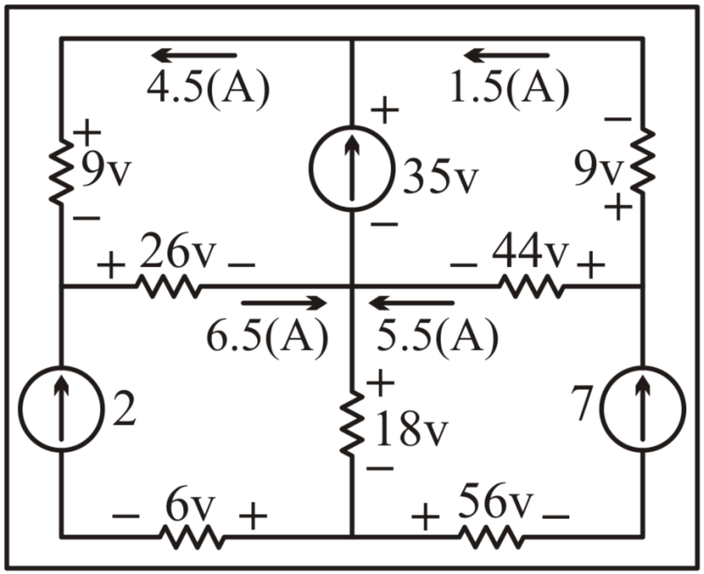
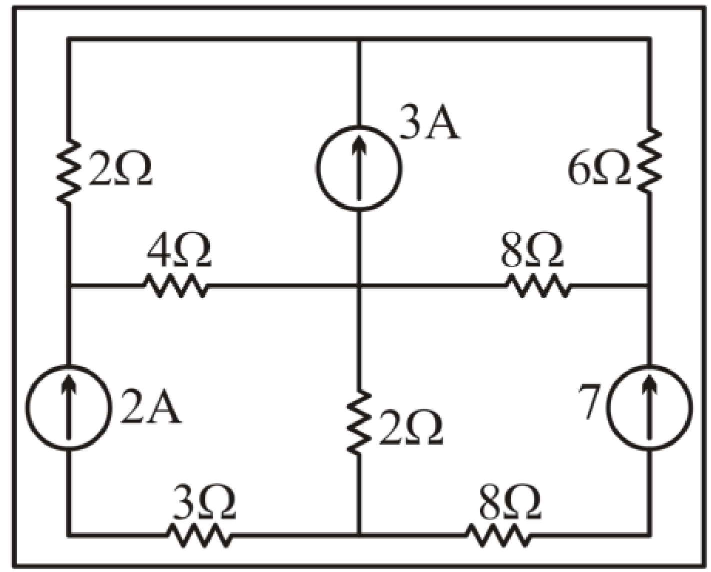
روش های تحلیل مدار

روش های تحلیل مدارهای مقاومتی

تحلیل مدار یعنی :



بعد از تحلیل



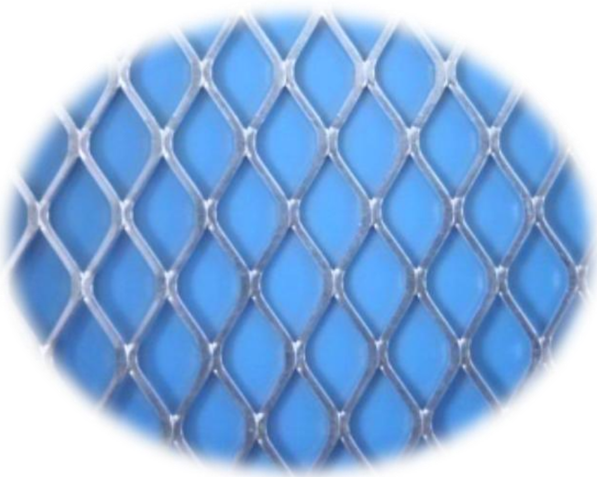
قبل از تحلیل

ابزار تحلیل مدار قوانین KVL و KCL هستند.

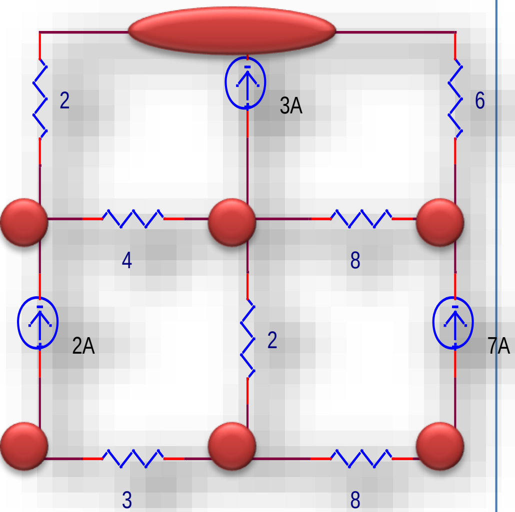
مهمترین روش های تحلیل یک مدار عبارتند از :

تحلیل گره

تحلیل مش



تحلیل گره



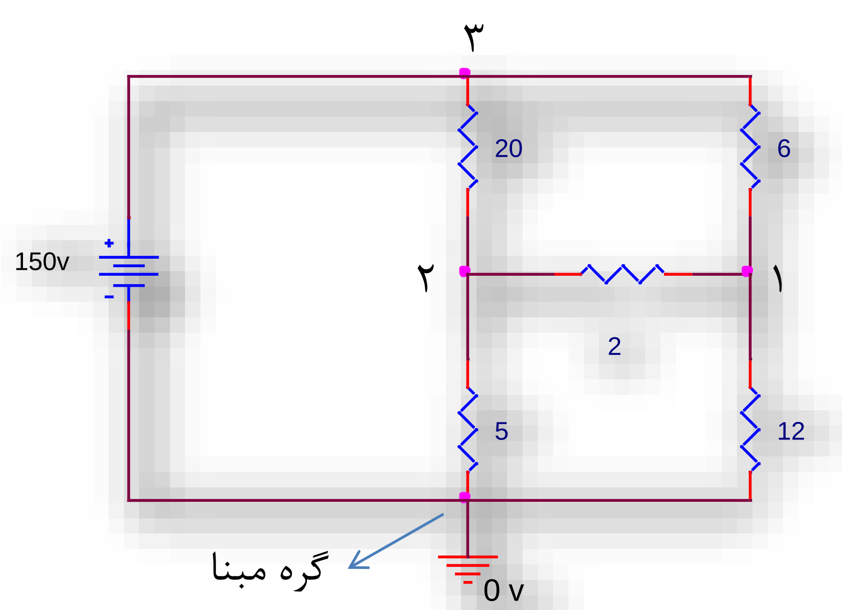
محل برخورد شاخه ها را گره گوییم.

آماده کردن مدار برای تحلیل از روش تحلیل گره :

۱.تمام منابع ولتاژ سری با مقاومت ها را تبدیل به منابع جریان می کنیم.

۲.گره ها را شماره گذاری می کنیم.

۳.ولتاژ یک گره دلخواه را مبنا گرفته و آن را به زمین وصل می کنیم.



مراحل تحلیل گره

۱. برای تمام گره ها بجز گره مبنا KCL می نویسیم.

(KCLها را بر اساس ولتاژهای گره ها می نویسیم.)

۲. n-معادله n-مجهولی بدست آمده را به روش کرامر یا روشهای دیگر حل می کنیم.

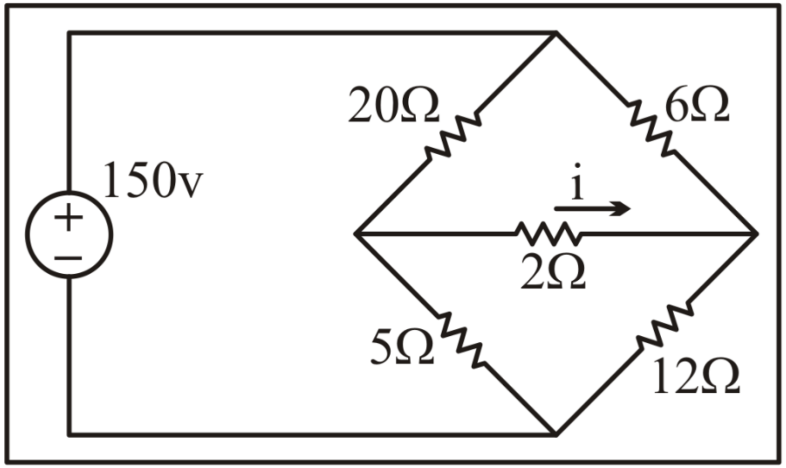
(متغیرهای ما در این معادلات ولتاژ گره ها می باشند.)

۳. با توجه به اینکه ولتاژ هر شاخه برابر است با تفاضل ولتاژ دو سر آن ، ولتاژ شاخه ها قابل محاسبه میشوند.

۴. جریان هر شاخه را نیز میتوان به کمک روابط بین ولتاژ و جریان شاخه ی مورد نظر بدست آورد.

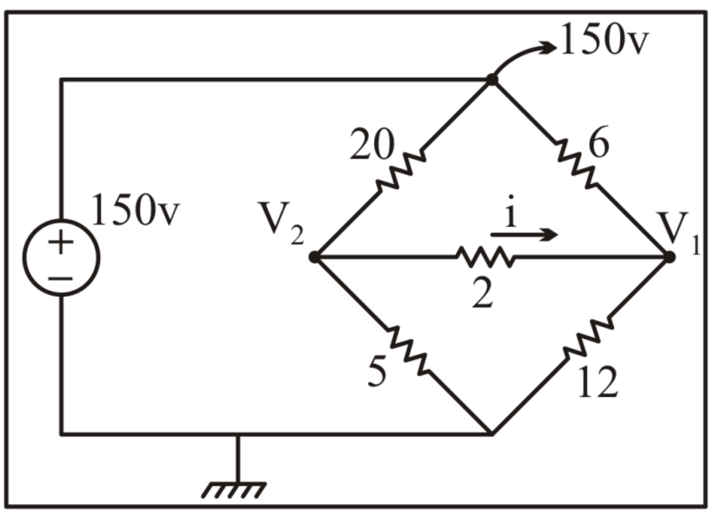
مثال ۱:

در مدار روبرو جریان **i** را بیابید.



حل:

ابتدا مدار را آماده می کنیم:



شروع به نوشتن KCL در گره ها می کنیم:

KCL در گره ۱ : $$\frac{V_1-150}{6}+\frac{V_1-V_2}{2}+\frac{V_1}{12}=0$$

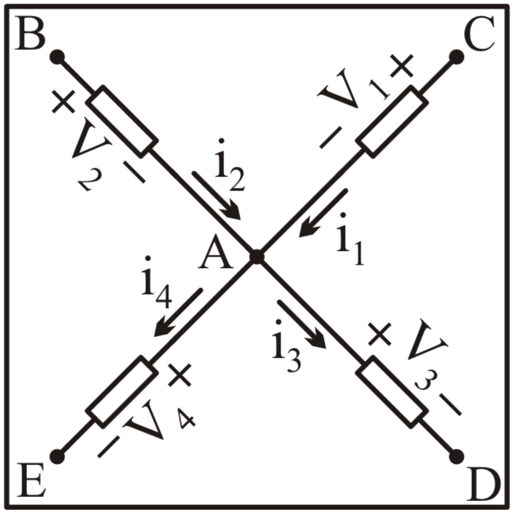
KCL در گره ۲ : $$\frac{V_2-150}{20}+\frac{V_2}{5}+\frac{V_2-V_1}{2}=0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_1=72\ \text{v} \\ V_2=58\ \text{v} \end{cases}$$

پس :

$$i=\frac{V_2-V_1}{2}=-7\ A$$

خروج از سردرگمی KCL ها



فرض کنید i_1, i_2, i_3, i_4 جریان هایی مثبت هستند.

پس جهت قراردادی ولتاژها اینگونه می باشند:

برای گره ی A ، KCL می نویسیم :

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4$$

و بر اساس ولتاژها :

$$\frac{V_C - V_A}{R_1} + \frac{V_B - V_A}{R_2} = \frac{V_A - V_D}{R_3} + \frac{V_A - V_E}{R_4}$$

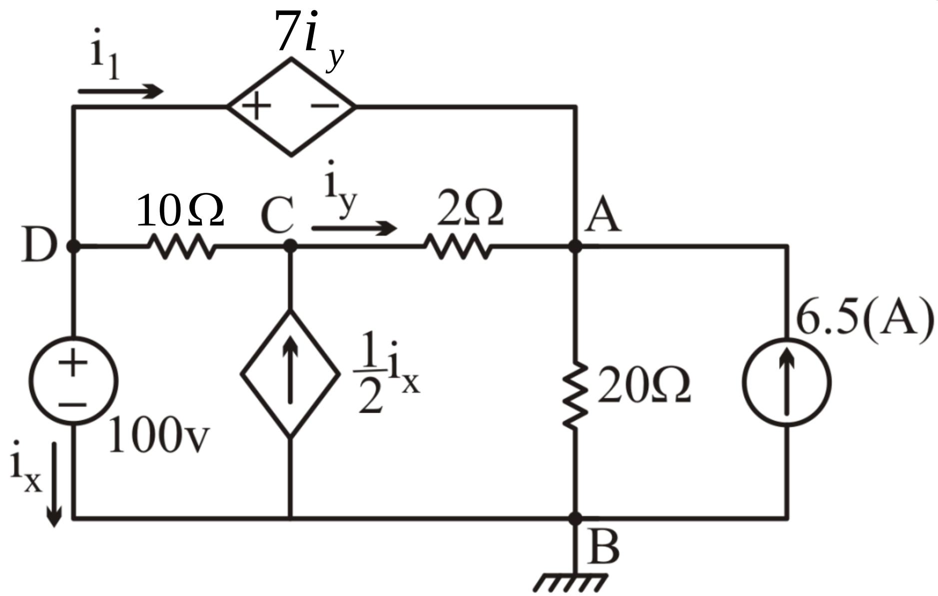
یا :

$$\frac{V_A - V_C}{R_1} + \frac{V_A - V_B}{R_2} + \frac{V_A - V_D}{R_3} + \frac{V_A - V_E}{R_4} = 0$$

فهمیدی !!؟؟؟

مثال ۲:

با استفاده از تحلیل گره ولتاژ گره A را بیابید .



