

فصل ۱:

اصول تحلیل مدارها و المان های فشرده

	Lamp		Zener diode		Resistor
	Wall light		Diode		Variable resistor
	Light globe		Photo diode		Transformer
	Switch		LED		Antenna unbalanced
	Locking switch		Diode pin		Antenna balanced
	Push button switch		Cell		Speaker
	wire		Battery		Microphone
	Connected		Ground		Heating element
	Not connected		Fuse		Motor
			dc supply		Electric Bell
			ac supply		
	Voltmeter				
	Ammeter				
	Galvanometer				
	Potentiometer				
	Galvanometer				
	Capacitor				
	Polarized capacitor				
	Variable capacitor				
	Crystal				

۱-۱- مفهوم المان و مدار فشرده (Lumped):

۱-۲- جهت های قراردادی ولتاژ و جریان؛

۱-۳- قوانین KVL و KCL؛

۱-۴- اجزای اصلی مدارهای فشرده؛

- مقاومت (خطی/غیر خطی، تغییر پذیر/تغییر ناپذیر با زمان)؛

- منابع وابسته (مستقل)؛

- شکل موج های متداول برای وابسته (مستقل)؛

- منابع وابسته؛

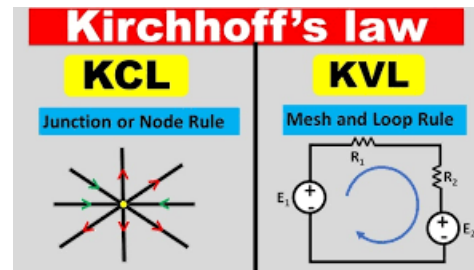
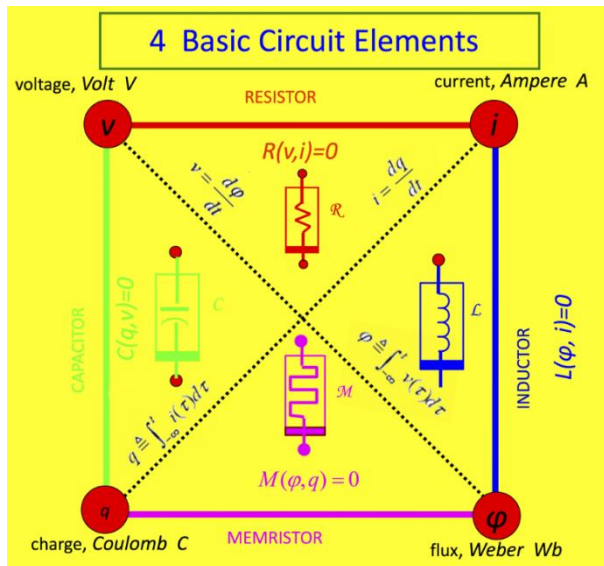
- خازن (خطی/غیر خطی، تغییر پذیر/تغییر ناپذیر با زمان)؛

- القاگر/سلف (خطی/غیر خطی، تغییر پذیر/تغییر ناپذیر با زمان)؛

۱-۵- مفهوم توان و انرژی در المان های فشرده؛

۱-۶- تقریب سیگنال کوچک؛

۱-۷- نکات تکمیلی و پیوست ها؛



۱-۱- مفهوم المان و مدار فشرده (Lumped)

❑ **مدار:** مجموعه ای از المان های الکتریکی و الکترونیکی است و از به هم پیوستن آن ها و برای کاربردی خاص تشکیل می شود. مدارهای الکتریکی به دو دسته کلی فشرده (Lumped) و گسترده (Distributed) تقسیم می شوند.

❑ **اجزاء مدار:** المان های تشکیل دهنده مدار را اجزای آن نامند. اجرای مدار، در تحلیل های تئوریک، عموماً به صورت ایده آل نشان داده شده که این مدل ایده آل چنان انتخاب می شود که مهمترین خاصیت فیزیکی آن المان را نشان دهد.

❑ **مدار فشرده:** از به هم پیوستن المان های فشرده به دست می آید. در یک مدار فشرده، ابعاد مدار و هر جزء آن در مقایسه با طول موج متناظر با بالاترین فرکانس کاری، کمتر است ($d \ll \lambda$).

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{25 \times 10^3} = 12 \text{ km}$$

❖ یک مدار صوتی با فرکانس کاری 25kHz:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{500 \times 10^6} = 60 \text{ cm}$$

❖ یک پردازنده فرکانس بالای کامپیوتری با فرکانس 500MHz:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 1 \text{ cm}$$

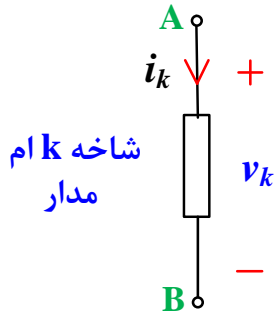
❖ یک مدار ماکروویو با فرکانس 30GHz:

✓ در مثال اول، تقریب فشرده بودن مناسب است و در مثال های دوم و سوم، تقریب فشرده بودن چندان مناسب نیست. بنابراین در خصوص تشخیص فشرده بودن یا نبودن مدار، ابعاد باید در مقایسه با طول موج فرکانس مورد نظر سنجیده شود.

❑ **مدار گسترده:** مداری که فشرده نباشد، گسترده نام دارد.

❖ 2 در مدار فشرده، قوانین ولتاژ و جریان کیرشهف معتبر است ولی در مدار گسترده، معادلات ماکسول برقرار است.

۱-۲- جهت های قراردادی ولتاژ و جریان



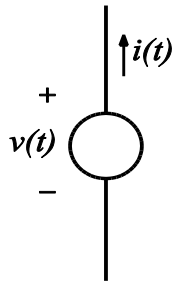
□ **جهت قراردادی متناظر:** اگر جهت جریان در شاخه‌ای از سری که علامت + دارد وارد شده و به سوی سری که علامت - دارد پیش رود جهت‌های ولتاژ و جریان این شاخه را در جهت‌های متناظر گویند.

$$v_k = v_A - v_B$$

✓ در صورت استفاده از جهت قراردادی متناظر:

توان توسط شاخه مربوطه مصرف می شود \rightarrow when $p(t) = v(t) \cdot i(t) > 0$

توان توسط شاخه مربوطه به مدار داده می شود \rightarrow when $p(t) = v(t) \cdot i(t) < 0$



✓ معمولاً جهت جریان در منابع به‌گونه‌ای فرض می‌شود که توان تحویل بدهند.

۱-۳- قوانین کیرشهف (KVL و KCL)

□ **تحلیل مدار:** تعیین جریان و ولتاژهای مورد نظر در یک مدار الکتریکی است.

□ تحلیل مدار بر سه اصل پایه ریزی شده است:

✓ قانون جریان کیرشهف (KCL)؛

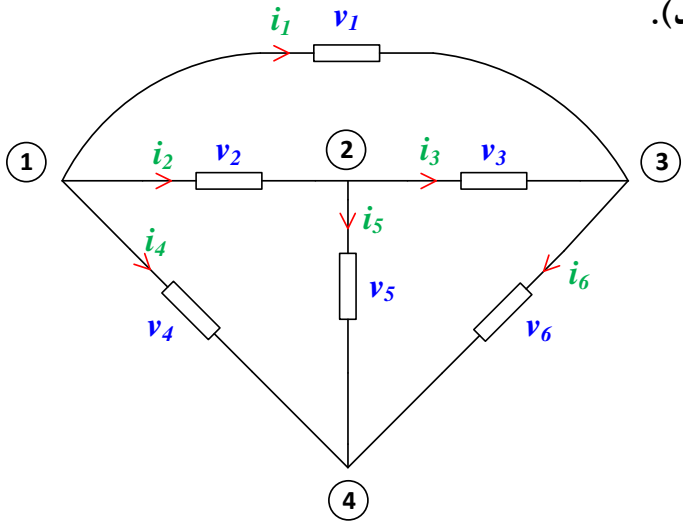
✓ قانون ولتاژ کیرشهف (KVL)؛

✓ روابط شاخه‌ها (رابطه جریان و ولتاژ هر شاخه)؛

❖ قوانین کیرشهف با تقریب از معادلات معروف ماکسول که قوانین عمومی میدان الکترومغناطیسی را بیان می‌کنند، ناشی می‌شود.

