

مرحله ۱: مدار را با چند منبع ساده می‌کنیم! مثلاً مقاومت‌های موازی یا سری را به صورت معادل آن‌ها قرار می‌دهیم یا گره‌های گسترده (۱) را با یک‌جا (رسم) (۲) می‌کنیم.

مرحله ۲: گره‌های مدار را مشخص می‌کنیم و به هر کدام یک پتانسیل نسبت می‌دهیم: مانند V_1, V_2, \dots, V_n .

مرحله ۳: یکی از نقاط گره را به گره صفر (یا به عنوان گره مبنا) انتخاب می‌کنیم. فرض و این است که پتانسیل گره مبنا صفر است.

مرحله ۴: برای هر گره، معادله‌ی جریان‌های کولمب (KCL) را می‌نویسیم. برای نوشتن معادله در هر گره به جز منابع جریان (که جهت جریان مشخص دارند) شاخه‌ها را شروع می‌کنیم از نظر می‌گیریم و با علامت مثبت منظور می‌کنیم. علامت جریان‌های ورودی به گره منفی خواهد بود.

مرحله ۵: برای مداری با n گره، $n-1$ معادله نوشته می‌شود که شامل معادله‌ی گره‌ها به جز گره مبناست. تعداد معادله‌ها با تعداد مجهولات = که پتانسیل‌های گره‌ها هستند = برابر است.

مرحله ۶: با حل دستگاه معادلات چندمجهولی، پتانسیل گره‌ها را به دست می‌آوریم.

مرحله ۷: با معلوم بودن پتانسیل گره‌ها، جریان هر شاخه به راحتی به کمک قانون اهم محاسبه می‌شود.

مثال ۱: توان مصرفی مقاومت ۴ اهم را در شکل ۱-۲۱ به روش پتانسیل گره حساب کنید.

شکل ۱-۲۱

این معادله‌ها با "با" یک جریان‌های ورودی و خروجی به گره اعتباری بوده و در تحلیل حالت مرحله ۲ می‌توان به کار برد.

۱-۶- الف - مقدمه: پتانسیل گره

تعریف گره (Node): به محل برخورد شاخه‌ها و یا انشعاب جریان‌ها گره گفته می‌شود.

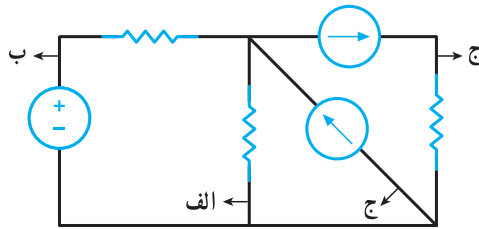
گره مبنا: گره‌ای است که بیشترین انشعاب را دارا باشد، پتانسیل آن به عنوان مبنا یا پتانسیل صفر در نظر گرفته می‌شود.

تذکره ۱: هر شاخه می‌تواند شامل المان‌های مقاومت، منبع جریان و منبع ولتاژ باشد که دو سر آن به گره مبنا و گره مورد نظر متصل باشد. در ضمن اگر بین دو گره المانی نباشد و اتصال کوتاه شده باشد، یک گره در نظر گرفته می‌شود.

تذکره ۲: اساس تحلیل پتانسیل گره بر مبنای جریان شاخه‌ها (KCL) می‌باشد و می‌دانیم هر جریانی طبق قانون اهم به صورت $I = \frac{\text{اختلاف پتانسیل}}{\text{مقاومت}}$ می‌باشد.

سه حالت در محاسبه جریان شاخه‌ها پیش می‌آید: (شکل ۱-۲۱)
الف) شاخه فقط شامل یک مقاومت باشد.

- ب) شاخه علاوه بر مقاومت دارای منبع ولتاژ نیز باشد.
ج) شاخه شامل منبع جریان یا منبع جریان و مقاومت باشد.



شکل ۱-۲۱

۱-۶-ب- روش پتانسیل گره

در مرحله ۴ با توجه به انواع شاخه به هنجاریان یادآور شوید که :

$$\text{در شاخه الف: } I = \frac{V}{R} = \frac{V_{\text{گره}} - V_{\text{منبع}}}{R}$$

$$\text{در شاخه ب: } I = \frac{V}{R} = \frac{V_{\text{منبع}} - V_{\text{گره}}}{R}$$

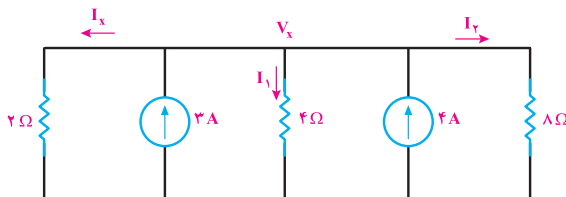
$$\text{در شاخه ج: مقدار منبع جریان } I =$$

برای قسمت (ج) جهت توسط خود منبع مشخص می شود که اگر جریان به سمت گره باشد (ورودی) با علامت منفی و اگر از گره دور شود (خروجی) با علامت مثبت در محاسبات منظور خواهد شد.

۱-۶-۱- حل تمرین شماره ۱۲ صفحه ۵۰ کتاب درسی از روش پتانسیل گره (شکل ۱-۲۲)

هدف : یافتن پتانسیل V_x و جریان I_x با استفاده از روش پتانسیل گره

گام ۱) تعیین جریان شاخه ها و نام گذاری گره ها



شکل ۱-۲۲

گام ۲) نوشتن kcl در گره V_x

$$(KCL) I_x + I_1 + I_r - 3 - 4 = 0$$

$$\frac{V_x}{2} + \frac{V_x}{4} + \frac{V_x}{8} = 7, \quad 7V_x = 56, \quad V_x = 8V$$

$$I_x = \frac{V_x}{2} = \frac{8}{2} = 4 \text{ A}$$

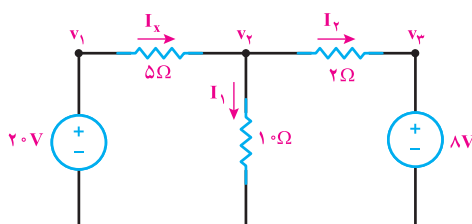
گام ۳) با توجه به معادلات به دست آمده، مقادیر V_x و I_x را می‌یابیم.

تذکره: هنگام نوشتن kcl می‌توان جریان ورودی را مثبت و خروجی را منفی در نظر گرفت این فرض تأثیری در جواب‌های مسئله نخواهد داشت.

۲-۶-۱- حل تمرین شماره ۲۱ صفحه ۵۳ کتاب درسی از روش پتانسیل گره (شکل ۱-۲۳)

هدف: محاسبه I_x با استفاده از روش پتانسیل گره

گام ۱) تعیین جریان شاخه‌ها و نام‌گذاری گره‌ها



شکل ۱-۲۳

گام ۲) معادلات جریان را در گره دوم می‌نویسیم.

$$V_1 = 20 \text{ V} , \quad V_3 = 8 \text{ V}$$

$$\text{KCL}) I_x - I_1 - I_v = 0$$

$$\frac{V_1 - V_2}{5} - \frac{V_2}{10} - \frac{V_2 - V_3}{2} = 0 , \quad V_2 = 10 \text{ V}$$

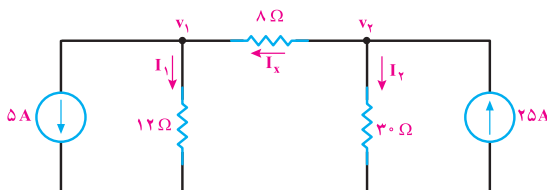
گام ۳) I_x را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$I_x = \frac{V_1 - V_2}{5} = \frac{20 - 10}{5} = 2 \text{ A}$$

۳-۶-۱- حل تمرین شماره ۶ صفحه ۴۸ کتاب درسی از روش پتانسیل گره (شکل ۱-۲۴)

هدف: محاسبه I_x با استفاده از روش پتانسیل گره

گام ۱) تعیین جریان شاخه‌ها و نام‌گذاری گره‌ها



شکل ۱-۲۴

$$KCL_1) 5 + I_1 + \frac{V_1 - V_2}{8} = 0$$

$$KCL_2) \frac{V_2}{30} + \frac{V_2 - V_1}{8} - 25 = 0$$

گام ۲) معادلات جریان را در گره اول و دوم می نویسیم.

$$\begin{cases} 5V_1 - 3V_2 = -120 \\ -15V_1 + 19V_2 = 3000 \end{cases} \rightarrow V_1 = 134/4V \text{ و } V_2 = 264V$$

گام ۳) I_x را به صورت زیر محاسبه می کنیم.

$$I_x = \frac{V_2 - V_1}{8} = \frac{264 - 134/4}{8} = 16/2A$$

۱-۱ الف - مقدمه : جمع آثار

یکی دیگر از روش های تحلیل مدارهای الکتریکی که دارای چند منبع تغذیه بوده و هریک از آنها جریانی در مدار ایجاد می کند، روش جمع آثار است.

مثال ۱۱-۱

وقتی منبع ولتاژ را از مدار حذف می کنیم، دوسر آن را اتصال کوتاه می کنیم. در صورتی که بخواهیم منبع جریانی را از مدار حذف کنیم، باید آن را باز کرده و از مدار جدا سازیم.

مثال ۱۱-۲ در مدار شکل ۱۱-۲ جریان را در مقاومت های R_1 و R_2 و توان و ولتاژ مقاومت R_3 اهر را محاسبه کنید.

شکل ۱۱-۲

راه حل

ابتدا به جز یک منبع (مثلاً ۲A) بقیه منابع را از مدار حذف می کنیم. حال برای هر عنصر جریانی را در نظر می گیریم و آن ها را مطابق روش های که قبلاً آموختیم، حساب می کنیم (شکل ۱۱-۳).

