

## برنامه‌ریزی روز پیش‌رو برای واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن ظرفیت دینامیکی خطوط و ترانسفورماتورها در حضور تولیدات بادی

محمد اخلاقی<sup>۱</sup>، زهرا مروج<sup>۱</sup>، امیر باقری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده- پخش بار بهینه (OPF) یکی از مطالعات مهم جهت برنامه‌ریزی واحدهای نیروگاهی می‌باشد که در آن هدف تأمین بار روز بعد با صرف کمترین هزینه بهره‌برداری و با در نظر گرفتن قیود شبکه می‌باشد. یکی از قیود تأثیرگذار بر نتیجه این مسئله، قید ظرفیت حرارتی خطوط و ترانسفورماتورها می‌باشد. در بیشتر مقالات پیشین از ظرفیت حرارتی استاتیکی برای خطوط و ترانسفورماتورها استفاده شده است که قیدی محافظه‌کارانه بوده و باعث عدم استفاده بهینه از ظرفیت واقعی این تجهیزات شده و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری را به دنبال دارد. این مسئله در شرایط حضور تولیدات تجدیدپذیر مانند مزارع بادی اهمیت بیشتری می‌یابد. در این مقاله مدلی برای برنامه‌ریزی روز پیش‌رو برای واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن ظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط و ترانسفورماتورها ارائه می‌گردد. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ باسه استاندارد IEEE-RTS در محیط نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده و نتایج در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر کارایی مدل پیشنهادی در کاهش هزینه‌ها و استفاده حداکثری از توان مزارع بادی می‌باشد.

کلید واژه: برنامه‌ریزی بهره‌برداری، روز پیش‌رو، ظرفیت دینامیکی خطوط، ظرفیت دینامیکی ترانسفورماتورها، تولیدات بادی.

### ۱- مقدمه

بر خطوط و ترانسفورماتورها فراهم شده است. از جمله این تجهیزات، ادوات اندازه‌گیری ظرفیت دینامیکی خطوط (DLR) و ظرفیت دینامیکی ترانسفورماتورها (DTR) می‌باشد. با بکارگیری این تجهیزات می‌توان ظرفیت لحظه‌ای عبور توان از خطوط و ترانسفورماتورها را اندازه گرفت و با ارسال آن به مرکز دیسپاچینگ شبکه، بهره‌برداری شبکه را بصورت بهینه و اقتصادی انجام داد. از سوی دیگر، امروزه مسائلی مانند رشد مصرف انرژی الکتریکی و نگرانی‌های ناشی از تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی و اتمام سوخت‌های فسیلی، طراحان و بهره‌برداران شبکه برق را بر آن داشته است که از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند مزارع بادی استفاده نمایند [۵]. علیرغم مزایای متنوع منابع بادی، وجود عدم قطعیت در توان تولیدی این واحدها، باعث بروز مشکلاتی در بهره‌برداری شبکه مانند وقوع تراکم در خطوط و ترانسفورماتورها و یا بروز اضافه ولتاژ در باسهای شبکه مخصوصاً در مواقع کم‌باری می‌گردد [۶ و ۷]. در این شرایط بهره‌بردار شبکه به ناچار ممکن است تصمیم به قطع توان تولیدی این منابع در برخی ساعات شبانه‌روز بگیرد. در صورت بکارگیری تجهیزات اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط و ترانسفورماتورها، این مشکل تا حدود زیادی مرتفع شده و استفاده حداکثری از پتانسیل واحدهای بادی که منابعی پاک و رایگان هستند بعمل خواهد آمد.

برنامه‌ریزی بهره‌برداری برای روز بعد یکی از مسائل مهم در سیستم قدرت می‌باشد که هدف از آن مشخص کردن چیدمان تولید واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن قیود مختلف می‌باشد. این فرآیند توسط مطالعه پخش بار بهینه (OPF) صورت می‌پذیرد [۱]. در این مطالعه قیود واحدهای نیروگاهی و نیز قیود پخش بار شبکه باید در نظر گرفته شوند تا اطمینان از بهره‌برداری ایمن شبکه حاصل شود. قیدهای مربوط به واحدهای نیروگاهی شامل قیود توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی و نرخ تغییرات توان می‌باشد. قیود شبکه نیز شامل برقراری معادلات پخش بار شبکه (بصورت مدل DC یا AC)، قید ظرفیت حرارتی خطوط و ترانسفورماتورها، و قید محدوده مجاز ولتاژ باسها (در صورت استفاده از مدل پخش بار AC) می‌باشد [۲ و ۳]. در شبکه‌های برق برای قید ظرفیت خطوط و ترانسفورماتورها معمولاً از ظرفیت حرارتی استاتیکی که یک حد محافظه‌کارانه می‌باشد استفاده می‌گردد. رسیدن توان عبوری از تجهیزات به حد حرارتی استاتیکی‌شان، معمولاً باعث بروز تراکم در خطوط و ترانسفورماتورها شده که عملاً امکان استفاده از ژنراتورهای ارزان قیمت شبکه را غیرممکن کرده و باعث تحمیل هزینه‌های اضافی به بهره‌بردار سیستم می‌گردد [۴]. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و ساخت سنسورها و تجهیزات اندازه‌گیری، امکان مانیتورینگ و نظارت آنلاین



طبق استاندارد IEEE برای خطوط هوایی [۱۲]، ظرفیت عبور توان از یک خط وابسته به مشخصات ساختمانی سیم و نیز شرایط آب و هوایی منطقه مانند سرعت وزش باد و دمای محیط می‌باشد. این ظرفیت با توجه به رابطه تعادل حرارتی بین سیم و هوای اطراف آن بدست می‌آید بگونه‌ای که حرارت تولید شده در سیم که ناشی از عبور جریان از آن می‌باشد از دو طریق همرفتی و تابشی به محیط اطراف انتقال داده می‌شود. این انتقال حرارت باید بگونه‌ای باشد که در حالت تعادل دمایی، دمای سیم از حد مجاز (که در مراجع معمولاً ۷۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود) فراتر نرود. رابطه تعادل حرارتی بصورت (۱) می‌باشد.