قوانین کیرشهف فقط در مدارهای فشرده برقرار هستند.

❑ **قانون جریان کیرشلف (KCL):** در هر گره از هر مدار فشرده و در هر لحظه از زمان مجموع جبری جریان‌های همه شاخه‌هایی که از آن گره خارج می‌شوند برابر صفر است. (گره محل تقاطع دو یا چند شاخه می‌باشد).



✓ در هنگام بکارگیری KCL در یک گره معین، ابتدا جهت جریان شاخه‌ها را تعیین می‌کنیم. سپس در جمع جبری، **جریان شاخه‌های خارج شونده از گره را با علامت مثبت** و جریان شاخه‌های وارد شونده به گره را با علامت منفی مشخص می‌کنیم. روابط حاصله (مانند روابط زیر) را معادلات گره نامند.

KCL در گره ۱: $i_1 + i_2 + i_4 = 0$

KCL در گره ۲: $-i_2 + i_5 + i_3 = 0$

KCL در گره ۴: $-i_4 - i_5 - i_6 = 0$

❖ **نتایجی که از قانون جریان کیرشلف KCL حاصل می‌شود:**

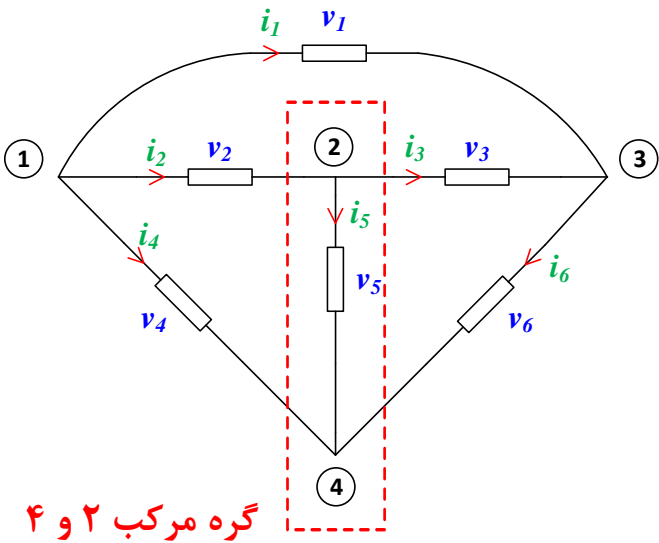
✓ KCL یک محدودیت جبری، خطی و همگن روی جریان‌های شاخه‌ها برقرار می‌کند (معادلات حاصله جبری، خطی و همگن هستند).

✓ KCL به ماهیت اجزاء بستگی ندارد. یعنی در مدارهای خطی، غیر خطی، تغییرپذیر با زمان، تغییر ناپذیر با زمان، پسیو و اکتیو قابل اعمال است. فقط باید در فرکانس کاری، فشرده باشند.

✓ KCL اصل بقای بار الکتریکی را در هر گره بیان می‌کند. به این معنی که بار الکتریکی در هیچ گره‌ای جمع نمی‌شود (جریان شاخه، همان بار الکتریکی جاری شده در واحد زمان است).

✓ KCL نه تنها در هر گره ساده، بلکه در هر گره مرکب نیز برقرار است. گره مرکب، ترکیبی از چند گره ساده است و معادله حاصل در مدار روبرو، جمع روابط KCL دو گره ساده است.

✓ جریان شاخه‌های وصل شده به یک گره ساده یا مرکب مستقل از هم نیستند. اگر تعداد کل گره‌های مدار n_t و تعداد شاخه‌های مدار b باشد، تعداد متغیرهای مستقل جریان شاخه، برابر با $b - n_t + 1$ است. مدار روبرو شامل ۴ گره و ۶ شاخه است، لذا تعداد متغیرهای مستقل جریان شاخه، $6 - 4 + 1 = 3$ است.

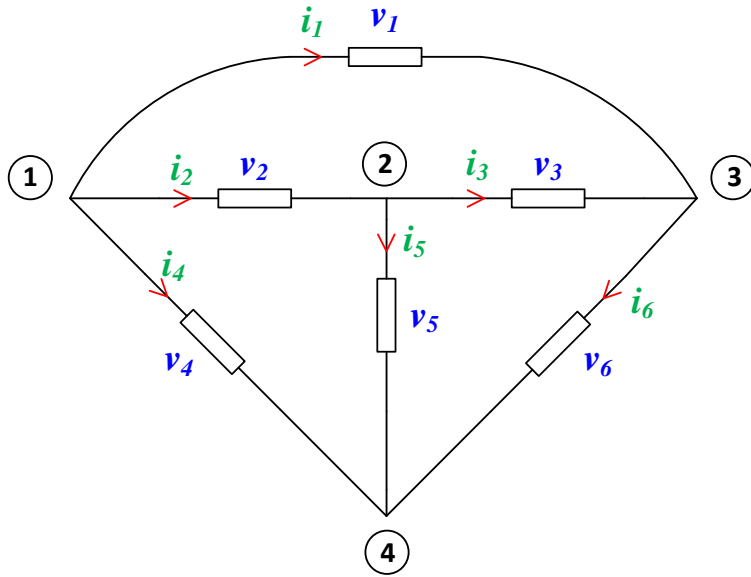


گره مرکب ۲ و ۴

KCL در گره مرکب ۲ و ۴:

$-i_2 + i_3 - i_4 - i_6 = 0$

□ **قانون ولتاژ کیرشهف (KVL):** در هر مدار فشرده و در هر لحظه از زمان و در هر حلقه آن، جمع جبری ولتاژ شاخه های واقع در حلقه صفر است (حلقه، هر مسیر بسته در مدار است که از یک گره شروع شده و به همان گره ختم می شود).



✓ در هنگام بکارگیری KVL در یک حلقه مشخص، ابتدا یک جهت قراردادی برای حلقه تعیین می کنیم (جهت قراردادی حلقه، یک جهت دلخواه انتخابی است). سپس در جمع جبری، ولتاژ شاخه هایی که جهت قراردادی متناظر آن ها با جهت حلقه موافق است، با علامت مثبت و ولتاژ شاخه هایی که جهت قراردادی آنها مخالف جهت حلقه است، با علامت منفی مشخص می شوند.

I KVL در حلقه I : $+v_2 + v_5 - v_4 = 0$

II KVL در حلقه II : $+v_3 + v_6 - v_5 = 0$

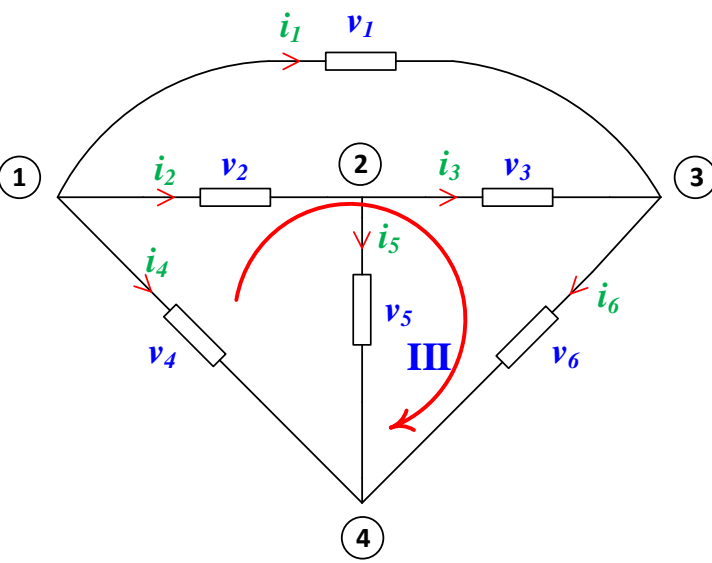
❖ **نتایجی که از قانون جریان کیرشهف KCL حاصل می شود:**

✓ KVL یک محدودیت جبری، خطی و همگن روی جریان های شاخه ها برقرار می کند (معادلات حاصله جبری، خطی و همگن هستند).