حل :

KCL برای گره ی A :
$$\frac{V_A - V_C}{2} + \frac{V_A}{20} = i_1 + 6.5$$

KCL برای گره ی C :
$$\frac{V_C - V_A}{2} + \frac{V_C - V_D}{10} = 0.5 i_x$$

KCL برای گره ی D :
$$i_x + i_1 + \frac{V_D - V_C}{10} = 0$$

و به کمک شکل می یابیم :

$$V_D = 100 \text{ v} \quad , \quad \frac{V_C - V_A}{2} = i_y \quad , \quad V_D - V_A = 7 i_y$$

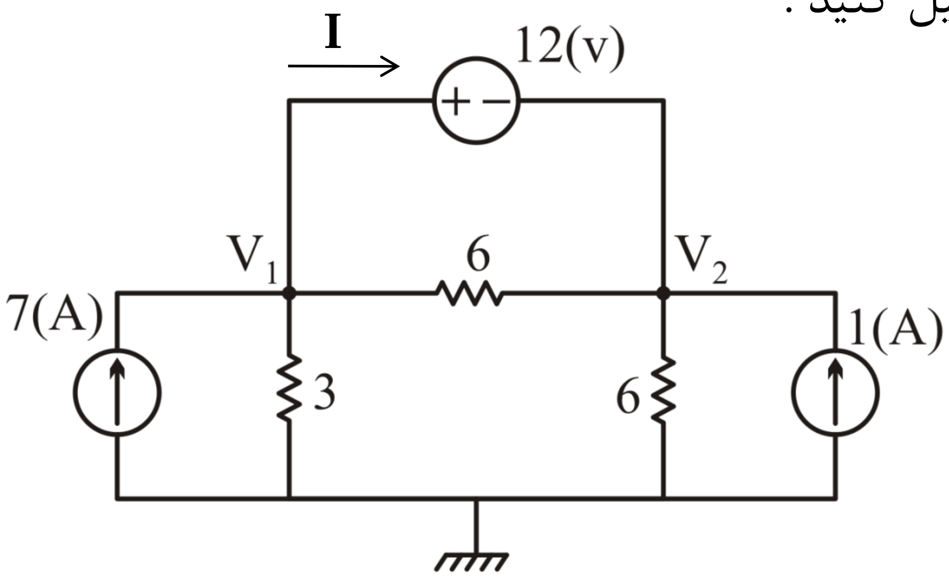
با ساده کردن این معادلات :

$$\Rightarrow \begin{cases} 9V_A - 12V_C = -330 \\ 5V_A - 7V_C = -200 \end{cases} \Rightarrow V_A = 30 \ v$$

گره مرکب

مثال ۳:

با استفاده از روش تحلیل گره مدار را تحلیل کنید .



حل :

KCL برای گره ی 1 : $$\frac{V_1}{3}+\frac{V_1-V_2}{6}+I=7$$

KCL برای گره ی 2 : $$\frac{V_2}{6}+\frac{V_2-V_1}{6}-I=1$$

با جمع ۲ معادله اخیر I حذف می شود :

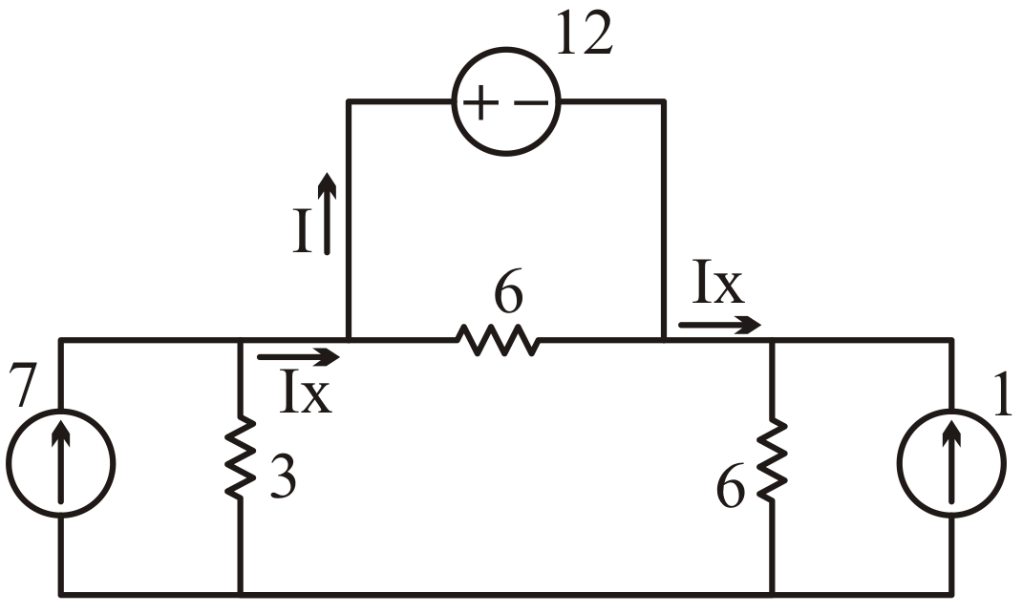
با توجه به شکل :

$$\begin{cases} 2V_1 + V_2 = 48 \\ V_1 - V_2 = 12 \end{cases}$$

با حل این دستگاه :

$$V_1 = 20\ \text{v} \ , \quad V_2 = 8\ \text{v}$$

حل مجدد مثال ۳ به کمک مفهوم گره مرکب :

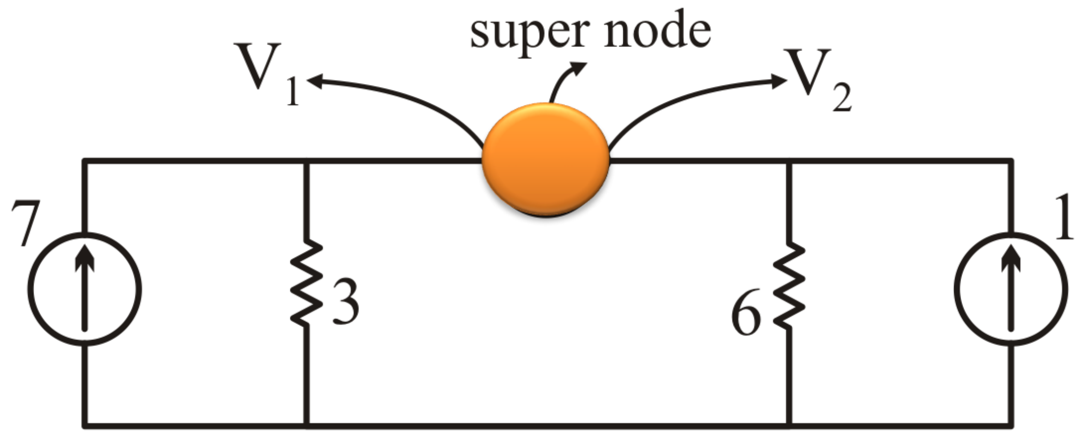


KCL برای گره ی 1 : $$\frac{V_1}{3}+\overbrace{\frac{V_1-V_2}{6}}^{I_x}+I=7$$

KCL برای گره ی 2 : $$\frac{V_2}{6}+\underbrace{\frac{V_2-V_1}{6}}_{-I_x}-I=1$$

$$\Rightarrow \frac{V_1}{3}+\frac{V_2}{6}=7+1$$

یعنی

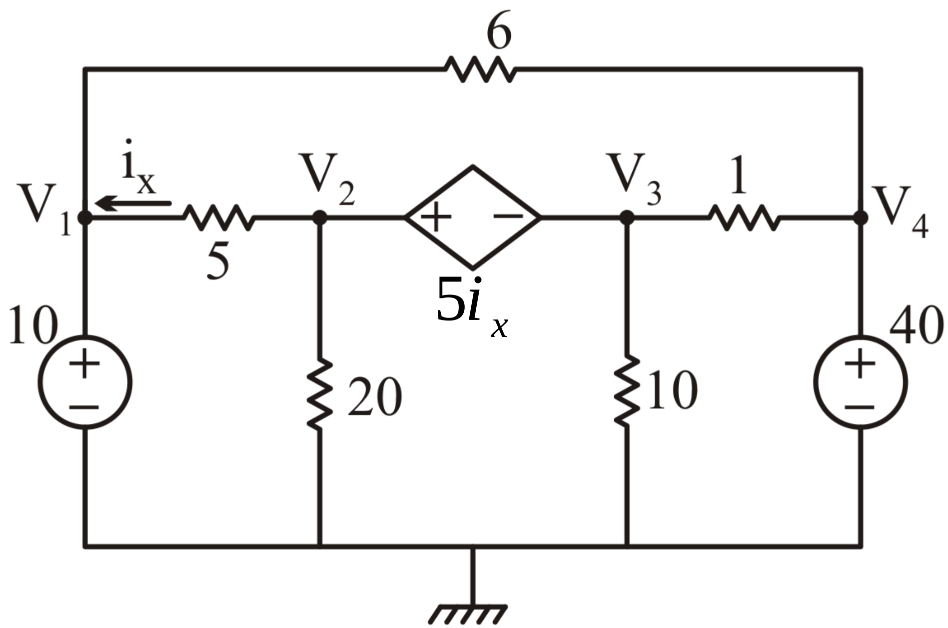


برای گره ی مرکب KCL: $\dfrac{V_1 - 0}{3} + \dfrac{V_2}{6} = 7 + 1$

ادامه ی حل نیز مشابه آنچه گفته شد می باشد .

مثال ۴:

ولتاژهای V_1, V_2, V_3, V_4 را بیابید.



حل :

ابتدا i_x را بر حسب ولتاژها می نویسیم:

$$i_x = \frac{V_2 - V_1}{5}$$

و از روی شکل می فهمیم :

$$\begin{cases} V_1 = 10 \text{ v} \\ V_4 = 40 \text{ v} \end{cases}$$

همچنین :

$$V_2 - V_3 = 5i_x = 5\left(\frac{V_2 - V_1}{5}\right) = V_2 - V_1$$

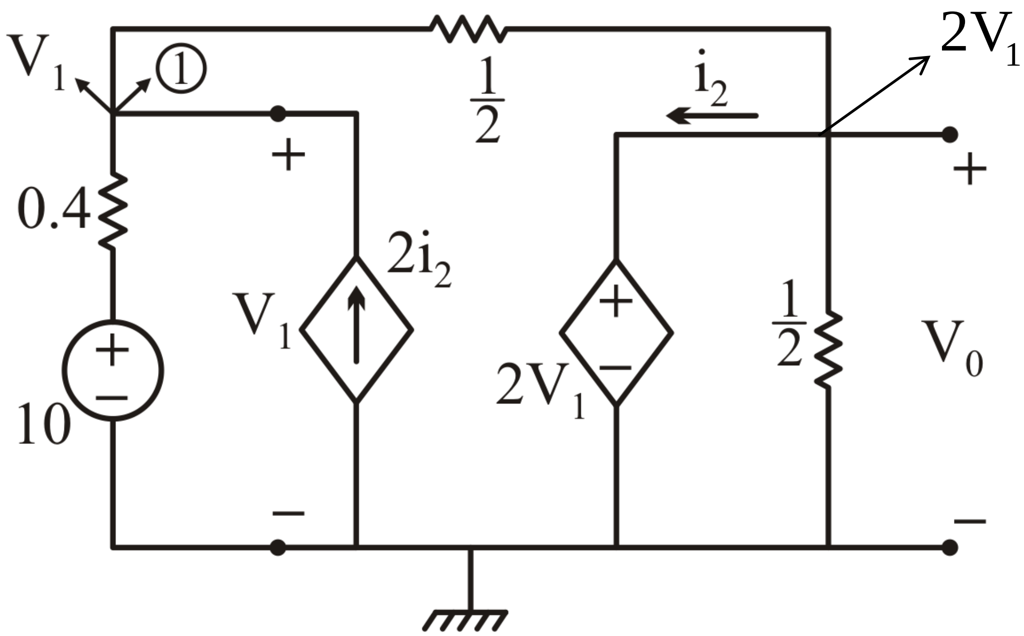
$$\Rightarrow \quad V_3 = V_1 = 10\ \text{v}$$

و با KCL در گره مرکب :

$$\frac{V_2 - 10}{5} + \frac{V_2}{20} + \frac{10}{10} + \frac{10 - 40}{1} = 0 \quad \Rightarrow \quad V_2 = 124\ \text{v}$$

مثال ۵ :

ولتاژ خروجی V_0 را محاسبه کنید.



از شکل مشخص است که :

$$V_o = 2V_1$$

پس مجهول ها V_1 , i_2 هستند :

KCL برای گره ی 1 : $$\frac{V_1 - 2V_1}{0.5} + \frac{V_1 - 10}{0.4} = 2i_2$$

KCL برای گره ی 2 : $$\frac{2V_1 - V_1}{0.5} + \frac{2V_1}{0.5} + i_2 = 0$$

و از حل این دستگاه :

$$V_1 = 2 \text{ v} \Rightarrow V_o = 2V_1 = 4 \text{ v}$$

تحلیل مش

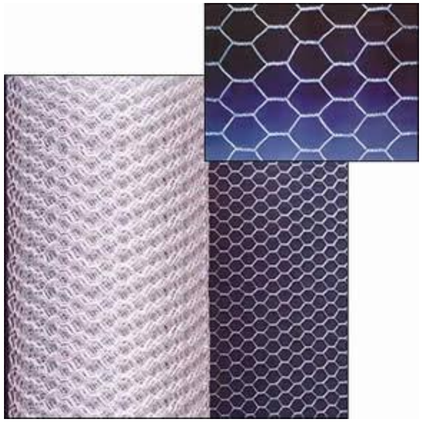
مش **حلقه**ای است که درونش حلقه ی دیگری نباشد .

این ویژگی مختص مدارهای مسطح یا صفحه ای است .

و مدار مسطح یعنی مداری که شکلش قابل رسم در صفحه

(۲ بعد 2D) باشد با این شرط که هیچ شاخه ای شاخه ی دیگر را

قطع نکند ، مگر در گره ها.



مش (Mesh) در زبان انگلیسی به معنای شبکه و تور می باشد.

آماده کردن مدار برای تحلیل مش

۱. منابع جریان موازی با مقاومت را به منابع ولتاژ سرس با آنها تبدیل می کنیم .

۲. تمامی مش ها را شماره گذاری می کنیم.

۳. برای هر مش در جهت دلخواه جریانی فرضی در نظر می گیریم .

(معمولاً در جهت عقربه های ساعت)

مراحل تحلیل مش

پس از آماده شدن مدار :

۱. برای هر مش KVL می نویسیم .

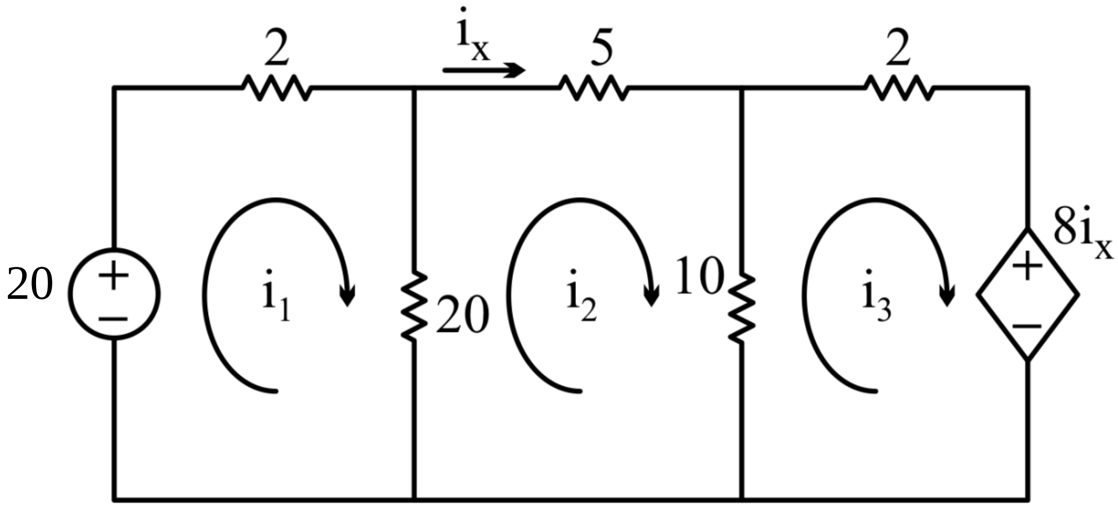
(KVLها را بر اساس جریان مشها می نویسیم.)