شکل ۱۱-۳

می بینیم مقاومت R_3 همی به صورت موازی با مقاومت 2Ω همی و مجبوسه آن ها به صورت سری با مقاومت 3Ω همی قرار دارد.

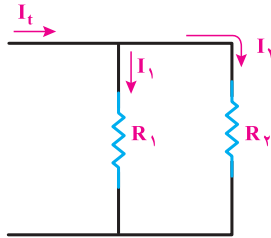
$$R_{eq} = (2\Omega \parallel 2\Omega) + 3\Omega$$

۲۸

اگر جریان مدار بین دو شاخه تقسیم شود رابطه تقسیم جریان به صورت زیر استفاده می شود
(شکل ۱-۲۵).

$$I_1 = \frac{I_t \times R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{مقاومتی که جریانش خواسته نشده}$$

$$I_2 = \frac{I_t \times R_1}{R_1 + R_2}$$



شکل ۱-۲۵

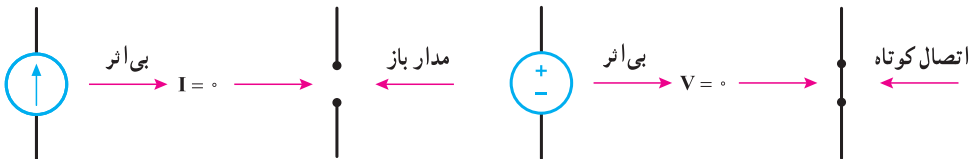
تذکره ۱: به دست آوردن I_t به کمک قانون اهم می باشد، اگر در مسئله منبع ولتاژ وجود داشته

$$I_t = \frac{V_t}{R_t} \quad \text{باشد:}$$

تذکره ۲: جمع آثار مربوط به جمع تأثیر جریان و ولتاژهای مدار می باشد، ولی توان را به کمک این روش از اثر جمع توان ها نمی توان محاسبه کرد.

۱-۲-ب- روش جمع آثار

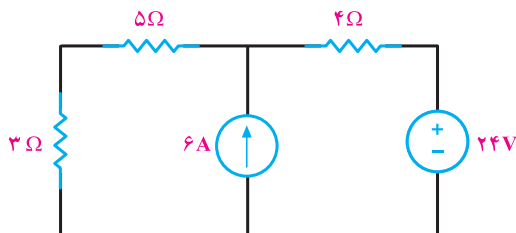
در این روش منابع مدار را بی اثر می کنیم و فقط یکی از آنها را نگه می داریم، بی اثر کردن منبع جریان به معنی اتصال باز شدن آن منبع و بی اثر کردن منبع ولتاژ به معنی اتصال کوتاه آن منبع تلقی می شود (شکل ۱-۲۶).



شکل ۱-۲۶

۱-۲-۱- حل تمرین شماره ۵ صفحه ۴۸ کتاب درسی از روش جمع آثار (شکل ۱-۲۷)

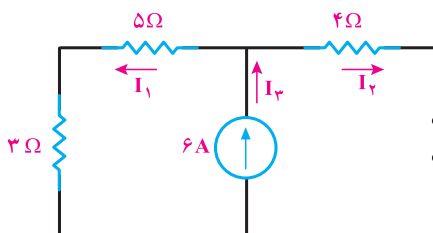
هدف: محاسبه توان مقاومت 3Ω به روش جمع آثار



شکل ۱-۲۷

حالت ۱) حذف منبع ولتاژ

مطابق شکل ۱-۲۸ منبع ولتاژ ۲۴ ولتی اتصال کوتاه شده است.



شکل ۱-۲۸

گام ۱) مقاومت‌های سری را به یک مقاومت تبدیل کنید.

گام ۲) با استفاده از معادلات تقسیم جریان، جریان هر شاخه به صورت زیر قابل محاسبه است:

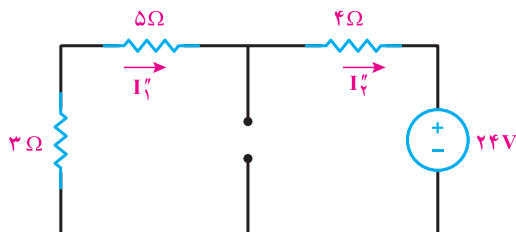
$$I_3 = 6A$$

$$I'_2 = I_3 \times \frac{5}{5+4} = 4A \quad (\rightarrow): I'_2 \text{ جهت جریان}$$

$$I'_1 = I_3 \times \frac{4}{5+4} = 2A \quad (\leftarrow): I'_1 \text{ جهت جریان}$$

حالت ۲) حذف منبع جریان

مطابق شکل ۱-۲۹ محل منبع جریان به مدار باز تبدیل شده است.



شکل ۱-۲۹

با توجه به اینکه یک حلقه داریم، با استفاده از روش جریان حلقه می‌توان جریان مقاومت را یافت.

جهت جریان I_1'' و I_2'' به صورت (\rightarrow) می‌باشد.

$$\text{KVL}) 3I_1'' + 5I_1'' + 4I_2'' + 24 = 0$$

$$8I_1'' + 4I_2'' + 24 = 0$$

$$12I_1'' = -24, \quad I_1'' = I_2'' = -2$$

نتیجه:

در این قسمت باید مقادیر به دست آمده از حالت ۱ و ۲ را با هم جمع کرد.

چون جریان‌های I_1' و I_1'' خلاف جهت هم هستند از هم کم می‌شوند:

$$I_1 = I_1' - I_1''$$

$$I_1 = 2 - (-2)$$

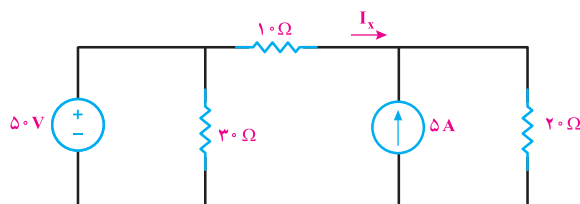
$$= 4 \text{ A}$$

با استفاده از جریان محاسبه شده در قسمت‌های قبل می‌توان مقدار نهایی توان را یافت.

$$P_{3\Omega} = R \times I_1^2 = 3 \times (4)^2 = 48 \text{ W}$$

۲-۱-۲- حل تمرین شماره ۷ صفحه ۴۹ کتاب درسی از روش جمع آثار (شکل ۱-۳۰)

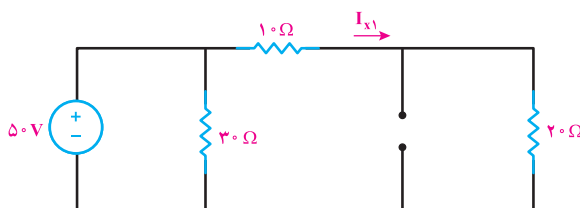
هدف: به دست آوردن جریان I_x از روش جمع آثار



شکل ۱-۳۰

گام ۱) منبع ۵ آمپر را حذف می‌کنیم.

حذف منبع جریان مطابق شکل ۱-۳۱



شکل ۱-۳۱

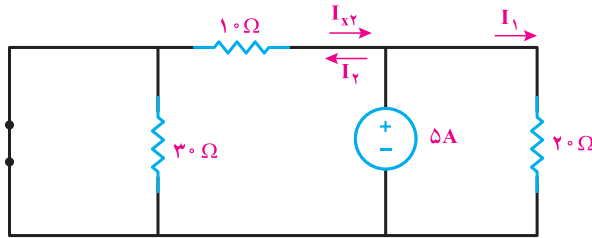
پس از حذف منبع مدار به شکل زیر خواهد بود و با روش تحلیل جریان خانه I_{x_1} را می‌یابیم.

$$5^\circ = 1^\circ I_{x_1} + 2^\circ I_{x_1} = 3^\circ I_{x_1}$$

$$I_{x_1} = \frac{5^\circ}{3^\circ}$$

گام ۲) منبع 5° ولت را حذف می‌کنیم.

حذف منبع ولتاژ مطابق شکل ۱-۳۲



شکل ۱-۳۲

می‌توان مقاومت $3^\circ \Omega$ را از مدار حذف کرد و جریان $5A$ بین $2^\circ \Omega$ و $1^\circ \Omega$ که با هم دیگر موازی

هستند تقسیم می‌شود.

$$I = \frac{5 \times 2^\circ}{1^\circ + 2^\circ} = \frac{1^\circ}{3^\circ} = \frac{1^\circ}{3} A$$

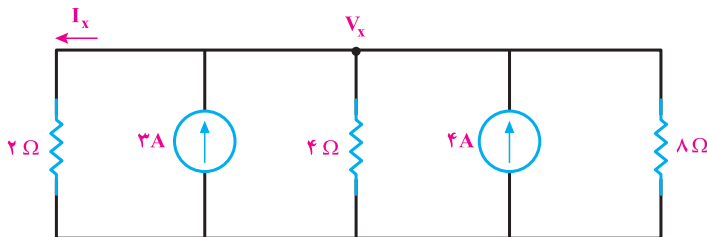
$$I_{x_2} = -I = -\frac{1^\circ}{3} A$$

$$I_x = I_{x_1} + I_{x_2}$$

$$I_x = \frac{5}{3} - \frac{1^\circ}{3} = -\frac{5}{3} A$$

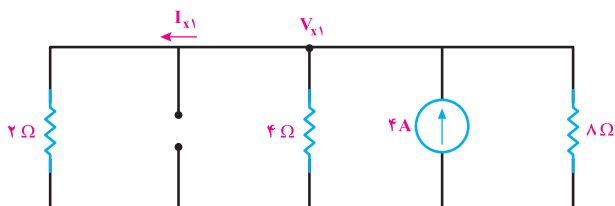
۳-۲-۱- حل تمرین شماره ۱۲ صفحه ۵۰ کتاب درسی از روش جمع آثار (شکل ۱-۳۳)

هدف: یافتن پتانسیل V_x و جریان I_x با استفاده از روش جمع آثار



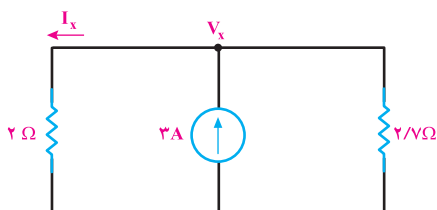
شکل ۱-۳۳

گام ۱، ابتدا منبع جریان ۳ آمپری را حذف می‌کنیم. (شکل ۱-۳۴)



شکل ۱-۳۴

— با استفاده از تبدیل منابع جریان و ولتاژ، این مرحله را محاسبه می‌کنیم (شکل ۲-۳۵).