$$RI^2 + q_s = q_c + q_r \quad (1)$$

در این رابطه،  $I$  جریان عبوری از سیم برحسب آمپر و  $R$  مقاومت هادی برحسب  $\Omega/m$  می‌باشد؛  $q_s$  توان حرارتی جذبی ناشی از تابش خورشید بر حسب  $W/m$  بوده که بصورت رابطه (۲) بیان می‌گردد.  $q_c$  توان حرارتی منتقل شده از سیم به محیط به روش همرفتی (Convection) بر حسب  $W/m$  بوده و برای سرعت‌های باد کم و زیاد طبق روابط (۳) و (۴) بدست می‌آید.  $q_r$  توان حرارتی دفع شده از روی سطح هادی بر اثر تشعشع (Radiation) بر حسب  $W/m$  بوده و از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$q_{s,t} = \alpha \cdot Q_{se} \cdot \sin \theta \cdot A' \quad (2)$$

$$q_{c,low} = [1.01 + 0.0372 \left( \frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.52}] \cdot K_f K_{angle} (T_c - T_a) \quad (3)$$

$$q_{c,high} = [0.0119 \left( \frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.6}] \cdot K_f K_{angle} (T_c - T_a) \quad (4)$$

$$q_r = 0.0178 D \epsilon \left[ \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (5)$$

پارامترهای موجود در روابط (۲) تا (۵) بصورت زیر می‌باشند:

$\alpha$ : ضریب جذب خورشیدی

$Q_{se}$ : توان تابشی خورشید (برحسب  $W/m^2$ )

$A'$ : سطح بیرونی هادی در واحد طول (برحسب  $m^2/m$ )

$\theta$ : زاویه تابش اشعه خورشید

$D$ : قطر خارجی هادی (برحسب متر)

$\rho_f$ : چگالی هوا (بر حسب  $kg/m^3$ )

$\mu_f$ : ویسکوزیته هوا (برحسب  $Pa \cdot s$ )

$T_c$  و  $T_a$ : به ترتیب دمای محیط و هادی در زمان (بر حسب درجه سانتیگراد)

$V_{w,t}$ : سرعت وزش باد در زمان  $t$  (بر حسب  $m/s$ )

$K_f$ : ضریب هدایت حرارتی هوا

$K_{angle}$ : ضریب جهت باد

مطالعات متنوعی در زمینه برنامه ریزی برای روز پیش رو از دیدگاههای مختلف انجام شده است [۸]. از جمله:

- در نظر گرفتن توابع هدف مختلف مانند هزینه بهره‌برداری، تلفات شبکه، کاهش آلایندگی‌های زیست محیطی و ...
- در نظر گرفتن مدل AC، DC و یا مدل‌های تقریبی دیگر برای پخش بار
- در نظر گرفتن قیود امنیت شبکه مانند قید رزرو، قید پیشامد N-1 و ...
- در نظر گرفتن متغیرهای کنترلی دیگری علاوه بر توان تولیدی ژنراتورها مانند کلیدزنی خطوط انتقال، استفاده از ادوات FACTS و ...
- روش حل مسئله

در اکثر مطالعات انجام شده از ظرفیت دینامیکی خطوط و ترانسفورماتورها استفاده نشده است. مطالعات اندکی نیز وجود دارند که در آنها ظرفیت دینامیکی خطوط یا ترانسفورماتورها لحاظ گردیده است. در [۹] یک مدل بهینه‌سازی تصادفی برای مسئله در مدار قرارگرفتن واحدهای نیروگاهی در حضور قید امنیت (SCUC) ارائه شده است که شامل کلیدزنی بهینه خطوط انتقال (OTS) برای مدیریت عدم قطعیت توان تولیدی بادی و خروج واحدهای نیروگاهی و خطوط است. در این مسئله از تقریب خطی پخش بار بهینه AC استفاده شده که در آن ظرفیت دینامیکی خطوط برای در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی مدل گردیده است. مطالعه مشابهی در [۱۰] با در نظر گرفتن عدم قطعیت شرایط محیطی و اثر آن بر ظرفیت دینامیکی خطوط صورت پذیرفته است. نتایج حاکی از اثرات مثبت DLR بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و قطع بار، و استفاده بهینه از پتانسیل منابع بادی می‌باشد. مرجع [۱۱] تنها مرجعی است که بهینه‌سازی برنامه‌ریزی روز پیش رو را با در نظر گرفتن ظرفیت دینامیکی خطوط و نیز ظرفیت دینامیکی ترانسفورماتورها پیاده‌سازی نموده است بگونه‌ای که تغییرات دینامیکی دمای روغن بالای ترانسفورماتور و نقطه داغ سیم‌پیچ آن به همراه ظرفیت دینامیکی خطوط انتقال در نظر گرفته شده‌اند. در این مطالعه از پخش بار DC استفاده شده و مدل AC مد نظر قرار نگرفته است. این در حالیست که با توجه به اینکه ظرفیت دینامیکی باعث آزاد شدن ظرفیت توان عبوری از تجهیزات می‌گردد، استفاده از پخش بار DC باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌گردد. در مقاله حاضر برنامه‌ریزی روز پیش‌رو برای واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن ظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط و ترانسفورماتورها فرمول‌بندی و اجرا می‌گردد که در آن از مدل AC برای پخش بار بهینه استفاده شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ باسه استاندارد IEEE-RTS پیاده‌سازی شده و نتایج در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر کارایی مدل پیشنهادی در کاهش هزینه‌ها، کاهش قطع بار اجباری، و استفاده حداکثری از توان مزارع بادی می‌باشد.

### ۲- فرمول‌بندی مسئله

#### ۲-۱- ظرفیت دینامیکی خطوط



۲-۴- فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی پیش رو با در نظر گرفتن

ظرفیت دینامیکی خطوط و ترانسفورماتورها

۲-۴-۱- تابع هدف

تابع هدف برنامه‌ریزی روز پیش رو مطابق با رابطه (۹) شامل هزینه تولید واحدهای نیروگاهی، هزینه قطع اجباری بار (Load Shedding)، و هزینه قطع توان بادی باد (Wind Power Curtailment) برای بازه ۲۴ ساعته رو بعد می‌باشد. در این مدل، تابع هزینه تولید (سوخت) بصورت درجه ۲ در نظر گرفته شده است که در آن  $P_{i,t}^g$  توان تولیدی ژنراتور واقع در باس نام در ساعت نام می‌باشد.  $P_{i,t}^{sh}$  توان قطع شده بار باس نام در ساعت نام بوده و  $P_{i,t}^{wc}$  توان قطع شده باد در باس نام در ساعت نام می‌باشد. پارامترهای  $VOLL$  و  $WCC$  نیز بترتیب نشان‌دهنده ارزش بار قطع شده و توان باد قطع شده می‌باشند.

$$\min OF = \sum_{i \in \Omega_G} \sum_{t \in \Omega_T} \left[ a_i (P_{i,t}^g)^2 + b_i P_{i,t}^g + c_i \right] + \sum_{i \in \Omega_B} \sum_{t \in \Omega_T} (VOLL \times P_{i,t}^{sh}) + \sum_{i \in \Omega_W} \sum_{t \in \Omega_T} (WCC \times P_{i,t}^{wc}) \quad (9)$$