۲. n-معادله n-مجهولی را حل می کنیم تا جریان هر عنصر مشخص شود.

۳. ولتاژ دو سر عناصر با توجه به رابطه ی ولتاژ و جریانش قابل محاسبه می شود.

مثال ۶:

مدار مقابل را با روش تحلیل مش حل کنید .



حل :

KVL برای مش 1 : $$2i_1 + 20\left(i_1 - i_2\right) = 20$$

KVL برای مش 2 : $$5i_2 + 10\left(i_2 - i_3\right) + 20\left(i_2 - i_1\right) = 0$$

KVL برای مش 3 : $$2i_3 + 8i_x + 10\left(i_3 + i_2\right) = 10$$

با در نظر گرفتن $i_x = i_2$ و حل معادلات :

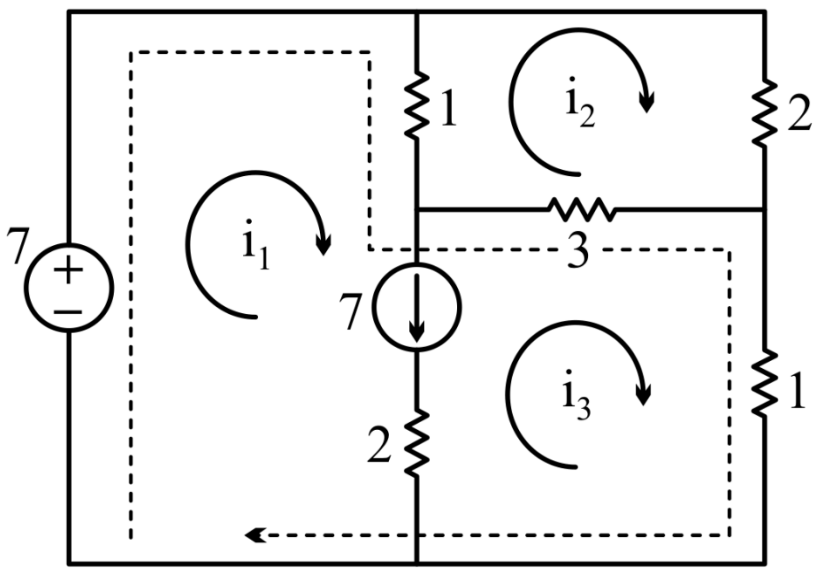
$$\begin{cases} i_1 = 2 \text{ A} \\ i_2 = 1.2 \text{ A} \\ i_3 = 0.2 \text{ A} \end{cases}$$

ابر مش

اگر بین ۲ مش (در مرزشان) منبع جریان باشد ، حلقه ی شامل آن دو را ابر مش گویند.

مثال ۷:

با استفاده از تحلیل مش جریانهای i_1, i_2, i_3 را محاسبه کنید.



حل :

KVL برای مش 2 : $$1(i_2 - i_1) + 2i_2 + 3(i_2 - i_3) = 0$$

KVL برای ابر مش 1,3 : $$-7 + 1(i_1 - i_2) + 3(i_3 - i_2) + i_3 = 0$$

و از روی شکل :

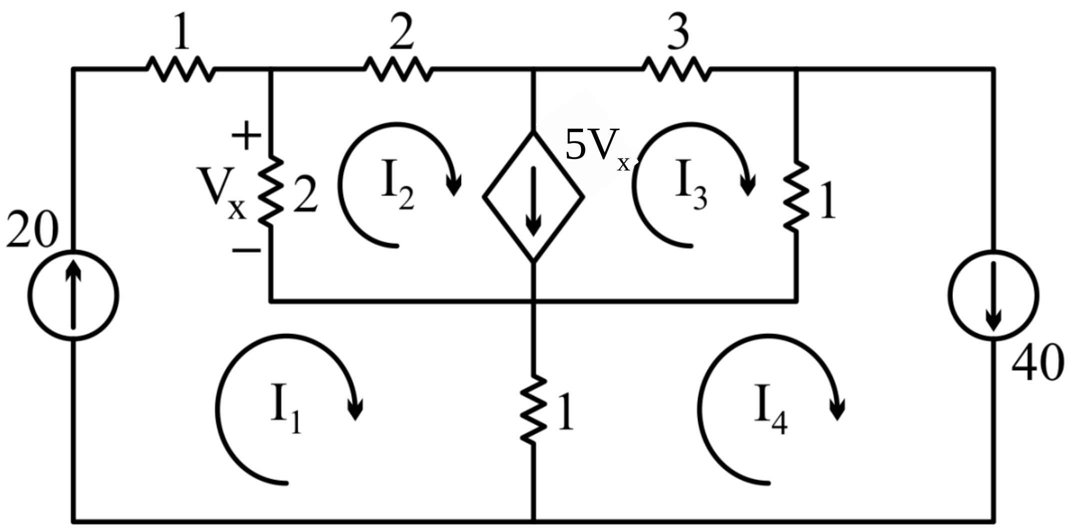
$$i_1 - i_3 = 7 \text{ A}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} -i_1 + 6i_2 - 3i_3 = 0 \\ i_1 - 4i_2 + 4i_3 = 7 \\ i_1 - i_3 = 7 \end{cases} \Rightarrow i_3 = \frac{\begin{vmatrix} -1 & 6 & 0 \\ 1 & -4 & 7 \\ 1 & 0 & 7 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1 & 6 & -3 \\ 1 & -4 & 4 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix}} = 2 \text{ A}$$

$$\Rightarrow \quad i_1 = 9 \text{ A}, \quad i_2 = 2.5 \text{ A}$$

مثال ۸ :

جریانهای i_4, i_3, i_2, i_1 را محاسبه کنید.



حل :

ظاهراً باید ۴ بار KVL بنویسیم ولی با نگاهی ساده :

$$i_1 = 20 \text{ A}, \quad i_4 = 40 \text{ A} \quad , V_x = 2(20 - i_2)$$

واز شکل مشخص است که :

$$i_2 - i_3 = 5V_x \quad \Rightarrow \quad i_3 = 11i_2 - 200$$

پس کافیست تنها یک KVL در مش مرکب (۳,۲) بزنیم :

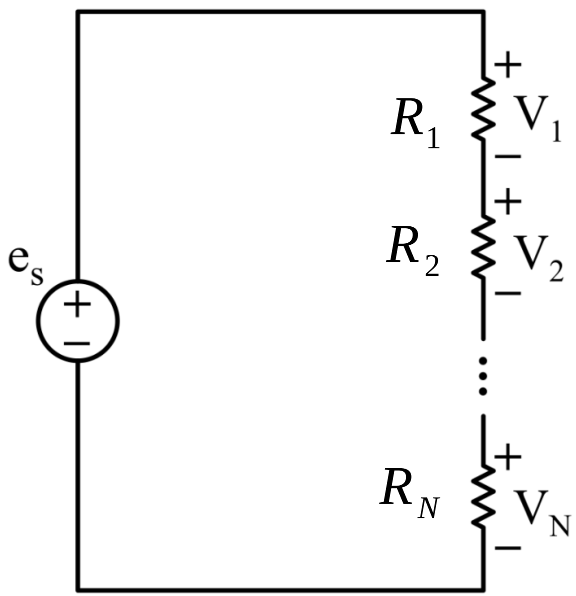
KVL برای ابر مش :

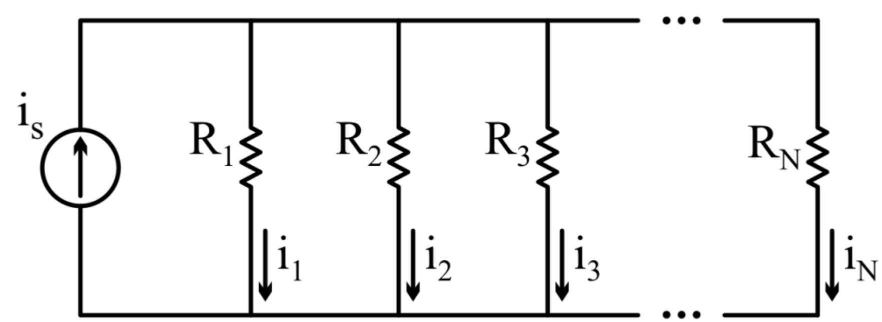
$$2i_2 + 3(11i_2 - 200) + 1(11i_2 - 200 - 40) + 2(i_2 - 20) = 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} i_2 = 18.33 \text{ A} \\ i_3 = 1.66 \text{ A} \end{cases}$$

تقسیم ولتاژ و جریان

از دبیرستان به خاطر داریم :



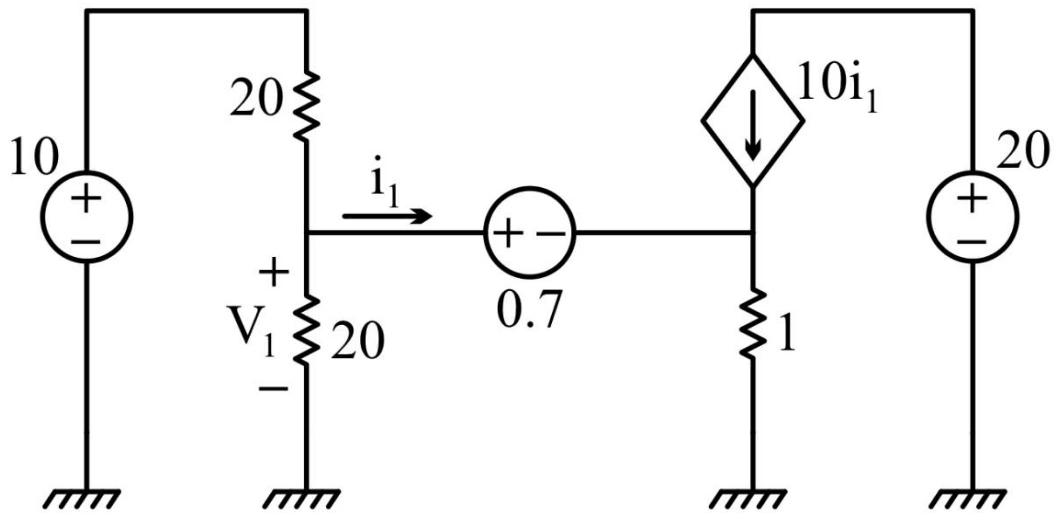


$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + \ldots + R_n} e$$

$$i_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2 + \ldots + G_n} i$$

مثال ۹ :

آیا میتوان برای تعیین V_1 از تقسیم ولتاژ استفاده کرد ؟



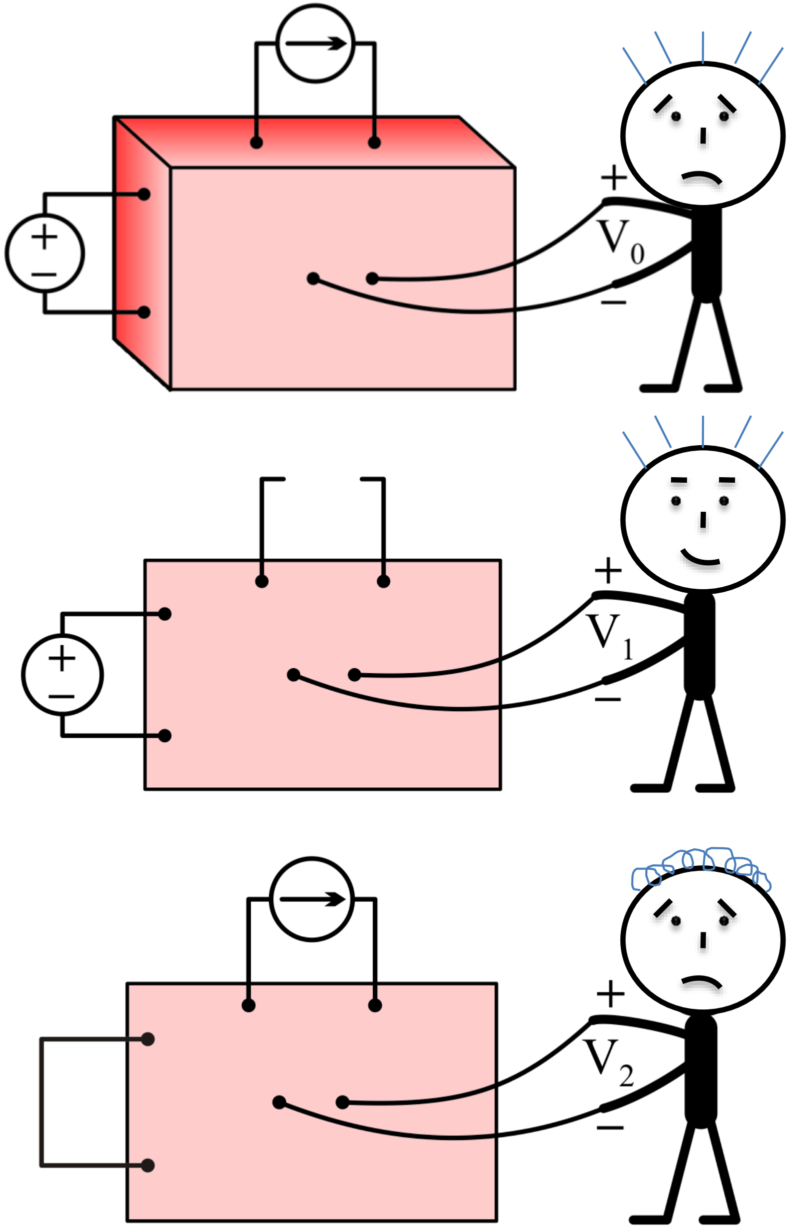
جمع آثار در تحلیل مدار مقاومتی

در یک شبکه **خطی** ، ولتاژ یا جریان یک عنصر را می توان

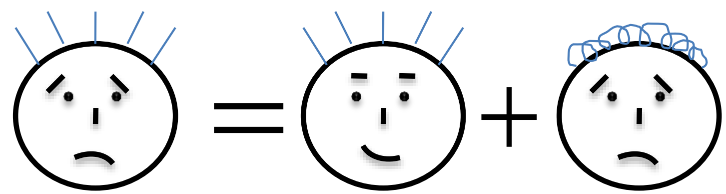
از جمع اثر تک تک منابع مستقل بر روی آن بدست آورد .

