, pp. 45-55, 1978.
10. Carlsson, C., and Korhonen, P., "A Parametric

Approach to Fuzzy Linear Programming," *Fuzzy Sets and Systems* 20, pp. 17-30, 1986.

11. Slowinski, R., "A Multicriteria Fuzzy Linear Programming Method for Under Supply System Development Planning," *Fuzzy Sets and Systems* 19, pp. 217-237, 1986.
12. Rommelfanger, H., "Interactive Decision Making in Fuzzy Linear Optimization Problems," *European Journal of Operational Research* 41, pp. 210-217, 1989.
13. Dubois, D., and Prade, H., *Fuzzy Sets and Systems-Theory and Application*, New York, 1980.
14. Okamura, M., O-ura, Y., Hayashi, S., Uemura, K., and Ishiguro, F., "A New Power Flow Model and Solution Method-Including Load and Generator Characteristics and Effects of System Control Devices," *IEEE Trans*, Vol. PAS-94, No. 3, pp. 1042-105, May/June 1975.



شکل ۶ - تابع عضویت عدد فازی $\tilde{\alpha}_i$



شکل ۷ - تابع عضویت عدد فازی $\tilde{\rho}_i$

پیوست الف: تعیین تابع عضویت $\tilde{\rho}_{i\uparrow}$ تا $\tilde{\rho}_{i\downarrow}$

تابع عضویت $\tilde{\alpha}_i$ (مشخص شده توسط تصمیم گیرنده) را بر اساس شکل (۶) در نظر بگیرید. حال با در نظر گرفتن اینکه در شکل (۴) مقادیر $\beta_i = \gamma_i = 0.5$ را داشته باشیم آنگاه توابع عضویت $\tilde{\rho}_{i\uparrow}$ و $\tilde{\rho}_{i\downarrow}$ که شیب دو تکه خط سمت راست شکل (۴) است به صورت زیر محاسبه می شوند (شکل (۷) را ببینید):

$$\begin{cases} \rho_{i\uparrow}^L = \frac{1}{\gamma} \cdot \alpha_i^L \cdot \Delta P_i^{\max} \\ \rho_{i\uparrow}^U = \frac{1}{\gamma} \cdot \alpha_i^U \cdot \Delta P_i^{\max} \\ \sigma_{\rho_{i\uparrow}}^L = \frac{1}{\gamma} \cdot \sigma_{\alpha_i}^L \cdot \Delta P_i^{\max} \\ \sigma_{\rho_{i\uparrow}}^U = \frac{1}{\gamma} \cdot \sigma_{\alpha_i}^U \cdot \Delta P_i^{\max} \end{cases} \quad (50)$$

$$\begin{cases} \rho_{i\downarrow}^L = \frac{\gamma}{\gamma} \cdot \alpha_i^L \cdot \Delta P_i^{\max} \\ \rho_{i\downarrow}^U = \frac{\gamma}{\gamma} \cdot \alpha_i^U \cdot \Delta P_i^{\max} \\ \sigma_{\rho_{i\downarrow}}^L = \frac{\gamma}{\gamma} \cdot \sigma_{\alpha_i}^L \cdot \Delta P_i^{\max} \\ \sigma_{\rho_{i\downarrow}}^U = \frac{\gamma}{\gamma} \cdot \sigma_{\alpha_i}^U \cdot \Delta P_i^{\max} \end{cases} \quad (51)$$

جدول (۵): محدودیتهای تولیدی ژنراتورها به همراه ضریبهای a_i و b_i

ضریبهای b_i	ضریبهای a_i	ضریبهای تنظیم	بیشینه توان اکتیو	کمینه توان اکتیو	بیشینه توان راکتیو	کمینه توان راکتیو	شماره ژنراتور
۵/۹	۸/۵	۰/۰۵	۱/۵۰	۰/۳۰	۱/۰۰	-۰/۲۰	۱
۹۲/۴	۱۹/۰	۰/۰۵۰	۰/۸۰	۰/۱۰	۱/۰۰	-۰/۲۰	۷
۴۲۲/۸	۲۰/۰	۰/۰۵۰	۰/۸۰	۰/۱۰	۱/۰۰	-۰/۲۰	۸