۲-۴-۲- قیود

قیود مسئله مطابق روابط (۱۰)-(۲۸) ذکر گردیده‌اند. قیود (۱۰) تا (۱۳) روابط مربوط به برقراری معادلات پخش بار طبق مدل AC می‌باشند. قید (۱۴) محدوده قابل قبول ولتاژ را نشان می‌دهد. قیود (۱۵) و (۱۶) محدودیت توان تولیدی اکتیو و راکتیو ژنراتورها بوده و قیدهای (۱۷) و (۱۸) مربوط به محدودیت نرخ افزایش و کاهش توان در ژنراتورها می‌باشد. روابط (۱۹) و (۲۰) مربوط به ظرفیت حرارتی استاتیکی و دینامیکی خطوط می‌باشند. قید (۲۱) ظرفیت حرارتی ترانسفورماتور بدون DTR را نشان می‌دهد و روابط (۲۲) تا (۲۵) نیز مدل کننده محدودیت‌های حاکم بر ترانسفورماتورهای دارای DTR می‌باشند. رابطه (۲۶) محدودیت قطع بار در باسهای شبکه را نشان می‌دهد و نهایتاً قیود (۲۷) و (۲۸) محدودیت مربوط به تولید توان بادی و قطع توان بادی را نشان می‌دهند. متغیرهای پارامترهای مربوط به معادلات (۱۰)-(۲۸) در قسمت پیوست تعریف گردیده‌اند.

۳- مطالعات عددی

۳-۱- شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه در این مقاله، شبکه ۲۴ باسه IEEE RTS مطابق شکل (۱) می‌باشد. این شبکه که شامل سطوح ولتاژ ۱۳۸ و ۲۳۰ کیلوولت می‌باشد، دارای ۳۴ خط انتقال، ۵ ترانسفورماتور، و ۹ واحد نیروگاهی می‌باشد. اطلاعات مربوط به شبکه شامل مشخصات خطوط، بارها، و ژنراتورها در [۱۵] آورده شده است. طبق [۱۱] و [۱۶] سه نیروگاه بادی با ظرفیت نامی ۴۰۰ مگاوات در باسهای ۱۶، ۲۱، و ۲۳ نصب شده‌اند.

با توجه به رابطه (۱)، دو نوع ظرفیت حرارتی برای خطوط قابل تعریف است. حالت اول این است که در تمامی شرایط بهره‌برداری (تمامی زمانها) حداکثر مقدار مجاز  $75^\circ\text{C}$  برای دمای هادی (TC) در نظر گرفته شده و بدینانه‌ترین شرایط محیطی یعنی کمترین سرعت وزش باد و بیشترین دما برای محیط (مثلاً  $40^\circ\text{C}$ ) لحاظ گردد. به این ترتیب یک حد محافظه کارانه و قابل اطمینان برای جریان مجاز عبوری از سیم بدست می‌آید که ظرفیت حرارتی استاتیکی نامیده می‌شود. حالت دوم این است که جریان مجاز سیم در هر لحظه (یا بازه زمانی) با توجه به شرایط محیطی آن لحظه محاسبه شده و در بهره‌برداری شبکه بصورت هوشمند استفاده گردد. به این نوع از ظرفیت، ظرفیت حرارتی دینامیکی خط اطلاق می‌گردد. طبق رابطه (۱)، جریان عبوری از سیم باعث تغییر دمای سیم می‌گردد. این تغییر دما باید بگونه‌ای باشد که در تمامی بازه‌های زمانی دمای سیم از حد مجاز  $(75^\circ\text{C})$  فراتر نرود.

۲-۲- ظرفیت دینامیکی ترانسفورماتورها

برخلاف خطوط، عامل محدود کننده در جریان عبوری از ترانسفورماتورها دما شامل دمای روغن بالا (TOT) و دمای نقطه داغ سیم‌پیچ (HST) ترانسفورماتور می‌باشد [۱۳]. این دو دما بترتیب توسط روابط (۶) و (۷) بیان می‌گردند. این دماها بطور دینامیکی وابسته به جریان عبوری از ترانسفورماتور در زمان  $t$  ( $I_{tr}(t)$ )، مشخصات ساختمانی و خنک‌کاری آن ( $\theta_{hr}$  و  $K_3$ ،  $K_2$ ،  $K_1$ ) و دمای لحظات قبلی ترانسفورماتور می‌باشند.

$$\theta_{top}(t) = K_1 I_{tr}^2(t) + K_2 \theta_{amb}(t) + (1 - K_2) \theta_{top}(t-1) + K_3 \quad (6)$$

$$\theta_{hst}(t) = \theta_{hr} I_{tr}^2(t) + \theta_{top}(t) \quad (7)$$

در شرایط مختلف بهره‌برداری، دمای روغن بالای ترانسفورماتور ( $\theta_{top}$ ) و دمای نقطه داغ سیم‌پیچ ( $\theta_{hst}$ ) باید از مقادیر مجاز مربوطه پایین تر باشند.

۳-۲- مدل توان تولیدی بادی

توان تولیدی در توربین بادی بر اساس مشخصه توان-سرعت بصورت رابطه (۸) می‌باشد که در آن  $V_w$  و  $P_w$  سرعت و توان بادی بوده و  $V_{rated}$ ،  $V_{cut-out}$  و  $V_{cut-in}$  بترتیب سرعت نامی، سرعت قطع پایین و سرعت قطع بالای توربین می‌باشند.  $P_{rated}$  نیز توان نامی توربین می‌باشد [۱۴].

$$P_w = \begin{cases} 0; & V_w < V_{cut-in} \\ P_{rated} \times \frac{V_w - V_{cut-in}}{V_{rated} - V_{cut-in}}; & V_{cut-in} \leq V_w < V_{rated} \\ P_{rated}; & V_{rated} \leq V_w < V_{cut-out} \\ 0; & V_w \geq V_{cut-out} \end{cases} \quad (8)$$



$$P_{i,t}^g + P_{i,t}^w - (P_{i,t}^d - P_{i,t}^{sh}) = \sum_{j \in \Omega_B} P_{ij,t}; \quad \forall i \in \Omega_B, \forall t \in \Omega_T \quad (10)$$

$$Q_{i,t}^g + Q_{i,t}^w - (Q_{i,t}^d - Q_{i,t}^{sh}) = \sum_{j \in \Omega_B} Q_{ij,t}; \quad \forall i \in \Omega_B, \forall t \in \Omega_T \quad (11)$$