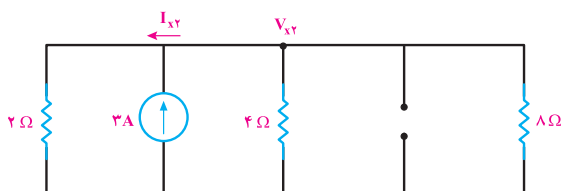


شکل ۱-۳۵

$$I_{x_1} = 4 \times \frac{2/7}{2 + 2/7} = 2/27 \text{ A}$$

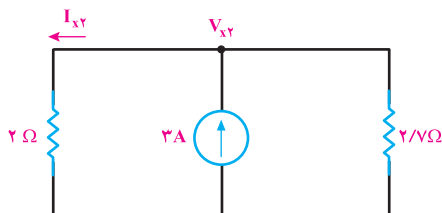
$$V_{x_1} = (2 \parallel 2/7) \times 4 = 4/515 \text{ V}$$

گام ۲، منبع جریان ۴ آمپری را مطابق شکل ۱-۳۶ حذف می‌کنیم.



شکل ۱-۳۶

با استفاده از تقسیم جریان، مطابق شکل ۱-۳۷ در این مرحله محاسبه می‌کنیم.



شکل ۱-۳۷

$$I_{x_2} = 3 \times \frac{2/27}{2 + 2/27} = 1/73 \text{ A}$$

$$V_{x_2} = (2 \parallel 2/7) \times 3 = 3/446 \text{ V}$$

گام ۳) جریان و ولتاژ کل حاصل جمع مقادیر در گام ۱ و گام ۲ می باشد.

$$I_x = I_{x_1} + I_{x_2} = 2/27 + 1/73 = 4 \text{ A}$$

$$V_x = V_{x_1} + V_{x_2} = 4/595 + 3/446 = 8 \text{ V}$$

۸-۱- تبدیل منابع ولتاژ و جریان به یکدیگر

منبع جریان و منبع ولتاژ را با شرایط زیر می توان به یکدیگر تبدیل کرد.

شکل ۱-۸-۱

به شکل های ۱-۸-۱ نگاه کنید: معصوف کنندگی R_s در هر دو مدار یکی است، ابتدا جریان معصوف کنندگی را در هر دو مدار حساب می کنیم.

در مدار با ولتاژ داریم:

$$I_s = I_s \frac{R_s}{R_s + R_p}$$

در مدار حبه داریم:

$$I_s = \frac{V_s}{R_s + R_p}$$

شکل ۱-۸-۲

اکنون برای این که دو منبع شکل های ۱-۸-۱ معادل هم باشند، باید جریان I_s در هر دو حالت برابر باشد، با تساوی قرار دادن جریان ها داریم:

$$I_s = I_s$$

$$\frac{V_s}{R_s + R_p} = \frac{I_s R_p}{R_s + R_p}$$

۱- منبع جریان موازی با مقاومت باشد و منبع ولتاژ با مقاومت سری شده باشد.

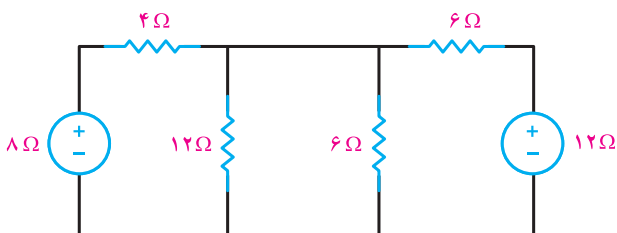
۲- خواسته مسئله مقاومت سری شده با منبع ولتاژ و یا موازی با منبع جریان و یا خود منابع نباشد.

۳- بین منبع جریان و ولتاژی که به هم تبدیل می شوند قانون اهم برقرار است.

۴- مصرف کننده از مدار در هر دو حالت جریان برابر دریافت کند.

استفاده از تبدیل منابع می تواند سرعت حل مسائل را افزایش دهد ولی اهمیت تعمیق یادگیری در روش های گفته شده برای هنرجویان شرح داده شود.

مثال ۱: توان مقاومت 12Ω در شکل ۱-۳۸ را به دست آورید.



شکل ۱-۳۸

حل: از تبدیل منابع استفاده می کنیم:

$$12V, 6\Omega \rightarrow I = \frac{V}{R} = \frac{12}{6} \rightarrow I = 2A$$

$$8V, 4\Omega \rightarrow I = \frac{V}{R} = \frac{8}{4} \rightarrow I = 2A$$

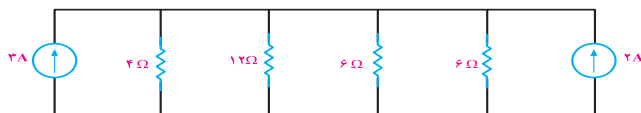
مدار معادل شکل (۱-۳۳) با تبدیل منبع شکل ۱-۳۹ خواهد بود.

پلاریته منبع ولتاژ نشان دهنده جهت جریان نیز خواهد بود.

با توجه به جهت جریان در مقاومت 12Ω می توان دو منبع را با هم جمع کرد.

$$2A + 2A = 4A$$

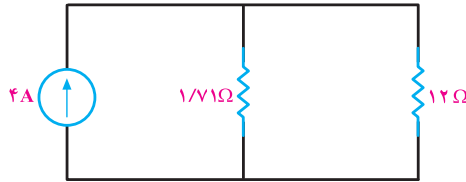
$$6\parallel 4 \rightarrow R = 1/1/1$$



شکل ۱-۳۹

بعد از خلاصه کردن المان های مقاومت و منبع جریان مدار زیر به دست می آید. (شکل ۱-۴۰)

$$I = \frac{4 \times 1/1}{12 + 1/1} = 0.5A$$



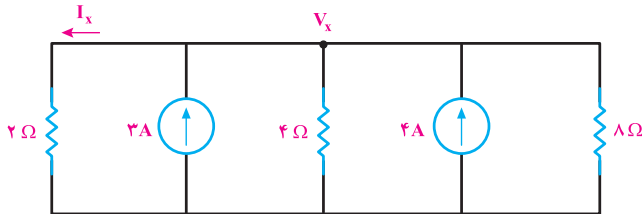
شکل ۱-۴۰

$$P = RI^2 \rightarrow P = 12 \left(\frac{1}{7} \right)^2 = 3 \text{ W}$$

۱-۸-۱- حل تمرین شماره ۱۲ صفحه ۵۰ کتاب درسی از روش جریان حلقه با کمک

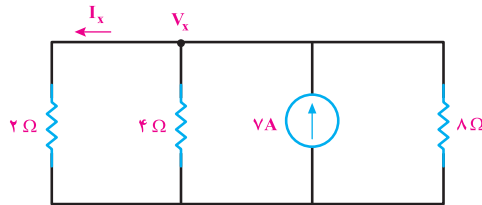
تبدیل منبع (شکل ۱-۴۱)

هدف: محاسبه پتانسیل V_x و جریان I_x با استفاده از روش جریان حلقه به کمک تبدیل منبع



شکل ۱-۴۱

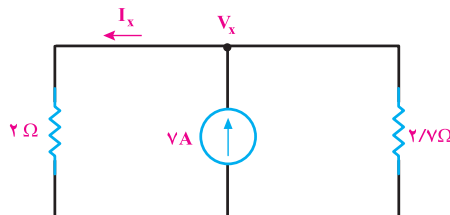
گام ۱، می توان تمام جریان هایی که با هم موازی هستند را به یک منبع جریان معادل تبدیل کرد و مقاومت های موازی را به یک مقاومت معادل تبدیل کرد. (شکل ۱-۴۲)



شکل ۱-۴۲

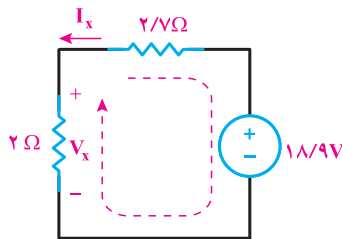
توجه: به دلیل اینکه I_x مجهول مورد نظر ماست، مقاومت ۲ اهمی مطابق شکل ۱-۴۳ را ثابت

نگه می داریم.



شکل ۱-۴۳

گام ۲) با استفاده از تبدیل منابع مطابق شکل ۱-۴۴ مقاومت و ولتاژ سری تبدیل می‌کنیم.



شکل ۱-۴۴

گام ۳) با نوشتن KVL در حلقه، V_x و I_x را می‌توانیم محاسبه کنیم.

$$\text{KVL}) -18/9 + 2/9 I_x + 2 I_x = 0$$

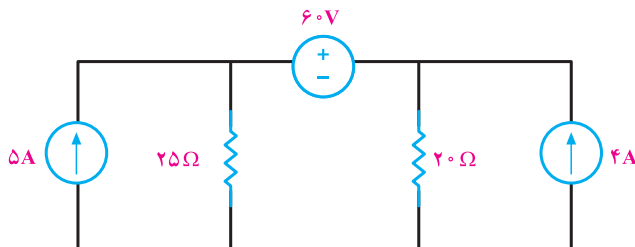
$$4/9 I_x = 18/9, \quad I_x = 4A$$

$$V_x = 2 I_x = 2 \times 4 = 8V$$

۲-۸-۱- حل تمرین شماره ۲ صفحه ۴۷ کتاب درسی از روش جریان حلقه و تبدیل منبع

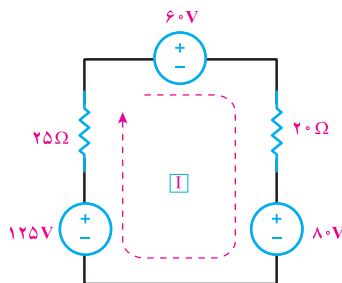
(شکل ۱-۴۵)

هدف: محاسبه توان منبع ولتاژ ۶۰ ولتی با استفاده از روش جریان حلقه و تبدیل منبع



شکل ۱-۴۵

گام ۱) منابع جریان را به منبع ولتاژ تبدیل کرده و مطابق شکل ۱-۴۶ به صورت زیر خواهد شد.



