

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱- مقدمه

یکی از سیستم‌های مفید و پرکاربرد در صنایع کنونی، شبکه‌های الکتریکی می‌باشند که وظیفه تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی را بر عهده دارند. از خصوصیات مهم این سیستم‌ها نسبت به دیگر سیستم‌های موجود در صنعت، سهولت تبدیل انرژی الکتریکی به دیگر انواع انرژی‌ها و قابلیت توزیع در نواحی وسیع و همچنین سرعت زیاد در انتقال می‌باشد.

در شبکه‌های الکتریکی، تولید انرژی الکتریکی در مولدهای توربینی از تبدیل انرژی مکانیکی چرخشی به انرژی الکتریکی حاصل می‌شود. سپس این انرژی، توسط شبکه‌های انتقال به نقاط دور دست منتقل می‌گردد و در مراکز مورد نیاز، بین مصرف‌کنندگان توزیع می‌شود. بررسی مشخصات و کاربردهای وسایل و سیستم‌های تبدیل انرژی، پردازش و تحلیل این شبکه‌ها و نحوه انتقال انرژی بر عهده علم مهندسی برق گذاشته شده است. بنابراین، یکی از شاخه‌های مهم مطالعات در شبکه‌های الکتریکی، تحلیل این‌گونه شبکه‌ها (یا مدارهای الکتریکی) می‌باشد. بدین منظور ابتدا باید متغیرهای اساسی کاربردی در مدارهای الکتریکی بیان گردند که این امر در این فصل مهیا می‌گردد. با تعریف شدن این متغیرها و قوانین پایه کیرشهف<sup>۱</sup>، در فصول بعدی قادر خواهیم بود تا به تجزیه و تحلیل مدارهای الکتریکی بپردازیم.

---

<sup>۱</sup> - Kirchhoff's Laws

## ۲-۱- متغیرهای شبکه

تاکنون سیستم‌های آحاد متعددی برای متغیرهای مورد نظر در شبکه‌های الکتریکی ارائه شده است، لیکن از میان انواع سیستم‌های آحاد، سیستم MKS کاربرد وسیعی در مهندسی برق دارد. این سیستم بر پایه واحدهای متر (m)، کیلوگرم (kg)، و ثانیه (sec) بنا شده است که بترتیب برای متغیرهای طول، جرم، و زمان به کار می‌روند. در سیستم‌های واقعی، مقدار این متغیرها از اعداد بسیار کوچک تا اعداد بسیار بزرگ در حال تغییر هستند. مقادیر بسیار کوچک و بسیار بزرگ را می‌توان با مضرب‌هایی از یکاهای پایه بیان نمود. در نتیجه می‌توان از آوردن تعداد زیادی صفر پیش از ممیز و یا بعد از آن پرهیز نمود. به عنوان مثال، برای نمایش  $0.0035 \text{ sec}$  می‌توان از نماد  $3.5 \times 10^{-3} \text{ sec}$  استفاده نمود و یا اینکه به جای  $870 \text{ m}$ ، می‌توان از نماد  $87 \text{ km}$  بهره جست. همچنین برای راحتی بیشتر نمایش مقادیر متغیرها به جای استفاده از یکاهای پایه می‌توان از کلمات پیشوند در جلوی واحدها بهره جست. به عنوان مثال، به جای  $10^{-3}$  می‌توان از پیشوند "میلی" استفاده کرد و برای بیان  $3.5 \times 10^{-3} \text{ sec}$ ، عبارت  $3.5$  میلی ثانیه ( $3.5 \text{ msec}$ ) را به کار برد. مضرب‌های معمول برای یکاهای پایه مورد استفاده در مدارهای الکتریکی را می‌توان در جدول (۱-۱) مشاهده نمود.

جدول (۱-۱): ضرایب معمول در مدارهای الکتریکی

نام مضرب	مضرب	نمایش مضرب
ترا	$10^{+12}$	T
گیگا	$10^{+9}$	G
مگا	$10^{+6}$	M
کیلو	$10^{+3}$	k
میلی	$10^{-3}$	m
میکرو	$10^{-6}$	$\mu$
نانو	$10^{-9}$	n
پیکو	$10^{-12}$	p

اکنون قادر خواهیم بود که دیگر متغیرهای مورد استفاده در مدارهای الکتریکی را بیان نماییم.

## الف) بار الکتریکی

کمیت بار الکتریکی<sup>۱</sup> در ارتباط با خواص اتم‌های ماده موردنظر می‌باشد. برای درک بهتر این موضوع، همان‌گونه که می‌دانیم، اتم‌های هر ماده از ذرات بنیادین الکترون، پروتون و نوترون تشکیل شده‌اند که تعداد الکترون‌ها و پروتون‌های هراتم با یکدیگر برابر می‌باشند. پروتون دارای بار مثبت، الکترون دارای بار منفی، و نوترون، دارای بار خنثی است؛ لذا هر اتم از نظر بار الکتریکی خنثی می‌باشد. حال اگر تعداد الکترون‌های یک اتم از تعداد پروتون‌های آن بیشتر گردد، اتم دارای بار منفی خواهد بود و بالعکس اگر الکترونی از مدار لایه آخری خارج شود، آنگاه اتم دارای بار مثبت خواهد بود.

اکنون می‌خواهیم واحد بار الکتریکی را در سیستم MKS بیان کنیم. بار الکتریکی هر ماده که با  $q(t)$  نمایش داده می‌شود، با واحد کولن<sup>۲</sup> C اندازه‌گیری می‌شود. هر کولن، بار معادل با مجموع بار الکتریکی  $6/3 \times 10^{18}$  الکترون می‌باشد. به عبارت دیگر، بار هر الکترون، معادل با  $1/602 \times 10^{-19}$  C در نظر گرفته می‌شود.

مهمترین اثر بارهای الکتریکی، توانایی آنان در تولید نیروهای جاذبه یا دافعه می‌باشد. به عبارت دیگر، بارهای همنام الکتریکی، یکدیگر را دفع و بارهای غیرهمنام، یکدیگر را جذب می‌کنند. جذب و دفع این بارهای الکتریکی توسط جاذبه نیروهای جاذبه و دافعه ایجاد شده می‌باشد که نیروی وارد بر هر یک از ذرات به مقدار مساوی می‌باشند.

## ب) جریان الکتریکی

در صورتی که یک بار الکتریکی بین دو صفحه به حرکت در آید، آهنگ حرکت این بار بر حسب زمان را جریان الکتریکی<sup>۳</sup> می‌نامیم. انتقال بار در یک هادی را می‌توان بین دو سطح از سطح مقطع هادی مذکور در نظر گرفت. کمیت جریان الکتریکی توسط متغیر  $i(t)$  نمایش داده می‌شود که واحد آن در سیستم MKS، برابر آمپر (A) می‌باشد. در صورتی که میزان تغییرات بار عبوری در واحد زمان، متغیر باشد، آنگاه جریان الکتریکی در هر لحظه تغییر می‌کند که برابر است با:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-1)$$

و یا،

1- Electric Charge

2- Coulomb

3- Electric Current

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (2-1)$$

حال اگر نرخ تغییرات بار در واحد زمان، ثابت باشد (که این بار را با حرف بزرگ  $Q$  نشان می‌دهیم) آنگاه جریان الکتریکی ثابت  $I$  به مقدار زیر خواهد بود:

$$I = \frac{Q}{t}$$

### ج) انرژی الکتریکی

در توضیح کمیت بار الکتریکی بیان شد که اگر هر بار الکتریکی در نزدیکی بار الکتریکی دیگری قرار گیرد، بر آن بار، نیرویی به صورت جاذبه یا دافعه وارد می‌شود. به عبارت دیگر، در اطراف هر بار الکتریکی، محدوده‌ای وجود دارد که بر بارهای الکتریکی در آن محدوده، نیرو وارد می‌شود. هر چه بار جدید در فاصله دورتری از بار اصلی قرار گیرد، این نیرو ضعیف‌تر خواهد بود. به این محدوده اطراف بار الکتریکی، میدان الکتریکی می‌گوییم. به عبارت دیگر، میدان الکتریکی در هر نقطه، برابر نیروی مؤثر وارد بر واحد بار الکتریکی مثبت در آن نقطه می‌باشد. حال اگر بخواهیم بار الکتریکی را در یک میدان الکتریکی و در جهت خلاف میدان (یعنی علیه نیرویی که بارهای الکتریکی دیگر بر آن وارد می‌کنند) جابجا کنیم، نیاز به انجام کار و صرف انرژی می‌باشد.