✓ KVL به ماهیت اجزاء بستگی ندارد. یعنی در مدارهای خطی، غیر خطی، تغییرپذیر با زمان، تغییر ناپذیر با زمان، پسیو و اکتیو قابل اعمال است. فقط باید در فرکانس کاری، فشرده باشند.

✓ KVL نه تنها در هر حلقه ساده، بلکه در هر حلقه مرکب نیز برقرار است. حلقه مرکب، ترکیبی از چند حلقه ساده است و معادله حاصل در مدار روبرو، جمع روابط KVL دو حلقه ساده است.

✓ اگر تعداد کل گره های مدار n_t باشد، تعداد متغیرهای مستقل ولتاژ شاخه، برابر با $n_t - 1$ است. مدار روبرو شامل 4 حلقه است، لذا تعداد متغیرهای مستقل ولتاژ شاخه، $4 - 1 = 3$ است.



III KVL در حلقه III : $+v_2 + v_3 + v_6 - v_4 = 0$

۱-۴- اجزای اصلی مدارهای فشرده

□ در این فصل اجزاء دو سر بررسی می شوند. ضمناً المان ها **ایده آل** فرض می شوند. این المان ها عبارتند از:

✓ مقاومت (خطی/غیر خطی، تغییر پذیر/تغییر ناپذیر با زمان)؛

✓ منابع وابسته (مستقل)؛

✓ منابع وابسته؛

✓ خازن (خطی/غیر خطی، تغییر پذیر/تغییر ناپذیر با زمان)؛

✓ القاگر/سلف (خطی/غیر خطی، تغییر پذیر/تغییر ناپذیر با زمان)؛



□ چند تعریف پایه:

✓ مدار، یک ساختار به هم پیوسته از اجزاء مدار است که در ازای یک ورودی خاص، خروجی مشخصی را تحویل می دهد.

✓ اجزاء مدار، مدل های ایده آل شده المان های فیزیکی هستند.

✓ هر مدل برای نشان دادن مهمترین خاصیت المان فیزیکی انتخاب می شود.

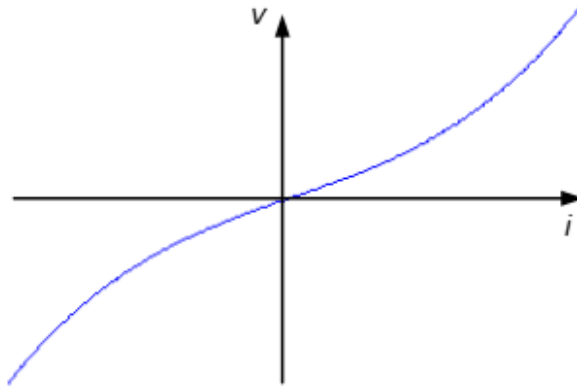
✓ هر المان فیزیکی، خواص دیگری هم ممکن است داشته باشد که در ساختن مدل نادیده گرفته می شود.

✓ مدل های ایده آل، المان های فیزیکی را به طور تقریبی مشخص می کنند.

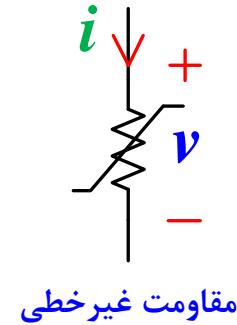
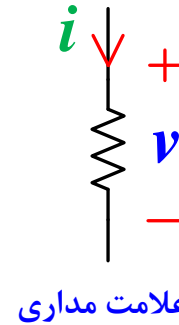
	RESISTOR	CAPACITOR	INDUCTOR
LOW FREQUENCY BEHAVIOR			
HIGH FREQUENCY BEHAVIOR			

– مقاومت (Resistor)

□ **مقاومت:** المانی است که در هر لحظه از زمان، میان ولتاژ دو سر آن $v(t)$ و جریان عبوری از آن $i(t)$ یک رابطه وجود داشته باشد و بتوان در صفحه VI منحنی مشخصه آن را نشان داد. این منحنی، مشخصه VI مقاومت نامیده می شود.

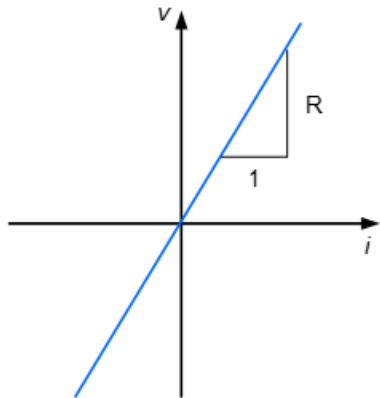


مشخصه VI یک مقاومت نوعی

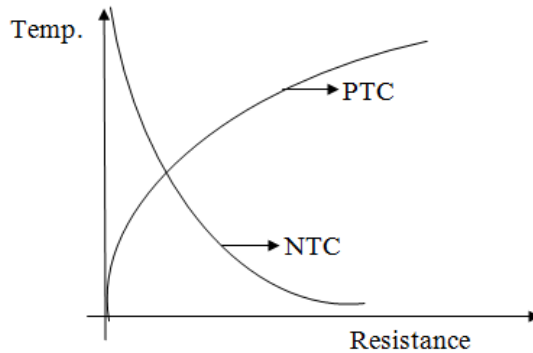


□ طبقه بندی انواع مقاومت‌ها:

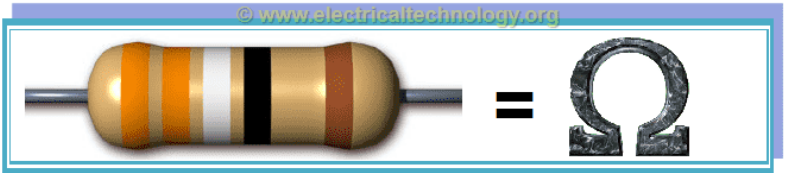
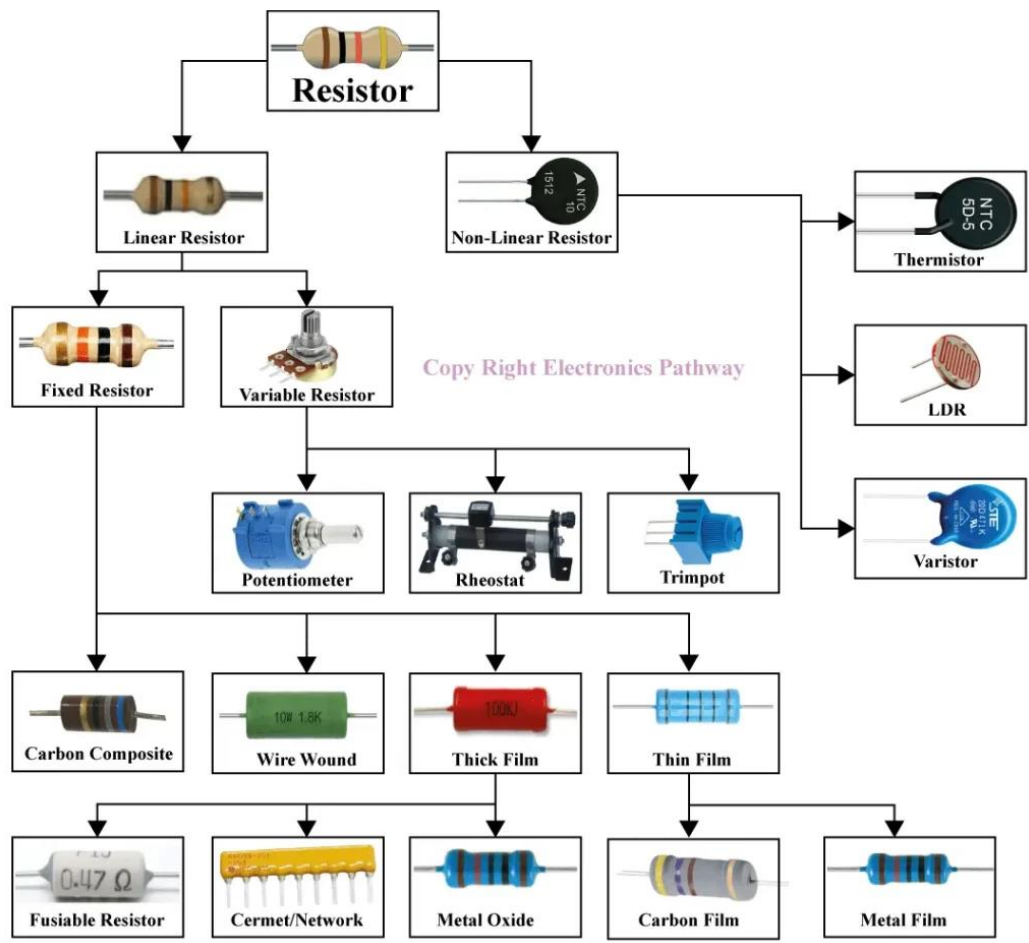
- ✓ **مقاومت خطی:** مقاومتی که مشخصه آن خط مستقیم گذرنده از مبدا باشد.
- ✓ **مقاومت غیرخطی:** مقاومتی که خطی نباشد را غیرخطی گویند (مشخصه VI خطی نیست).
- ✓ **مقاومت تغییرناپذیر با زمان:** مقاومتی که مشخصه آن با زمان تغییر نمی کند.
- ✓ **مقاومت تغییرپذیر با زمان:** مقاومتی که مشخصه آن با زمان تغییر می کند.