$$P_{ij,t} = \sum_{j \in \Omega_B} |V_{i,t}| |V_{j,t}| |Y_{ij}| \cos(\delta_{i,t} - \delta_{j,t} - \theta_{ij}); \quad \forall ij \in \Omega^\ell, \forall t \in \Omega_T \quad (12)$$

$$Q_{ij,t} = \sum_{j \in \Omega_B} |V_{i,t}| |V_{j,t}| |Y_{ij}| \sin(\delta_{i,t} - \delta_{j,t} - \theta_{ij}); \quad \forall ij \in \Omega^\ell, \forall t \in \Omega_T \quad (13)$$

$$V^{min} \leq |V_{i,t}| \leq V^{max}; \quad \forall i \in \Omega_B, \forall t \in \Omega_T \quad (14)$$

$$P_{i,min}^g \leq P_{i,t}^g \leq P_{i,max}^g; \quad \forall i \in \Omega_G, \forall t \in \Omega_T \quad (15)$$

$$Q_{i,min}^g \leq Q_{i,t}^g \leq Q_{i,max}^g; \quad \forall i \in \Omega_G, \forall t \in \Omega_T \quad (16)$$

$$P_{i,t}^g - P_{i,t-1}^g \leq RU_i; \quad \forall i \in \Omega_G, \forall t \in \Omega_T \quad (17)$$

$$P_{i,t-1}^g - P_{i,t}^g \leq RD_i; \quad \forall i \in \Omega_G, \forall t \in \Omega_T \quad (18)$$

$$I_{ij,t} \leq I_{ij}^{st}, \quad \forall ij \in \Omega_{SLR}^\ell, \forall t \in \Omega_T \quad (19)$$

$$I_{ij,t} \leq I_{ij,t}^{dyn}, \quad \forall ij \in \Omega_{DLR}^\ell, \forall t \in \Omega_T \quad (20)$$

$$I_{tr,t} \leq I_{tr}^{st}, \quad \forall tr \in \Omega_{STR}^{tr}, \forall t \in \Omega_T \quad (21)$$

$$\theta_{top,t}^{tr} \leq \theta_{top}^{max}; \quad \forall tr \in \Omega_{DTR}^{tr}, \forall t \in \Omega_T \quad (22)$$

$$\theta_{hst,t}^{tr} \leq \theta_{hst}^{max}; \quad \forall tr \in \Omega_{DTR}^{tr}, \forall t \in \Omega_T \quad (23)$$

$$\theta_{top,t}^{tr} = K_1 I_{tr,t}^2 + K_2 \theta_{amb,t} + (1 - K_2) \theta_{top,t-1} + K_3; \quad \forall tr \in \Omega_{DTR}^{tr}, \forall t \in \Omega_T \quad (24)$$

$$\theta_{hst,t}^{tr} = \theta_{hr} I_{tr,t}^2 + \theta_{top,t}^{tr}; \quad \forall tr \in \Omega_{DTR}^{tr}, \forall t \in \Omega_T \quad (25)$$

$$P_{i,t}^{sh} \leq P_{i,t}^d; \quad \forall i \in \Omega_B, \forall t \in \Omega_T \quad (26)$$

$$P_{i,t}^w \leq P_{i,t}^{av}; \quad \forall i \in \Omega_W, \forall t \in \Omega_T \quad (27)$$

$$P_{i,t}^{wc} = P_{i,t}^{av} - P_{i,t}^w; \quad \forall i \in \Omega_W, \forall t \in \Omega_T \quad (28)$$

توان بادی قطع شده بترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۱۰۰ دلار در نظر گرفته شده‌اند. در مورد قید ولتاژ نیز حداقل و حداکثر مقدار مجاز اندازه ولتاژ بترتیب برابر ۰/۹۵ و ۱/۰۵ پریونیت لحاظ گردیده‌اند. تغییرات بار، دمای محیط ( $T_a$ )، سرعت وزش باد ( $V_W$ )، و شدت تابش خورشید ( $Q_{se}$ ) در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات مربوط به مدل دمایی ترانسفورماتور

| پارامتر       | مقدار  |
|---------------|--------|
| توان نامی     | 140MVA |
| $K_1$         | 5.7    |
| $K_2$         | 0.175  |
| $K_3$         | 1.009  |
| $\theta_{hr}$ | 20.3°C |

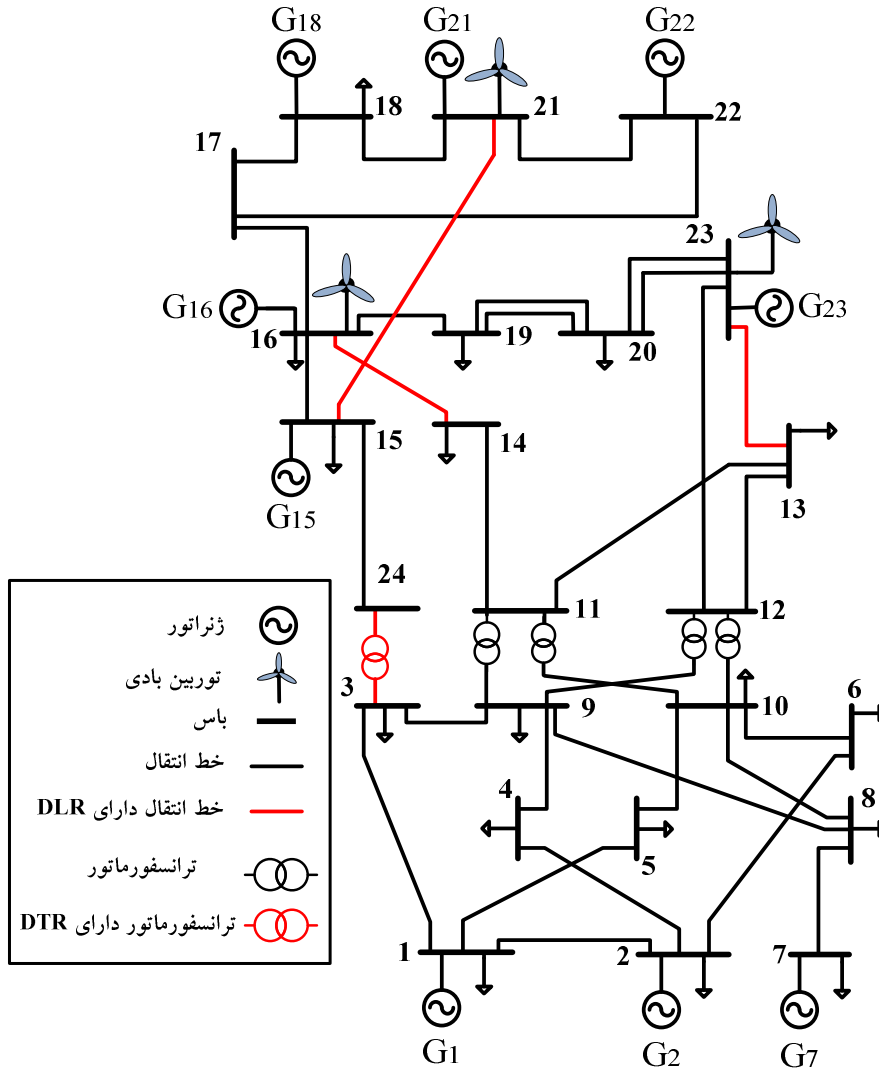
برای توربین‌های بادی، سرعت قطع پایین، سرعت نامی، و سرعت قطع بالا بترتیب برابر با ۴، ۱۴، و ۲۵ متر بر ثانیه می‌باشند. برای تحت استرس قرار دادن شبکه، ظرفیت خطوط ۲۳-۱۳، ۱۶-۱۴، و ۲۱-۱۵ از مقدار ۵۰۰، ۵۰۰، و ۱۰۰۰ مگاوات‌آمپر به ترتیب به مقادیر ۲۰۰، ۲۰۰، و ۳۲۰ مگاوات-آمپر کاهش داده شده‌اند و این خطوط مجهز به DLR شده‌اند تا اثر ظرفیت دینامیکی بر عملکرد شبکه بررسی شود. ظرفیت استاتیکی ترانسفورماتور موجود در مسیر ۲۴-۳ نیز ۱۵۰ مگاوات‌آمپر در نظر گرفته شده و بر روی این ترانسفورماتور DTR نصب گردیده است. در محاسبه ظرفیت دینامیکی ترانسفورماتور، مشخصات جدول (۱) مورد استفاده قرار گرفته است. در مورد خطوط، حداکثر دمای مجاز 75°C لحاظ شده است. در مورد ترانسفورماتور نیز حداکثر دمای قابل قبول برای دمای روغن بالا و نقطه داغ سیم‌پیچ بترتیب برابر 95°C و 110°C در نظر گرفته شده‌اند. ارزش بار قطع شده و

