

# بررسی امکان تأمین بارهای پراکنده در مسیر خطوط انتقال فشار قوی

مهدی احسان (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

نصرالله بوزش (کارشناس ارشد)

شرکت توزیع نیروی برق استان بوشهر

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور بررسی امکان تأمین بارهای پراکنده در مسیر خطوط انتقال فشار قوی، ابتدا یک مدل ریاضی برای جذب قدرت الکتریکی از یک یا چند سیم در مجاورت خطوط انتقال - با در نظر گرفتن اثر زمین - تدوین شد. سپس به وسیله‌ی یک برنامه‌ی رایانه‌ی تغییرات ولتاژ الکتروستاتیک القایی، توان قابل جذب و میزان افت ولتاژ ناشی از بارگیری برای متغیرهای مختلف هندسی و الکتریکی خطوط در محیط مطلوب شبیه‌سازی شدند. در نتیجه‌ی شبیه‌سازی، استفاده از سیم‌گارد برای آرایش‌های مختلف مطرح شد، و سیستم خاصی به منظور استفاده از یک سیم‌گارد و زمین برای یک مورد خط ۳۰۰ کیلوولت پیشنهاد شد. میزان ولتاژ، ضریب تنظیم و حداکثر توان قابل جذب برای واحد طول خط در حالت‌های مختلف محاسبه، و با دو روش استفاده از ترانس‌های اندازه‌گیری ولتاژ و روش متداول توزیع مقایسه شدند. در نهایت تأثیر این روش بر حفاظت خط توسط EMTP شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت.

## مقدمه

برق‌رسانی به مناطق دور دست یا کوهستانی به دلیل پراکندگی و سختی رفت و آمد، امری بس دشوار، غیراقتصادی و گاهی غیرممکن است. با توجه به این که خطوط انتقال نیرو در سطح وسیعی از کشور گسترش دارد و معمولاً از مناطق روستایی و دورافتاده عبور می‌کند، مناسب است که تأمین توان مورد نیاز این مناطق از شبکه‌های انتقال مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور دو روش غیرمتعارف برق‌رسانی به این مناطق را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

روش اول - ترانس‌های اندازه‌گیری: استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ و اتصال مستقیم آن به شبکه‌های فشارقوی که این ترانسفورماتورها اصولاً مشابه ترانسفورماتورهای ولتاژ، کم‌قدرت که در اندازه‌گیری و کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرند طراحی و ساخته می‌شوند.

روش دوم - القاء الکتروستاتیک: استفاده از سیم زمین عایق‌بندی شده در طول معینی از خط برای جذب قدرت از طریق کوپلاژ خازنی است. این روش به دقت مورد مدل‌سازی و بررسی قرار گرفته و در نهایت به بررسی این دو روش از لحاظ جنبه‌های اقتصادی آنها و مقایسه‌ی آن با احداث خطوط توزیع متداول برای تغذیه‌ی این گونه مصارف پرداخته شده است.

استفاده از سیم عایق‌بندی شده به منظور جذب توان محاسباتی متغیرهای مدار

می‌دانیم که میدان الکتروستاتیکی در اطراف یک بار الکتریکی از

رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود<sup>[۱]</sup>:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x}$$

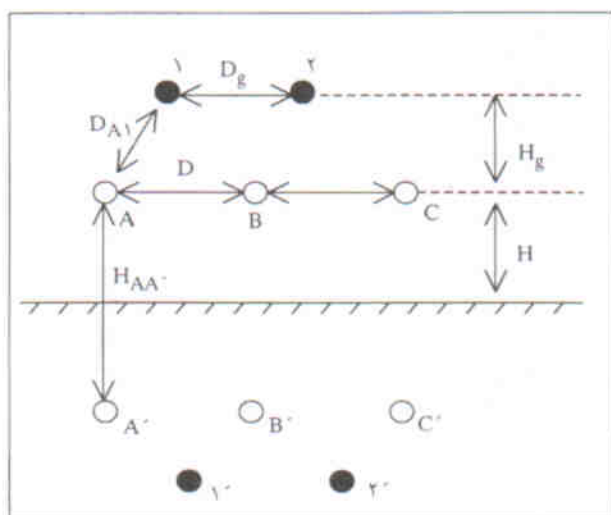
همچنین ولتاژ بین دو نقطه‌ی a و b از طریق رابطه‌ی زیر به دست