مقاومت خطی



مقاومت متغیر با زمان



IEEE Symbols (Old) IEC Symbols (New)

Institute of Electrical and Electronics Engineers International Electrotechnical Commission

Resistor (General Symbol)	Trimmer Resistor	Resistor (General Symbol)	Trimmer Resistor
Potentiometer	Thermistor	Potentiometer	Thermistor
Rheostat (Variable Resistor)	Photoresistor (LDR)	Rheostat (Variable Resistor)	Photoresistor (LDR)

Resistor & Different Symbols of Resistors

۱- مقاومت خطی تغییر ناپذیر با زمان: مشخصه آن خطی است و با زمان تغییر نمی کند.

قانون اهم

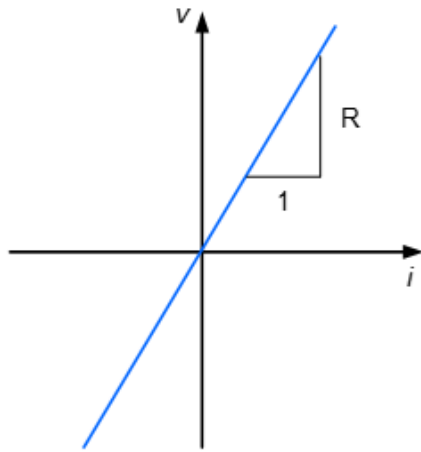
$$v(t) = Ri(t)$$

یا

$$i(t) = Gv(t)$$

R مقاومت نامیده میشود و واحد آن اهم (Ω) است.

G رسانایی نامیده میشود و واحد آن مهو است

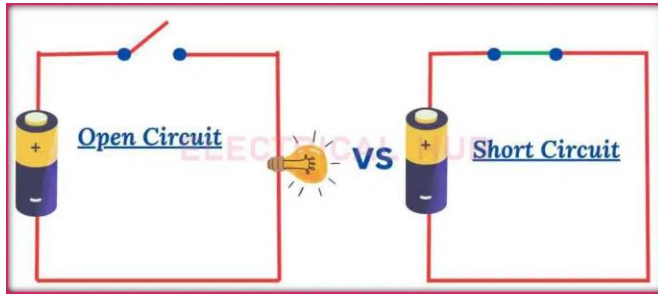


مقاومت خطی تغییر ناپذیر با زمان

❖ حالت‌های خاص مقاومت خطی تغییر ناپذیر با زمان:

✓ شاخه مدار باز: یک مقاومت با اندازه ∞ است. در شاخه مدار باز، در ازای تمامی ولتاژها، $i(t) = 0$ می باشد.

✓ شاخه اتصال کوتاه: یک مقاومت با اندازه صفر است. در شاخه اتصال کوتاه $v(t) = 0$ می باشد.



۲- مقاومت خطی تغییر پذیر با زمان: مشخصه آن خطی است ولی با زمان تغییر می کند.

$$v(t) = R(t) i(t)$$

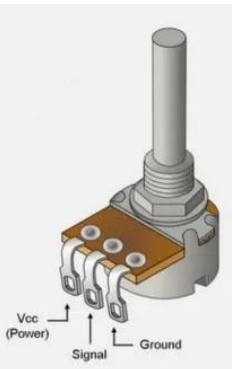
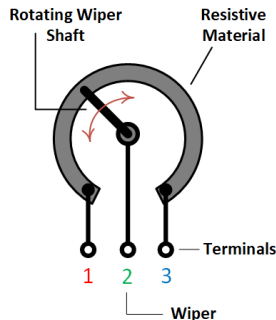
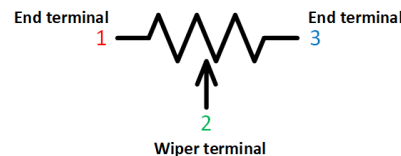
یا

$$i(t) = G(t) v(t)$$

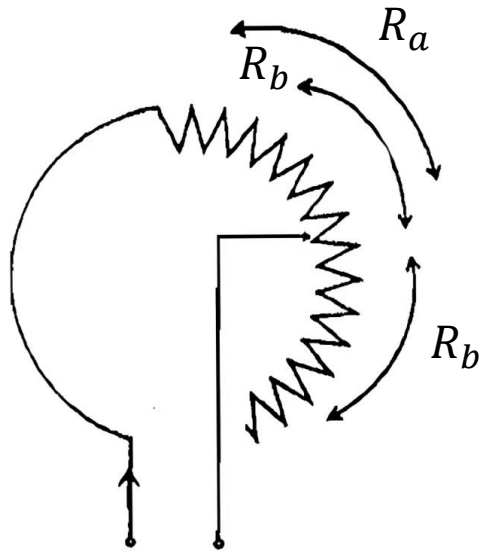
✓ پتانسیومتر: یک مثال از مقاومت خطی متغیر با زمان است (مثلاً، مقدار آن با یک پریود منظم در حال تغییر است).

✓ کلید: یک مقاومت خطی است که در حالت وصل مقدار آن صفر و در حالت قطع ∞ است.