# هفتمین کنفرانس بین المللی فناوری و مدیریت انرژی

با رویکرد آب، انرژی و گرمایش جهانی

۹ و ۱۰ شهریور ۱۴۰۰

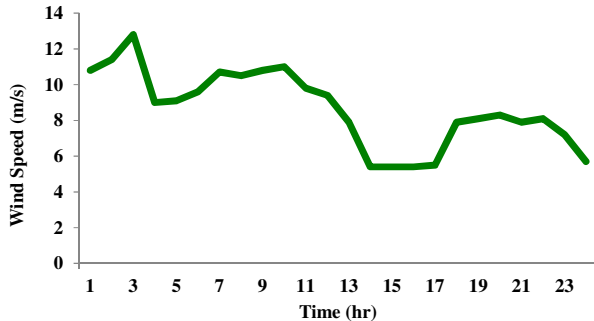
ایران - اردبیل



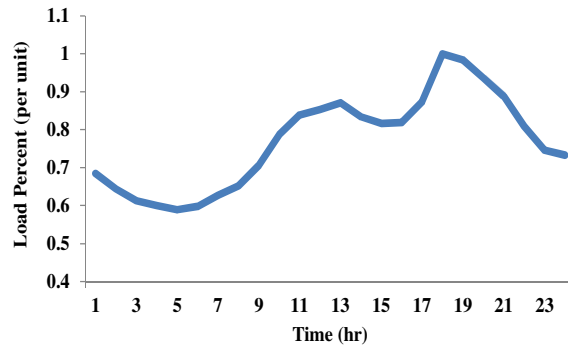
شکل (۱): شبکه ۲۴ باسه IEEE-RTS مورد مطالعه

جدول (۱): سناریوهای مورد مطالعه در شبکه ۲۴ باسه

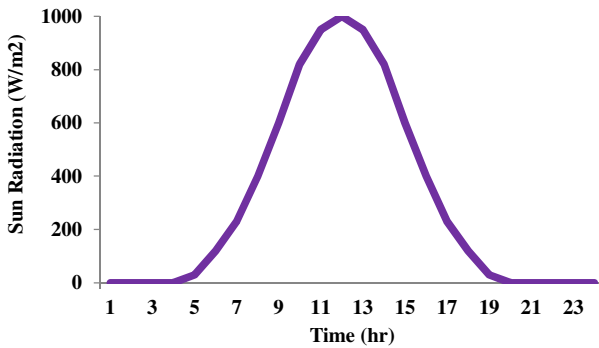
| سناریو | عنوان   | خطوط     |                                    | ترانسفورماتورها |  |
|--------|---------|----------|------------------------------------|-----------------|--|
|        |         | ظرفیت    | قید                                | ظرفیت           | قید  |
| ۱      | SLR-STR | استاتیکی | $I_{\ell,t} \leq I_{\ell}^{st}$    | استاتیکی        | $I_{tr,t} \leq I_{tr}^{st}$  |
| ۲      | SLR-DTR | استاتیکی | $I_{\ell,t} \leq I_{\ell}^{st}$    | دینامیکی        | $\theta_{top,t}^{tr} \leq \theta_{top}^{max}; \theta_{hst,t}^{tr} \leq \theta_{hst}^{max}$ |
| ۳      | DLR-STR | دینامیکی | $I_{\ell,t} \leq I_{\ell,t}^{dyn}$ | استاتیکی        | $I_{tr,t} \leq I_{tr}^{st}$  |
| ۴      | DLR-DTR | دینامیکی | $I_{\ell,t} \leq I_{\ell,t}^{dyn}$ | دینامیکی        | $\theta_{top,t}^{tr} \leq \theta_{top}^{max}; \theta_{hst,t}^{tr} \leq \theta_{hst}^{max}$ |



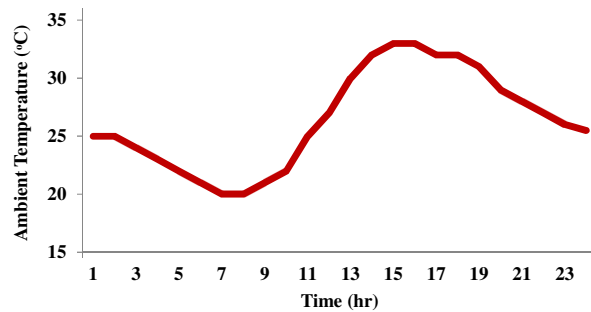
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۲): اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی (الف): درصد بار شبکه (ب): سرعت وزش باد (ج): دمای محیط (د): شدت تابش خورشید

### ۳-۳- محیط شبیه‌سازی

مدل ارائه شده در این مقاله در محیط نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی و اجرا شده است. نرم‌افزار مذکور یک بسته بهینه‌سازی صنعتی است که برای مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت بسیار مناسب است [۱۷]. برای حل مسئله مورد نظر، از مدل (Dynamic Nonlinear) DNLP (Programming) و حلگر Conopt4 استفاده شده است.