می‌آید:

$$V_{ab} = \int_{D_a}^{D_b} E \cdot dx = \int \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} \cdot dx = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[ \frac{D_b}{D_a} \right]$$

با استفاده از رابطه‌های فوق و نیز با توجه به شکل ۱، معادلات ۱ و

۲ را می‌نویسیم. در این معادلات r<sub>g</sub> شعاع سیم محافظ، r شعاع هادی



شکل ۱. خط انتقال با دو سیم محافظ با در نظر گرفتن اثر زمین.

فاز، H ارتفاع فازها از زمین، D فاصله‌ی فازها از هم و  $D_g$  فاصله‌ی سیم‌های محافظ از هم است:

$$\frac{1}{\sqrt{\pi \epsilon_0}} \begin{bmatrix} \ln \frac{H_{AA'}}{r} & \ln \frac{H_{AB'}}{D} & \ln \frac{H_{AC'}}{\sqrt{D}} & \ln \frac{H_{A'V}}{D_{A1}} & \ln \frac{H_{A'V}}{D_{A2}} \\ \ln \frac{H_{AB'}}{D} & \ln \frac{H_{BB'}}{r} & \ln \frac{H_{BC'}}{D} & \ln \frac{H_{B'V}}{D_{B1}} & \ln \frac{H_{B'V}}{D_{B2}} \\ \ln \frac{H_{AC'}}{\sqrt{D}} & \ln \frac{H_{BC'}}{D} & \ln \frac{H_{CC'}}{r} & \ln \frac{H_{C'V}}{D_{C1}} & \ln \frac{H_{C'V}}{D_{C2}} \\ \ln \frac{H_{A'V}}{D_{A1}} & \ln \frac{H_{B'V}}{D_{B1}} & \ln \frac{H_{C'V}}{r_{C1}} & \ln \frac{H_{1'V}}{r_g} & \ln \frac{H_{1'V}}{D_g} \\ \ln \frac{H_{A'V}}{D_{A2}} & \ln \frac{H_{B'V}}{D_{B2}} & \ln \frac{H_{C'V}}{r_{C2}} & \ln \frac{H_{1'V}}{D_g} & \ln \frac{H_{2'V}}{r_g} \end{bmatrix}$$

$P_{AA}$ : ماتریس ضرایب ولتاژ هادی‌ها (فازها)؛  
 $P_{GA}$  و  $P_{AG}$ : ماتریس ضرایب ولتاژ متقابل بین فازها و سیم‌های محافظ؛

$P_{GG}$ : ولتاژ ضرایب سیم‌های محافظ؛

$Q_A$ : بردار بارهای الکتریکی فازها؛

$Q_G$ : بردار بارهای الکتریکی سیم‌های محافظ؛

$V_A$ : بردار ولتاژ فازها؛

$V_G$ : بردار ولتاژ سیم‌های محافظ.

ولتاژ القایی در سیم محافظ طبق قضیه‌ی تونین باید در حالت مدارباز - یعنی در حالتی که  $Q_G$  برابر صفر است - به دست آید. بنابراین طبق معادله‌ی ۳:

$$Q_A = P_{AA}^{-1} \cdot V_A$$

و با جایگزین کردن آن در معادله‌ی ۴ داریم:

$$V_G = P_{GA} P_{AA}^{-1} \cdot V_A \quad (5)$$

از معادله‌ی ۵ با محاسبه‌ی مقادیر  $P_{AA}$  و  $P_{GA}$  که بستگی به شکل خط و دکل آن و ولتاژ خط دارد به راحتی می‌توان ولتاژ سیم‌های محافظ و زاویه‌ی آنها ( $\theta$  و  $U$ ) را محاسبه کرد.