Potentiometer Symbol



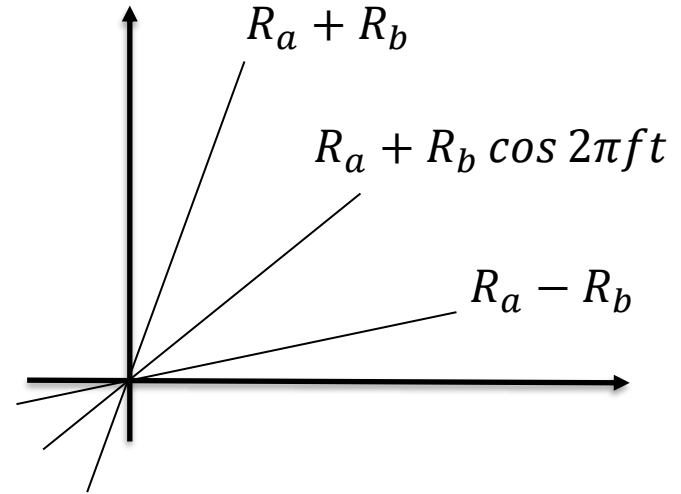
❖ **نکته:** بر اساس نمونه مثال زیر، مقاومت‌های خطی تغییرپذیر با زمان می‌توانند سیگنال‌های با فرکانس جدید تولید کنند.



$$i(t) = A \cos \pi f t$$

$$R(t) = R_a + R_b \cos 2\pi f t$$

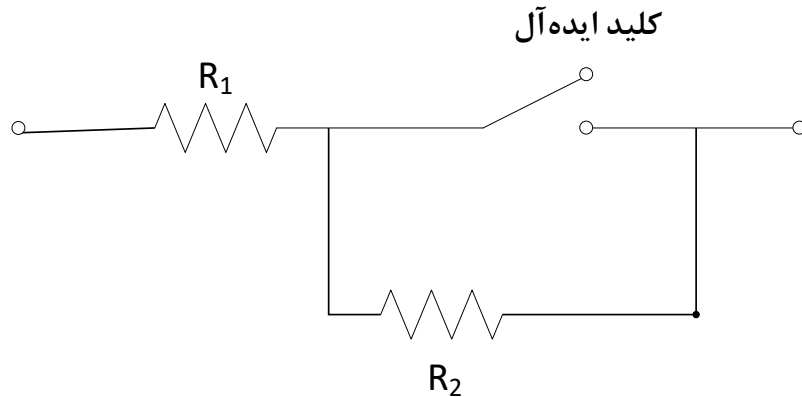
$$R_a > R_b, R_b > 0, R_a > 0$$



$$v(t) = R(t)i(t)$$

$$= AR_a \cos 2\pi f_1 t + \frac{AR_b}{2} \cos 2\pi(f_1 + f)t + \frac{AR_b}{2} \cos 2\pi(f_1 - f)t$$

سیگنال‌های با فرکانس‌های جدید $f_1 + f$ و $f_1 - f$ ایجاد شده‌اند.



✓ **کلید ایده‌آل:** وقتی بسته باشد مانند مدار اتصال کوتاه است.

وقتی باز باشد مانند مدار باز است.

✓ **کلید واقعی:** وقتی باز است مقاومت بسیار بزرگی دارد. وقتی

بسته است مقاومت نسبتاً کمی دارد.

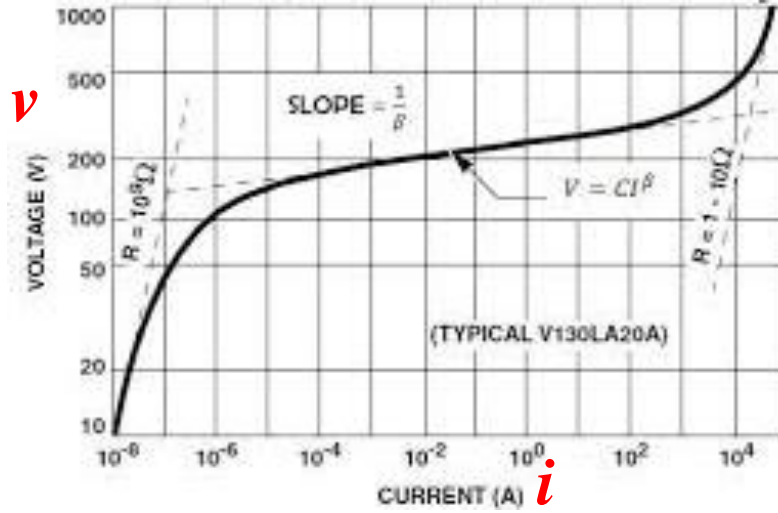
✓ **مدل‌سازی کلید واقعی با یک کلید ایده‌آل:** مقاومت R_1 بسیار

کوچک و مقاومت R_2 بسیار بزرگ است.

۳- مقاومت غیر خطی تغییرناپذیر با زمان: مقاومتی که خطی نباشد، غیر خطی است.



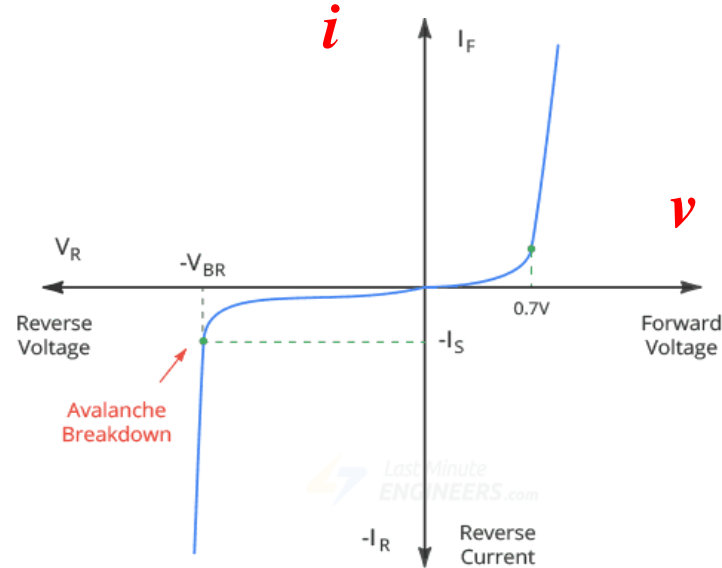
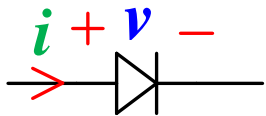
وریستور



$$v = f(i)$$



دیود



$$i = I_S (e^{\frac{v}{V_T}} - 1)$$

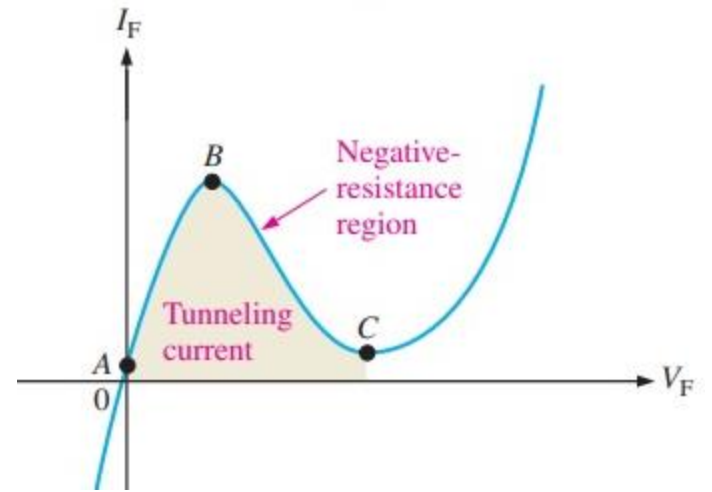
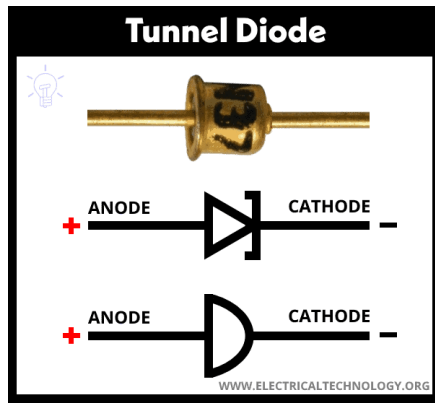
ثابت بولتزمن k