### ۴-۳- نتایج شبیه‌سازی

جدول (۲) مولفه‌های مختلف هزینه را در ۴ حالت (سناریوی) مطالعاتی نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد در سناریوی ۱ که DLR و DTR حضور ندارند، هزینه‌های بهره‌برداری، قطع بار و قطع توان بادی زیاد است. لازم به ذکر است که قطع توان بادی بیشتر در ساعات ابتدایی روز که بار شبکه کم بوده و مقدار سرعت باد (طبق شکل ۲-ب) بالاست اتفاق می‌افتد. این انقطاع توان بادی معمولاً بدلیل قید اضافه ولتاژ و یا قیود واحدهای حرارتی اتفاق می‌افتد. طبق جدول (۲)، مولفه‌های هزینه در صورت استفاده از واحدهای DLR و DTR کاهش می‌یابند. در سناریوی ۴ که هر دو تجهیز DLR و DTR حضور دارند، هزینه کل نسبت به سناریوی ۱ حدود ۱۹ درصد کاهش داشته و هزینه قطع بار و قطع باد نیز صفر گردیده است. به

عبارت دیگر حضور تجهیزات مذکور، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم و نیز استفاده حداکثری از ظرفیت منابع بادی شده است. بگونه‌ای که در این سناریو، تمام توان تولید شده واحدهای بادی توسط شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل (۳) به عنوان نمونه، توان تولیدی ژنراتور G22 را در دو سناریوی ۱ و ۴ نشان می‌دهد. ژنراتور مذکور ارزانه‌ترین ژنراتور سیستم است. شکل مورد نظر نشان می‌دهد که ژنراتور ارزان G22 در سناریوی ۱ در ساعات ابتدایی روز توان کمی تولید می‌کند که این امر بدلیل محدودیت‌های بارگذاری خطوط و یا ولتاژ باسها می‌باشد. اما در سناریوی ۴، حضور DLR و DTR باعث شده است تا این ژنراتور در ساعات ابتدایی روز نیز دیسپچ شده و باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری گردد.

شکل (۴) بارگذاری خط ۱۶-۱۴ را به‌عنوان یکی از خطوطی که روی آن DLR نصب شده است در سناریوهای ۱ و ۴ مقایسه می‌کند. طبق این شکل در سناریوی ۱، تقریباً در تمامی ساعات شبانه‌روز از ظرفیت استاتیکی این خط به طور کامل (۱۰۰ درصد یا ۱ پیرونی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته ظرفیت واقعی این خط در لحظات مختلف شبانه‌روز بیش از این مقدار است و همانگونه که منحنی قرمز رنگ نشان می‌دهد، در





انجمن  
انرژی  
ایران



$V_{i,t}$  و  $\delta_{i,t}$ : اندازه و زاویه ولتاژ باس آم در ساعت آم؛

$Y_{ij}$  و  $\theta_{ij}$ : اندازه و زاویه ادمیتانس خط ij؛

$RU_i$  و  $RD_i$ : نرخ افزایش و کاهش توان تولیدی ژنراتور نصب شده در باس آم؛

$I_{ij,t}$  و  $I_{tr,t}$ : جریان عبوری از خط ij یا ترانسفورماتور tr در زمان آم؛

$I_{ij}^{st}$  و  $I_{tr}^{st}$ : ظرفیت جریانی استاتیکی خط ij یا ترانسفورماتور tr؛

$\theta_{top,t}^{tr}$  و  $\theta_{hst,t}^{tr}$ : دمای روغن بالا و دمای نقطه داغ ترانسفورماتور tr آم در زمان آم؛

$\Omega_B$ : مجموعه باسهای شبکه؛

$\Omega_G$ : مجموعه ژنراتورهای شبکه؛

$\Omega_W$ : مجموعه باسهای دارای نیروگاه بادی؛

$\Omega_T$ : مجموعه ساعت‌های بهره‌برداری در یک روز؛

$\Omega_W$ : مجموعه باسهای دارای نیروگاه بادی؛

$\Omega^L$ : مجموعه کل خطوط شبکه؛

$\Omega_{SLR}^L$ : مجموعه خطوط بدون DLR؛

$\Omega_{DLR}^L$ : مجموعه خطوط دارای DLR؛

$\Omega_{STR}^{tr}$ : مجموعه ترانسفورماتورهای بدون DTR؛

$\Omega_{DTR}^{tr}$ : مجموعه ترانسفورماتورهای دارای DTR؛

### ۶- مراجع

- [1] A. Meng, C. Zeng, P. Wang, D. Chen, T. Zhou, X. Zheng, H. Yin, "A high-performance crisscross search based grey wolf optimizer for solving optimal power flow problem." *Energy*, vol. 225, p. 120211, 2021.
- [2] L. Shi, C. Wang, L. Yao, Y. Ni, and M. Bazargan, "Optimal power flow solution incorporating wind power," *IEEE Syst. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 233-241, 2011.
- [3] N. Viafora, S. Delikaraoglou, P. Pinson, and J. Holbøll, "Chance-constrained optimal power flow with non-parametric probability distributions of dynamic line ratings," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 114, p. 105389, 2020.
- [4] S. R. Salkuti, "Congestion management using optimal transmission switching," *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 3555-3564, 2018.
- [5] A. Bagheri, H. Monsef, H. Lesani, "Renewable power generation employed in an integrated dynamic distribution network expansion planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 1, no. 127, pp. 280-296, 2015.
- [6] B. Das B, "Uncertainty modelling of wind turbine generating system in power flow analysis of radial distribution network," *Electric Power Systems Research*, vol. 1, no. 111, pp. 141-147, 2014.