برای به دست آوردن ظرفیت‌های خازنی  $C_{1g}$  و  $C_{2g}$  و  $C_{12}$  برای سیم‌های محافظ نیز طبق قضیه‌ی تونین باید در حالت اتصال کوتاه برای منابع ولتاژ - یعنی در حالتی که  $V_A$  برابر صفر است - عمل کرد. بنابراین طبق معادله‌ی ۳:

$$Q_A = -P_{AA}^{-1} P_{AG} \cdot Q_G$$

و با جایگزین کردن  $Q_A$  در معادله‌ی ۴ داریم:

$$Q_G = [P_{GG} - P_{GA} P_{AA}^{-1} P_{AG}]^{-1} \cdot V_G$$

$$Q_G = C V_G$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} C_{1g} & C_{12} \\ C_{21} & C_{2g} \end{bmatrix} = [P_{GG} - P_{GA} P_{AA}^{-1} P_{AG}]^{-1}$$

محاسبه‌ی متغیرهای مدار معادل خط ۴۰۰ کیلوولت امیدیه ۲ - شیراز

به منظور محاسبه‌ی متغیرهای الکتریکی مدل ارائه شده ( $U$ ،  $\theta$ ،  $C_{1g}$ ،  $C_{2g}$  و  $P$ )، و با توجه به اطلاعات داده شده و نیز مشخصات دکل‌های خط مذکور (شکل ۲)، اطلاعات ورودی برای دو برنامه‌ی MATLAB و ATP به طور جداگانه اخذ می‌شود. باید یادآور شویم که در محاسبه، ظرفیت خازنی خطوط باندل به جای مقدار G.M.R قرار می‌گیرد:

$$\begin{bmatrix} q_A \\ q_B \\ q_C \\ q_{G1} \\ q_{G2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_{G1} \\ V_{G2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

این معادله‌ی ماتریسی را متناظر معادله‌ی ماتریسی زیر نامگذاری می‌کنیم:

$$\frac{1}{\sqrt{\pi \epsilon_0}} \begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & P_{AC} & P_{AG1} & P_{AG2} \\ P_{BA} & P_{BB} & P_{BC} & P_{BG1} & P_{BG2} \\ P_{CA} & P_{CB} & P_{CC} & P_{CG1} & P_{CG2} \\ P_{G1A} & P_{G1B} & P_{G1C} & P_{G1G1} & P_{G1G2} \\ P_{G2A} & P_{G2B} & P_{G2C} & P_{G2G1} & P_{G2G2} \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} q_A \\ q_B \\ q_C \\ q_{G1} \\ q_{G2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_{G1} \\ V_{G2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

و بالاخره به طور کلی معادله‌ی خلاصه‌شده‌ی زیر را خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} P_{AA} & P_{GA} \\ P_{GA} & P_{GG} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_A \\ Q_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_G \end{bmatrix}$$

از معادله‌ی ماتریسی فوق نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$P_{AA} Q_A + P_{AG} Q_G = V_A \quad (3)$$

$$P_{GA} Q_A + P_{GG} Q_G = V_G \quad (4)$$

متغیرهای این معادله‌ی ماتریسی را چنین تعریف می‌کنیم:

$$C_B = [P_{GG} \cdot G_{GA} \cdot P_{AA}^{-1} \cdot P_{GA}]^{-1} = \begin{bmatrix} 6/433 & -0/512 \\ -0/512 & 6/433 \end{bmatrix}$$

(PF/m)

ولتاژ القایی سیم‌های زمین:

$$V_E = P_{GA} \cdot P_{AA}^{-1} \cdot V_A = \begin{bmatrix} 30/1230 & \angle -14/5799^\circ \\ 30/1230 & \angle 166/5799^\circ \end{bmatrix} \text{KV}$$