شکل ۱-۴۶

گام ۲) نوشتن kvl در حلقه و محاسبه توان مورد نظر

$$KVL) -۱۲۵ + ۲۵I - ۶۰ + ۲۰I + ۸۰ = ۰, \quad ۴۵I = ۱۰۵, \quad I = ۲/۳A$$

$$P = V \cdot I \rightarrow P = ۶۰ \times ۲/۳ = ۱۴۰ \text{ W} \quad \text{تولیدی}$$

۹-۱. مدار معادل تونن و نورتن

الکترونیک: مدارهای الکتریکی برای بدست آوردن معادل تونن، ابتدا بار یا عنصر مورد نظر را از مدار جدا می‌کنیم، سپس اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ای را که بار از آن جدا شده است، به یکی از روش‌های تحلیل که قبلاً آموخته‌ایم محاسبه می‌کنیم. ولتاژ بدست آمده که به آن **ولتاژ مدار باز** V_{th} گفته می‌شود، همان ولتاژ تونن (V_{th}) مدار است. برای بدست آوردن مقاومت معادل مدار، تمام منابع را بی اثر می‌کنیم (سازجای جریان باز و منابع ولتاژ اتصال کوتاه). سپس با نگاه کردن به مدار از دو نقطه‌ای که بار از آنجا باز شده، مقاومت معادل کل را بدست می‌آوریم. این مقاومت تونن مدار (R_{th}) خواهد بود.

مثال ۱-۲۳: در مدار شکل ۱-۲۳ برای این که بتوانیم اثر تغییرات بار را بررسی کنیم، معادل تونن مدار را بدست می‌آوریم.

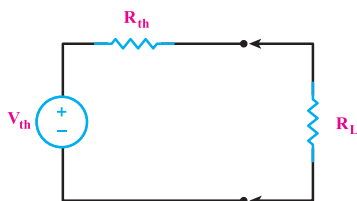
راه حل:

۱- ابتدا مطابق شکل ۱-۲۴ بار را از مدار جدا کرده و سپس ولتاژ بین دو پایانه‌ی A و B را محاسبه می‌کنیم.

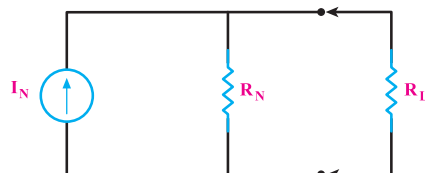
شکل ۱-۲۴

۱-۲۳ Voltage Open-Circuit
۱-۲۴ Voltage Thevenin

اگر بتوانیم از دید مصرف کننده مدار را به منبع ولتاژ واقعی (منبع ولتاژ و مقاومت سری با آن) تبدیل کنیم مدار معادل تونن به دست آمده است شکل ۱-۴۷ و اگر به منبع جریان واقعی تبدیل کنیم (منبع جریان و مقاومت موازی با آن) مدار معادل نورتن به دست می‌آید. (شکل ۱-۴۸)



شکل ۱-۴۷



شکل ۱-۴۸

برای محاسبه V_{th} که به آن V_{OC} یا ولتاژ مدار باز نیز گفته می‌شود کافی است مقاومت مصرف کننده از دو سر A و B را از مدار جدا کرده و V_{AB} محاسبه شود.

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

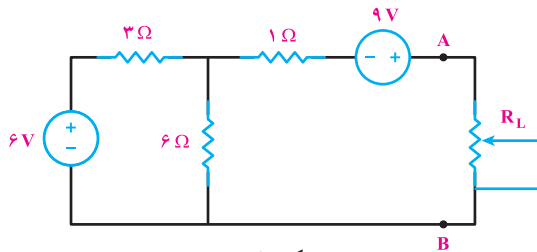
برای محاسبه R_{th} پس از باز کردن R_L (مقاومت بار) از مدار، مقاومت معادل دیده شده از دو سر مدار را حساب می‌کنیم. به شرط آنکه منابع در مدار بی اثر شده باشند.

برای محاسبه جریان I_N که به آن I_{SC} یا جریان اتصال کوتاه نیز گفته می‌شود کافی است مقاومت مصرف کننده از دو سر A و B از مدار جدا شود و سپس دو سر A و B را به هم اتصال کوتاه کنیم. جریان عبوری از قسمت اتصال کوتاه همان I_{SC} می‌باشد.

محاسبه R_N و R_{th} کاملاً شبیه همدیگر است (به عبارت دیگر $R_N = R_{th}$).

مثال: جریان مصرف کننده در شکل ۱-۴۹ را از دو روش معادل تونن مدار و معادل نورتن

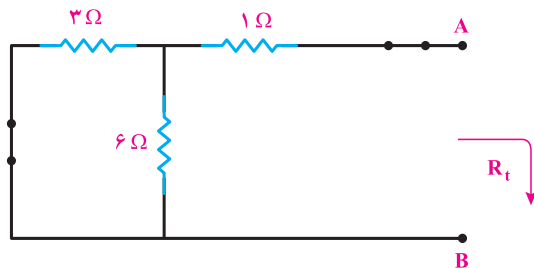
مدار بیابید.



شکل ۱-۴۹

$$(R_L = 1\ \Omega)$$

مقاومت R_L از مدار جدا می‌شود و تمام منابع موجود در مدار هم‌زمان بی اثر می‌شود تا بتوان R_{th} را حساب کرد (شکل ۱-۵۰).



شکل ۱-۵۰

R_t همان R_{th} می‌باشد.

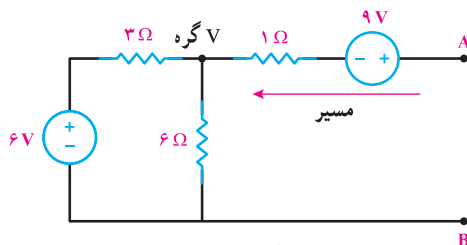
$$R_{th} = (3 \parallel 6) + 1 = 3\ \Omega$$

* برای محاسبه V_{th} یا V_{OC} به صورت زیر عمل می‌کنیم (روش انتخابی: پتانسیل گره).

$$V_{OC} = V_{AB} = V_A - V_B$$

نقطه B به زمین مدار متصل است (شکل ۱-۵۱) پس $V_B = 0$ را بیابیم.

$$V_A = V_{\text{مسیر}} + V_{\text{گره}}$$



شکل ۱-۵۱

هنگام حرکت از نقطه A به گره مدار از منبع ولتاژ و مقاومت 1Ω می‌گذریم.

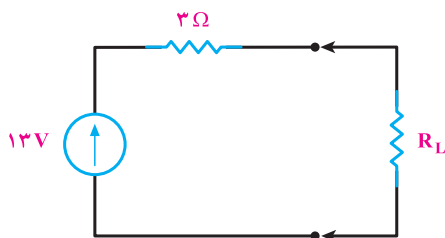
$$V_{\text{مسیر}} = +9 + 1 \times 0 = 9V$$

تذکر: چون مدار باز است از مقاومت 1Ω هیچ جریانی عبور نمی‌کند پس ولتاژ دو سر آن صفر است.

$$\text{KCL: } \frac{V-6}{3} + \frac{V}{6} + 0 = 0 \rightarrow 3V = 12 \rightarrow V = 4V$$

$$V_A = 9 + 4 = 13 \rightarrow V_{AB} = 13 - 0 = 13V = V_{th}$$

مدار معادل تونن مطابق شکل ۱-۵۲ به صورت زیر است:



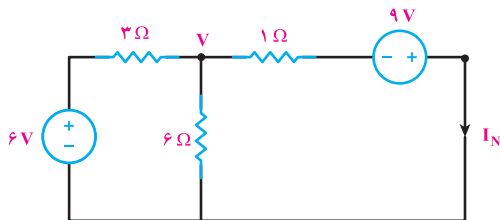
شکل ۱-۵۲

$$R_L = 1\Omega \rightarrow I_L = \frac{V}{R_t} = \frac{13}{13} = 1A$$

روش محاسبه I_N : R_L را از مدار باز کرده و جای آن اتصال کوتاه می‌گذاریم (شکل ۱-۵۳).

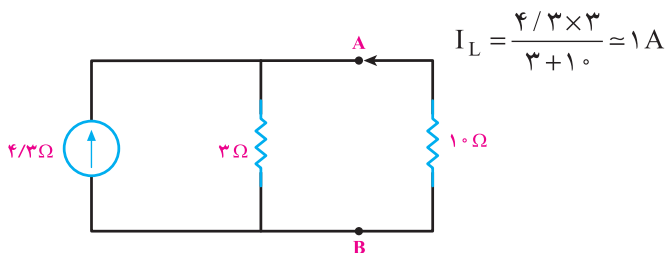
$$\xrightarrow{\text{پتانسیل گره}} \left(\frac{V-6}{3} + \frac{V}{6} + \frac{V-(-9)}{1} = 0 \right) \times 6$$

$$2V - 12 + V + 6V + 54 = 0 \rightarrow 9V = -42 \rightarrow V = -\frac{42}{9} = -4.66 \text{ V}$$



شکل ۱-۵۳

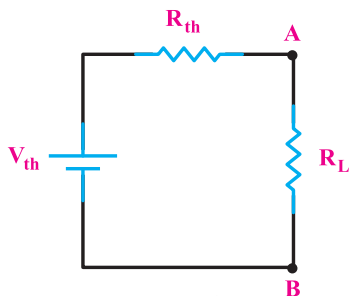
با جاگذاری V در رابطه $(I_N = \frac{-4.66 + 9}{1} = 4.3 \text{ A})$ به دست می آید. البته برای حل این مسئله باز به هنجریان تأکید شود روش های جمع آثار و حلقه نیز می تواند مفید باشد در ضمن به اتصال متقابل منبع ولتاژ ۹ ولتی با گره V توجه نمایید. اینک مدار معادل نورتن مطابق شکل ۱-۵۴ خواهد بود.