انرژی الکتریکی می‌تواند از انواع دیگر انرژی‌ها از قبیل انرژی شیمیایی (در عملکرد باتری‌ها)، انرژی مکانیکی (در عملکرد ژنراتورهای آبی یا بخاری)، و انرژی اتمی (در راکتورهای هسته‌ای) ایجاد شود. در سیستم MKS، انرژی الکتریکی (یا کار) با متغیر  $w(t)$  نشان داده می‌شود و واحد آن هم با ژول (نمایش با حرف  $J$ ) بیان می‌گردد.

### د) ولتاژ الکتریکی

در قسمت قبل دیدیم که برای حرکت یک بار در میدان الکتریکی، نیاز به انجام کار و صرف انرژی می‌باشد. به عبارت دیگر، با حرکت بار الکتریکی و دریافت انرژی، میزان انرژی پتانسیل بار افزایش می‌یابد. بدین‌سان می‌توان گفت که میدان الکتریکی می‌تواند وسیله ذخیره‌سازی انرژی در خود (برای تبدیل آن به کار) باشد.

حال، ولتاژ الکتریکی یا اختلاف پتانسیل را می‌توان به صورت کار واحد بار الکتریکی مثبت در حال حرکت بین دو نقطه از میدان تعریف نمود. در سیستم MKS، متغیر ولتاژ الکتریکی با  $v(t)$  نمایش داده می‌شود و واحد آن با ولت (نمایش با حرف  $V$ ) بیان می‌گردد.

بنا به تعریف، اختلاف ولتاژ یک ولت، بیانگر آن است که برای حرکت بار الکتریکی به مقدار یک کولن بین دو نقطه مورد نظر، یک ژول انرژی مورد نیاز می‌باشد؛ یعنی:

$$v(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (3-1)$$

که در این رابطه،  $v(t)$  اختلاف ولتاژ بین دو نقطه مورد نظر بر حسب ولت ( $V$ )،  $w(t)$  انرژی الکتریکی بر حسب ژول ( $J$ )، و  $q(t)$  بار الکتریکی بر حسب کولن ( $C$ ) می‌باشد.

### هـ) توان الکتریکی

بر حسب تعریف، نرخ تغییرات کار یا انرژی الکتریکی را بر حسب زمان، توان الکتریکی می‌نامیم. در سیستم MKS، این متغیر با اپراتور  $p(t)$  نمایش داده می‌شود که واحد آن با وات (نمایش با حرف  $W$ ) بیان می‌گردد. بر اساس تعریف ارائه شده می‌توان نوشت:

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (4-1)$$

و یا،

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau \quad (5-1)$$

با توجه به آنکه تعیین توان الکتریکی در شرایط  $-\infty$  عملاً غیر ممکن است، لذا رابطه اخیر را می‌توان به صورت زیر اصلاح نمود:

$$w(t) = W(t_0) + \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau \quad (6-1)$$

حال با توجه به روابط (1-1) و (3-1)، رابطه (4-1) را می‌توان به شکل ساده شده زیر نوشت:

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = \frac{dw(t)}{dq(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt} \\ p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (7-1)$$

به عبارت دیگر، حاصل ضرب جریان الکتریکی در ولتاژ الکتریکی در هر لحظه را می‌توان به عنوان توان الکتریکی بیان نمود.

در صورتی که ولتاژ و جریان الکتریکی، برابر مقادیر ثابت  $V$  و  $I$  باشند آنگاه توان الکتریکی نیز ثابت و به مقدار زیر خواهد بود:

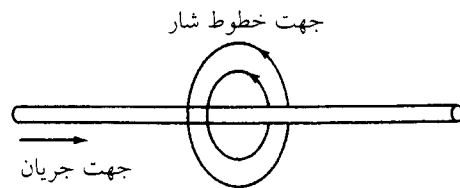
$$P = V.I$$

و انرژی الکتریکی دریافتی در مدت زمان  $t$  نیز برابر خواهد بود با:

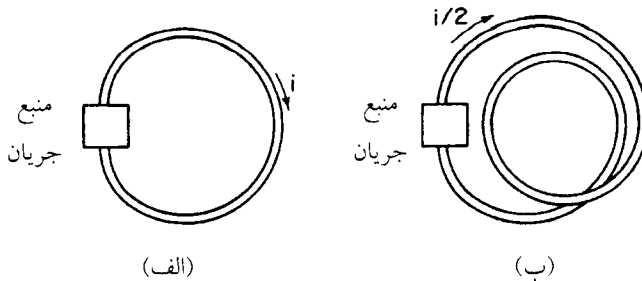
$$W = V.I.t$$

## و) شار ارتباطی

در صورتی که از یک هادی، جریان الکتریکی عبور نماید، در اطراف این هادی، خطوط مغناطیسی مطابق با شکل (۱-۱) ایجاد می‌شود. به این خطوط، خطوط میدان مغناطیسی<sup>۱</sup> می‌گویند. هر چه به طرف سیم نزدیکتر شویم، این خطوط به هم فشرده تر شده و هر چه از سیم دورتر شویم، تراکم خطوط کمتر می‌گردد. در سیستم MKS، واحد این متغیر برابر ویر-دور<sup>۲</sup> (Wb-turn) می‌باشد. به عبارت دیگر، این متغیر از حاصل ضرب شار (بر حسب ویر) هر سیم در تعداد دور آن سیم به دست می‌آید. بنابراین، برای یک حلقه سیم مطابق با شکل (۱-۲-الف) در صورتی که جریان  $i(t)$  از آن عبور کند و شار موردنظری را ایجاد کند، آنگاه اگر سیم، دو دور بزند، برای ایجاد همان شار، نیاز به جریان  $i(t)/۲$  خواهد بود که این مطلب را می‌توان در شکل (۱-۲-ب) مشاهده نمود.



شکل (۱-۱): خطوط شار در اطراف یک هادی



شکل (۱-۲): خطوط شار ناشی از عبور از یک سیم پیچ

حال اگر شار الکتریکی ناشی از یک مدار الکتریکی تغییر کند و یا اینکه حرکت هادی را در یک مداری داشته باشیم که شار را محصور می‌کند، آنگاه ولتاژی در مدار موردنظر القا می‌شود. اگر متغیر شار را با  $\phi(t)$  نمایش دهیم آنگاه بین ولتاژ القایی و شار عبوری از مدار، رابطه زیر برقرار می‌باشد:

<sup>۱</sup> - Magnetic Flux<sup>۲</sup> - Weber-turn

$$v(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (۸-۱)$$

و یا اینکه،

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (۹-۱)$$

به این رابطه، قانون القای فارادی می‌گویند.

تا اینجا با متغیرهای اساسی برای تحلیل مدارهای الکتریکی آشنا شدیم. مشخصات این متغیرها به‌طور خلاصه در جدول (۲-۱) آورده شده است.