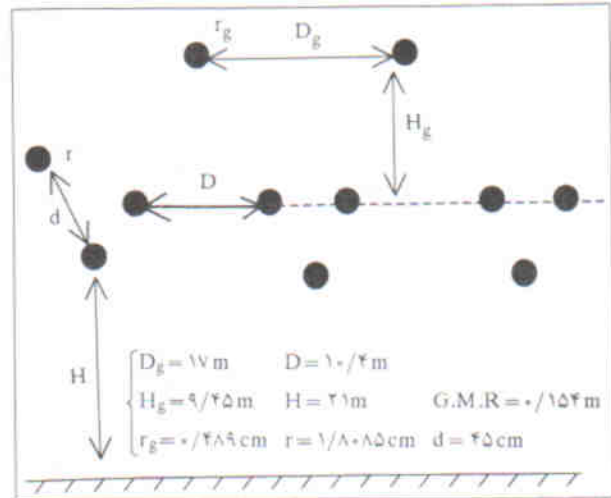
در صورتی که اختلاف زاویه بین دو ولتاژ القایی روی سیم‌های زمین را  $\theta$  بنامیم:

$$\theta = \theta_2 - \theta_1$$

حداکثر توان در یک بار اهمی - هنگامی که یک سیم زمین برای جذب توان عایق‌بندی شده و سیم دیگر گارد به دکل وصل باشد - عبارت است از:

$$P_{I_{max}} = 1/141 \text{ KW/Km}$$

تأثیر متغیرهای سیم زمین بر متغیرهای مدار معادل<sup>[۳]</sup> در شکل‌های ۳ تا ۵ تأثیر متغیرهای سیم زمین، شامل «شعاع سیم زمین» ( $r_g$ )، «ارتفاع سیم زمین از هادی‌های فاز» ( $H_g$ )، و «فاصله ی افقی بین دو سیم زمین» ( $d_g$ ) بر روی متغیرهای مدار معادل ( $C_{1g}$ ،  $C_{12}$ ،  $U_1$  و  $\theta$ ) ارائه شده است. برای بررسی این تأثیرات، متغیرهای سیم زمین را در محدوده‌ی معقول و عملی تغییر داده و نتایج را به صورت نمودار ارائه کرده‌ایم. لازم به توضیح است که در این محاسبات سایر متغیرهای خط انتقال ثابت و مطابق مشخصات خط مذکور است.



شکل ۲. خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت امیدیه - شیراز<sup>[۱]</sup>

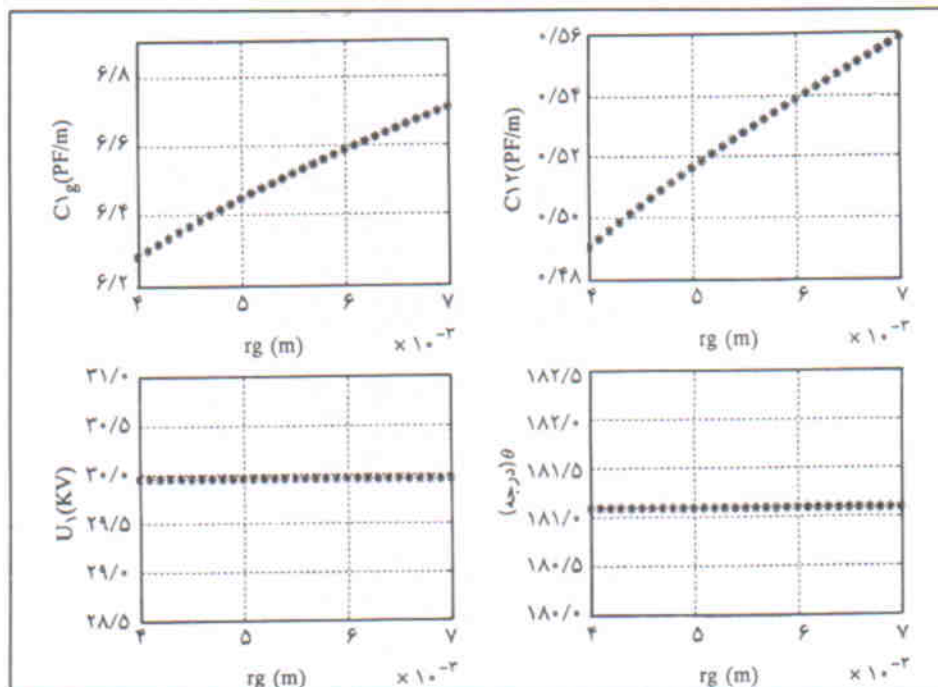
$$G.M.R. = K \cdot \sqrt{rd^{(n-1)}}$$

مقدار K برای باندهای مختلف متفاوت است. مثلاً برای باندل سه‌تایی فوق  $K=1$  است. ماتریس ظرفیت خازنی فازها:

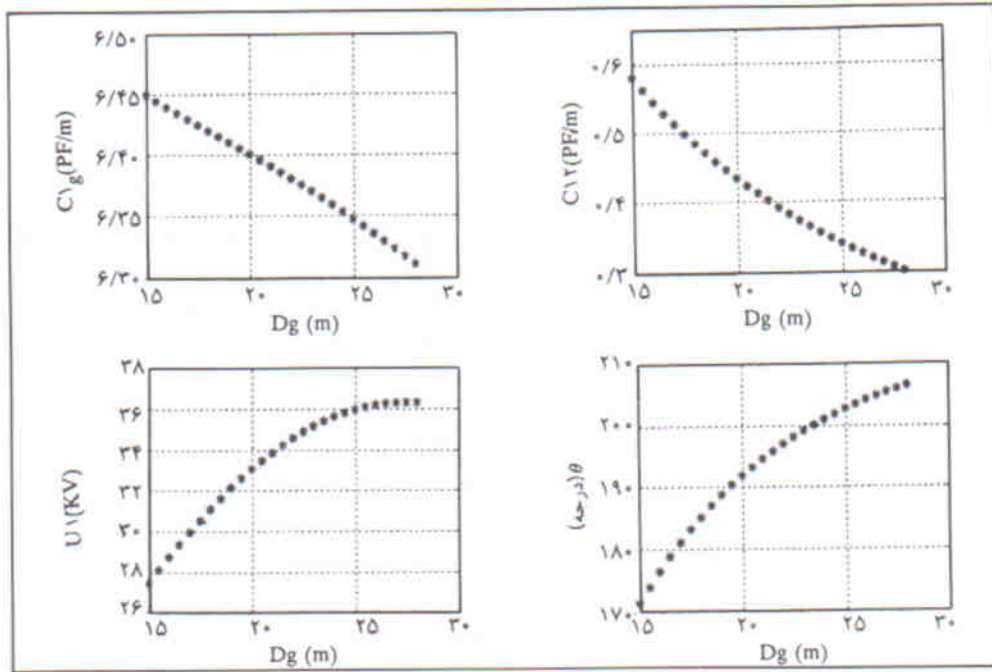
$$C_P = [P_{AA} - P_{AG} \cdot P_{GG}^{-1} \cdot P_{GA}]^{-1}$$

$$= 10^{-10} \begin{bmatrix} 0/1109 & -0/0215 & -0/0066 \\ -0/0215 & 0/1150 & -0/0215 \\ -0/0066 & -0/0215 & 0/1109 \end{bmatrix} \text{ (F/m)}$$