یعنی :

- ✓ همه‌ی منابع مستقل را به جز یکی، صفر می‌کنیم.
- ✓ پاسخ حاصل از آن را می‌یابیم.
- ✓ این کار را برای سایر منابع نیز انجام می‌دهیم.
- ✓ نتایج را با هم جع می‌کنیم.

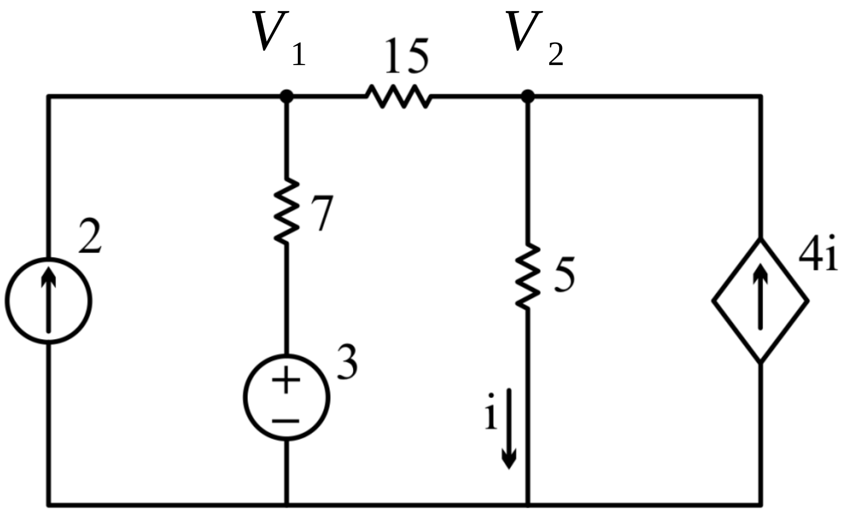


$$V_o = V_1 + V_2$$



مثال ۱۰ :

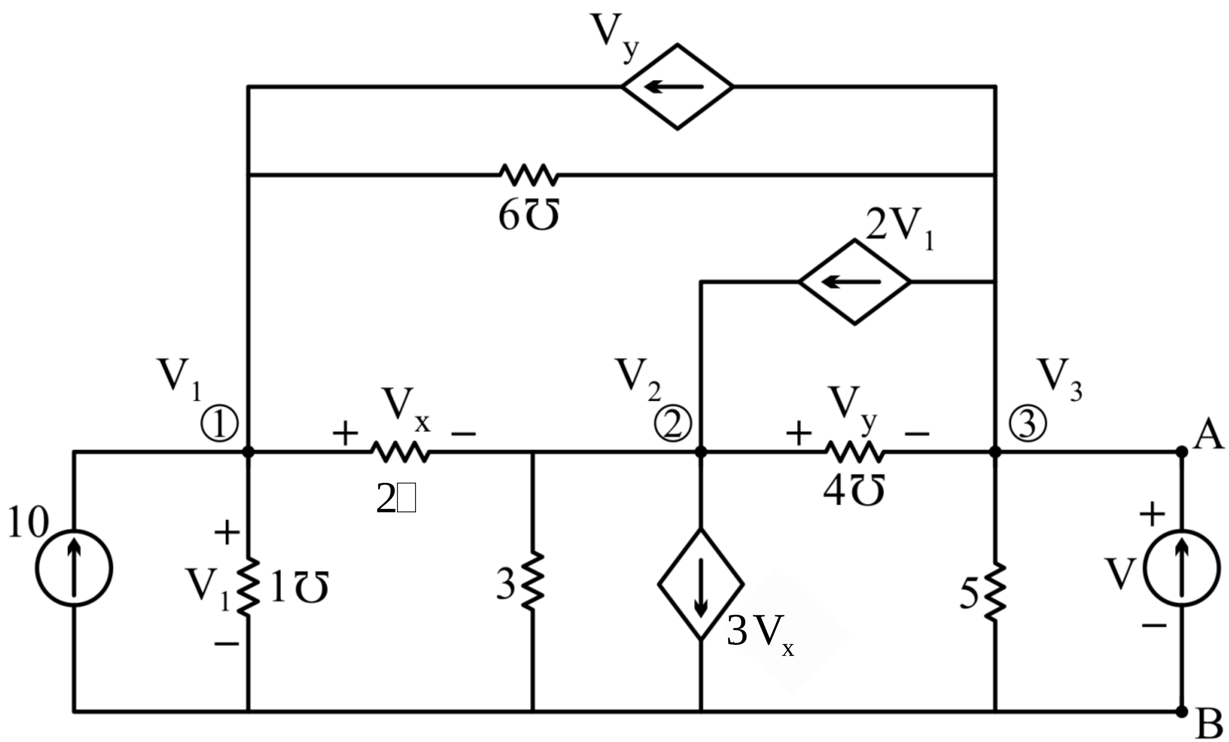
در مدار ولتاژ روی منبع جریان را به کمک اصل برهمنهی بدست آورید.



مدارهای معادل

مثال ۱۱ :

در مدار مقابل رابطه ی بین V و i را بدست آورید.



حل :

با کمک تحلیل گره :

$$V_x = V_1 - V_2 \quad , \quad V_y = V_2 - V_3$$

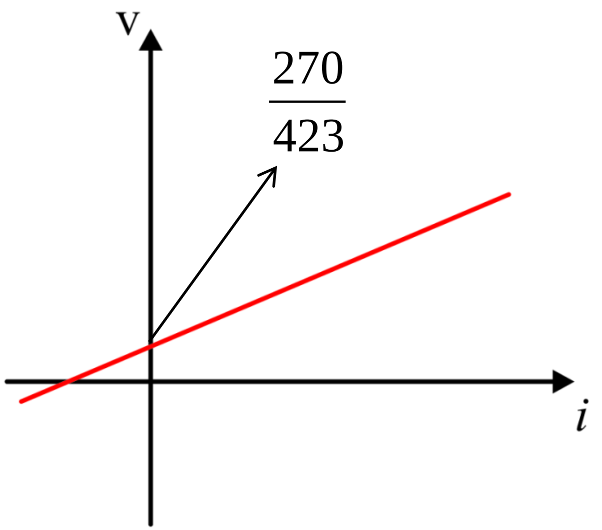
KCL برای گره 1 : $$-10 + V_1 + 2(V_1 - V_2) + 6(V_1 - V_3) - (\overbrace{V_2 - V_3}^{V_y}) = 0$$

KCL برای گره 2 : $$2(V_2 - V_1) + 3V_2 + 3(V_1 - V_2) + 4(V_2 - V_3) - 2V_1 = 0$$

KCL برای گره 3 : $$-I + 5V_3 + 4(V_3 - V_2) + 2V_1 + 6(V_3 - V_1) + V_2 - V_3 = 0$$

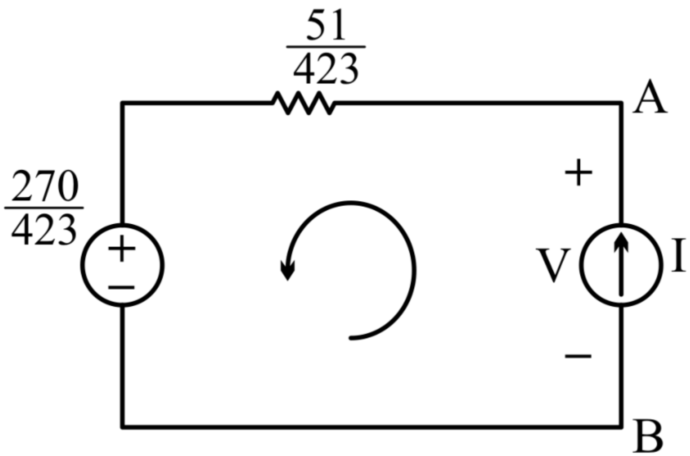
$$\Rightarrow \begin{cases} 9V_1 - 3V_2 - 5V_3 = 10 \\ -4V_1 - 3V_2 + 14V_3 = I \\ V_1 - 6V_2 + 4V_3 = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V = V_3 = \frac{\begin{vmatrix} 9 & -3 & 10 \\ -4 & -3 & I \\ 1 & -6 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 9 & -3 & -5 \\ -4 & -3 & 14 \\ 1 & -6 & 4 \end{vmatrix}} = \frac{51}{423} I + \frac{270}{423}$$

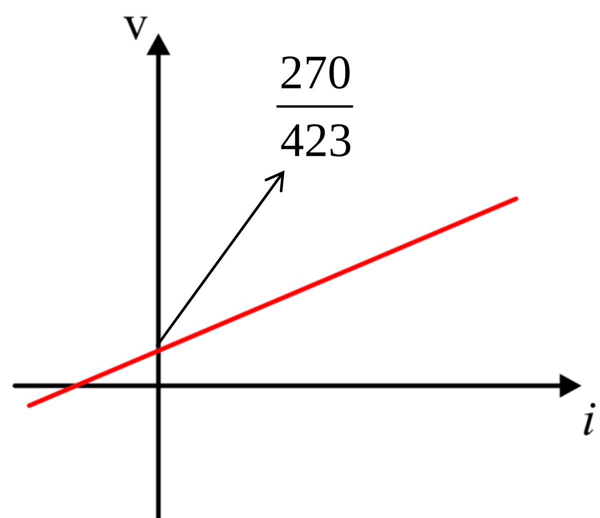


مثال ۱۲ :

در مدار مقابل رابطه ی بین Vو i را بدست آورید.



حل :



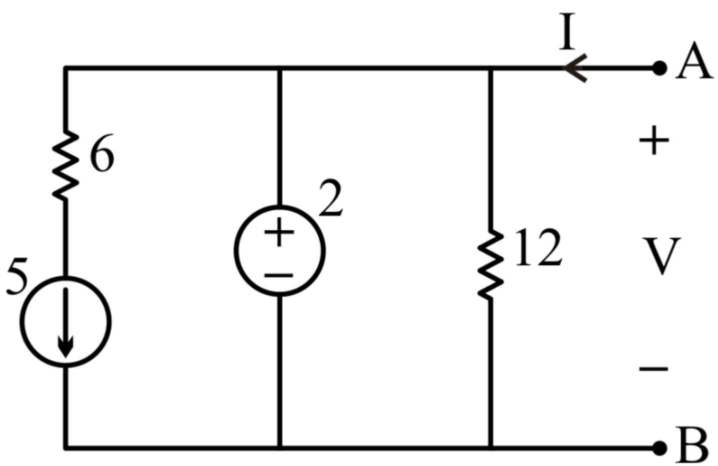
KVL : $V = \dfrac{51}{423} I + \dfrac{270}{423}$

دیدیم رابطه ی بین i , V در ۲ مثال قبل یکسان بود پس میتوان گفت :

این ۲ مدار از ۲ سر A و B **معادل** یکدیگرند و میتوانند جایگزین هم شوند .

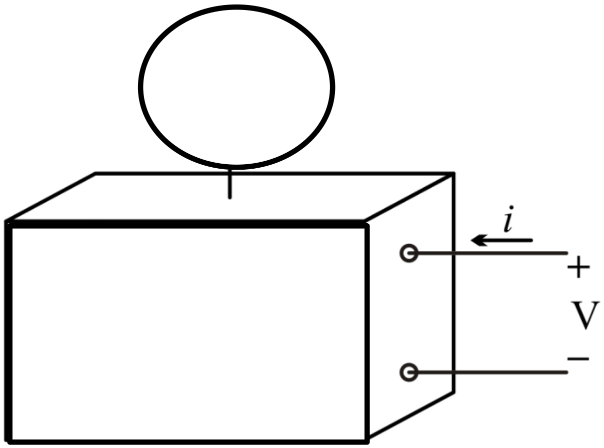
مثال ۱۳:

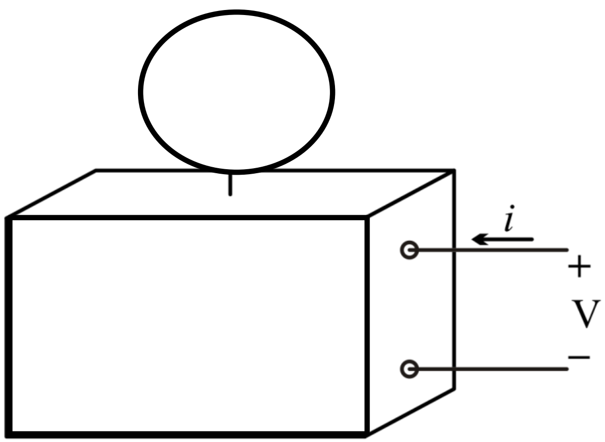
مداری معادل مدار مقابل از دو سر A , B بکشید .



مقدمه ای بر مدارهای معادل تونن ، نورتن

فرض کنید در هر یک از جعبه های زیر مداری خطی(شامل مقاومت، منابع وابسته و نابسته) وجود دارد و A و B دو سر از مدار باشد.