جدول (۲-۱): متغیرهای اساسی مدارهای الکتریکی و مشخصات آنها

رابطه واحد	نمایش واحد	واحد	نمایش متغیر	متغیر
$q(t) = \int i(t) dt$	C	کولن	$q(t)$	بار الکتریکی
$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$	A	آمپر	$i(t)$	جریان الکتریکی
$w(t) = \int p(t) dt$	J	ژول	$w(t)$	انرژی الکتریکی
$v(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)}$	V	ولت	$v(t)$	ولتاژ الکتریکی
$p(t) = v(t)i(t) = \frac{dw(t)}{dt}$	W	وات	$p(t)$	توان الکتریکی
$\phi(t) = \int v(t) dt$	Wb-turn	وبر-دور	$\phi(t)$	شار مغناطیسی

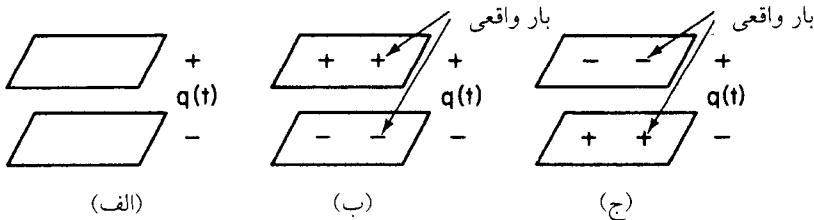
### ۳-۱- تعیین جهت‌های مبنا برای متغیرهای الکتریکی

در بخش قبلی با متغیرهای اساسی مدارهای الکتریکی آشنا شدیم. در این بخش می‌خواهیم جهت‌های قراردادی و مقادیر مثبت و منفی متغیرهایی از قبیل  $q(t)$ ،  $i(t)$ ،  $v(t)$ ، و  $p(t)$  را مشخص نماییم. این عمل توسط علامت‌های مثبت و منفی و بردارهای مشخص‌کننده جهت صورت می‌گیرد.

#### الف) جهت‌های مبنا برای متغیر بار الکتریکی

برای پی بردن به جهت‌های قراردادی برای تغییرات بار الکتریکی  $q(t)$ ، دو صفحه هادی مجزا مطابق با شکل (۴-۱-الف) را در نظر بگیرید. بار الکتریکی بین دو صفحه مورد نظر با دو علامت منبای + و - مشخص می‌شود که به‌صورت مرجع و مبنا در نظر

گرفته می‌شود. پلاریته مثبت و منفی برای بیان  $q(t)$ ، هیچ ارتباطی با بار واقعی موجود بر روی دو صفحه هادی ندارد. حال اگر در زمان خاصی، بار واقعی روی صفحه بالایی دارای پلاریته مثبت باشد و صفحه پایینی دارای بار با پلاریته منفی باشد، آنگاه می‌توان گفت که مقدار  $q(t)$  دارای علامت مثبت در زمان موردنظر می‌باشد. به عبارت دیگر، مثبت بودن مقدار  $q(t)$  به این معنا است که صفحه بالایی نسبت به صفحه پایینی، دارای بار مثبت بیشتری می‌باشد که این موضوع در شکل (۱-۴-ب) نشان داده شده است. حال اگر با پلاریته مبنای مثبت و منفی برای متغیر  $q(t)$ ، صفحه بالایی دارای بار الکتریکی با پلاریته منفی و صفحه پایینی دارای بار الکتریکی با علامت مثبت باشد، آنگاه متغیر  $q(t)$  برابر یک مقدار منفی خواهد بود که در شکل (۱-۴-ج) مشخص شده است. مقدار منفی  $q(t)$  به این معنا است که صفحه پایینی با علامت مرجع منفی، دارای بار الکتریکی مثبت بیشتری نسبت به صفحه بالایی با علامت مرجع مثبت در زمان موردنظر  $t$  می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که علامت‌های قراردادی و مرجع + و - هیچ ارتباطی با مقدار بارهای الکتریکی بر روی دو صفحه ندارد و مقدار بارهای روی صفحات نسبت به یکدیگر، با علامت مقدار  $q(t)$  مشخص می‌گردد.



شکل (۱-۴): الف) جهت‌های قراردادی و مبنای بار الکتریکی  $q(t)$  در بین دو

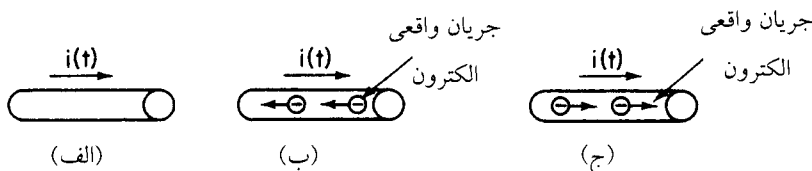
صفحه؛ (ب)  $q(t) > 0$ ؛ (ج)  $q(t) < 0$

ب) جهت‌های مبنای بار برای متغیر جریان الکتریکی

برای این منظور، یک هادی الکتریکی مطابق شکل (۱-۵-الف) در نظر بگیرید. برای نمایش جهت جریان  $i(t)$  در کنار هادی، یک پیکان قرار می‌دهیم که آن را به عنوان جهت مبنای در نظر می‌گیریم. حال اگر در یک زمان خاص، جهت واقعی حرکت بارهای الکتریکی با علامت منفی (و یا الکترون‌های آزاد در هادی) در خلاف جهت پیکان مبنای باشد، آنگاه مقدار جریان، برابر یک مقدار مثبت خواهد بود که این موضوع در شکل (۱-۵-ب) نشان داده شده است. به عبارت دیگر، جهت مثبت قراردادی برای جریان، بر مبنای جهت حرکت حفره‌های ایجاد شده ناشی از حرکت الکترون‌ها می‌باشد. همچنین اگر جهت حرکت



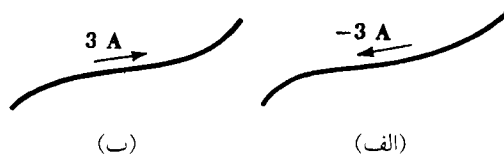
بارهای الکتریکی با بار منفی، هم جهت با جهت قراردادی جریان  $i(t)$  در زمان موردنظر باشد، آنگاه مقدار جریان الکتریکی را با علامت منفی در نظر می‌گیریم که در شکل (۱-۵-ج) مشخص شده است.



شکل (۱-۵): الف) جهت‌های مبنا و قراردادی برای جریان الکتریکی؛ ب)  $i(t) > 0$ ؛ ج)  $i(t) < 0$

بر اساس توضیحات ارائه‌شده درمی‌یابیم که جریان الکتریکی با علامت مثبت، معرف جهت حرکت بارهای مثبت (یا جهت حرکت حفره‌های ایجاد شده ناشی از حرکت الکترون‌ها) می‌باشد. البته این موضوع، علی‌رغم این مطلب است که می‌دانیم جریان الکتریکی در هادی‌ها از حرکت الکترون‌های با بار منفی ایجاد می‌شود. همچنین در می‌یابیم که جهت پیکان جریان، معرف جهت واقعی جریان نمی‌باشد بلکه جهت جریان، با توجه به مقدار جریان به همراه جهت پیکان قراردادی به دست می‌آید. بنابراین، صحبت از مقدار جریان  $i(t)$  بدون توجه به جهت قراردادی پیکان جریان، بی‌مفهوم است.

مثال (۱-۱): در صورتی که در یک هادی الکتریکی، جریان الکتریکی واقعی به مقدار ۳A باشد، برای نمایش این جریان می‌توان به دو روش بر اساس جهت‌های قراردادی جریان مطابق با شکل (۱-۶-الف و ب) ارائه نمود. در این شکل، جهت جریان در هر دو حالت از سمت چپ به راست می‌باشد.



شکل (۱-۶): دو روش برای نمایش جریان ۳A با جهت واقعی یکسان

ج) جهت‌های مبنا برای ولتاژ الکتریکی

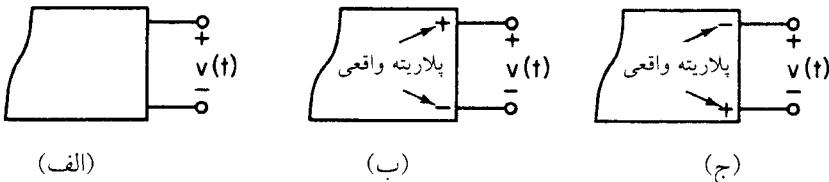
بدین منظور، دو ترمینال متصل به شبکه الکتریکی را مطابق شکل (۱-۷-الف) در نظر بگیرید. شبکه موردنظر، شکل خاصی ندارد و فقط دو سر سیم از آن خارج شده است تا از

این طریق، به عناصر دیگری متصل شود. حال در زمان دلخواه  $t$ ، این دو سر دارای اختلاف ولتاژی به مقدار  $v(t)$  و با علامت‌های قراردادی مثبت و منفی (مطابق با شکل) هستند. هنگامی که ولتاژ واقعی ترمینال بالایی بیشتر از ولتاژ واقعی ترمینال پایینی باشد، آنگاه گفته می‌شود که ولتاژ  $v(t)$  دارای اختلاف ولتاژی با علامت مثبت است که در شکل (۱-۷-ب) مشخص شده است. همچنین اگر اختلاف ولتاژ ترمینال بالایی نسبت به ترمینال پایینی، دارای یک مقدار منفی باشد، آنگاه می‌توان گفت که ولتاژ  $v(t)$  با جهت‌های قراردادی ارائه شده در شکل (۱-۷-ج) در لحظه مورد نظر  $t$ ، دارای مقدار منفی است.