شکل ۱-۵۴

۱-۱۰- توان ماکزیمم منتقل شده به بار

R_L به عنوان مصرف کننده هنگامی بیشترین توان را از مدار تحویل می گیرد که مقدار R_L با R_{th} یا R_N مدار برابر باشد (شکل ۱-۵۵).



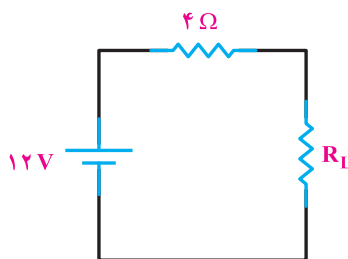
شکل ۱-۵۵

$$P = R_L I_L^2 \rightarrow P = R_L \left(\frac{V_{th}}{R_L + R_{th}} \right)^2 \rightarrow P = \frac{V_{th}^2 \times R_L}{(R_L + R_{th})^2}$$

تابع تعریف شده مقدار توان دریافتی از منبع به ازای تغییر R_L می‌باشد که اگر P' (مشتق توان نسبت به R_L) را به دست آوریم.

$$P' = 0 \Rightarrow R_L = R_{th}$$

البته در کلاس مناسب است که مثالی به صورت شکل ۱-۵۶ طرح شود و برای R_L مقادیر ۳Ω ، ۴Ω و ۵Ω استفاده شود و در هر حالت P محاسبه شود.



شکل ۱-۵۶

$$- R_L = 3\Omega \rightarrow I_L = \frac{12}{4+3} = 1.71 \text{ A}$$

$$P_L = R_L I_L^2 \rightarrow P_L = 3(1.71)^2 = 8.77 \text{ W}$$

$$- R_L = 4\Omega \rightarrow I_L = \frac{12}{4+4} = 1.5 \text{ A}$$

$$P_L = 4(1.5)^2 = 9 \text{ W}$$

$$- R_L = 5\Omega \rightarrow I_L = \frac{12}{4+5} = 1.33 \text{ A}$$

$$P_L = 5(1.33)^2 = 8.84 \text{ W}$$

نتیجه اینکه در حالتی که R_L با مقاومت سری شده برابر بود توان دریافتی بیشترین مقدار یعنی ۹ W به دست آمد.

* می‌توان توان ماکزیمم منتقل شده به بار را از دو رابطه

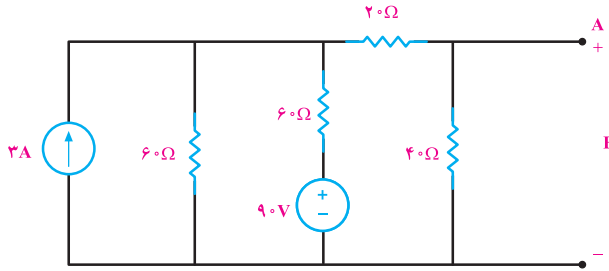
$$P_{\max} = \frac{V_{th}^2}{4 R_{th}}, \quad P_{\max} = \frac{1}{4} R_N I_N^2$$

نیز به دست آورد.

توان ماکزیمم هنگامی به R_L می‌رسد که $R_L = R_{th}$ یا $R_L = R_N$ باشد.

۱-۱۰-۱-

مثال ۱: مطلوبست محاسبه معادل تونن مدار الکتریکی زیر از دو نقطه A و B (شکل ۱-۵۷).



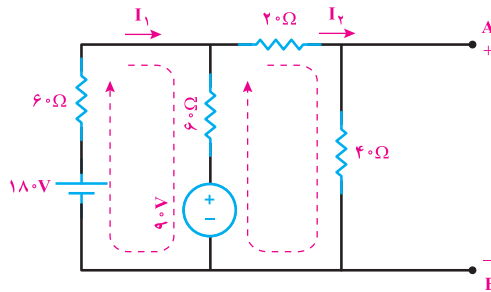
شکل ۱-۵۷

ابتدا به محاسبه V_{OC} می‌پردازیم.

گام ۱) با استفاده از تبدیل منابع مقاومت و جریان موازی را به یک مقاومت و ولتاژ سری مبدل می‌کنیم.

گام ۲) تعیین جریان شاخه‌ها و نوشتن kvl

مطابق شکل ۱-۵۸ در دو مسیر نشان داده شده kvl می‌نویسیم:



شکل ۱-۵۸

$$KVL_1) -18 + 6 \cdot I_1 + 6 \cdot I_1 - 6 \cdot I_2 + 9 = 0$$

$$KVL_2) -9 + 6 \cdot I_2 - 6 \cdot I_1 + 2 \cdot I_2 + 4 \cdot I_2 = 0$$

$$\begin{cases} 12 \cdot I_1 - 6 \cdot I_2 = 9 \\ -6 \cdot I_1 + 12 \cdot I_2 = 9 \end{cases} \quad , \quad \begin{cases} I_1 = 1/5 \text{ A} \\ I_2 = 1/5 \text{ A} \end{cases}$$

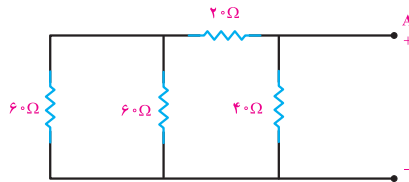
گام ۳) با توجه به جریان‌های حاصل از حل دستگاه V_{th} را می‌یابیم.

$$V_{AB} = 4 \cdot I_r = 60 \text{ V}$$

سپس مقاومت معادل را می‌یابیم.

گام ۴) تمامی منابع را حذف کرده و مقاومت معادل دیده شده از دو سر A و B را می‌یابیم

(شکل ۱-۵۹).

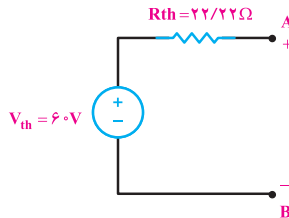


شکل ۱-۵۹

$$R_{th} = ((60 \parallel 60) + 20) \parallel 40 = 22/22 \Omega$$

گام ۵) معادل تونن مدار مانند شکل زیر از مقاومت معادل مدار سری با V_{th} تشکیل شده.

مطابق شکل ۱-۶۰ مدار تونن دیده شده از دو سر A و B رسم می‌شود.



شکل ۱-۶۰

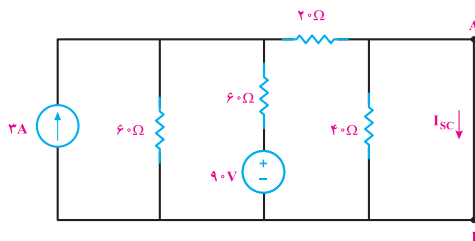
۲-۱-۱۰-۱-

مثال ۲: مطلوبست محاسبه معادل نورتن مدار شکل ۱-۶۱ از دو سر A و B.

ابتدا به محاسبه I_{SC} می‌پردازیم.

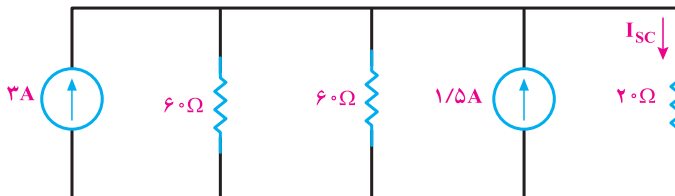
گام ۱) دو سر A و B را اتصال کوتاه کرده و جریان عبوری از این شاخه را I_{SC} می‌نامیم

(شکل ۱-۶۱).



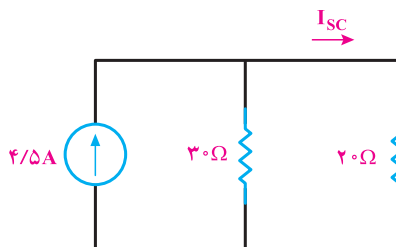
شکل ۱-۶۱

مقاومت $40\ \Omega$ اهمی اتصال کوتاه شده و حذف می‌شود.
 گام ۲) مقاومت $60\ \Omega$ اهمی و منبع $90\ \text{V}$ ولتی را به اتصال موازی تبدیل می‌کنیم (شکل ۱-۶۲).
 مطابق شکل ۱-۶۲ تبدیل منبع صورت می‌گیرد.



شکل ۱-۶۲

گام ۳) کلیه منابع جریان موازی با هم را به یک منبع جریان مبدل کرده و مقاومت‌های موازی را به یک مقاومت معادل تبدیل می‌کنیم (جریان I_{sc} از مقاومت $20\ \Omega$ اهمی عبور می‌کند). (شکل ۱-۶۳).



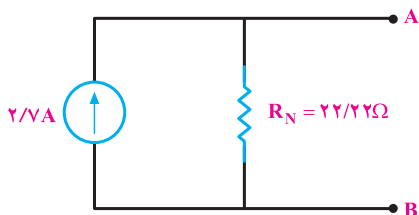
شکل ۱-۶۳

گام ۴) با استفاده از تقسیم جریان می‌توان جریان عبوری از مقاومت $20\ \Omega$ اهمی I_{sc} را محاسبه کرد.

$$I_{sc} = \frac{4/5 \times 30}{50} = 2/7\ \text{A}$$

گام ۵) معادل نورتن مدار مانند شکل ۱-۶۴، از مقاومت معادل مدار، موازی با I_{sc} تشکیل

شده است.