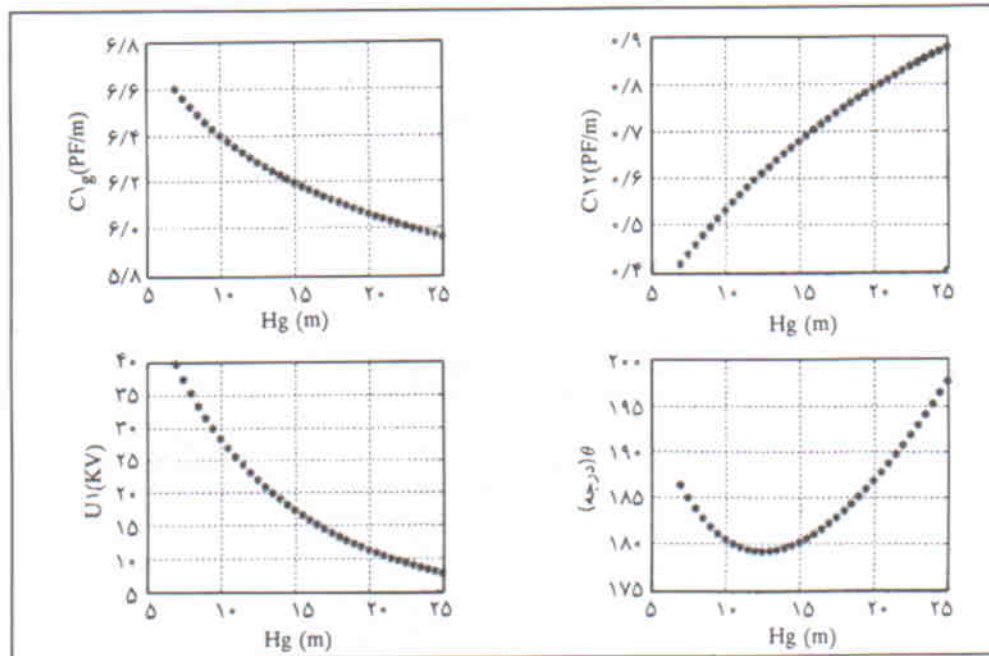
ماتریس ظرفیت خازنی سیم‌های زمین:



شکل ۳. نمودار متغیرهای مدار معادل خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت بر حسب  $r_g$



شکل ۴. نمودار متغیرهای مدار معادل خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت برحسب  $D_g$ .



شکل ۵. نمودار متغیرهای مدار معادل خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت برحسب  $H_g$ .

است که با افزایش ارتفاع  $H_g$ ، ظرفیت خازنی  $C_{1g}$  و ولتاژ القایی  $U$  کاهش می‌یابد، در حالی که ظرفیت خازنی  $C_{1\gamma}$  همراه  $H_g$  افزایش می‌یابد و زاویه در یک بازه  $180^\circ$  تغییر می‌کند.

### بررسی اقتصادی طرح

با توجه به بررسی‌های انجام شده، هزینه‌ی ارزی طرح اول برق‌رسانی به روستاهای مجاور شبکه‌های انتقال ۲۳۰ کیلوولتی با استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ همراه با تجهیزات جانبی معادل ۶۰۰

شکل ۳ نشانگر تأثیر اندک  $C_{1g}$  بر  $C_{1\gamma}$ ،  $U$  و  $\theta$  است. در حالی که خازن متقابل  $C_{1\gamma}$  بین دو سیم زمین با افزایش  $C_{1g}$  افزایش می‌یابد. در شکل ۴، متغیرهای مدار معادل به صورت تابعی از فاصله‌ی افقی  $D_g$  بین سیم‌های زمین است و نشان می‌دهد که  $D_g$  عامل اصلی در تعیین متغیرهای مدار معادل است. اگر چه فاصله‌ی فازها ( $D$ ) اثری بر ظرفیت خازنی  $C_{1g}$  و  $C_{1\gamma}$  ندارد، ولتاژ القایی و زاویه‌ی  $\theta$  تابعی از  $D$  هستند. در شکل ۵ نیز اثر  $H_g$  قابل بررسی است. این شکل نشانگر آن

جدول ۱. هزینه‌ی تجهیزات مورد نیاز در طرح دوم

شرح کالا	واحد	مقدار	قیمت واحد (ریال)	قیمت کل (ریال)
کابل و سرکابل ۱۵۰×۱ خشک با کراسلینگ سطح ۳۳ کیلوولت	متر	۴۰	۶۵۴۰۰	۲۶۱۶۰۰۰
تابلو سلولی همراه با دژنگور و وسایل حفاظتی به‌طور کامل	دستگاه	۱	—	۴۱۲۰۶۶۲۰
ترانسفورماتور یک‌فاز ۲۲۰ ولت (۳۳ کیلوولت) به قدرت ۳۱۵ کیلوولت آمپر یا تابلو فشار ضعیف و کلید	دستگاه	۱	—	۱۹۶۰۰۰۰۰
مقره دوپل یشقایی	عدد	۸۲۶	۱۰۹۲۰۰	۹۰۰۰۰۰۰
هزینه‌ی اجرا (۳۰ درصد هزینه‌ی تجهیزات)	—	—	—	۲۶۰۰۰۰۰۰
جمع کل				۱۹۹۴۲۲۶۲۰

میلیون ریال است.