لازم به ذکر است که جهت‌های قراردادی را می‌توان به‌طور دلخواه تعیین نمود؛ زیرا آنها به‌تنهایی درباره اینکه چه ولتاژی بین ترمینال‌ها وجود دارد، هیچ اطلاعاتی به ما نمی‌دهند. به‌عنوان مثال، وقتی که با عبارت  $v_{AB}(t) > 0$  با جهت‌های قراردادی روبرو می‌شویم بیانگر آن است که ولتاژ ترمینال A و B نسبت به یکدیگر دارای اختلاف ولتاژ  $v(t)$  می‌باشد؛ زیرا،

$$v(t) = v_A(t) - v_B(t) > 0 \quad (10-1)$$

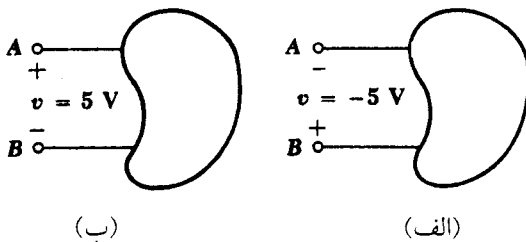
که  $v_A(t)$  و  $v_B(t)$  ولتاژ ترمینال‌های A و B نسبت به یک نقطه مرجع خاص می‌باشد.



شکل (۱-۷-الف): جهت مبنا برای ولتاژ الکتریکی  $v(t)$  بین دو ترمینال A و B؛ (ب)

$$v(t) > 0 \text{ (ج) ; } v(t) < 0$$

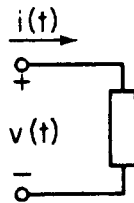
مثال (۱-۲): برای نمایش اختلاف ولتاژ پنج ولت بین دو سر A و B، می‌توان با در نظر گرفتن جهت‌های قراردادی ارائه شده در شکل‌های (۱-۸-الف و ب) مشخص نمود.



شکل (۱-۸): دو حالت برای نمایش ولتاژ واقعی ۵V بین دو سر A و B

### د) جهت‌های قراردادی برای عناصر دو سر

در اینجا، ابتدا عناصر دو سر را مورد بررسی قرار می‌دهیم که در بحث مدارهای الکتریکی، به هر یک از این عناصر دو سر، شاخه مدار نیز می‌گوییم. از جمله این عناصر دو سر، می‌توان به مقاومت، سلف، خازن، دیود و بعضی عناصر دیگر اشاره نمود. برای هر عنصر دو سر، یک ولتاژ قراردادی با پلاریته‌های مثبت و منفی و یک جریان قراردادی با جهت مشخص در نظر می‌گیرند. جهت قراردادی برای پلاریته ولتاژ دو سر هر عنصر و جهت جریان قراردادی مستقل از یکدیگر هستند ولی معمول است که جهت‌هایی را انتخاب کنیم که به آنان، جهت‌های قراردادی متناظر<sup>۱</sup> می‌گویند. جهت قراردادی ولتاژ شاخه و جهت قراردادی جریان شاخه را متناظر با یکدیگر می‌گویند، اگر جریان مثبت از سری که علامت مثبت برای ولتاژ آن در نظر گرفته، وارد شاخه شده و از سری که دارای علامت منفی برای ولتاژ است، از شاخه خارج شود. این جهت‌های قراردادی متناظر، در عنصر دو سر شکل (۹-۱) نشان داده شده است.



شکل (۹-۱): جهت‌های قراردادی ولتاژ و جریان برای یک عنصر دو سر

### ه) جهت‌های مبنا برای توان الکتریکی

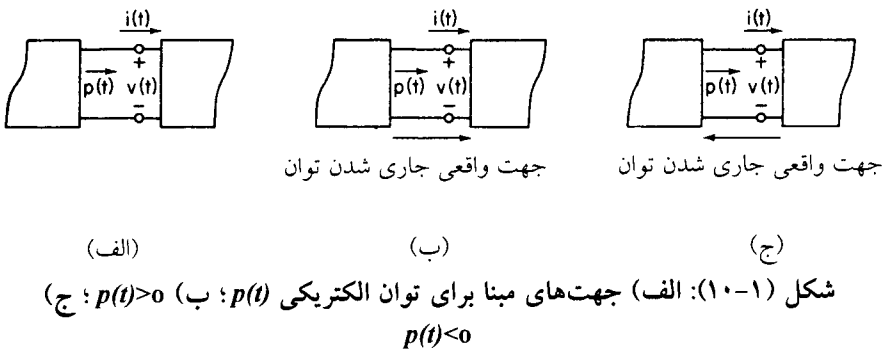
در بخش قبل بیان کردیم که توان الکتریکی در هر لحظه از زمان، از حاصل ضرب ولتاژ و جریان الکتریکی در آن لحظه از زمان به دست می‌آید؛ یعنی:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (۱۱-۱)$$

لذا با توجه به آنکه توان انتقالی، تابعی از دو متغیر ولتاژ و جریان الکتریکی می‌باشد، لذا جهت مبنای توان الکتریکی به جهت‌های مبنای ولتاژ و جریان الکتریکی بستگی خواهد داشت. برای درک بهتر این موضوع، مناسب است تا دو شبکه الکتریکی را در نظر بگیریم که از طریق دو ترمینال به یکدیگر متصل می‌شوند و جهت‌های مبنا برای ولتاژ، جریان و توان الکتریکی مطابق شکل (۱۰-۱-الف) در نظر گرفته شده است. حال اگر در یک زمان

<sup>۱</sup>- Associated Reference Direction

مشخصی، متغیرهای ولتاژ و جریان الکتریکی دارای پلاریته‌هایی مطابق شکل (۱-۱۰-ب) باشد و توان انتقالی هم مثبت باشد آنگاه جهت انتقال انرژی از شبکه سمت چپ به شبکه سمت راست خواهد بود. به عبارت دیگر، اگر با پلاریته‌های موردنظر در شکل (۱-۱۰-ج)، جهت واقعی انتقال انرژی از شبکه سمت راست به شبکه سمت چپ باشد، آنگاه با جهت مبنای در نظر گرفته شده برای توان الکتریکی، این متغیر دارای یک مقدار منفی خواهد بود.



موضوع انتقال توان الکتریکی بین دو شبکه را می‌توان برای یک عنصر دو سر مطابق شکل (۱-۹) نیز ارائه نمود. بر اساس قرار داد بیان شده، اگر جهت پیکان جریان الکتریکی و علامت‌های مثبت و منفی ولتاژ، به گونه‌ای بر روی سرهای یک عنصر قرار گرفته باشد که جریان الکتریکی از سر با پلاریته مثبت به عنصر وارد شود (مطابق با شکل ۱-۹) آنگاه توان الکتریکی جذب شده بدون توجه به مقادیر کمیت‌های ولتاژ و جریان الکتریکی، از حاصل ضرب جبری این دو کمیت به دست می‌آید. اگر مقدار عددی این حاصل ضرب، برابر یک مقدار منفی باشد، این به آن معنی است که این عنصر، توان الکتریکی منفی جذب می‌کند و یا به عبارت دیگر، توان الکتریکی تولید کرده و به دیگر عنصر تحویل می‌دهد. در نتیجه، علامت توان الکتریکی، جهت انتقال آن را مشخص می‌کند.