حضور DLR و DTR، این خط در ساعاتی از روز حتی تا مقدار ۱/۶ پریونیت (یعنی ۶۰ بیشتر از ظرفیت استاتیکی آن) نیز بارگذاری شده و با این کار باعث کاهش هزینه کل سیستم شده است. شکل (۵) نیز منحنی مشابهی را برای ترانسفورماتور مسیر ۲۴-۳ که به DTR مجهز شده است نشان می‌دهد. این شکل نیز بیانگر استفاده حداکثری از ظرفیت لحظه‌ای ترانسفورماتور نسبت به ظرفیت استاتیکی آن با رعایت قیود دمایی است بگونه‌ای که طبق شکل (۶) دمای نقطه داغ ترانسفورماتور (HST) در تمامی بازه‌های زمانی روز کمتر از ۱۱۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. دمای خط ۲۱-۱۵ نیز در شکل (۷) نشان داده شده است. مقایسه سناریوهای ۱ و ۴ طبق این شکل بیانگر استفاده بیشتر از ظرفیت این خط با رعایت حد مجاز دمایی می‌باشد. لازم به ذکر است که در تمامی موارد مطرح شده محدودیت ولتاژ باسها رعایت شده است. به عنوان مثال در سناریوی ۴ ولتاژ سه باس نمونه از شبکه در شکل (۸) نمایش داده شده‌اند. طبق این شکل اندازه ولتاژ باسهای ۵ و ۷ و ۸ در تمامی ساعت‌های شبانه‌روز در محدوده مجاز ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت قرار دارد.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی برای بهره‌برداری بهینه واحدهای نیروگاهی برای روز پیش رو با در نظر گرفتن ظرفیت دینامیکی خطوط و ترانسفورماتورها ارائه گردید. هدف ارائه برنامه‌ریزی بهینه واحدها برای تأمین بار شبکه در ۲۴ ساعت روز آینده با در نظر گرفتن توان تولیدی بادی و مدل AC برای پخش بار می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حضور تجهیزات DLR و DTR شرایط بهره‌برداری از شبکه بهبود می‌یابد که این بهبود شامل کاهش هزینه‌ها، کاهش قطع بار (افزایش قابلیت اطمینان شبکه) و استفاده حداکثری از ظرفیت تولیدات بادی می‌باشد. بطور کلی می‌توان گفت مدل ارائه شده باعث بهبود شرایط بهره‌برداری شبکه با رعایت تمامی قیود بهره‌برداری می‌گردد.

### ۵- پیوست: پارامترها و متغیرهای استفاده شده در معادلات

DLR: Dynamic Line Rating

DTR: Dynamic Thermal Rating

$P_{i,t}^{sh}$  و  $P_{i,t}^w$ ،  $P_{i,t}^d$ : توانهای اکتیو مربوط به بار، تولید بادی، و قطع بار در باس آم در ساعت آم؛

$P_{i,t}^{av}$ : ظرفیت در دسترس توربین بادی واقع در باس آم در ساعت آم؛

$Q_{i,t}^{sh}$  و  $Q_{i,t}^w$ ،  $Q_{i,t}^d$ : توانهای راکتیو مربوط به بار، تولید بادی، و قطع بار در باس آم در ساعت آم؛

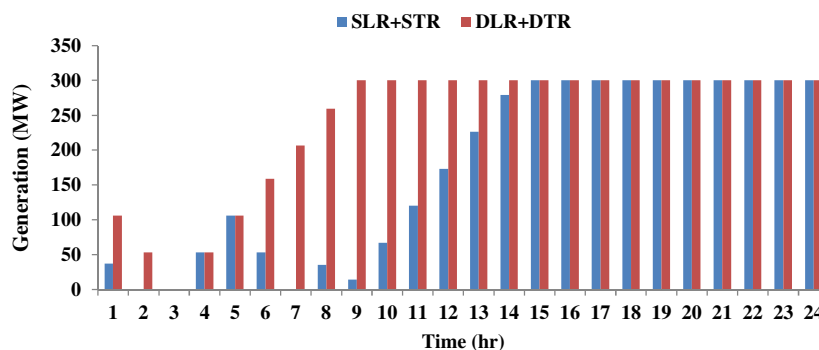
$Q_{ij,t}$  و  $P_{ij,t}$ : توانهای اکتیو و راکتیو عبوری از خط بین باسهای i و j در ساعت آم؛



- [12] A. Bagheri, H. Monsef, H. Lesani, "Renewable power generation employed in an integrated dynamic distribution network expansion planning", Electric Power Systems Research. vol. 127, pp.280-296, 2015.
- [13] IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators, IEEE std c57. 91-2011 (March 2012). doi:10.1109/IEEESTD. 2012.6166928.
- [14] Transmission and Distribution Committee, 2012. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE Std, 738.
- [15] C. Grigg et al., "The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020, 1999.
- [16] C. Ordoudis, P. Pinson, M. Zugno, "An updated version of the IEEE RTS 24-bus system for electricity market and power system operation studies," Technical University of Denmark (DTU), pp. 1-5, 2016.
- [17] A. Soroudi, "Power system optimization modeling in GAMS", Switzerland: Springer; 2017 Aug 29.
- [7] C. Murphy, A. Soroudi, A. Keane, "Information gap decision theory-based congestion and voltage management in the presence of uncertain wind power," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 26, no. 7, pp. 841-849, 2015.
- [8] F. Capitanescu, "Critical review of recent advances and further developments needed in AC optimal power flow," Electric Power Systems Research. vol. 1, no. 136, pp. 57-68, 2016.
- [9] M. Sheikh, J. Aghaei, A. Letafat, M. Rajabdorri, T. Niknam, M. Shafie-Khah, M. JP. Catalão, "Security-constrained unit commitment problem with transmission switching reliability and dynamic thermal line rating," IEEE Systems Journal, vol. 3, no. 4, pp. 3933-3943, 2019.
- [10] H. Park, YG. Jin, JK. Park, "Stochastic security-constrained unit commitment with wind power generation based on dynamic line rating," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 102, pp. 211-222, 2018.
- [11] N. Viafora, K. Morozovska, SH. Kazmi, T. Laneryd, P. Hilber, J. Holbøll, "Day-ahead dispatch optimization with dynamic thermal rating of transformers and overhead lines," Electric Power Systems Research, vol. 171, pp.194-208, 2019.