جریان اشباع معکوس I_S

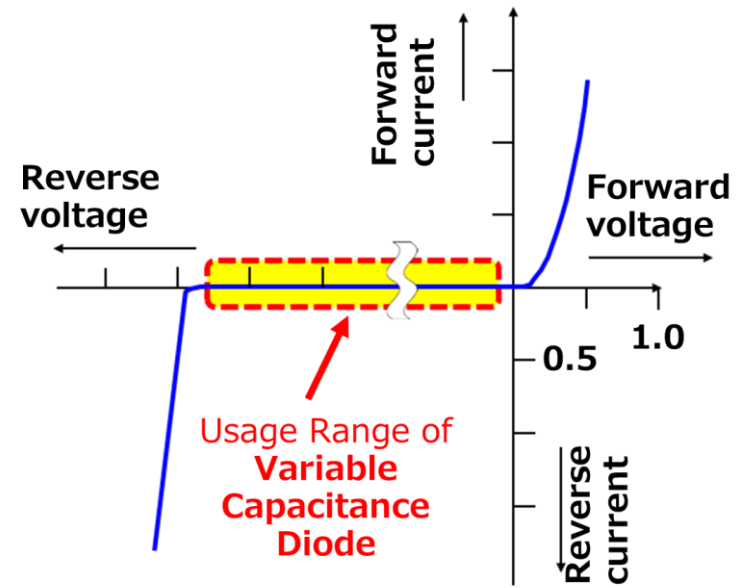
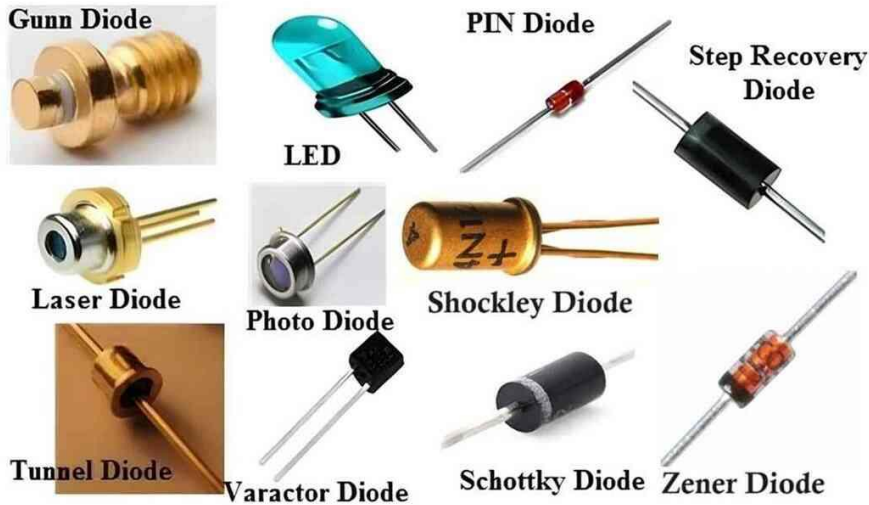
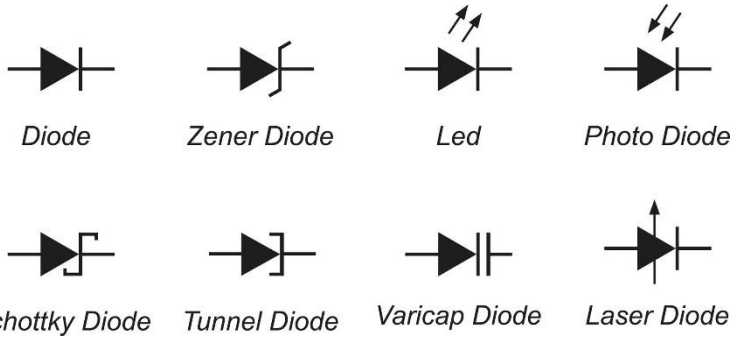
درجه حرارت بر حسب کلونین T

بار الکترون q

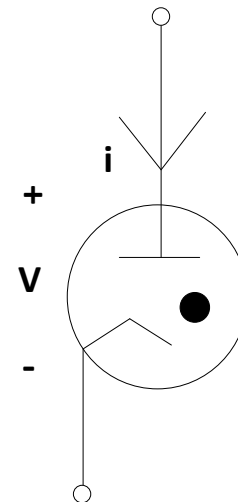
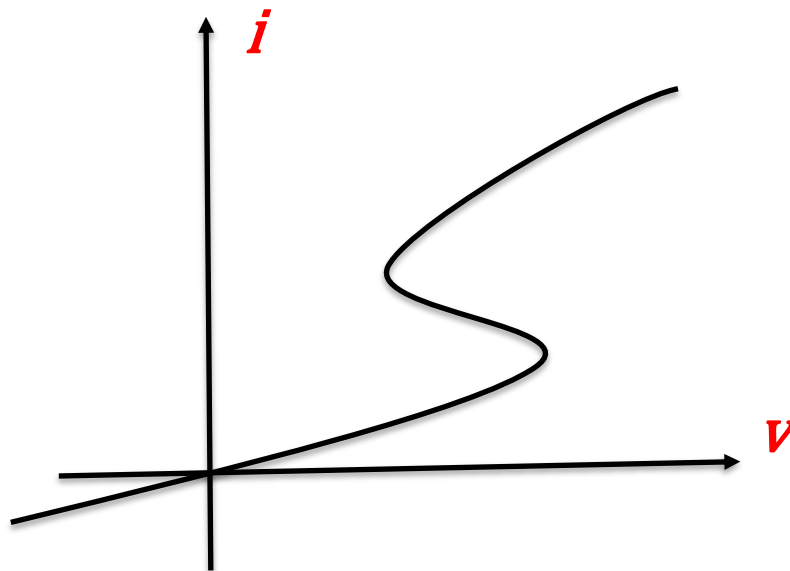
در درجه حرارت اتاق، مقدار $\frac{kT}{q}$ تقریباً مساوی 26mV است.



Diodes

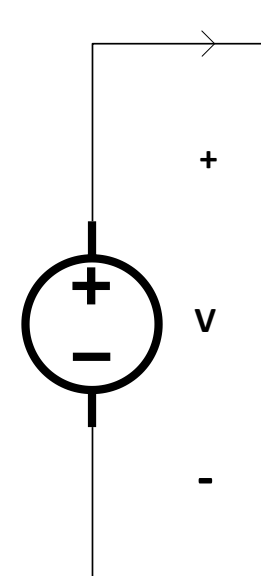
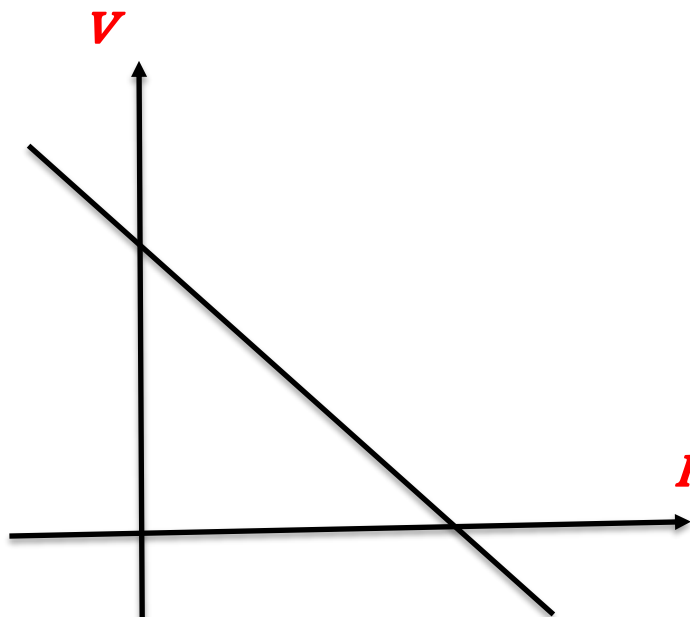


دیود گازدار، نمونه ای از یک مقاومت
غیرخطی تغییرناپذیر با زمان



✓ مقاومتی که در قسمتی از مشخصه آن شیب منفی باشد. مانند دیود تونلی و دیود گازدار.