منظور نشده است. هزینه‌ی تهیه، حمل و احداث یک کیلومتر شبکه‌ی توزیع ۲۰ کیلوولت هوایی با سیم‌گارد ۳۴ میلیون ریال، و هزینه‌ی تهیه، حمل و نصب یک دستگاه ترانسفورماتور ۱۰۰ کیلوولت آمپری با تابلو فشار ضعیف ۲۰۰ آمپری ۲۰ میلیون ریال است که جمعاً ۵۴ میلیون ریال برآورد می‌شود.

### نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده، هزینه‌ی تأمین قدرت با استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ معادل هزینه‌ی احداث ۱۷ کیلومتر شبکه‌ی توزیع ۲۰ کیلوولت هوایی، و هزینه‌ی تأمین برق با استفاده از سیم‌گارد عایق‌بندی شده معادل هزینه‌ی احداث ۵/۳ کیلومتر شبکه‌ی توزیع ۲۰ کیلوولت هوایی است. مقایسه‌ی فوق برتری روش جذب قدرت از سیم‌گارد عایق‌بندی شده را نشان می‌دهد.

دیگر امتیاز این طرح این است که چون از انرژی ذخیره‌شده بین سیم‌گارد و سیم‌های فاز خطوط انتقال استفاده می‌شود لذا ظرفیت خطوط انتقال اشغال نمی‌شود. البته در هر مورد باید با توجه به محل مصرف و خطوط انتقال قابل دسترسی، طرح‌های گوناگون را از لحاظ اقتصادی - فنی ارزیابی، و بهترین آنها را انتخاب کرد.

در طرح دوم (استفاده از سیم‌گارد برای جذب توان)، از یک سو نظر طراح و تجهیزات حفاظتی که در اولیه و ثانویه‌ی ترانسفورماتور و نیز سیستم کنترل ولتاژی که برای ترانسفورماتور در نظر می‌گیرد، و از سوی دیگر طولی از سیم‌گارد که باید عایق‌بندی شود، مقدار جبران سری مورد نیاز، و در نهایت تعداد عایق‌کننده‌ها - با توجه به مقدار جبران شده - تعیین‌کننده‌ی هزینه‌ها هستند. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده، تجهیزات مورد نیاز این طرح و هزینه‌ی مربوطه در جدول ۱ ارائه شده است. در این طرح فرض بر این است که سیم‌گارد در کل خط عایق‌بندی شده و می‌توان در هر نقطه از خط توان مورد نیاز بار را تأمین کرد.

یادآور می‌شویم که این هزینه‌ها برای شبکه‌های جدیدالاحداث در نظر گرفته شده است. به‌منظور دریافت توان از شبکه‌های موجود، باید با بررسی قابلیت اطمینان شبکه‌ی سراسری، چنانچه خروج خط انتقال مورد نظر مشکلی برای شبکه ایجاد نکند اقدام به عایق‌بندی سیم‌گارد و جذب توان کرد.

در طرح سوم (برق‌رسانی با احداث شبکه‌ی هوایی توزیع ۲۰ کیلوولت) با توجه به کم‌بودن مقدار توان مورد نیاز، هزینه‌ی تجهیزات لازم برای خروج تغذیه‌کننده‌ی ۲۰ کیلوولت از پست فوق توزیع

### منابع

transmission lines using ground wires, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, PAS-97(4), (1978).  
 ۴. یوزش، نصرالله، «برق‌رسانی به روستاها و مراکز پراکنده بار در مجاورت خطوط انتقال نیرو»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، تهران: دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۷۸.

1. Duncan Glover, J. and Mulukutla, S, Power system analysis and design, Publishing Company, Boston (1994).  
 ۲. دفترچه مشخصات خطوط انتقال نیرو، شرکت برق منطقه‌ای فارس.  
 3. Sarma, P. and Harbec, G., Capacitive power tap-off from