جدول (۲): مولفه‌های هزینه در سناریوهای مورد مطالعه

| سناریو | هزینه بهره برداری از واحدهای نیروگاهی | هزینه قطع بار (\$) | هزینه قطع توان بادی (\$) | تابع هدف (\$) |
|--------|---------------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------|
| ۱      | ۵۱۶۷۹۲                                | ۱۴۷۱۲۴             | ۲۶۷۰۲                    | ۶۹۰۶۱۸        |
| ۲      | ۵۱۹۲۴۱                                | ۱۰۵۱۵۲             | ۲۶۷۰۲                    | ۶۵۱۰۹۵        |
| ۳      | ۴۹۰۰۶۰                                | ۶۰۴۸۸              | ۹۰۷۹                     | ۵۵۹۶۲۴        |
| ۴      | ۴۴۴۱۰۳                                | ۰                  | ۰                        | ۴۴۴۱۰۳        |



شکل (۳): توان تولیدی ژنراتور G22 در سناریوهای ۱ و ۴

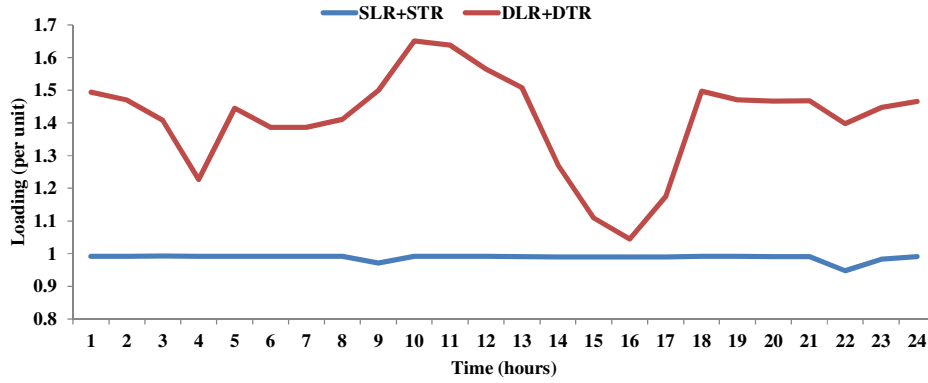


# هفتمین کنفرانس بین المللی فناوری و مدیریت انرژی

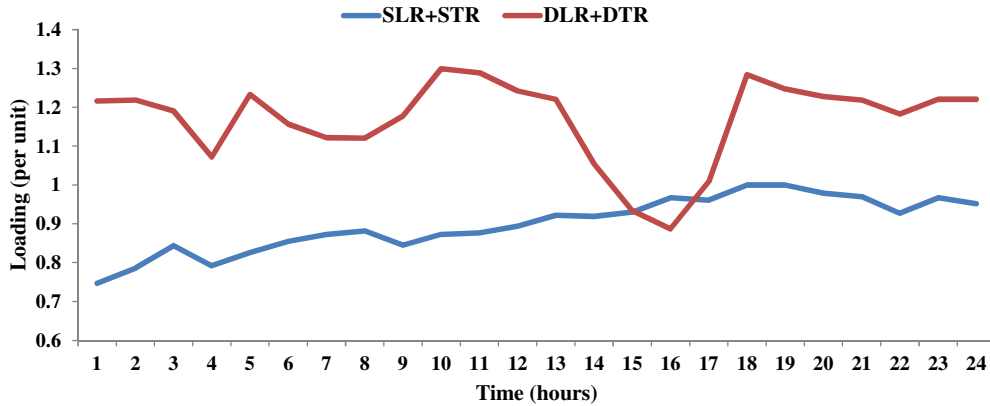
با رویکرد آب، انرژی و گرمایش جهانی

۹ و ۱۰ شهریور ۱۴۰۰

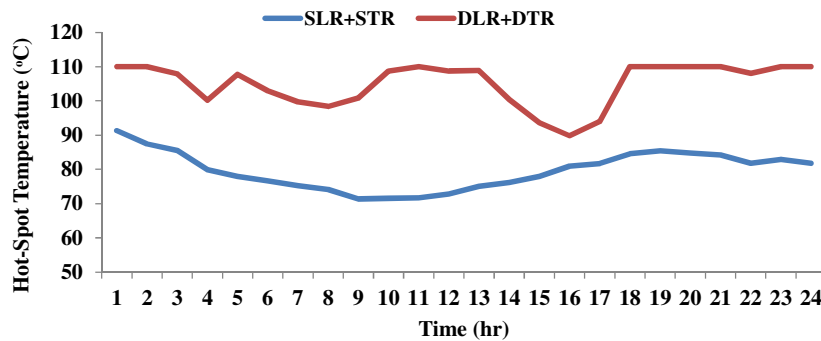
ایران - اردبیل



شکل (۴): بارگذاری خط ۱۶-۱۴ در سناریوهای ۱ و ۴



شکل (۵): بارگذاری ترانسفورماتور ۲۴-۳ در سناریوهای ۱ و ۴



شکل (۶): دمای نقطه داغ ترانسفورماتور در سناریوهای ۱ و ۴

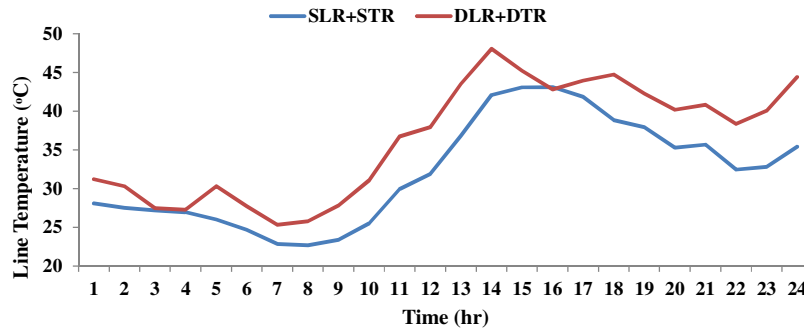


# هفتمین کنفرانس بین المللی فناوری و مدیریت انرژی

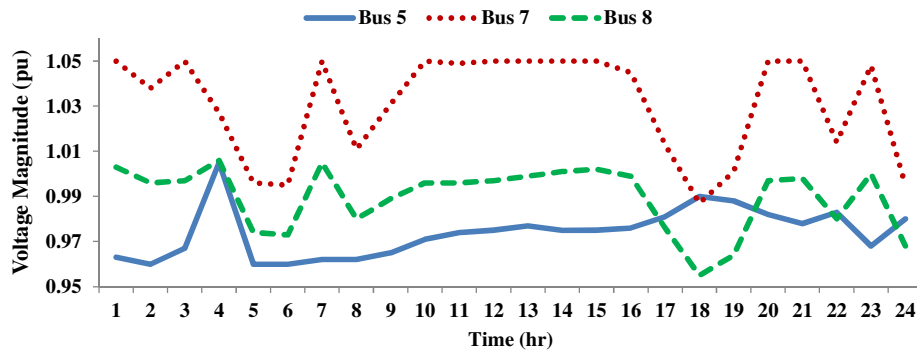
## با رویکرد آب، انرژی و گرمایش جهانی

۹ و ۱۰ شهریور، ۱۴۰۰

ایران - اردبیل



شکل (۷): دمای خط ۲۱-۱۵ ترانسفورماتور در سناریوهای ۱ و ۴



شکل (۸): پروفیل ولتاژ باس‌های ۵ و ۷ و ۸ در سناریوی ۴