مدل واقعی باتری، نمونه ای از یک
مقاومت غیرخطی تغییرناپذیر با زمان



❖ **نکته:** براساس نمونه مثال زیر، مقاومت‌های غیرخطی نیز می‌توانند سیگنال‌های با فرکانس جدید تولید کنند.

$$\left. \begin{array}{l} v = f(i) = i^3 + 2i \\ i(t) = \sin 2\pi ft \end{array} \right\} v(t) = \sin^3 2\pi ft + 2 \sin 2\pi ft \xrightarrow{\sin 3\alpha = 3\sin \alpha - 4\sin^3 \alpha}$$

$$v(t) = \frac{3 \sin 2\pi ft - \sin 2\pi(3f)t}{4} + 2 \sin 2\pi f = \frac{11}{4} \sin 2\pi ft - \frac{1}{4} \sin 6\pi ft$$

ملاحظه می‌شود هارمونیک سوم نیز ظاهر شده است.

❖ **نکته:** **خاصیت جمع پذیری:** تابع $f(x)$ را جمع‌پذیر گویند اگر برای هر مقدار x_1 و x_2 دلخواه:

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$$

❖ **نکته:** **خاصیت همگنی:** تابع $f(x)$ را همگن گویند اگر برای هر عدد دلخواه α :

$$f(\alpha x) = \alpha f(x)$$

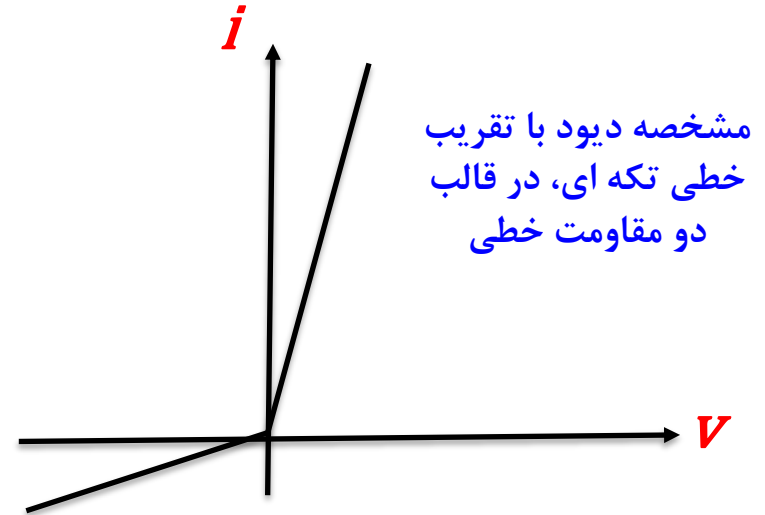
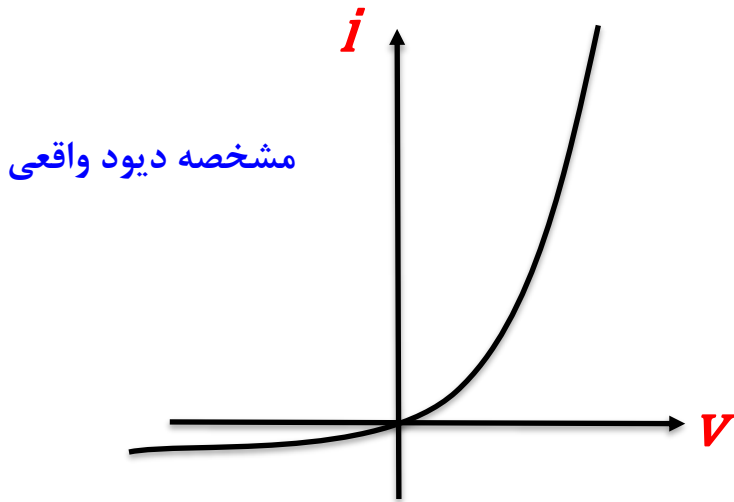
❖ **نکته:** می‌توان این دو خاصیت همگنی و جمع‌پذیری را با هم یکجا نوشت یعنی تابع $f(x)$ را جمع‌پذیر و همگن گویند اگر برای هر α_1 و α_2 دلخواه:

$$f(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2) = \alpha_1 f(x_1) + \alpha_2 f(x_2)$$

❖ **خواص همگنی و جمع‌پذیری در مقاومت‌های غیرخطی برقرار نمی‌باشد.** 14

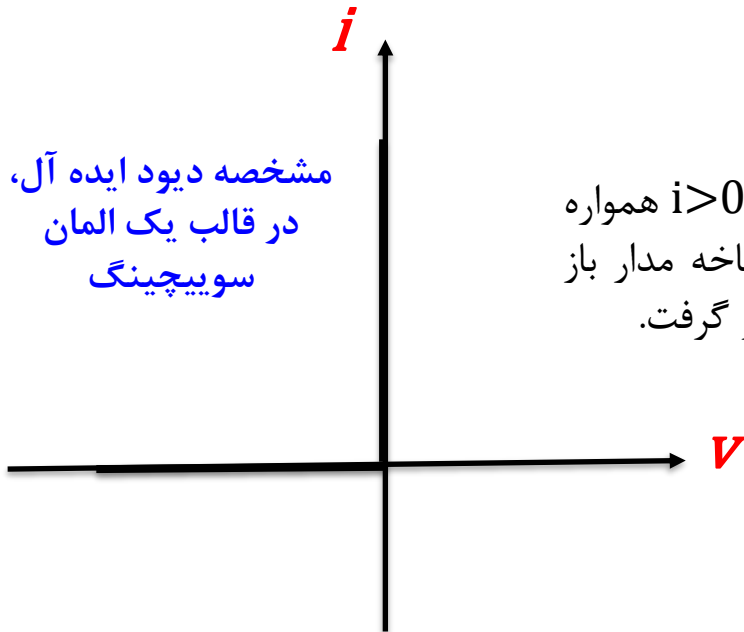
❖ نکته: روش تقریب خطی تکه‌ای، یک روش بسیار مهم در آسان سازی حل مدارهای غیرخطی در مهندسی برق است.

Piecewise Linear Approximation



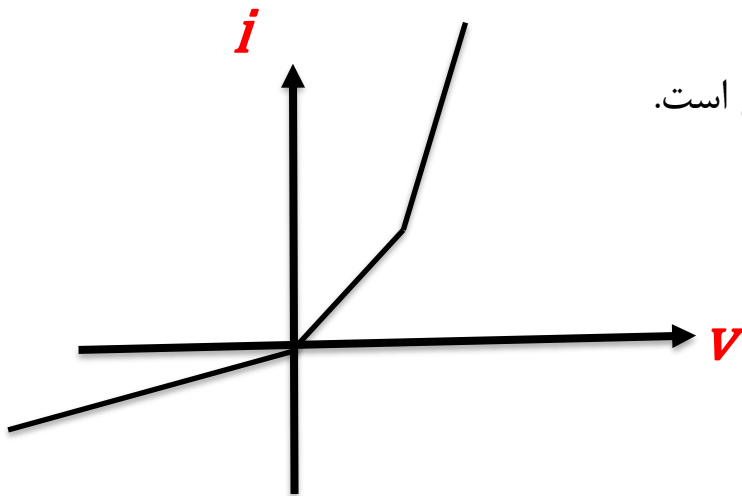
مشخصه دیود ایده آل، در قالب یک المان سویچینگ

✓ از تقریب بالا، به مشخصه دیود ایده‌آل می‌توان رسید که در آن، برای $i > 0$ همواره $v = 0$ یعنی شاخه اتصال کوتاه و برای $v < 0$ همواره $i = 0$ یعنی شاخه مدار باز است. ماهیت یک کلید قطع و وصل برای دیود ایده‌آل می‌توان در نظر گرفت.



✓ تقریب خطی چند تکه‌ای، روشی دقیق تر برای حل مدارهای غیرخطی است.

Multiple Piecewise Approximation



❖ **نکته:** تعریف مقاومت دو طرفه: مقاومتی است که مشخصه آن نسبت به مبدا متقارن باشد.

✓ در یک مقاومت دو طرفه با تغییر i به $-i$ و v به $-v$ مشخصه تغییری نمی کند. یعنی اگر نقطه (v, i) روی مشخصه باشد نقطه $(-v, -i)$ نیز روی مشخصه قرار می گیرد.