مثال (۱-۳): در سه عنصر دو سر ارائه شده در شکل (۱-۱۱-الف)، توان الکتریکی را محاسبه کنید.

حل: در عنصر ارائه شده در شکل (۱-۱۱-الف) توان الکتریکی برابر است با:

$$p(t) = 2 \times 3 = 6 \text{ W}$$

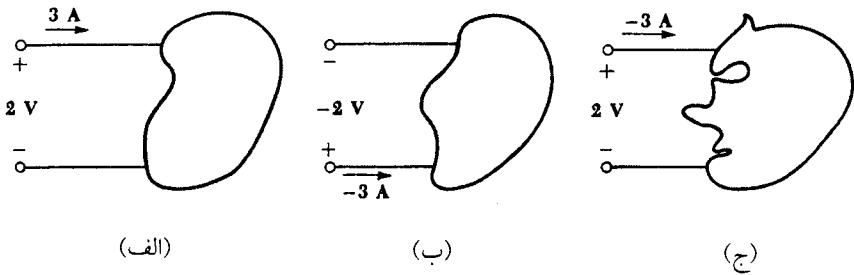
به عبارت دیگر می‌توان گفت که عنصر مذکور، توان الکتریکی  $6 \text{ W}$  را جذب (مصرف) می‌کند. برای عنصر شکل (۱-۱۱-ب) داریم:

$$p(t) = (-2) \times (-3) = 6 \text{ W}$$

لذا عنصر مذکور نیز همان توان  $6 \text{ W}$  را جذب می‌کند. اما برای عنصر شکل (۱-۱۱-ج) می‌توان نوشت:

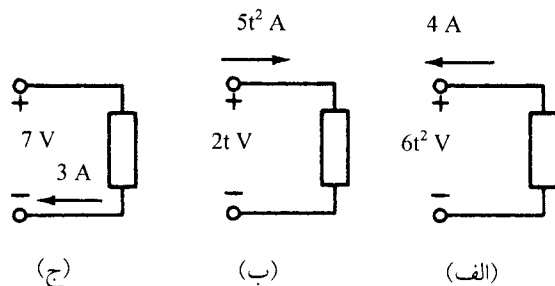
$$p(t) = 2 \times (-3) = -6 \text{ W}$$

یعنی آنکه عنصر مذکور، توان  $-6 \text{ W}$  را جذب کرده و یا اینکه توان الکتریکی  $6 \text{ W}$  را تولید می‌کند و به بقیه عناصر مدار تحویل می‌دهد.



شکل (۱-۱۱): سه عنصر دو سر در حالت‌های مختلف نمایش مقادیر و جهت‌های ولتاژ و جریان

تمرین (۱-۱): توان جذب شده و انرژی انتقالی در زمان  $10 \text{ sec}$  را توسط هر یک از عناصر ارائه شده در شکل (۱-۳) بیابید. انرژی اولیه را برابر صفر در نظر بگیرید.



شکل (۱-۳): عناصر الکتریکی و جریان و ولتاژ الکتریکی آنان

جواب: (الف)  $W(t) = -8000 \text{ W}\cdot\text{sec} = -2/22 \text{ W}\cdot\text{h}$  ,  $P(t) = -24t^2 \text{ W}$

(ب)  $W(t) = 25000 \text{ W}\cdot\text{sec} = 6/94 \text{ W}\cdot\text{h}$  ,  $P(t) = 10t^3 \text{ W}$

(ج)  $W(t) = 210 \text{ W}\cdot\text{sec}$  ,  $P(t) = 21 \text{ W}$



است که عنصر مذکور دارای حالت اولیه‌ای نباشد. به عبارت دیگر، اگر عنصری دارای خواص فوق نباشد، خاصیت غیر خطی بودن را به آن نسبت خواهیم داد. در این کتاب، عناصر مورد نظر به صورت عناصر خطی مد نظر می‌باشند.

### ب) تغییرناپذیر با زمان در مقابل تغییرپذیر با زمان

دومین مشخصه از عناصر یک شبکه الکتریکی، خاصیت تغییرناپذیر بودن یا تغییرپذیر بودن با زمان است. اگر مشخصه‌های فیزیکی یک عنصر، بر حسب زمان تغییر نکند، گفته می‌شود که آن عنصر دارای خاصیت تغییرناپذیری با زمان است. البته در دنیای واقعی، عناصر تغییرناپذیر با زمان، بسیار کم می‌باشند و در صورتی که محدوده زمانی مورد نظر، بسیار کوتاه باشد آنگاه به طور تقریبی می‌توان عناصر را به صورت تغییرناپذیر با زمان در نظر گرفت. در مدارهای الکتریکی مورد نظر در این کتاب، فرض می‌شود که عناصر به کار رفته دارای خاصیت تغییرناپذیر بودن با زمان در مدت زمان تحلیل مورد نظر می‌باشند.

### ج) عناصر اکتیو (فعال) در مقابل عناصر پسیو (غیرفعال)

مفهوم اکتیو<sup>۱</sup> یا پسیو بودن<sup>۲</sup> عناصر، در ارتباط با جهت انتقال انرژی و توان الکتریکی به آن عناصر می‌باشد. در صورتی که کل انرژی تزریقی به عنصر یک شبکه (بدون توجه به نوع مدار الکتریکی)، غیر منفی باشد، آنگاه می‌توان گفت که عنصر مذکور، یک عنصر پسیو است. به عبارت دیگر، شرط پسیو بودن یک عنصر آن است که در مدت زمان  $t$ ،

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau \geq 0 \quad (12-1)$$

در غیر این صورت، به عنصر مذکور، خاصیت اکتیو بودن اطلاق می‌شود. البته عناصر با خاصیت اکتیو بودن به ندرت در شبکه‌های الکتریکی به کار می‌روند. به عبارت دیگر، عناصر فیزیکی با خاصیت اکتیو بودن به ندرت پیدا می‌شود.

### د) عناصر فشرده در مقابل عناصر گسترده

روند انتقال سیگنال‌های الکتریکی در یک هادی، انتقال یک موج در فلزات و یا جاری شدن سیالی در یک لوله، به هیچ وجه به طور لحظه‌ای و آنی انجام نمی‌شود. به عبارت دیگر، در دنیای واقعی و فیزیکی، ابعاد عناصر یک سیستم در تحلیل مسایل مذکور بسیار مهم

<sup>1</sup>- Active Element

<sup>2</sup>- Passive Element

می‌باشد. به‌عنوان مثال، خواص الکتریکی یک مقاومت ۱۰۰۰ اهمی با طول ۱cm متفاوت از یک مقاومت ۱۰۰۰ اهمی با طول ۱km می‌باشد.

هنگامی که ابعاد فیزیکی یک عنصر، در تحلیل آن با اهمیت باشد، آن عنصر به‌عنوان یک عنصر گسترده<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر اگر ابعاد فیزیکی عنصر موردنظر، کوچک باشد؛ به‌گونه‌ای که ابعاد فیزیکی آن در تحلیل آن عنصر بی اهمیت باشد، عنصر از نوع فشرده<sup>۲</sup> خواهد بود. در این کتاب، فقط عناصر فشرده موردنظر می‌باشند که از جمله این عناصر می‌توان به مقاومت‌ها، سلف‌ها، خازن‌ها و ترانسفورماتورهای آزمایشگاهی اشاره نمود. این کار به دو دلیل انجام می‌شود: اول آنکه فهمیدن و طرح مدارهای با عناصر فشرده، ساده تر است. دوم آنکه نظریه مدارهای با عناصر گسترده را می‌توان بر مبنای مدارهای فشرده بسط و گسترش داد.

پس به‌طور خلاصه می‌توان گفت که عناصر و مدارهای الکتریکی مورد بحث در این کتاب، دارای خواص تغییرناپذیری با زمان، خطی بودن، فشرده‌گی عناصر و پسیو بودن می‌باشند.