در این صورت رابطه ی V بر حسب i حتماً اینگونه خواهد بود :

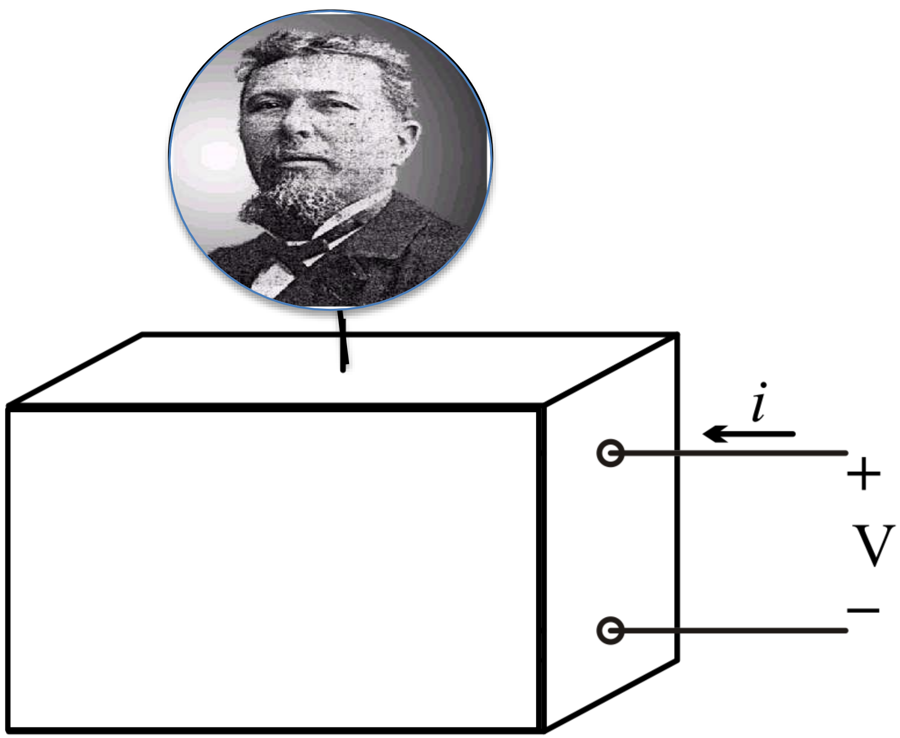
شرط **خطی** بودن

$$i = \frac{V}{a} - \frac{b}{a}$$

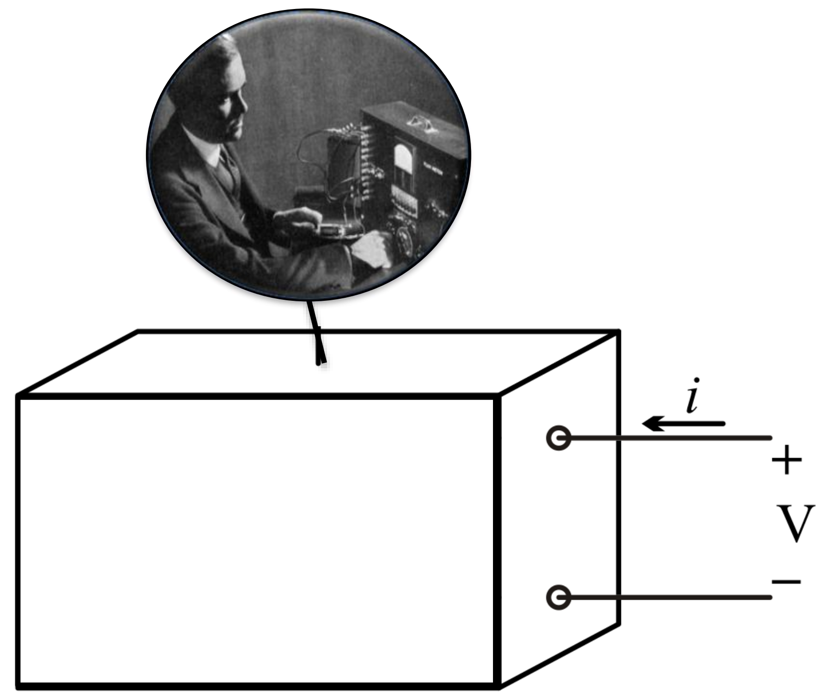
یا

$$V = ai + b$$

اکنون به کمک مدارهای معادل می توانیم بگوییم در جعبه ها این مدارها قرار داشته و کسی حق اعتراض ندارد. چرا؟



معادل تونن



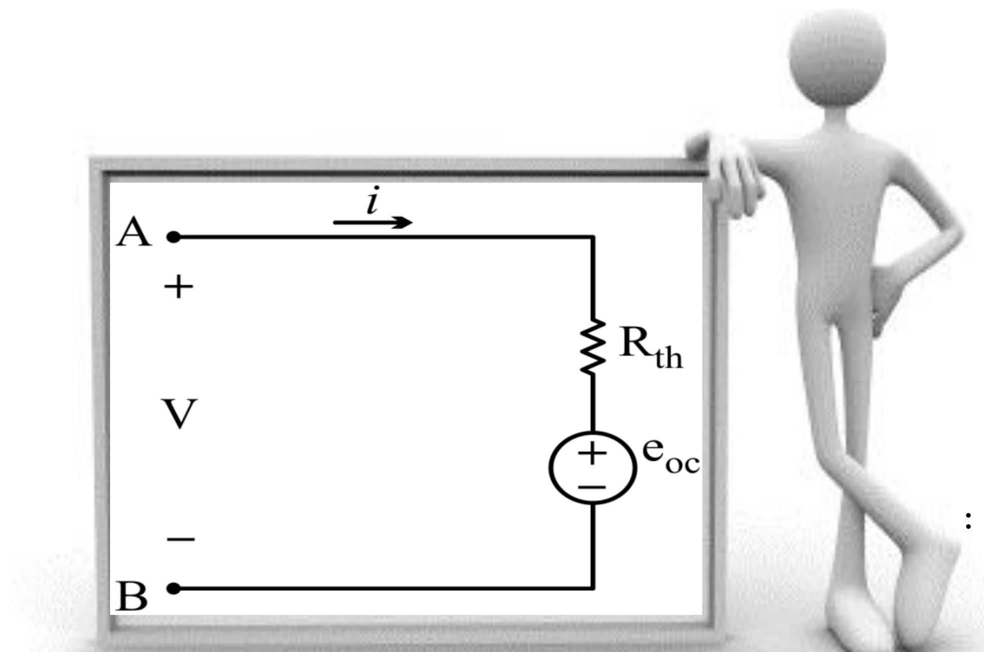
معادل نورتن

مدار معادل تونن

Léon Charles Thévenin

در این مدار معادل به جای a و b اینگونه می نویسیم :

$$V = R_{eq} i + e_{oc}$$

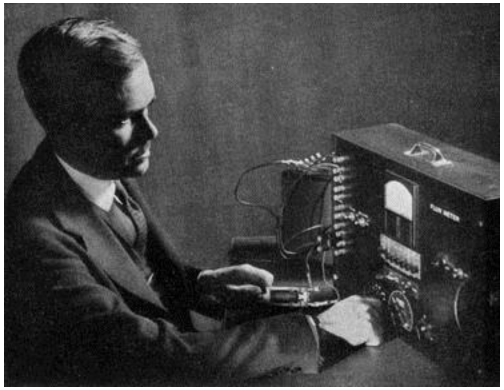


e_{oc} ولتاژِ مدار باز (open circuit) است چراکه :

اگر دوسر A و B باز باشد جریان صفر می شود پس : $V=e_{oc}$ می شود .

R_{eq} مقاومت ورودی از سرهای A و B یا مقاومت معادل تونن نام دارد.

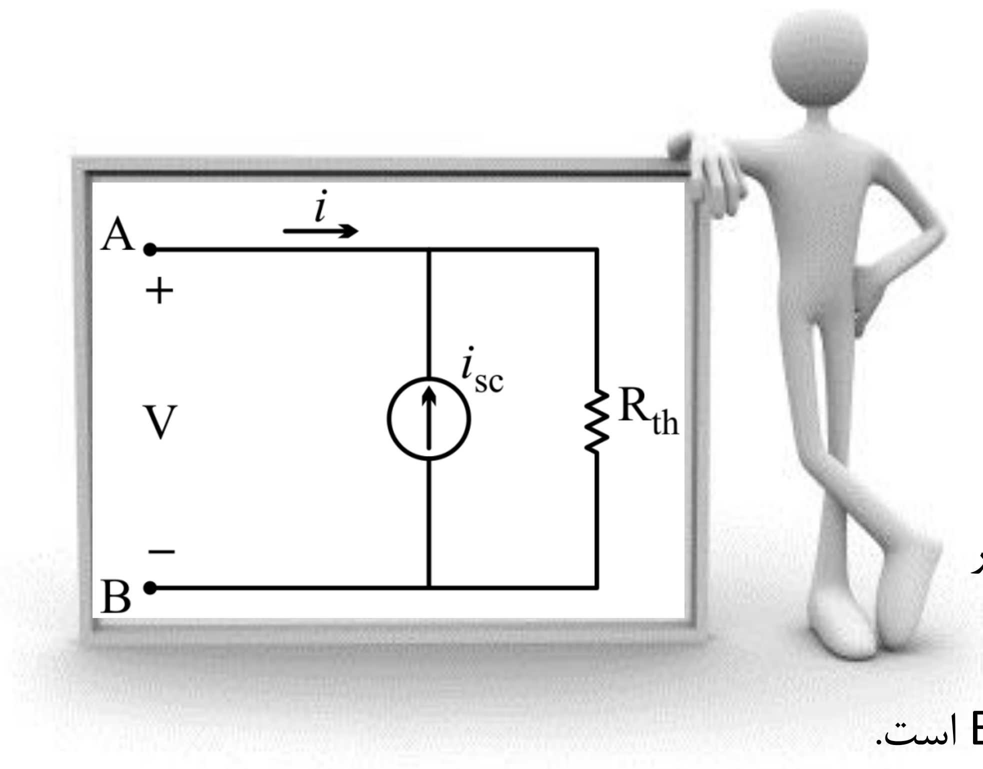
مدار معادل نورتن



Edward Lawry Norton

در این مدار معادل نیز به جای a و b اینگونه می نویسیم :

$$i = \frac{V}{R_{eq}} - i_{sc}$$

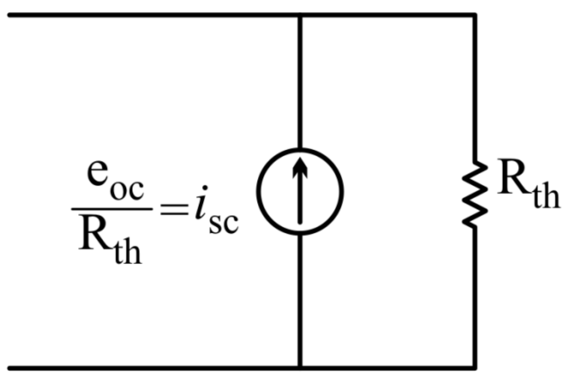


i_{sc} جریان اتصال کوتاه (short circuit) دو سر A,B می باشد :

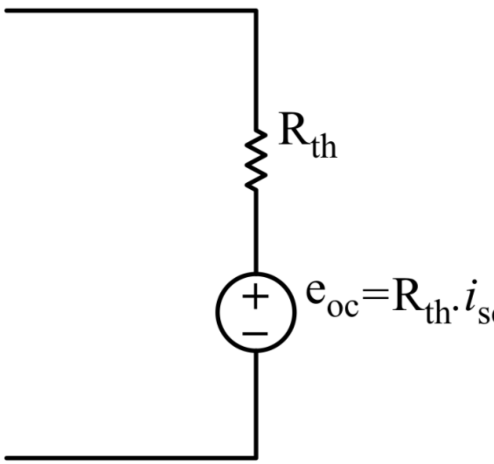
R_{eq} نیز همان مقاومت ورودی از سرهای A و B است.

تبدیل تونن به نورتن و برعکس

بدیهی است معادل های تونن و نورتن هم معادل یکدیگر هستند پس بین e_{oc} و i_{sc} باید رابطه ای باشد :

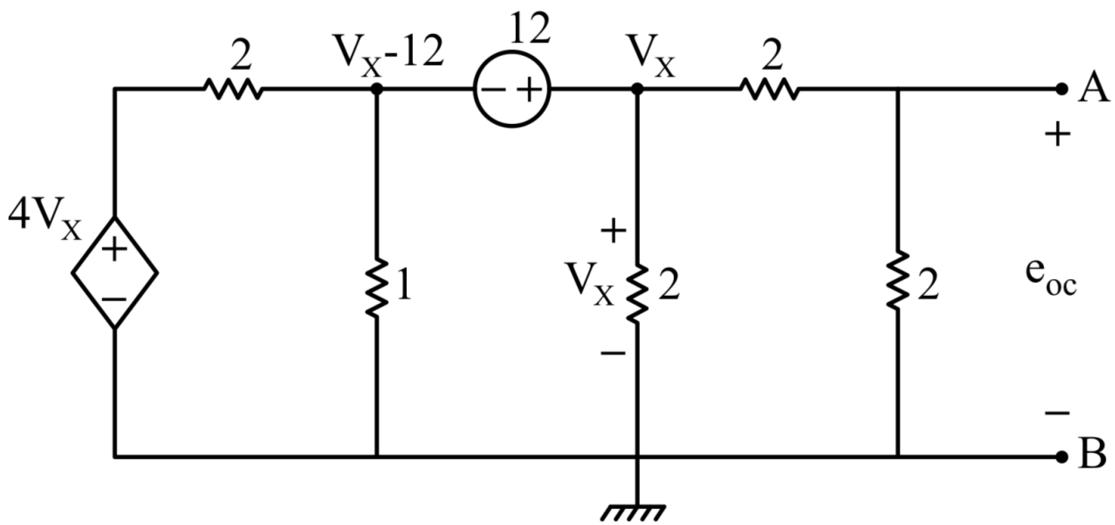


$$e_{oc} = R_{eq} . i_{sc}$$



مثال ۱۴:

در مدار زیر e_{oc} و i_{sc} و R_{eq} را جداگانه محاسبه کنید .



حل : محاسبه e_{oc}

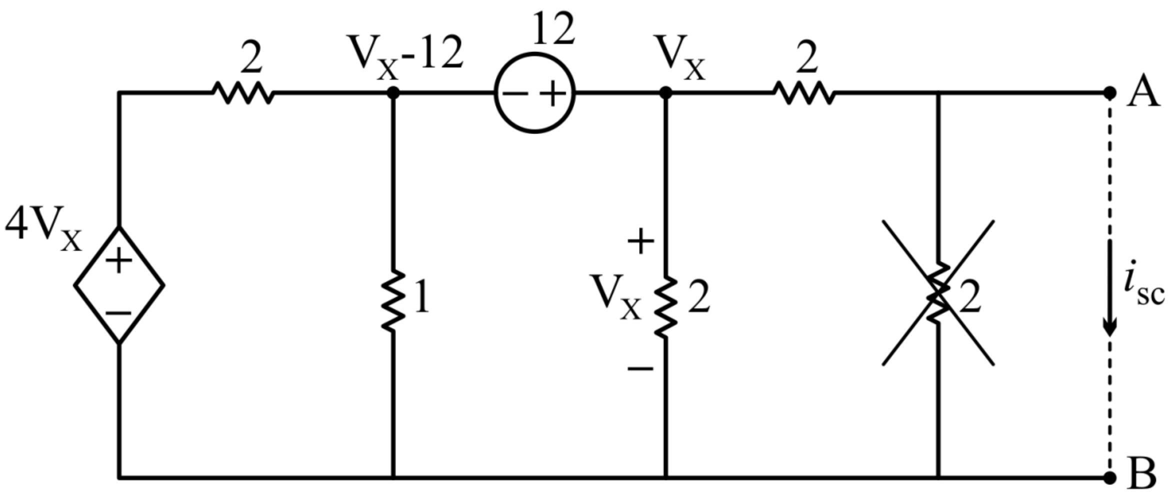
KCL: برای گره ی مرکب $\frac{V_x - 12 - 4V_x}{2} + \frac{V_x - 12}{1} + \frac{V_x}{2} + \frac{V_x}{4} = 0$

$\Rightarrow \quad V_x = 72 \text{ v}$

بنا بر تقسیم ولتاژ : $e_{oc} = \frac{V_x}{2} = 36 \text{ v}$

محاسبه ی i_{sc} :

A , B را اتصال کوتاه می کنیم و جریان A به B را محاسبه می کنیم.