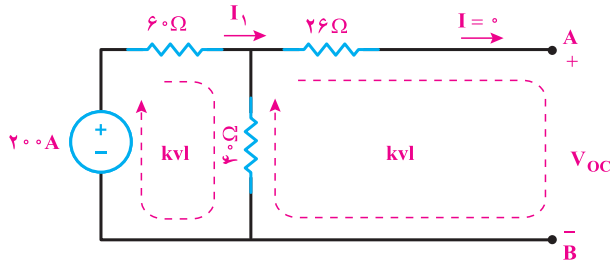
شکل ۱-۶۴

۳-۱-۱-

مثال ۳: مطلوبست محاسبه معادل تونن مدار شکل ۶۵-۱.

ابتدا به محاسبه V_{OC} می پردازیم.

گام ۱) تعیین جریان شاخه ها و نوشتن kvl مطابق شکل نشان داده شده (شکل ۶۵-۱) در دو مسیر آورده شده kvl می نویسیم.



شکل ۶۵-۱

$$KVL) -200 + 60 \cdot I_1 + 40 \cdot I_1 = 0$$

$$I_1 = 2 \text{ A}$$

$$V_{OC} = 40 \cdot I_1 = 80 \text{ V}$$

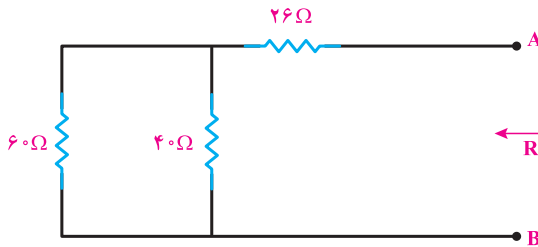
گام ۲) با توجه به جریان های حاصل از حل دستگاه V_{th} را می یابیم.

$$V_{OC} = V_{th} = 80 \text{ V}$$

سپس مقاومت معادل را می یابیم.

گام ۳) تمامی منابع را حذف کرده و مقاومت معادل دیده شده از دو سر A و B را می یابیم

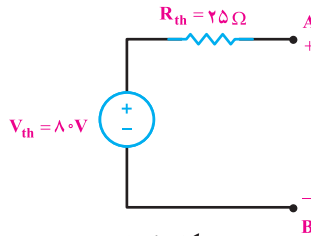
(شکل ۶۶-۱).



شکل ۶۶-۱

گام ۴) معادل تونن مدار مانند شکل زیر از مقاومت معادل مدار سری V_{th} تشکیل شده است

(شکل ۶۷-۱).



شکل ۱-۶۷

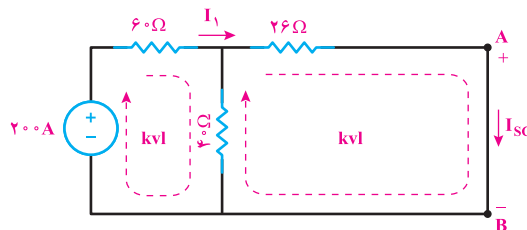
$$R_{th} = (6 \parallel 40) + 26 = 25 \Omega$$

۴-۱۰-۱-

مثال ۴: مطلوبست محاسبه معادل نورتن مدار شکل ۱-۶۸

ابتدا به محاسبه I_{SC} می پردازیم.

گام ۱) دو سر A و B را اتصال کوتاه کرده و جریان عبوری از این شاخه را I_{SC} می نامیم (شکل ۱-۶۸).



شکل ۱-۶۸

گام ۲) kvl را برای دو حلقه دیده شده در شکل ۱-۶۸ به صورت زیر می نویسیم:

$$KVL_1) -200 + 6 \cdot I_1 + 40 \cdot I_1 - 40 \cdot I_{SC} = 0$$

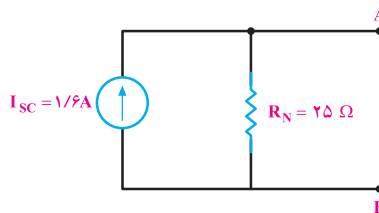
$$KVL_2) 40 \cdot I_{SC} - 40 \cdot I_1 + 26 \cdot I_{SC} = 0$$

گام ۳) حل دستگاه و محاسبه مقادیر جریان ها

$$\begin{cases} 10 \cdot I_1 - 4 \cdot I_{SC} = 200 \\ -4 \cdot I_1 + 66 \cdot I_{SC} = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} I_1 = 2/66 A \\ I_{SC} = 1/6 A \end{cases}$$

گام ۴) معادل نورتن مدار مانند شکل زیر، از مقاومت معادل مدار، موازی با I_{SC} تشکیل شده

است (شکل ۱-۶۹).



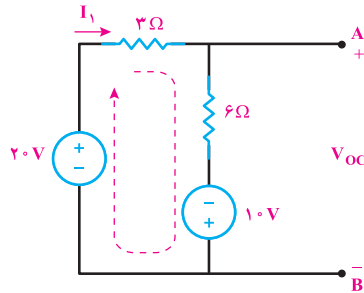
شکل ۱-۶۹

۵-۱۰-۱- حل تمرین ۱۳ صفحه ۵۰ کتاب درسی (شکل ۱-۷۰)

هدف : محاسبه معادل تونن مدار از دو سر A و B

ابتدا به محاسبه V_{OC} می پردازیم.

گام ۱) تعیین جریان شاخه ها و نوشتن KVL و سپس محاسبه مقاومت R_{th}



شکل ۱-۷۰

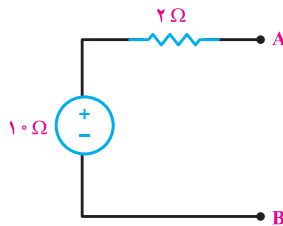
$$KVL) -20 + 3I_1 + 6I_1 - 10 = 0$$

$$I_1 = 3/3 \text{ A} , \quad R_{th} = 6 \parallel 3 = 2\Omega$$

گام ۲) با توجه به جریان های حاصل از حل دستگاه V_{th} را می یابیم.

$$V_{OC} = V_{AB} = V_{th} = 6 \times 3/3 - 10 = 10 \text{ V}$$

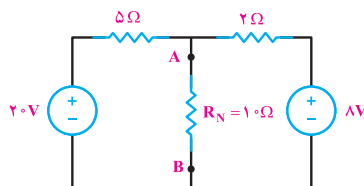
گام ۳) مطابق شکل ۱-۷۱ مدار معادل تونن ترسیم می شود.



شکل ۱-۷۱

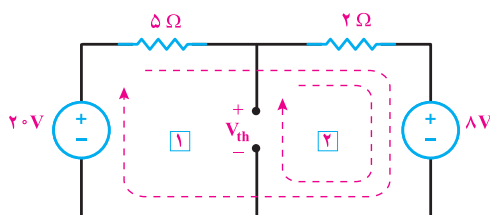
۶-۱۰-۱- حل تمرین شماره ۲۱ صفحه ۵۳ کتاب درسی (شکل ۱-۷۲)

هدف : محاسبه جریان R_L از روش مدار معادل تونن



شکل ۱-۷۲

در ابتدا V_{OC} را می‌یابیم. برای این کار ابتدا R_L را از مدار باز می‌کنیم.
گام ۱) بار R_L را حذف کرده و مطابق شکل ۱-۷۳ داریم:



شکل ۱-۷۳

گام ۲) نوشتن KVL در حلقه‌های مربوطه، حل معادلات و یافتن V_{th}

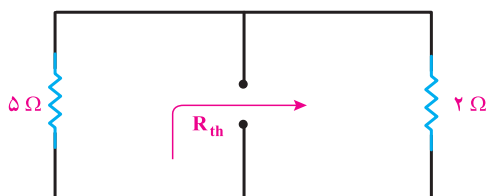
در حلقه بزرگ $KVL_1) -2 + 5I + 2I + 8 = 0$

$KVL_2) -V_{th} + 2I + 8 = 0$

$$\begin{cases} I = 1/11 \text{ A} \\ V_{th} = 11/43 \text{ A} \end{cases}$$

محاسبه R_{th}

گام ۳) حذف تمام منابع و محاسبه مقاومت معادل از دو سر A و B (شکل ۱-۷۴).

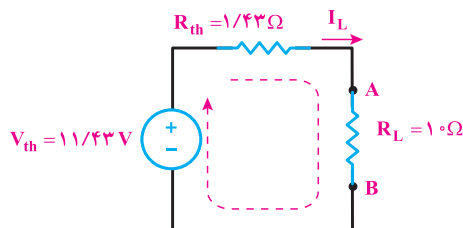


شکل ۱-۷۴

معادل تونن مدار یک مقاومت و ولتاژ سری می‌باشد.

گام ۴) مقاومت R_L را به دو سر A و B وصل می‌کنیم و مطابق شکل ۱-۷۵ با نوشتن یک

KVL مقدار جریان بار I_L را به دست می‌آوریم.