## ۱-۵- قوانین کیرشهف

در بخش (۱-۲)، متغیرهای مدارهای الکتریکی را بیان نمودیم که بعضی از این متغیرها با یکدیگر ارتباط منطقی دارند. بعضی از ارتباطات موردنظر، بستگی به طبیعت متغیرها دارد. به‌عنوان مثال، ارتباطی که بین جریان الکتریکی  $i(t)$  و بار الکتریکی  $q(t)$  وجود دارد، ناشی از تعریف این متغیرها است که به‌صورت  $i(t) = dq/dt$  می‌باشد. بعضی از ارتباطات بین متغیرها، مربوط به محدودیت نوع خاصی از عناصر شبکه می‌باشد. به‌عنوان مثال، برای هر مقاومت الکتریکی (به‌عنوان یک عنصر دو سر) بین ولتاژ دو سر آن و جریان الکتریکی عبوری، رابطه  $v(t) = R.i(t)$  وجود دارد که  $R$  مقاومت الکتریکی عنصر مقاومتی است (به این رابطه، قانون اهم گفته می‌شود که بعداً در مورد آن صحبت بیشتری خواهیم نمود). اما بعضی از ارتباطات بین متغیرها، بستگی به نحوه اتصال عناصر یک مدار الکتریکی به یکدیگر دارد که اصطلاحاً به آن توپولوژی مدار<sup>۳</sup> می‌گویند. در این بخش، می‌خواهیم این نوع ارتباطات را که تحت عنوان قوانین جریان و ولتاژ کیرشهف<sup>۴</sup> مشهور هستند، بیان کنیم.

<sup>۱</sup> - Distributed Element

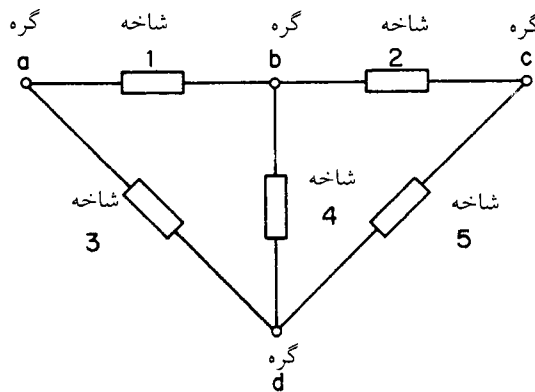
<sup>۲</sup> - Lumped Element

<sup>۳</sup> - Network Topology

<sup>۴</sup> - Kirchhoff's Current and Voltage Law



قبل از اینکه به بیان قوانین کیرشهف بپردازیم، باید مفاهیم گره، شاخه، و حلقه را بیان نماییم. نقطه‌ای از یک مدار الکتریکی که در آن، دو یا چند عنصر به هم متصل می‌شوند با نام گره<sup>۱</sup> شناخته می‌شود. همچنین به عناصر دو سری که در هر مدار الکتریکی به کار می‌روند، یک شاخه<sup>۲</sup> گفته می‌شود. بنابراین، مدار الکتریکی ارائه شده در شکل (۱-۱۳) دارای ۴ گره با نام‌های a، b، c، و d و دارای ۵ شاخه با شماره‌های ۱ تا ۵ می‌باشد. به گره a، دو شاخه ۱ و ۳ متصل شده است و این در حالی است که گره d با سه شاخه ۳، ۴ و ۵ در ارتباط است. حال مفهوم یک حلقه<sup>۳</sup> به این صورت بیان می‌شود: اگر در یک مسیر، از یک گره مورد نظر شروع کرده و با عبور از شاخه‌های مدار الکتریکی، به همان گره اولیه برسیم. اصطلاحاً گفته می‌شود که یک حلقه ایجاد شده است. مسیر این حلقه از شاخه‌های مدار الکتریکی تشکیل شده است. به عنوان مثال، شاخه‌های ۱، ۲ و ۳ در شکل (۱-۱۳)، یک حلقه را تشکیل می‌دهند. همچنین شاخه‌های ۲، ۴ و ۵ حلقه دیگری را تشکیل داده و شاخه‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ حلقه سوم را در مدار الکتریکی شکل مذکور تشکیل می‌دهند. پس در شکل (۱-۱۳)، ۴ گره، ۵ شاخه و ۳ حلقه وجود دارد. البته در فصل‌های آتی، با مفهوم دیگری به نام مش آشنا خواهیم شد که نوع خاصی از حلقه می‌باشد.



شکل (۱-۱۳): گره‌ها، شاخه‌ها و حلقه‌های یک مدار الکتریکی

اکنون آماده ایم که قوانین کیرشهف را بیان کنیم.

<sup>۱</sup> - Node  
<sup>۲</sup> - Branch  
<sup>۳</sup> - Loop

## ۱-۵-۱- قانون جریان کیرشهف

قانون جریان کیرشهف<sup>۱</sup> یا KCL: جمع جبری جریان‌های الکتریکی تمام شاخه‌های متصل شده به هر گره‌ای در هر لحظه از زمان، برابر صفر می‌باشد.

برای درک بهتر این قانون، گره b از شکل (۱۳-۱) را در نظر بگیرید که در شکل (۱۴-۱) نشان داده شده است. با توجه به حوزه عملکرد این قانون که برای هر گره می‌باشد، لذا نیازی به توجه به دیگر گره‌های شبکه وجود ندارد که در اینجا به صورت یک جعبه در نظر گرفته شده‌اند. در صورتی که جریان شاخه‌های ۱، ۲ و ۴ را بترتیب با  $i_1(t)$ ،  $i_2(t)$  و  $i_4(t)$  با جهت‌های موردنظر مشخص نماییم آنگاه بر اساس قانون KCL می‌توان نوشت:

$$i_1(t) - i_4(t) + i_2(t) = 0 \quad (13-1)$$

که در این معادله، جریان‌های ورودی به گره را با علامت مثبت و جریان‌های خروجی را منفی در نظر گرفته ایم. اگر علامت مثبت را برای جریان‌های خروجی از گره، و علامت منفی را برای جریان‌های ورودی در نظر بگیریم، رابطه (۱۳-۱) به شکل زیر تغییر می‌کند:

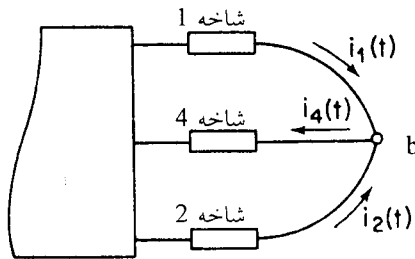
$$-i_1(t) + i_4(t) - i_2(t) = 0 \quad (14-1)$$

که با مقایسه دو رابطه اخیر در می‌یابیم که این دو رابطه دقیقاً مشابه یکدیگر هستند. به عنوان مثال، اگر،

$$i_1(t) = 1 - 3 \sin t \quad (A) \quad \text{و} \quad i_2(t) = 4 \sin 3t \quad (A)$$

آنگاه جریان  $i_4(t)$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i_4(t) = i_1(t) + i_2(t) = 1 - 3 \sin t + 4 \sin 3t$$



شکل (۱۴-۱): قانون KCL برای گره b از شکل (۱۳-۱)

<sup>1</sup> - Kirchhoff's Current Law

با توجه به مطالب مذکور می‌توان قانون جریان کیرشهف را به شکل متداول بهتری نیز ارائه نمود:

**بیان متداول قانون جریان کیرشهف:** مجموع جریان‌های الکتریکی ورودی به هر گره از طریق شاخه‌های متصل به آن، برابر مجموع جریان‌های الکتریکی خروجی از آن گره، در هر لحظه از زمان می‌باشد

بر اساس بیان اخیر قانون جریان کیرشهف، این قانون را برای گره  $b$  در شکل (۱۴-۱) می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

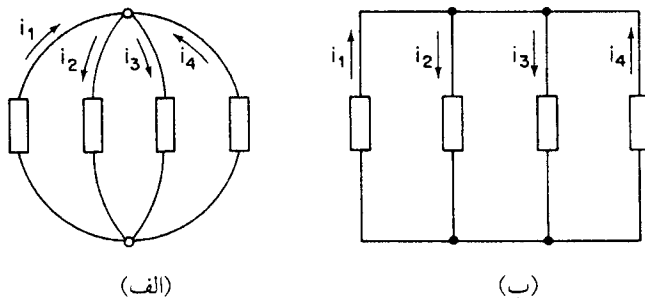
$$i_1(t) + i_2(t) = i_3(t) \quad (15-1)$$