برای گره ی مرکب KCL: $$\frac{V_x-12-4V_x}{2}+\frac{V_x-12}{1}+\frac{V_x}{2}+\frac{V_x}{2}=0$$

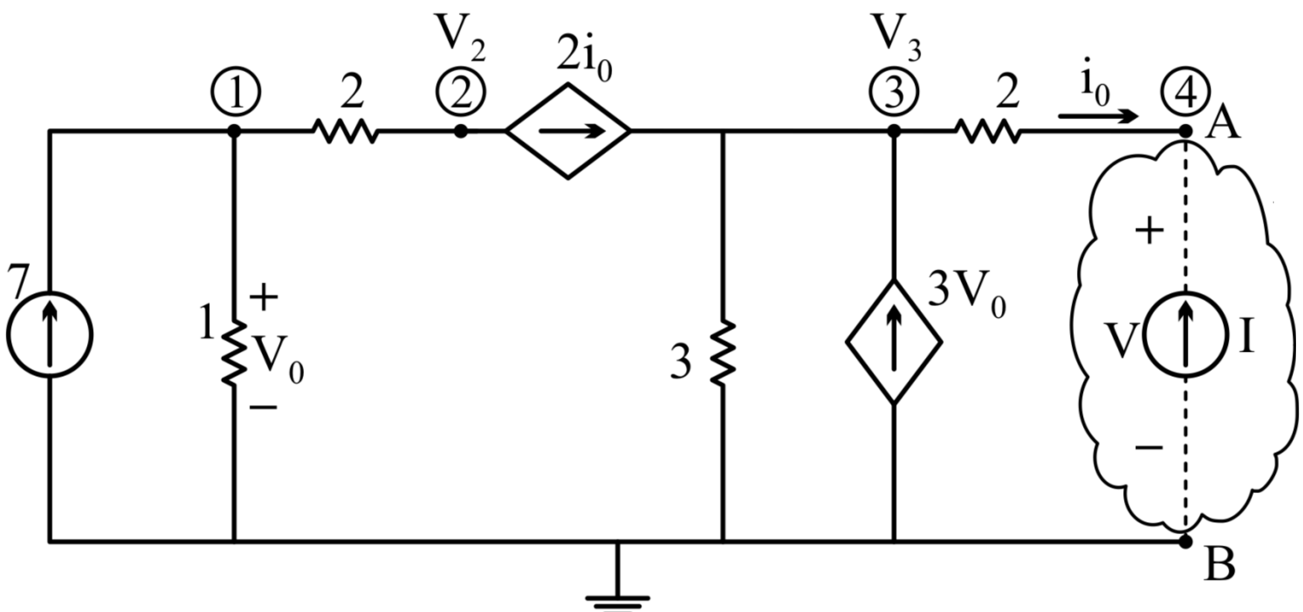
$$\Rightarrow V_x=36\ \text{v} \qquad \Rightarrow i_{SC}=\frac{V_x}{2}=18\ \text{A}$$

محاسبه R_{eq}:

$$R_{eq} = \frac{e_{oc}}{i_{sc}} = \frac{36}{18} = 2$$

مثال ۱۵ :

مدار معادل تونن دو سر A ,B را بدست آورید .



حل :

این بار روش کلی را بکار می گیریم :

یک منبع I به دو سر A,B وصل می کنیم و رابطه ی V و I را بدست می آوریم.

به کمک تحلیل گره و همچنین شکل :

$$i_o = -I$$

KCL گره ۱ : $-7 + \frac{V_o}{1} + \frac{V_o - V_2}{2} = 0$

KCL گره ۲ : $\frac{V_2 - V_o}{2} - 2I = 0$

KCL گره ۳ : $-2(-I) + \frac{V_3}{3} - 3V_o + (-I) = 0$

KCL گره ۴ : $\frac{V - V_3}{2} - I = 0$

$$\begin{cases} V_2 = 3V_o - 14 \\ V_2 - V_o - 4I = 0 \\ I = 3V_o - \dfrac{V_3}{3} \\ V = V_3 + 2I \end{cases}$$

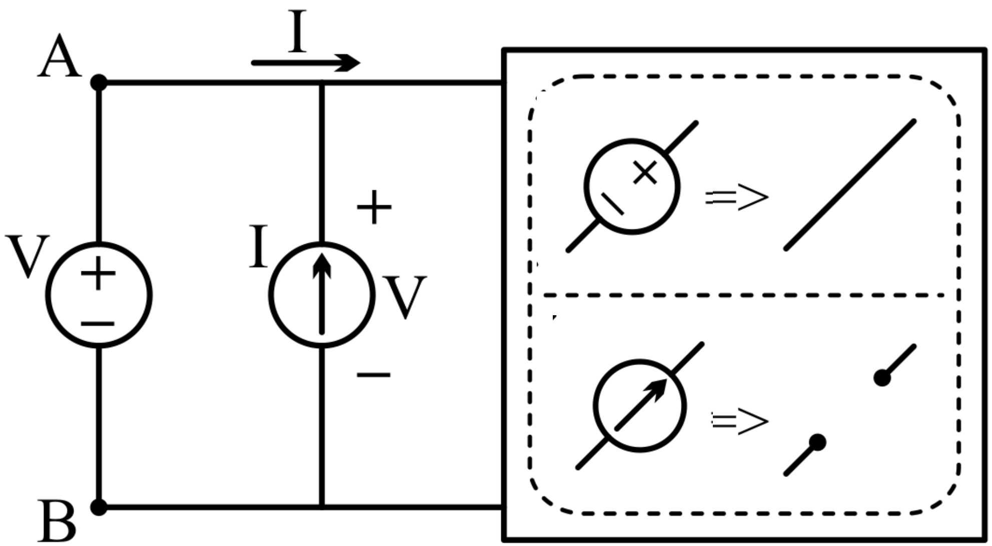
$$\Rightarrow \quad V = 17I + 63$$

$$V = R_{eq} I + e_{oc}$$

$$\Rightarrow \quad R_{eq} = 17 \qquad و \qquad e_{oc} = 63 \text{ v}$$

بدست آوردن مستقیم مقاومت ورودی

برای بدست آوردن R_{in} یا همان مقاومت معادل تونن از دو سر A و B اینگونه عمل می کنیم:



۱.تمام منابع مستقل را صفر می کنیم.

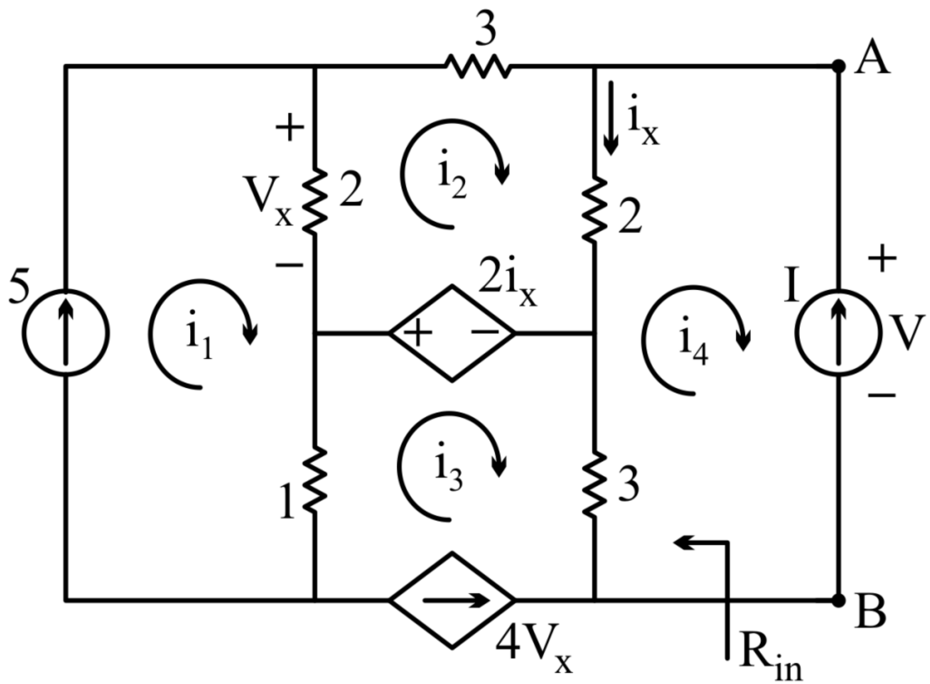
۲. منبع ولتاژدلخواه V به دو سر A , B وصل می کنیم و جریان I عبوری از منبع را بدست می آوریم .

یا منبع جریان دلخواه I به دو سر A , B وصل می کنیم و ولتاژ V دو سر منبع را بدست می آوریم :

$$R_{in} = \frac{V}{i}$$

مثال ۱۶:

مقاومت ورودی از دو سر A ,B را محاسبه کنید .



حل :

از شکل معلوم می شود که :

$$i_3 = -4V_x = -4\times 2\left(i_1 - i_2\right)$$

به کمک تحلیل مش :

KVL برای مش ۱ : $$2\left(i_1 - i_2\right) + \left(i_1 - i_3\right) = 0$$

KVL برای مش ۲ : $$2\left(i_2 - i_1\right) + 3i_2 + 2\left(i_2 - i_4\right) - 2\left(i_2 - i_4\right) = 0$$

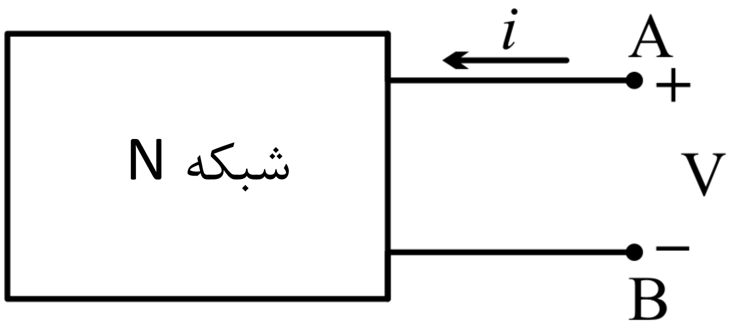
KVL برای مش ۴ : $$3\left(i_4 - i_3\right) + 2\left(i_4 - i_2\right) + V = 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} i_3 = -8\left(i_1 - i_2\right) \\ 3i_1 - 2i_2 - i_3 = 0 \\ -2i_1 + 5i_2 = 0 \\ -2i_2 - 3i_3 + 5i_4 + V = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = 0 \text{ A} \\ i_2 = 0 \text{ A} \\ i_3 = 0 \text{ A} \\ i_4 = \dfrac{-V}{5} \end{cases}$$

$$I = -i_4 \Rightarrow I = \frac{V}{5} \Rightarrow R_{eq} = \frac{V}{I} = 5$$

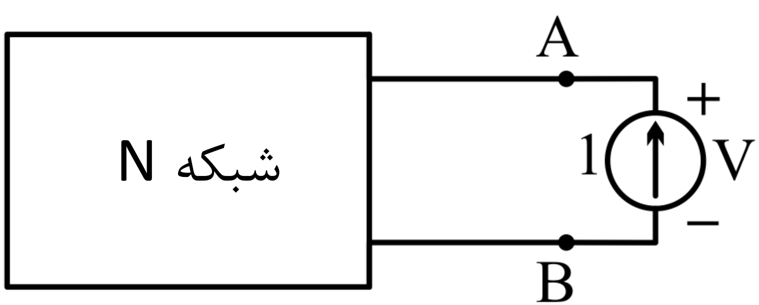
اتصال شبکه ها

فرض کنید در شبکه ی خطی روبرو داشته باشیم :



$$V = 6i + 1$$

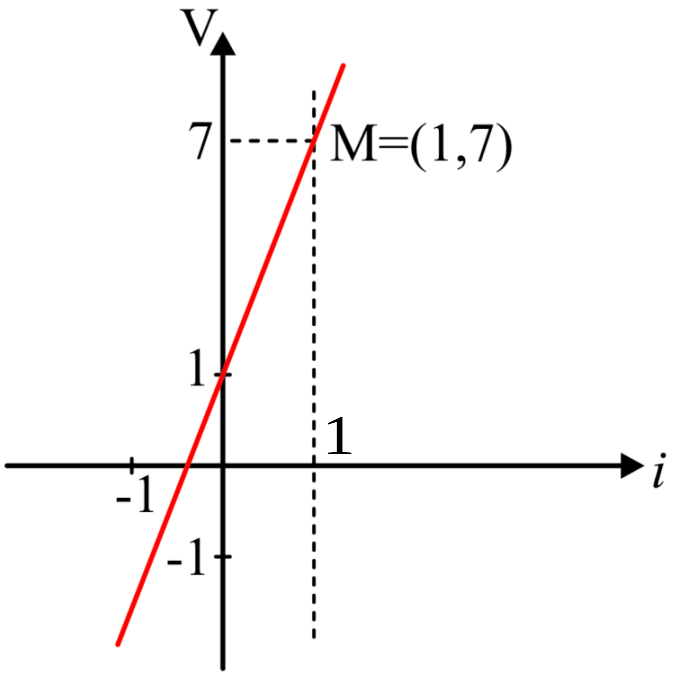
در اینصورت اگر منبع جریان i=1 A را به صورت زیر به آن وصل کنیم باید داشته باشیم:



$$V = 6(1) + 1 = 7 \text{ v}$$

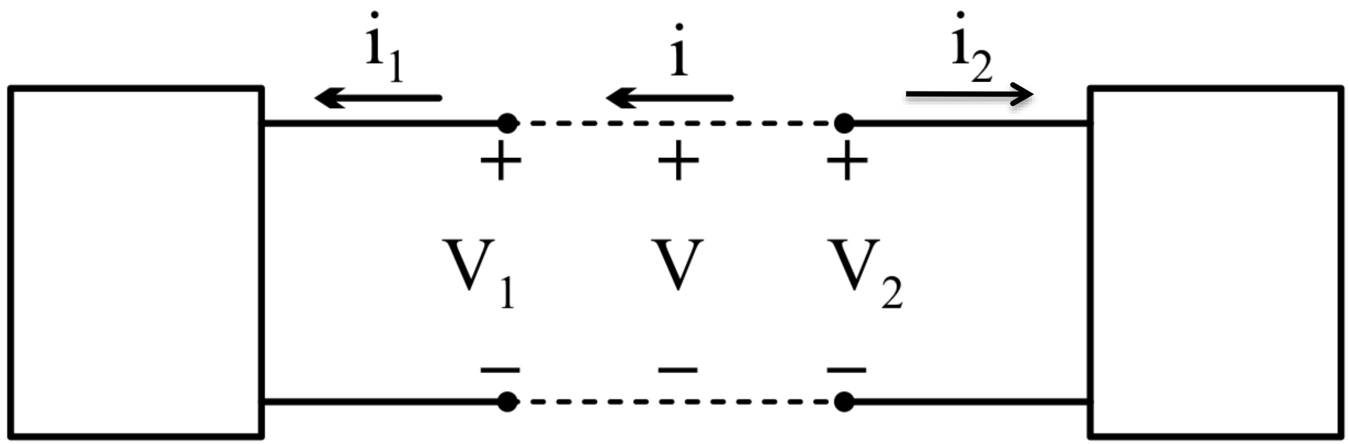
می توان گفت ما این دو معادله را تلاقی داده ایم :

$$\begin{cases} V = 6i + 1 \\ i = 1 \end{cases}$$



M را نقطه کار شبکه گویند .