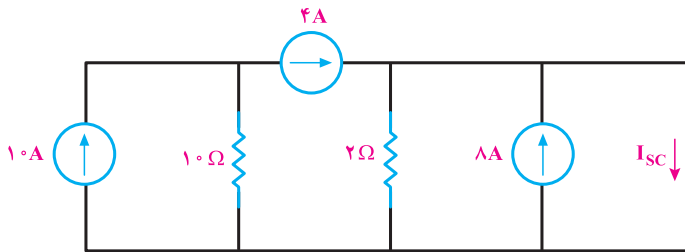
شکل ۱-۷۵

گام ۵) KVL مربوطه را نوشته و I_L را محاسبه می کنیم.

$$\text{KVL)} -11/43 + 1/43 I_L + 10 I_L = 0, \quad I_L = 1A$$

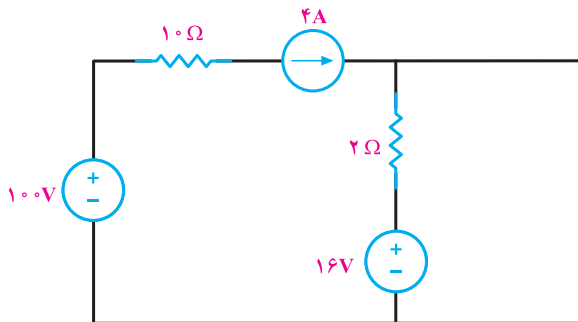
۷-۱۰-۱- حل تمرین شماره ۲۱ صفحه ۵۳ کتاب درسی

هدف: محاسبه جریان R_L را از روش مدار معادل نورتن برای دریافت توان ماکزیمم:
 ابتدا مطابق شکل ۱-۷۶ به محاسبه I_{SC} می پردازیم.



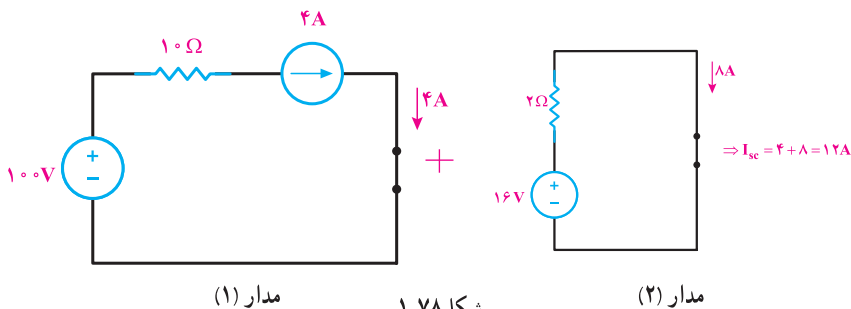
شکل ۱-۷۶

گام ۱) بار R_L را اتصال کوتاه می کنیم.
 گام ۲) با استفاده از تبدیل منابع مدار مطابق شکل ۱-۷۷ معادل خواهد شد.



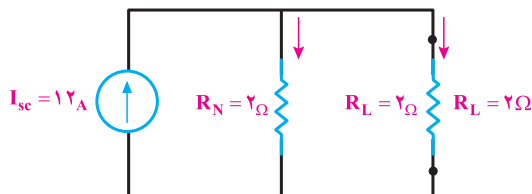
شکل ۱-۷۷

مدار بالا دقیقاً مانند ۲ مدار به صورت زیر عمل می کند.



شکل ۱-۷۸

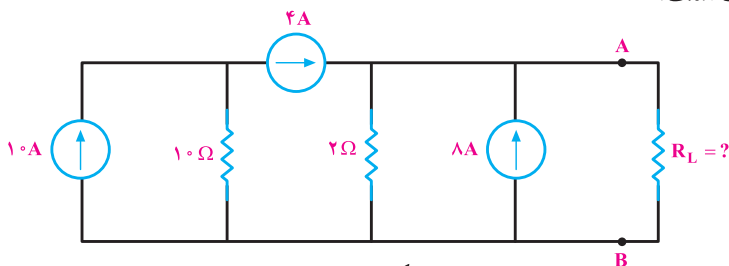
بنابراین جریان I_{SC} معادل $12A$ از جمع اثر دو مدار دیده شده خواهد بود. با توجه به مقدار R_N برابر 2Ω (دریافت توان ماکزیمم) و مدار معادل نورتن و برابر R_L و مقدار جریان R_L برابر $6A$ خواهد بود. (شکل ۱-۷۹)



شکل ۱-۷۹

۸-۱۰-۱- حل تمرین شماره ۲۱ صفحه ۵۳ کتاب درسی (شکل ۱-۸۰)

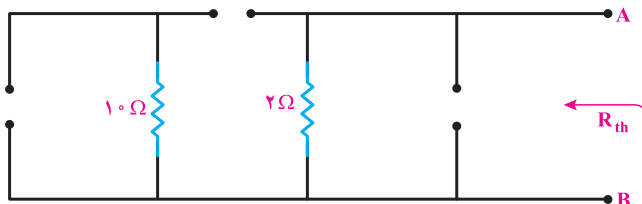
در شکل ۱-۸۰ مقدار R_L چقدر باشد تا حداکثر توان به آن منتقل شود در این حالت حداکثر توان چند وات است؟



شکل ۱-۸۰

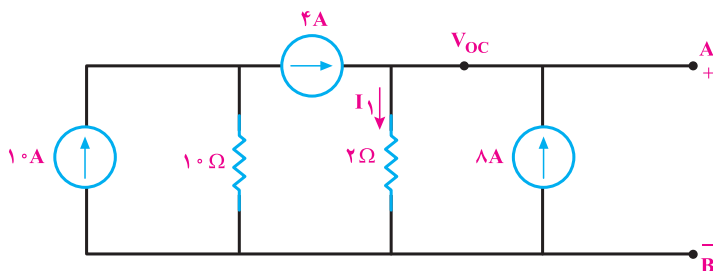
هدف :

- (۱) محاسبه توان ماکزیمم
 - (۲) محاسبه R_L تحت شرایطی که P_{max} به بار برسد.
 - (۳) برای اینکه ماکزیمم توان اتفاق بیفتد، باید بار با مقاومت دیده شده از دو سر بار برابر باشد.
- گام ۱) محاسبه R_{th} دیده شده از دو سر بار مطابق شکل ۱-۸۱ منابع را بی اثر می کنیم. یعنی هر سه منبع جریان باز می شوند و مقدار $R_{th} = 2\Omega$ به دست می آید.



شکل ۱-۸۱

گام ۲) محاسبه V_{OC} همان طور که در شکل ۱-۸۲ دیده می شود با استفاده از kcl می توانیم جریان I_1 را به دست آوریم و از آنجا به مقدار V_{OC} برسیم.

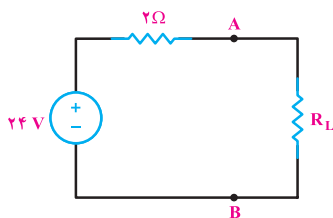


شکل ۱-۸۲

$$\text{KCL) } 4 + 8 - I_1 = 0, \quad I_1 = 12 \text{ A}$$

$$V_{OC} = 2I_1 = 24 \text{ V}$$

گام ۳) بار R_L را به دو سر معادل تونن اضافه کرده تحت شرایطی که $R_L = R_{th}$ شود. (شکل ۱-۸۳)



شکل ۱-۸۳

$$R_{th} = 2\Omega$$

گام ۴) محاسبه P_{max} با توجه به فرمول مربوطه.

$$P_{max} = \frac{V_{th}^2}{4R_{th}}$$

$$P_{max} = \frac{(24)^2}{4(2)} = \frac{24 \times 24}{8} = 72 \text{ W}$$

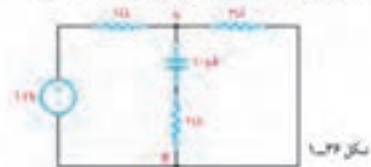
۱-۱-۱ وجود سلف و خازن در مدارهای جریان مستقیم

هنگامی که در درس مبانی برق با مفهوم ثابت زمانی آشنا شده اند و به رفتار سلف و خازن در حالتی که از اتصال آنها به منبع جریان و ولتاژ بیش از ۵ ثابت زمانی گذشته باشد اشاره شده است. خازن پس از ۵ ثابت زمانی تقریباً به حالت ماندگار خود رسیده است و دیگر از آن جریانی عبور نمی کند و می توان آن را مدار باز در نظر گرفت.

کاهش می‌یابد و از بین می‌رود به‌طوری‌که پس از گذشت ۵ ثابت زمانی، جریان مدار به حداکثر مقدار خود می‌رسد و نیروی محرکه‌ی خود القایی سلف صفر می‌شود. به‌طوری‌که می‌توان گفت **وقتی یک مدار جریان مستقیم دایم سلف به حالت ماندگار می‌رسد، ولتاژ در سر سلف صفر است و سلف به‌صورت یک هادی اتصال کوتاه عمل می‌کند**. در واقع دیگر در مدار دایره نمی‌شود و وقتی ندارد. البته در این حالت، به‌دلیل عبور جریان از سلف، مقداری انرژی در آن ذخیره می‌شود. ضمن این‌که جریان مدار ماکزیمم است. از زمان کلیدزنی تا زمان پایدار شدن را می‌گوییم مدار در حالت گذراست. از آنجا که در عمل در بسیاری موارد و به‌خصوص در وسایل الکترونیکی به مدارهای جریان مستقیم، برمی‌خوریم که از عناصر غیرفعال چون سلف، خازن و مقاومت اهمی درست شده‌اند، به‌حل کردن نمونه‌هایی از این مدارها در حالت پایدار می‌پردازیم. لازم به ذکر است که بررسی مدارها در حالت گذرا از حیطه‌ی این درس خارج است و در دوره‌های بالاتر به آن می‌پردازند.

مثال ۱۵: مدار شکل ۱-۳۶ در حالت ماندگار است. مطلوب است محاسبه‌ی:

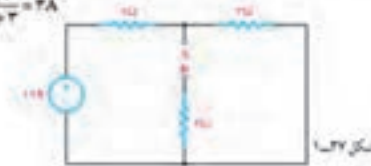
الف - جریان مقاومت ۳ اهمی. ب - انرژی ذخیره شده در خازن.