که این رابطه با روابط (۱۳-۱) و (۱۴-۱) هم ارز و معادل است. قانون KCL را می‌توان بر اساس بارهای الکتریکی نیز بیان نمود. با توجه به آنکه در هر گره، هیچ بار الکتریکی، ذخیره، تولید، یا از بین نمی‌رود، لذا مجموع بارهای الکتریکی ورودی و خروجی از هر گره با هم برابرند. این مطلب را می‌توان با انتگرال‌گیری از رابطه (۱۵-۱) نیز بدست آورد.

$$\int i_1(t)dt + \int i_2(t)dt = \int i_3(t)dt$$

$$q_1(t) + q_2(t) = q_3(t) \quad (16-1)$$

بعضی مواقع در ترسیم توپولوژی شبکه‌ها و مدارهای الکتریکی مسایلی پیش می‌آید که باعث اشتباه در تعیین گره‌های آن مدار می‌شود. این حالت، زمانی رخ می‌دهد که یک گره مطابق با شکل (۱۵-۱-الف) به صورت دو نقطه اتصال جدا از هم که با یک هادی (با مقاومت صفر) به هم متصل شده‌اند، نشان داده شود که این موضوع در شکل (۱۵-۱-ب) ارائه شده است. در این حالت، یک گره (یا یک نقطه مشترک) به یک خط مشترک تبدیل شده است. پس باید تمام سیم‌های رابط هادی یا قسمتی از سیم‌های رابط که به یک گره



شکل (۱۵-۱): شکل‌های متداول در نمایش گره‌ها؛ (الف) نقطه مشترک؛ (ب) خط مشترک

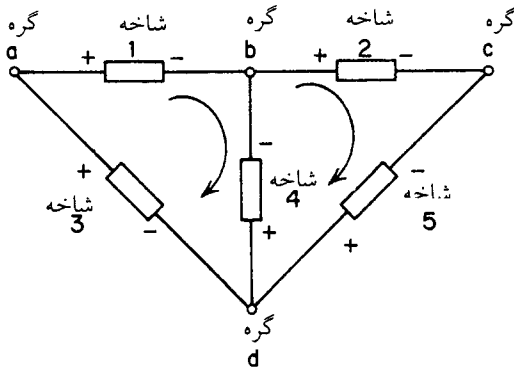
متصل شده اند را به عنوان یک گره در نظر گرفت. به عبارت دیگر، هنوز مدار (۱-۱۵-ب) دارای یک گره بالایی و یک گره پایینی می باشد.

### ۱-۵-۲- قانون ولتاژ کیرشهف

دومین قانون کیرشهف، قانون ولتاژ آن<sup>۱</sup> یا KVL می باشد. این قانون، در ارتباط با حلقه های ایجاد شده در هر مدار الکتریکی می باشد و به شکل زیر بیان می شود:

**قانون KVL:** جمع جبری ولتاژ تمام شاخه های هر حلقه در هر لحظه از زمان، برابر صفر می باشد.

برای درک بهتر این قانون، یک مدار الکتریکی مطابق شکل (۱-۱۶) را در نظر بگیرید که همان مدار شکل (۱-۱۳) می باشد؛ با این تفاوت که بدون توجه به جریان های عبوری از شاخه ها، ولتاژهای الکتریکی دو سر هر عنصر مشخص شده است. قبلاً گفتیم که این مدار، شامل سه حلقه می باشد که حلقه اول از شاخه های ۱، ۴ و ۳، حلقه دوم از شاخه های ۲، ۵ و ۴ و حلقه سوم از شاخه های ۱، ۲، ۵ و ۳ تشکیل شده است.



شکل (۱-۱۶): نمایش حلقه ها و ولتاژهای هر شاخه حلقه های یک مدار الکتریکی

حال بر اساس قانون KVL، رابطه ولتاژها را برای سه حلقه به صورت زیر می توان نوشت:

$$\text{حلقه ۱: } -v_3(t) + v_1(t) - v_4(t) = 0 \quad (17-1)$$

$$\text{حلقه ۲: } v_4(t) + v_2(t) - v_5(t) = 0 \quad (18-1)$$

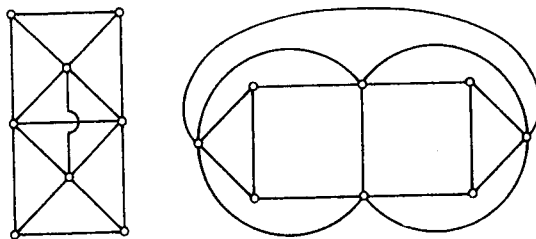
$$\text{حلقه ۳: } v_1(t) + v_2(t) - v_5(t) - v_3(t) = 0 \quad (19-1)$$

<sup>۱</sup> - Kirchhoff's Voltage Law

البته برای نوشتن قانون KVL در هر حلقه، در صورتی که در جهت حلقه (جهت فلش در شکل ۱-۱۶) حرکت کنیم و از سر منفی یک عنصر وارد شویم، بر اساس قاعده، ولتاژ را با علامت منفی برای آن در نظر می‌گیریم و اگر از سر مثبت وارد شویم، ولتاژ آن عنصر را با علامت مثبت فرض می‌کنیم. البته این موضوع، یک قرارداد اختیاری است که به صورت یک قاعده متداول در آمده است و اگر خلاف این روش را هم اختیار کنیم، هیچ خللی در تحلیل قانون ایجاد نمی‌کند. به عبارت دیگر، اگر بر خلاف قاعده متداول عمل کنیم، مثل آن است که روابط (۱-۱۷) تا (۱-۱۹) را در یک علامت منفی ضرب کرده باشیم که خللی در محاسبات ایجاد نمی‌کند.

### ۱-۶- شبکه‌های مسطح و غیرمسطح

آخرین دسته‌بندی از مدارها، شبکه‌های مسطح<sup>۱</sup> و غیرمسطح<sup>۲</sup> می‌باشد. مسطح بودن یک شبکه به آن معنا است که می‌توان مدار الکتریکی را به گونه‌ای ترسیم نمود که هیچ یک از عناصر مدار، یکدیگر را قطع نکنند. به عنوان مثال در شبکه (۱-۱۷-الف) یک عنصر مدار بر روی عنصر دیگر مدار قرار گرفته و به عبارت دیگر، گراف روی صفحه این مدار، ظاهراً به شکل غیرمسطح است؛ ولی با اصلاح نمایش مدار، می‌توان این اشکال نمایش را بر طرف نمود که در شکل (۱-۱۷-ب)، گراف مسطح نمایش داده شده است. اما بعضی از مدارهای الکتریکی را نمی‌توان به هیچ وجه به صورت یک شبکه مسطح نمایش داد که به عنوان نمونه، می‌توان شکل (۱-۱۸) را مشاهده نمود. به عبارت دیگر، گراف مدار ارائه شده در شکل مذکور را نمی‌توان به گونه‌ای ترسیم نمود که هیچ یک از شاخه‌ها بر روی شاخه‌های دیگری قرار نگیرند. به این نوع شبکه‌ها، شبکه‌های غیرمسطح می‌گویند.