اکنون می خواهیم ۲ شبکه را بدون در نظر گرفتن خطی بودن به هم وصل کنیم :



از شکل واضح است که شبکه ی حاصل زمانی کار می کند که :

$$V = V_1 = V_2 \qquad \text{و} \qquad i = i_1 = -i_2$$

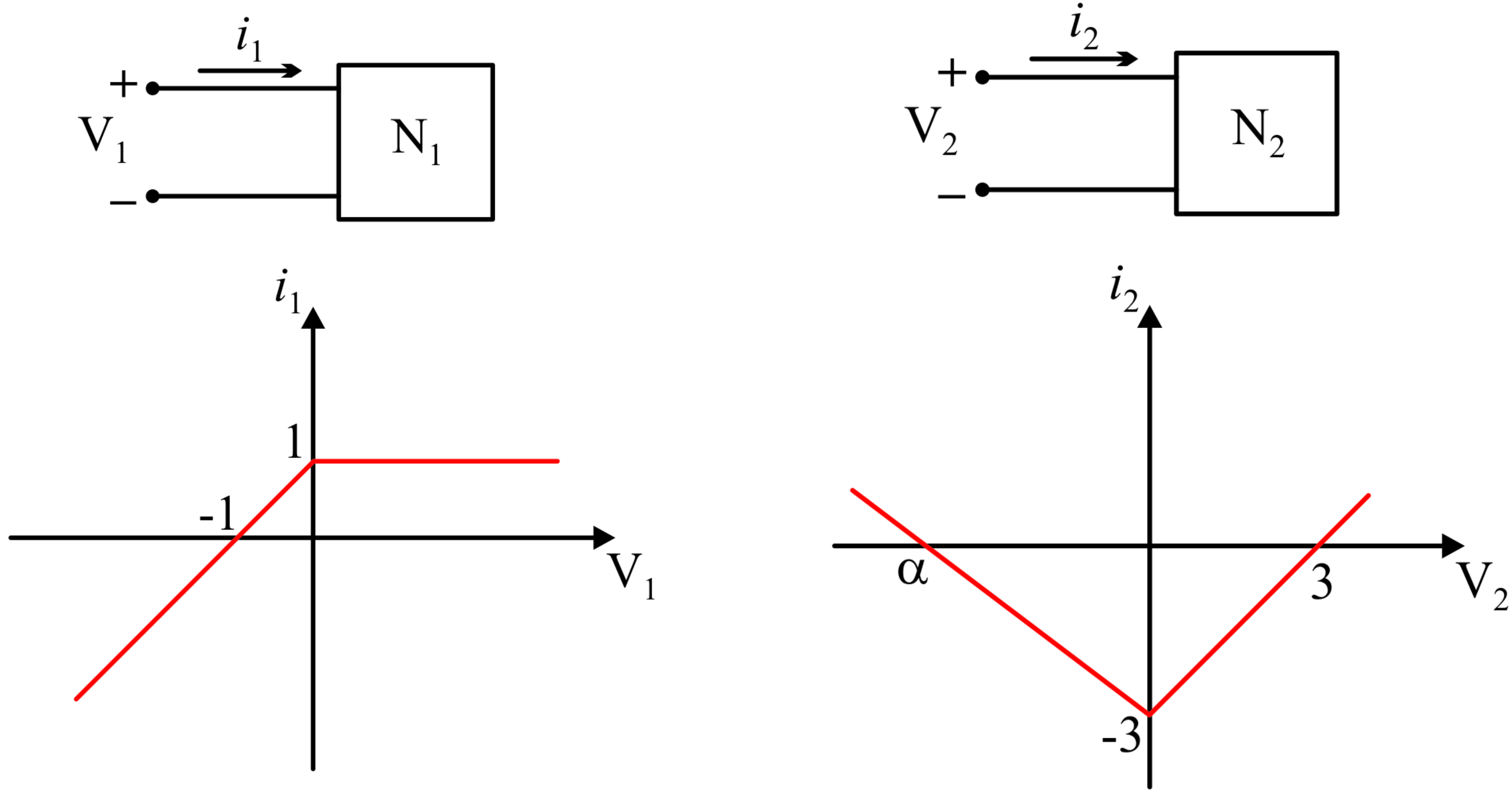
پس باید (i ,V) نقطه ی اتصال در رابطه ی i-V یکی از شبکه ها و (–i ,V) در

شبکه دیگر صدق کند . یعنی :

$$\begin{cases} f_1(i, V) = 0 \\ f_2(-i, V) = 0 \end{cases}$$

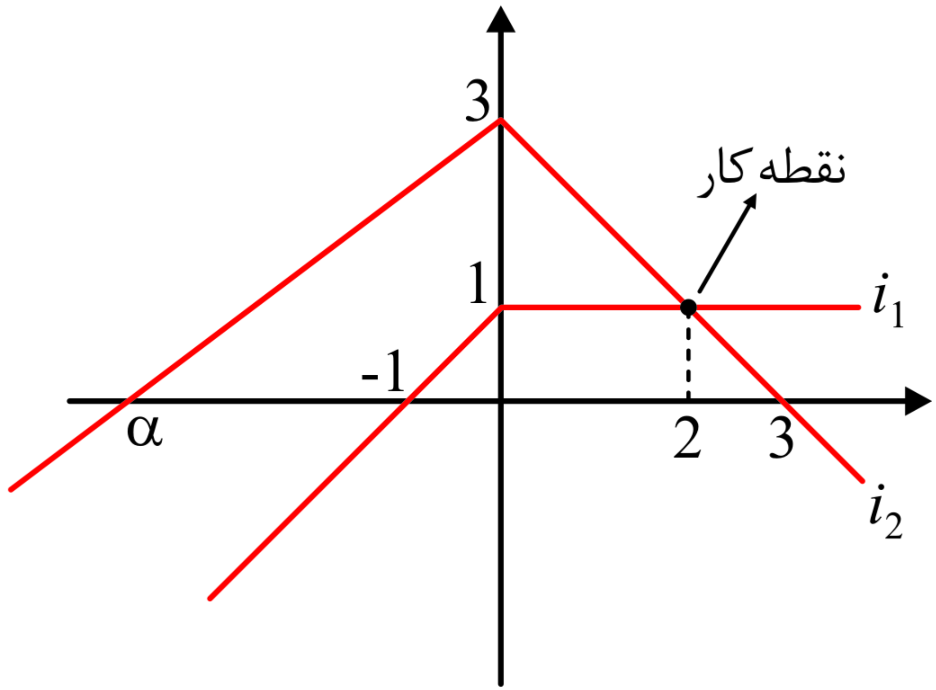
مثال ۱۷:

مشخصه ی i-V دو شبکه ی زیر داده شده اند. a چگونه باشد تا اتصال ۲ شبکه ۲ نقطه ی کار داشته باشد ؟



حل :

نمودار i-V شبکه ی ۲ را نسبت به محور V قرینه می کنیم و با نمودار i-V شبکه ی ۱ تلاقی می دهیم:

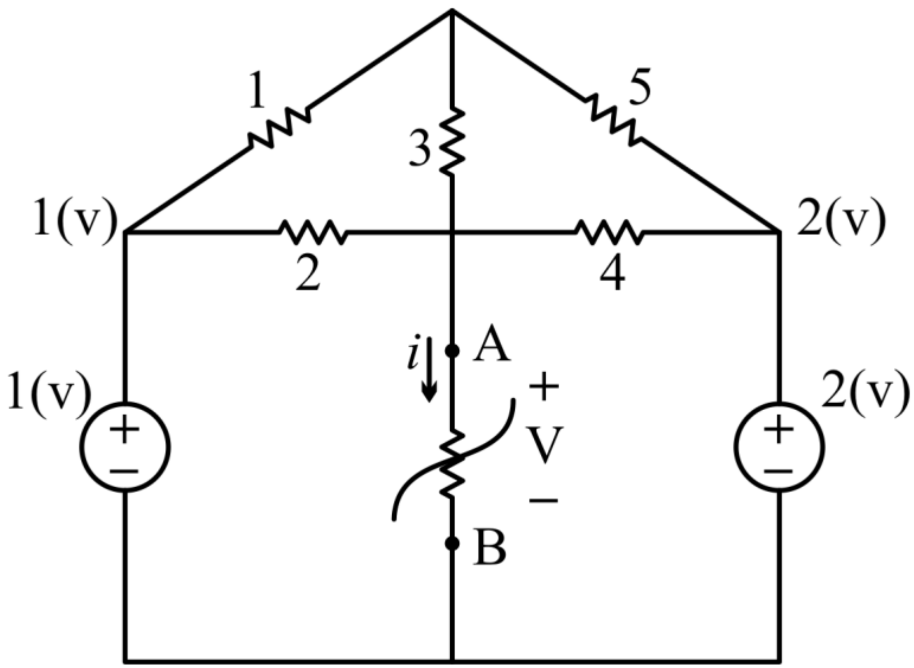


بدیهی است که باید a > 3 و نامساوی با 3 باشد تا نمودارها در دو نقطه تلاقی داشته باشند.

مثال ۱۸:

در مدار زیر مشخصه ی مقاومت غیر خطی به صورت $V = \frac{1}{93}\left(i^3 + 27i\right)$ می باشد.

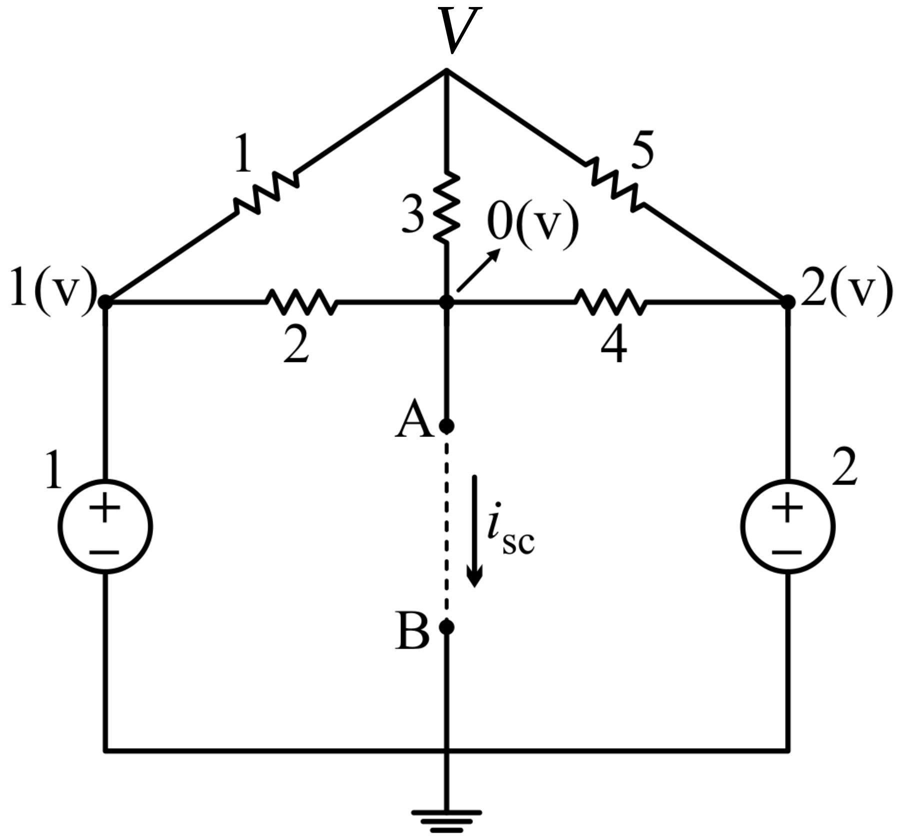
i را محاسبه کنید.



حل :

ابتدا مشخصه ی V-i شبکه خطی زیر را از دو سر A , B بدست می آوریم .

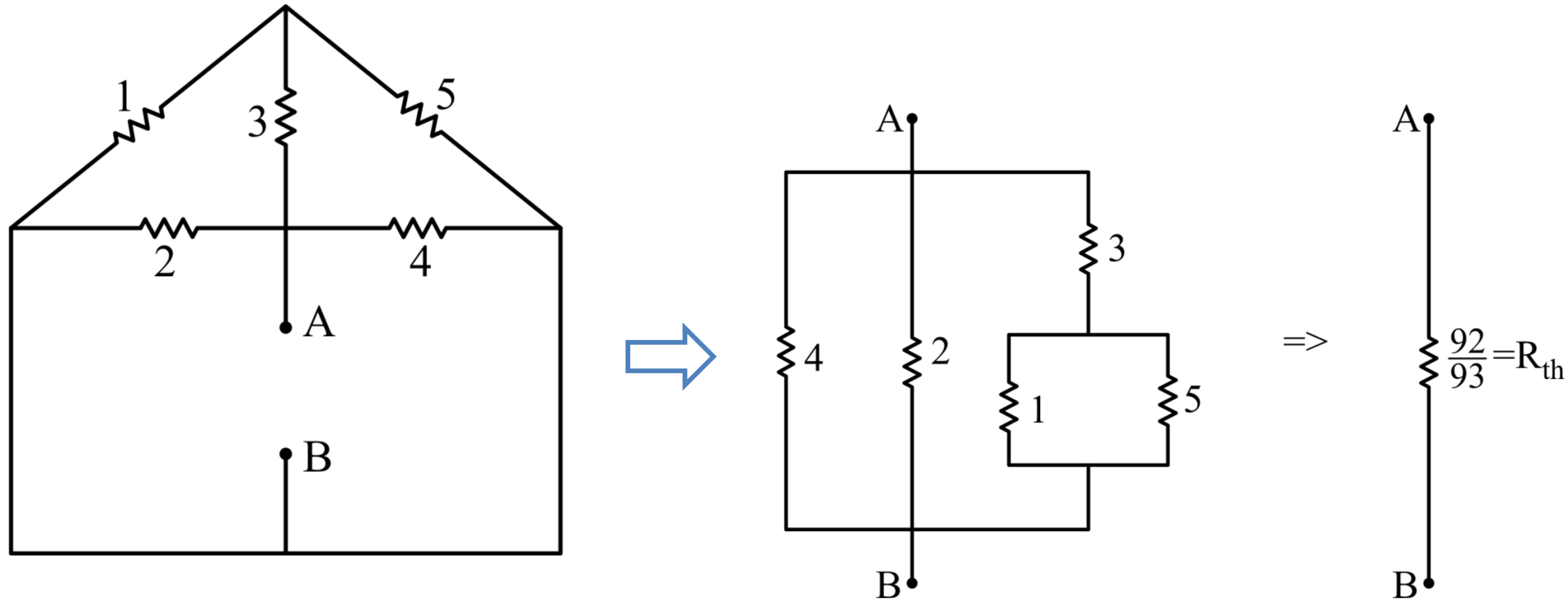
برای i_{sc} اگر A,B را اتصال کوتاه کنیم:



KCL در گره ی بالای مدار : $V - 1 + \frac{V}{3} + \frac{V - 2}{5} = 0$ $\Rightarrow$ $V = \frac{21}{23}$ v

KCL در گره ی 0 (v) : $i_{sc} + \frac{0-2}{4} + \frac{0-1}{2} + \frac{0-\frac{21}{23}}{3} = 0$ $\Rightarrow$ $i_{sc} = \frac{30}{23}$ A

برای R_{eq} نیز اول منابع را صفر می کنیم:



پس :

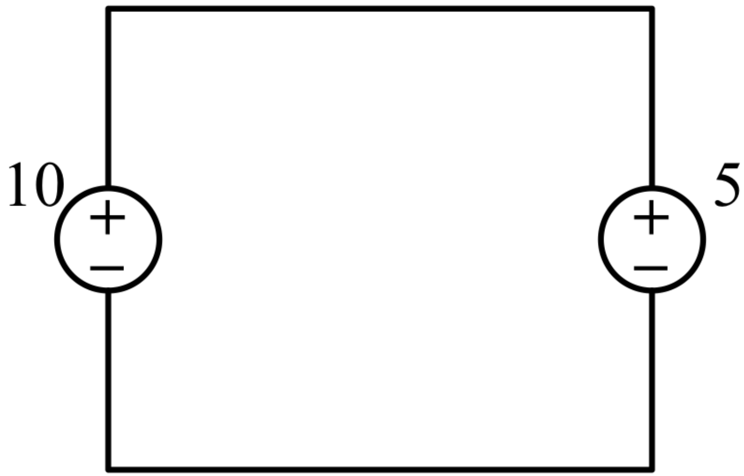
$$V = \frac{92}{93} i + \left(\frac{30}{23} \times \frac{92}{93} \right) = \frac{92}{93} i + \frac{120}{93}$$

حالا مشخصه ی (V , i) یکی را با (V , -i) دیگری تلاقی می دهیم :

$$\frac{1}{93}\left(i^3 + 27i\right) = -\frac{92}{93} i + \frac{120}{93} \Rightarrow i^3 + 119i - 120 = 0 \Rightarrow i = 1 \text{ A}$$

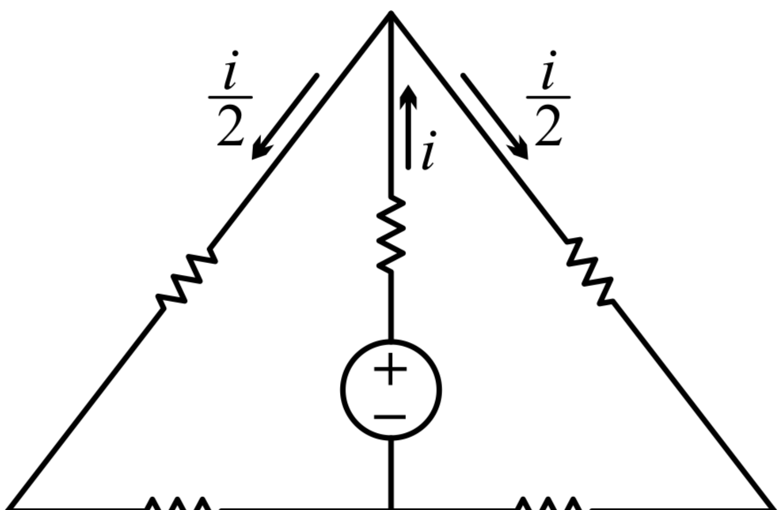
سوال

با توجه به مفهوم نقطه‌ی کار یک شبکه، جریان را در مدار زیر محاسبه کنید.



مدارهای متقارن

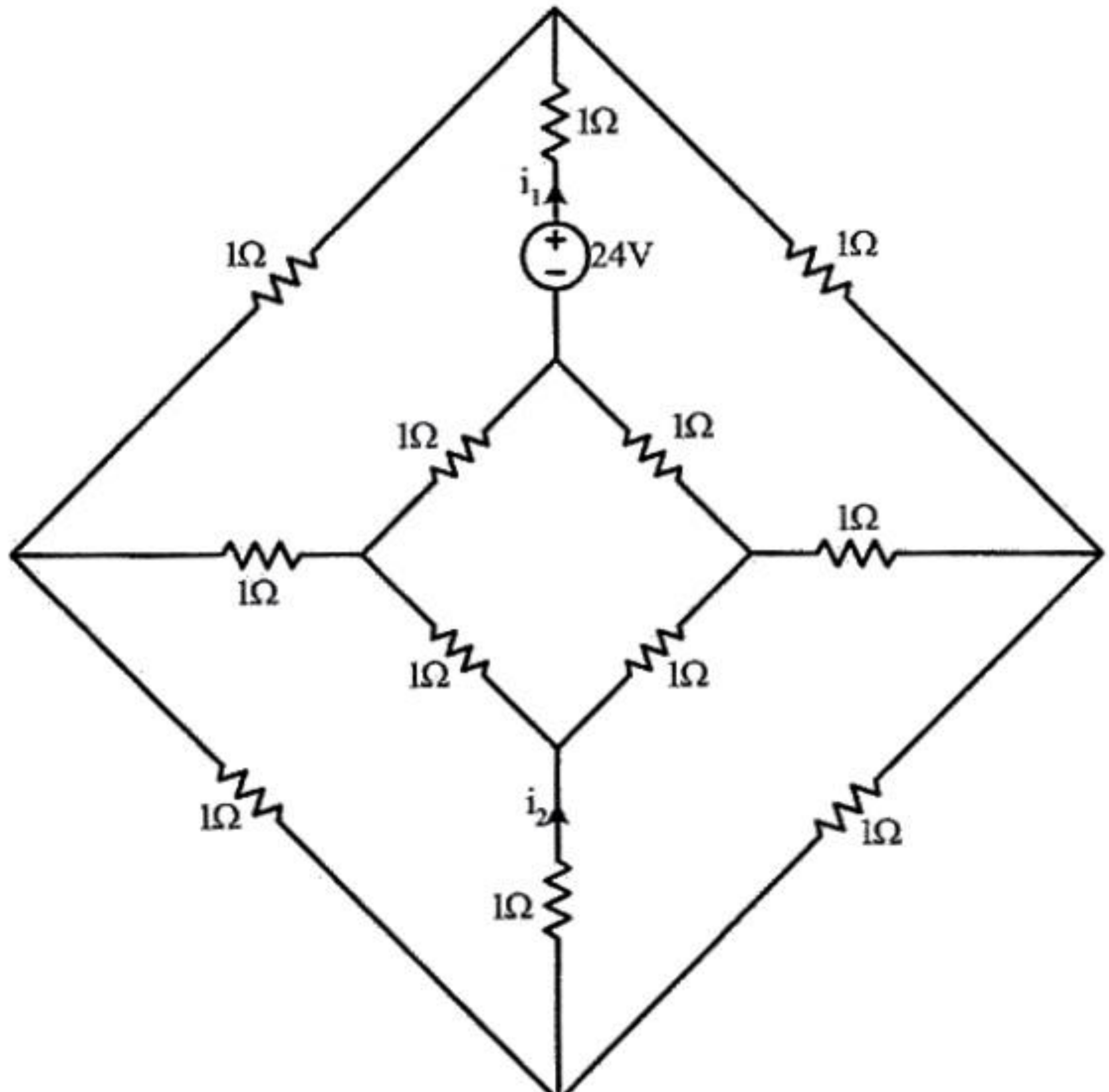
در مدارهایی که کاملاً تقارن در آنها وجود دارد جریانهای شاخه هایی که روی محور تقارن هستند بین دیگر شاخه ها به طور مساوی تقسیم می شوند :



و این امر تحلیل را ساده می کند ولی بهتر از آن اینکه می توان این مدارها را تا کرد و نقاط هم پتانسیل را روی هم گذاشت؛ با این شرط که به قوانین مربوط به موازی شدن عناصر دقت کنیم .

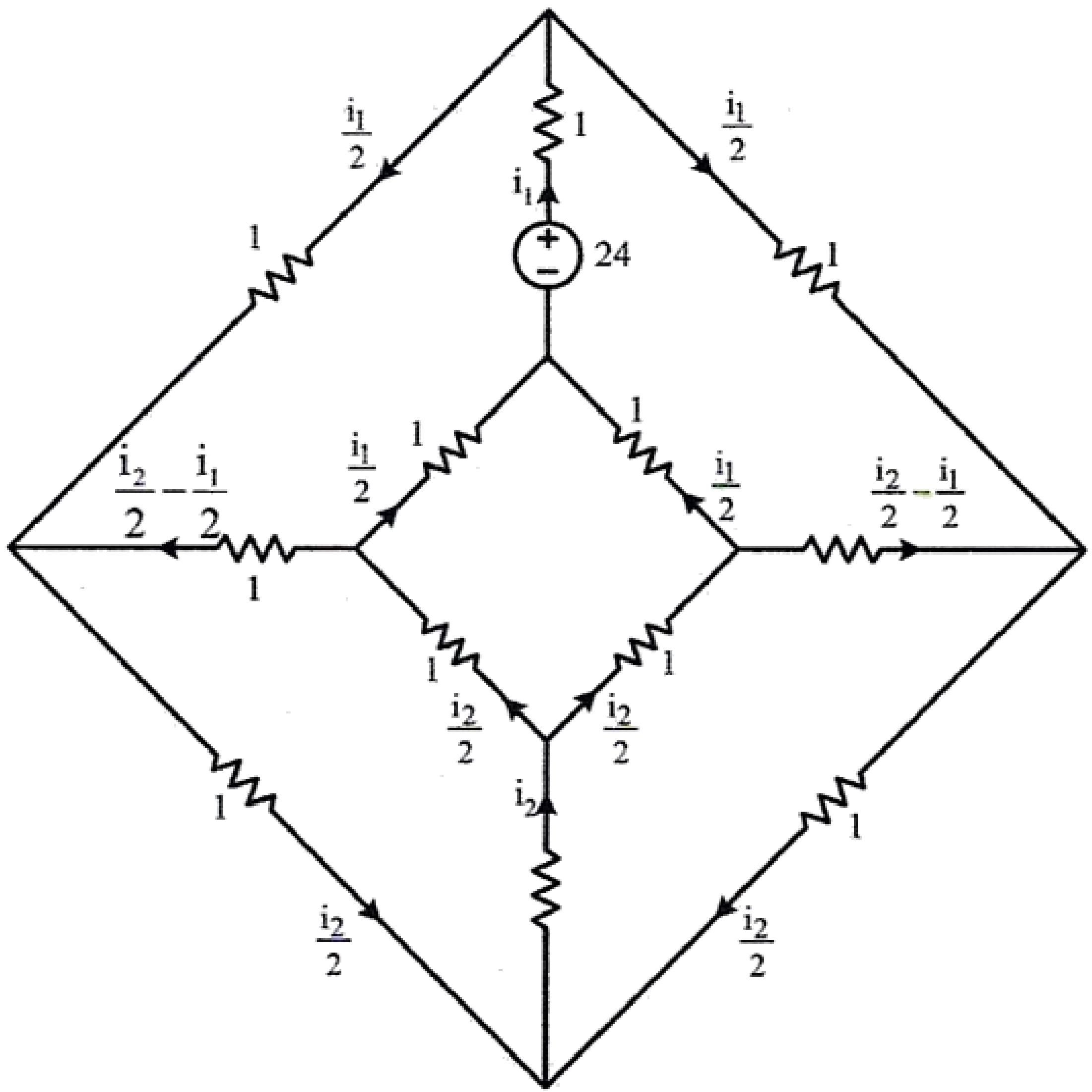
مثال ۱۹:

i_1 را محاسبه کنید .

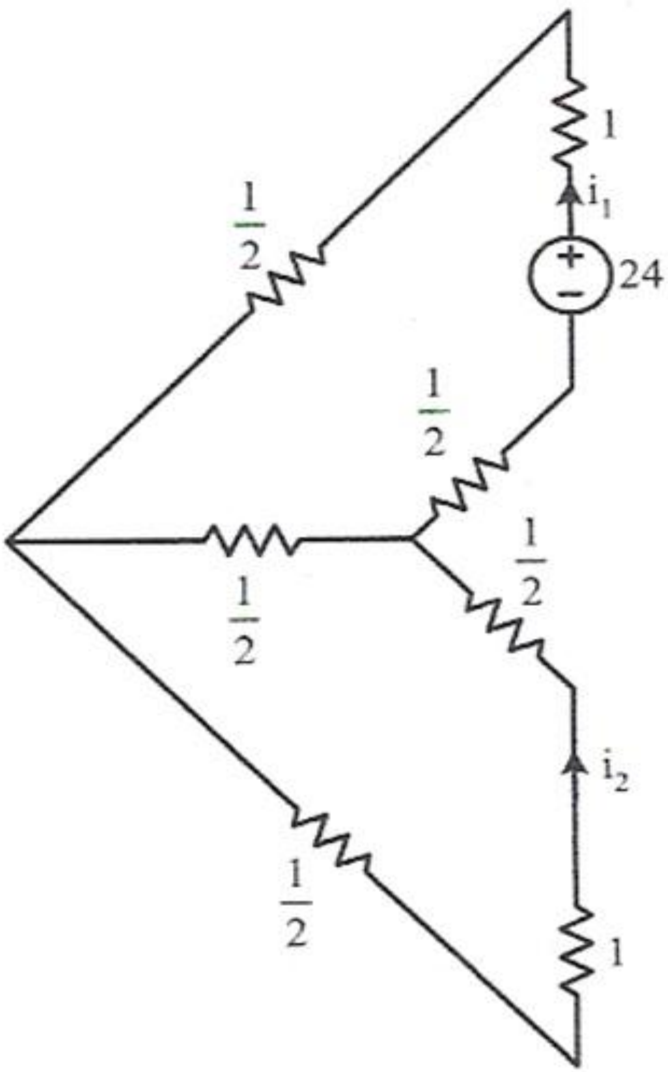


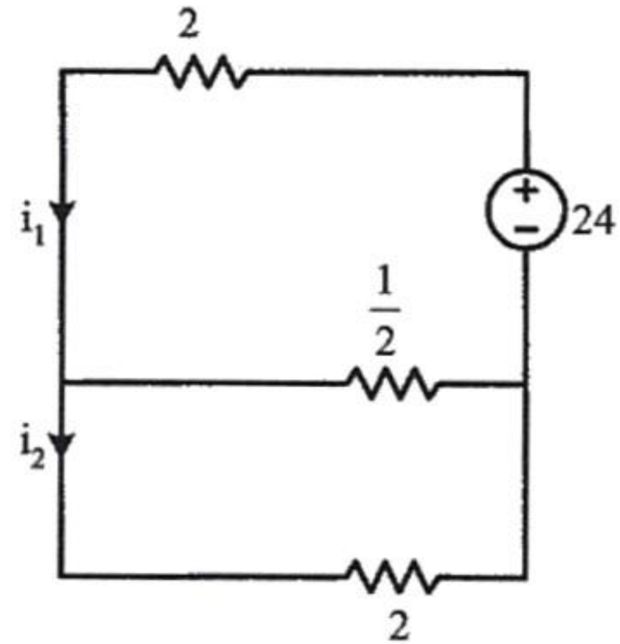
جریان تمامی شاخه‌ها را

برحسب i_2 , i_1 می‌نویسیم:



مدار را از وسط تا می‌کنیم ! و . . .





$$i_1 = \frac{24}{2+\frac{1}{2.5}} = 10 \text{ A}$$