را د حل:

الف - در حالت ماندگار، خازن شارژ می‌شود و مانند کلید باز عمل می‌کند. پس مدار به‌صورت شکل ۱-۳۷ درمی‌آید و جریان مقاومت ۳ اهمی برابر است با:

$$I_{R3} = \frac{10}{1+3} = 2.5 \text{ A}$$



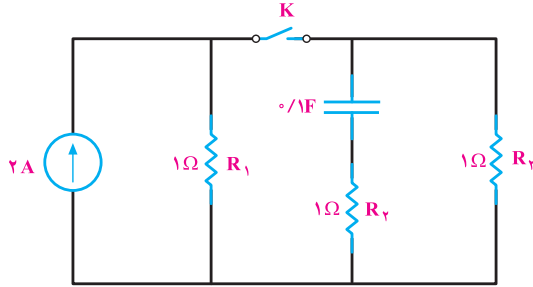
سلف نیز پس از ۵ ثابت زمانی تقریباً به حالت ماندگار خود رسیده است و می‌توان آن را به صورت اتصال کوتاه در نظر گرفت.

انرژی ذخیره شده در خازن از رابطه $W_C = \frac{1}{2} C V_C^2$ و بار خازن از رابطه $q = C \cdot V$ محاسبه می‌شود.

انرژی ذخیره شده در سلف از رابطه $W_L = \frac{1}{2} L I_L^2$ به دست می‌آید.

۱-۱۱-۱- حل تمرین شماره ۱۸ صفحه ۵۱ کتاب درسی (شکل ۸۴-۱)

هدف: در شکل ۱-۸۴ پس از وصل کلید مدار و رسیدن مدار به حالت پایدار انرژی ذخیره شده در خازن را بیابید.

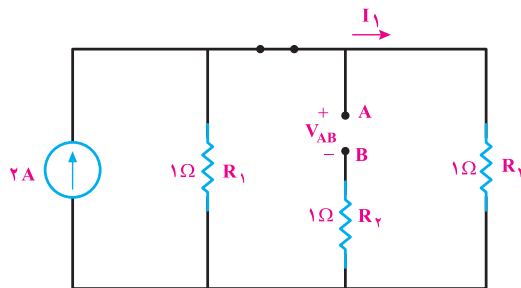


شکل ۱-۸۴

گام ۱) اتصال کلید K

خازن پس از رسیدن مدار به حالت پایدار (تعداد ۵ ثابت زمانی) خود به صورت اتصال باز در نظر گرفته می شود.

تحلیل مدار با شرایط جدید، مدار پس از رسیدن به حالت پایدار به صورت زیر خواهد بود. مطابق شکل ۱-۸۵ خازن از محل دو سر A و B باز می شود.



شکل ۱-۸۵

گام ۲) برای محاسبه انرژی ذخیره شده در خازن، باید ولتاژ دو سر خازن (A و B) محاسبه شود.

تذکر: مقاومت R_2 سری شده با خازن، با باز شدن خازن از مدار خارج می شود و چون جریانی از این مقاومت عبور نمی کند پس ولتاژ دو سر خازن یا V_{AB} همان ولتاژ دو نقطه A و C است. ($V_{AB} = V_{AC}$)
مقاومت R_1 و R_3 با همدیگر موازی هستند پس

$$I_1 = 2 \times \frac{1}{1+1} = 1 \text{ A}$$

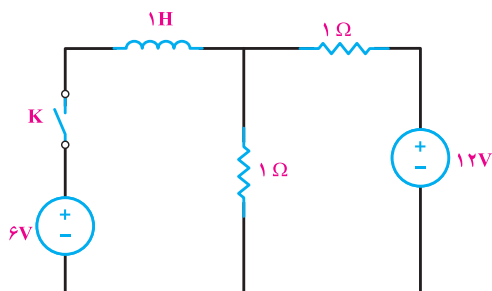
$$V_{AB} = 1 \times 1 = 1 \text{ V}$$

گام ۳) تعیین انرژی ذخیره شده در خازن با توجه به فرمول زیر :

$$W_C = \frac{1}{2} C V_{AB}^2 = \frac{1}{2} (0.5) (1)^2 = 0.25 \text{ J}$$

۱-۱۱-۲- حل تمرین شماره ۱۸ صفحه ۵۲ کتاب درسی (شکل ۱-۸۶)

هدف : محاسبه انرژی ذخیره شده در سلف در حالت ماندگار



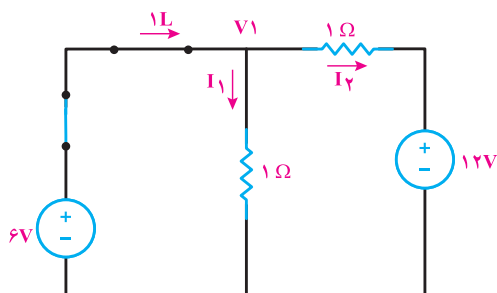
شکل ۱-۸۶

گام ۱، اتصال کلید K

مدار پس از گذشت ۵ ثابت زمانی به حالت پایدار خود خواهد رسید و سلف اتصال کوتاه می شود.

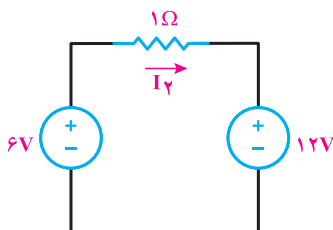
تحلیل مدار با شرایط جدید، مدار پس از رسیدن به حالت پایدار به صورت نشان داده شده در

شکل ۱-۸۷ خواهد بود.



شکل ۱-۸۷

گام ۲، مقاومت موازی با منبع ولتاژ حذف می شود و مطابق شکل ۱-۸۸ مدار زیر تشکیل می شود.



شکل ۱-۸۸

$$I_v = \frac{6 - 12}{1} = -6 \text{ A}$$

$$V_1 = 6 \text{ V} \rightarrow I_1 = 6 \text{ A}$$

$$\text{KCL}) -6 - I_L + 6 = 0, \quad I_L = 0 \text{ A}$$

یادآوری

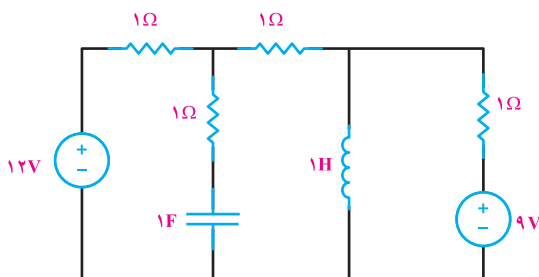
مقاومت موازی شده با منبع ولتاژ و مقاومت سری شده با منبع جریان بی اثر هستند.

گام ۳) تعیین انرژی ذخیره شده در سلف با توجه به فرمول زیر:

$$W_L = \frac{1}{2} L I_L^2 = \frac{1}{2} (1) (0)^2 = 0 \text{ W} \quad \text{مقدار انرژی ذخیره شده صفر است.}$$

۱-۱۱-۳- حل تمرین شماره ۱۹ صفحه ۵۲ کتاب درسی (شکل ۱-۸۹)

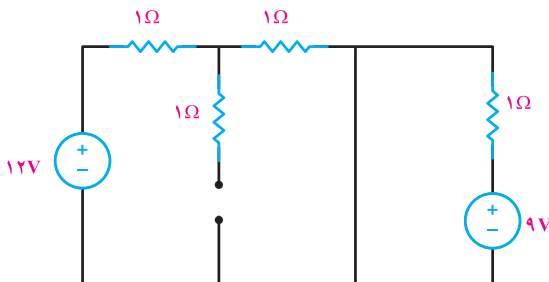
هدف: تعیین توان هر کدام از منابع ولتاژ در حالت پایدار (ماندگار)



شکل ۱-۸۹

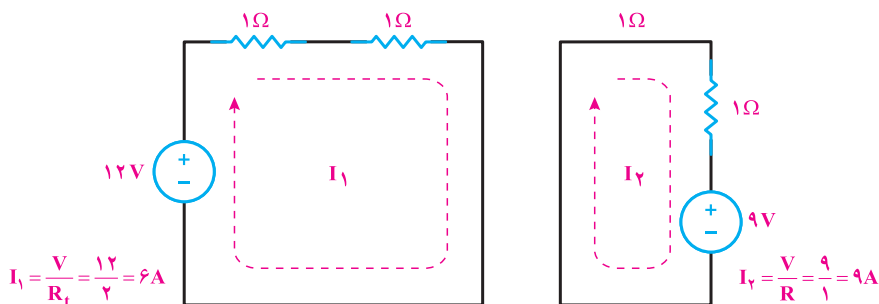
توجه: برای تحلیل مدار در حالت پایدار باید سلف را اتصال کوتاه کرده و خازن را اتصال باز کنید.

گام ۱) مدار را در حالت ماندگار فرض می‌کنیم که به صورت شکل ۱-۹۰ خواهد بود.



شکل ۱-۹۰

مدار بالا دقیقاً مثل دو شبکه و دو مدار جدا عمل می‌کنند. پس برای تحلیل آن دو مدار را جداگانه تحلیل می‌کنیم.



شکل ۹۱-۱

گام ۲) پس از محاسبه جریان‌ها به روش تحلیل جریان خانه، توان را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$P_{1V} = 12 \times (6) = 72 \text{ W} \quad \text{تولیدی}$$

$$P_{9V} = 9(I_2) = 9(9) = 81 \text{ W} \quad \text{تولیدی}$$

هنرآموزان گرامی

شرح راهنمای تدریس فصل اول کتاب مدارهای الکتریکی و توضیح شیوه حل بعضی مسائل آن در اینجا پایان می‌یابد. پیشنهاد می‌شود همکاران ارجمند، هنجریان را برای کسب مهارت بیشتر در حل تمرین و تسلط بر تحلیل مدارهای مختلف، تشویق به استفاده از کتاب کار مدار الکتریکی (کد ۴۷۱/۲) نمایند تا با حل مسائل بیشتر به مهارت کافی در درس مدار الکتریکی برسند.