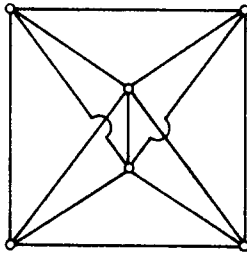
(الف)

(ب)

شکل (۱-۱۷): یک شبکه مسطح

<sup>۱</sup>- Planar Graph

<sup>۲</sup>- Non-Planar Graph

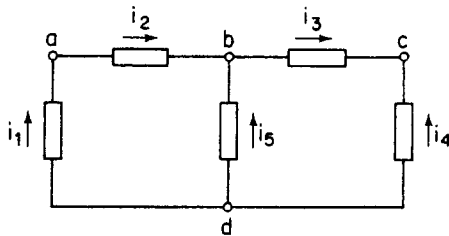


شکل (۱-۱۸): یک شبکه غیرمسطح

تمرین (۲-۱): شکل (۱-۱۹) یک مدار الکتریکی نمونه را نشان می‌دهد. در این مدار: الف) مطلوبست معادلات KCL برای گره‌های a، b، c و d؛ ب) مطلوبست معادلات KVL برای سه حلقه موجود مدار.

$$\left. \begin{array}{l} v_1 + v_2 - v_5 = 0 \\ v_5 + v_3 - v_4 = 0 \\ v_1 + v_2 + v_3 - v_4 = 0 \end{array} \right\} \text{معادلات KVL}$$

$$\left. \begin{array}{l} i_1 = i_2 \\ i_2 + i_5 = i_3 \\ i_3 + i_4 = 0 \\ i_1 + i_4 + i_5 = 0 \end{array} \right\} \text{جواب: معادلات KCL}$$



شکل (۱-۱۹): شبکه الکتریکی نمونه

## ۷-۱- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این فصل، ابتدا متغیرهای یک مدار الکتریکی به همراه واحدهای اندازه‌گیری آنان ارائه گردید. سپس جهت‌های مناسب هر یک از این متغیرها مطرح شد و در نهایت، قوانین اساسی کیرشهف بیان گردید. از مباحث این فصل می‌توان نتیجه گرفت که:

- مدارهای الکتریکی به حالت‌های مختلف زیر دسته بندی می‌شوند: خطی بودن در مقابل غیرخطی بودن، تغییرناپذیر با زمان در مقابل تغییرپذیر با زمان، مدارهای فشرده در مقابل

مدارهای گسترده، مدارهای اکتیو در مقابل مدارهای پسیو. در این کتاب، مدارهای از نوع خطی، تغییرناپذیر با زمان، و مدارهای فشرده با خاصیت پسیو مد نظر می‌باشد.

• قانون KCL بیان می‌کند که در هر لحظه از زمان، جمع جبری جریان‌های ورودی به هر گره، برابر صفر است. به عبارت دیگر،

$$\sum_{n=1}^N i_n(t) = 0$$

که در این رابطه،  $N$  تعداد شاخه‌های متصل به گره موردنظر و  $i_n(t)$  جریان هر شاخه متصل به گره مربوطه می‌باشد.

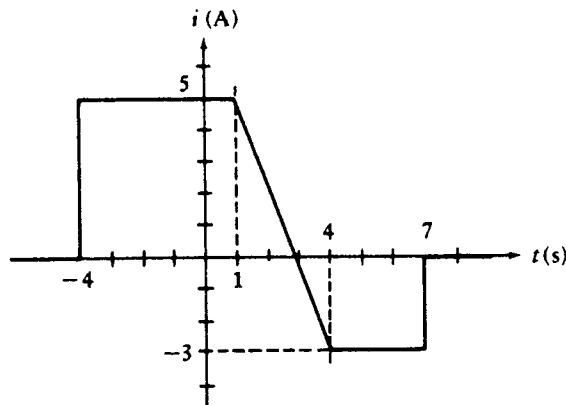
• قانون KVL بیان می‌دارد که در هر لحظه از زمان، جمع جبری ولتاژهای هر حلقه، برابر صفر است؛ یعنی:

$$\sum_{m=1}^M v_m(t) = 0$$

که در این رابطه،  $M$  تعداد کل شاخه‌های هر حلقه موردنظر و  $v_m(t)$  ولتاژ هر شاخه در حلقه مربوطه می‌باشد.

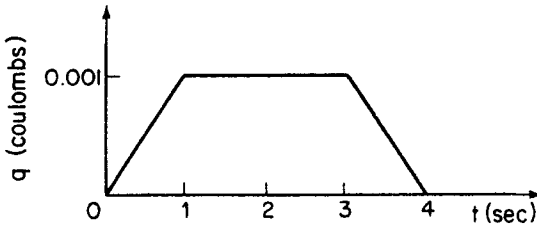
## ۱-۸- مسائل مروری

۱- منحنی تغییرات جریان الکتریکی یک عنصری را به صورت شکل (۱-۲۰) در نظر بگیرید. کل بار عبوری از این عنصر را بیابید.



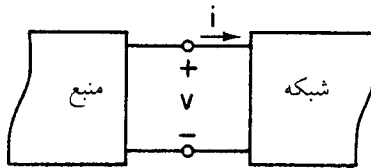
شکل (۱-۲۰): تغییرات جریان یک عنصر

۲- تغییرات بار الکتریکی عبوری از یک عنصر دو سر از یک شبکه الکتریکی به صورت شکل (۲۱-۱) می‌باشد: الف) شکل موج جریان عبوری از این عنصر را بیابید. ب) با استفاده از جریان عبوری قسمت (الف)، آیا می‌توان شکل بار الکتریکی عبوری را متفاوت از شکل (۲۱-۱) به دست آورد؛ به گونه‌ای که جریان عبوری از عنصر، همان شکل موج محاسبه شده در قسمت (الف) باشد؟



شکل (۲۱-۱): تغییرات بار یک عنصر

۳- شبکه‌ای مطابق با شکل (۲۲-۱) از طریق دو ترمینال به یک منبع، متصل شده است. فرض کنید که شبکه موردنظر، بدون انرژی اولیه باشد. حال اگر در مدت زمان  $0 \leq t \leq 3 \text{ msec}$ ، ولتاژ دو سر ترمینال شبکه به صورت  $v(t) = 10 - 200t$  و جریان آن به صورت  $i(t) = 10t^2$  (mA) تغییر کند، آنگاه مطلوبست محاسبه: الف) نحوه تغییرات قدرت انتقالی  $p(t)$  از منبع به شبکه موردنظر؛ ب) انرژی ارسالی  $w(t)$  به سمت شبکه؛ ج) کل انرژی ذخیره شده در مدت 3 msec در شبکه.



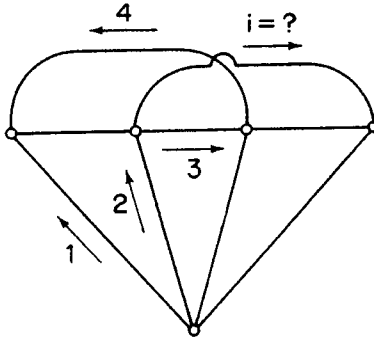
شکل (۲۲-۱): اتصال یک شبکه به منبع الکتریکی

۴- در شبکه ارائه شده در شکل (۱۹-۱)، موارد زیر را محاسبه کنید: الف) در صورتی که  $i_2(t) = 3 + 2t$  و  $i_3(t) = 3 + \sin t$  باشد، جریان‌های  $i_1(t)$ ،  $i_4(t)$  و  $i_5(t)$  را بیابید؛ ب) سه معادله KVL ارائه شده در شکل مذکور را با یکدیگر جمع کنید. چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



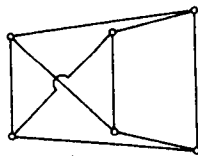
ج) در شکل مذکور، اگر  $v_1(t) = 2 + 7t$  ،  $v_4(t) = -4 + \sin t$  ،  $v_5(t) = 3 + e^{-t}$  باشد مطلوبست محاسبه  $v_2(t)$  ،  $v_3(t)$  .

۵- شبکه‌ای دارای گراف به صورت شکل (۲۳-۱) می‌باشد. در این شبکه، جهت و مقدار جریان ۴ شاخه، مشخص شده است. جریان شاخه موردنظر را تعیین کنید.

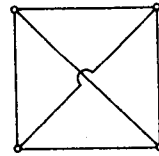


شکل (۲۳-۱): گراف یک شبکه الکتریکی نمونه

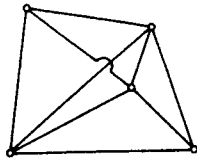
۶- کدام یک از گراف‌های ارائه شده در شکل (۲۴-۱) را می‌توان به صورت یک گراف مسطح رسم نمود. این گراف‌ها را رسم کنید.



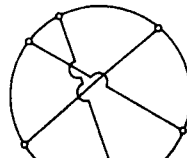
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۲۴-۱): چند گراف نمونه