✓ کلیه مقاومت های خطی، دو طرفه می باشند.

✓ یک مقاومت دو طرفه از هر سری که در مدار قرار گیرد، فرقی نمی کند.

مثلاً، مقاومت های نشان داده شده در زیر، دارای خواص مذکور هستند:

$v = i + i^3$ مقاومت دو طرفه، غیرخطی و تغییر ناپذیر با زمان

$v = e^i - 1$ مقاومت غیرخطی و تغییر ناپذیر با زمان

$v = 2i + e^{-t}i - v \cdot \cos(2t) \longrightarrow v = \frac{(2 + e^{-t})}{1 + \cos(2t)} i$ مقاومت دو طرفه، خطی و متغیر با زمان

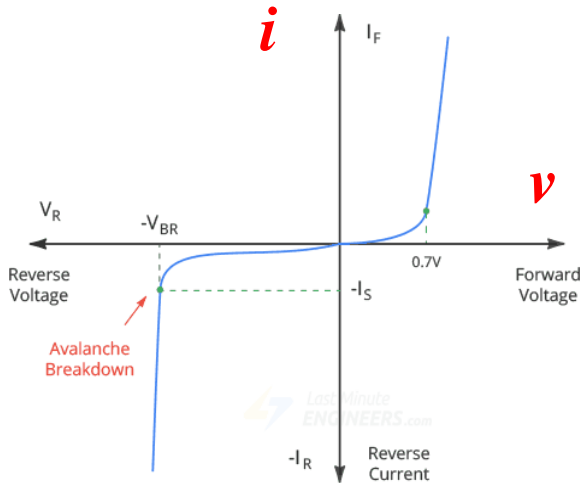
❖ **نکته:** تعریف مقاومت کنترل شده با جریان: ولتاژ مقاومت تابعی از جریان مقاومت می باشد.

$$v = f(i)$$

❖ **نکته:** تعریف مقاومت کنترل شده با ولتاژ: جریان مقاومت تابعی از ولتاژ مقاومت می باشد.

$$i = f(v)$$

✓ دیود پیوندی، یک مقاومت غیرخطی کنترل شده با ولتاژ می باشد.



۴- **مقاومت غیرخطی تغییرپذیر با زمان:** مقاومت غیرخطی که مشخصه آن با زمان تغییر کند را غیرخطی تغییرپذیر با زمان نامند. مثلاً اگر یک دیود تحت شرایط حرارتی قرار گیرد، مشخصه آن دچار تغییراتی می شود که تابعی از زمان می باشد.

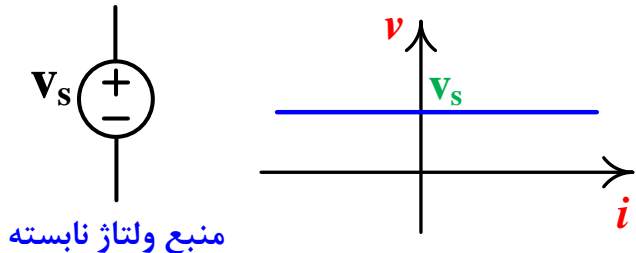
– منابع وابسته/مستقل (Independent Source)

☐ منابع در مدارها، دو دسته کلی هستند:

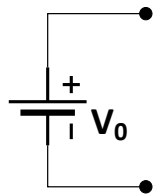
✓ منبع ولتاژ وابسته یا منبع ولتاژ؛

✓ منبع جریان وابسته یا منبع جریان؛

☐ **منبع ولتاژ:** یک المان دو سر را منبع ولتاژ گویند اگر ولتاژ معین $v_s(t)$ را در دو سر یک مدار دلخواه که به آن وصل شود نگه دارد. یعنی صرف نظر از جریان $i(t)$ که داخل آن می‌گذرد ولتاژ دوسر آن به مقدار $v_s(t)$ بماند (حالت ایده آل).



منبع ولتاژ وابسته



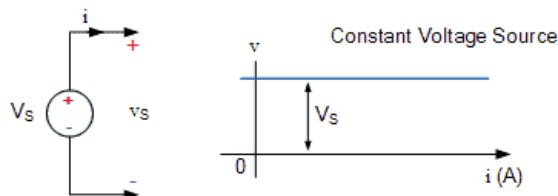
✓ اگر ولتاژ معین $v_s(t)$ ثابت باشد یعنی وابسته به زمان نباشد، این منبع ولتاژ را یک منبع ولتاژ ثابت گویند.

❖ **نکته:** منبع ولتاژ به عنوان یک مقاومت غیرخطی: برای $v_s \neq 0$ مشخصه از مبدا نمی‌گذرد، پس منبع ولتاژ یک مقاومت غیرخطی کنترل شده با جریان است.

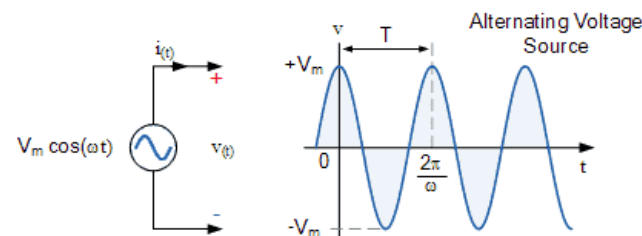
❖ **نکته:** منبع ولتاژ به عنوان یک مقاومت تغییر پذیر با زمان: اگر $v_s(t)$ ثابت نباشد، منبع ولتاژ مقاومت تغییر پذیر با زمان بوده و $v_s(t)$ با زمان تغییر می‌کند.

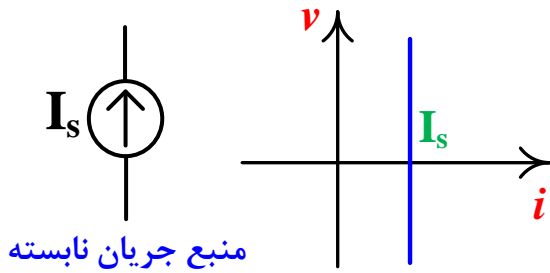
Ideal Voltage Sources

DC Voltage



AC Voltage Source



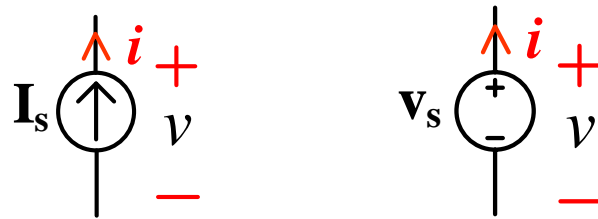


□ **منبع جریان:** المانی را منبع جریان گویند که اگر هر مدار دلخواهی به آن وصل شود و هر ولتاژی دو سر آن ایجاد شود، مقدار جریان ثابت بماند.

❖ **نکته:** منبع جریان به عنوان یک مقاومت غیرخطی: برای $i_s \neq 0$ مشخصه از مبداء نمی‌گذرد، پس منبع جریان یک مقاومت غیرخطی کنترل شده با ولتاژ است.

❖ **نکته:** منبع جریان به عنوان یک مقاومت تغییر پذیر با زمان: اگر $i_s(t)$ ثابت نباشد، منبع جریان مقاومت تغییر پذیر با زمان بوده و $i_s(t)$ با زمان تغییر می‌کند.

❖ **نکته:** چون منبع معمولاً به مدار توان تحویل می‌دهد، به کار بردن جهت‌های قراردادی ولتاژ شاخه و جریان شاخه یک منبع نابسته که مخالف جهت های قراردادی متناظر باشد، معمول و راحت تر است. با این جهت‌های ولتاژ و جریان نامتناظر، حاصل ضرب $i(t) v_s(t)$ توانی است که منبع به مدار دلخواهی که به آن وصل شده است تحویل می‌دهد.



توان تولید شده است $\rightarrow p(t) > 0$

– شکل موج های متداول برای منابع مستقل

$$f(t) = K \quad \forall t$$

□ مقدار ثابت:

$$f(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

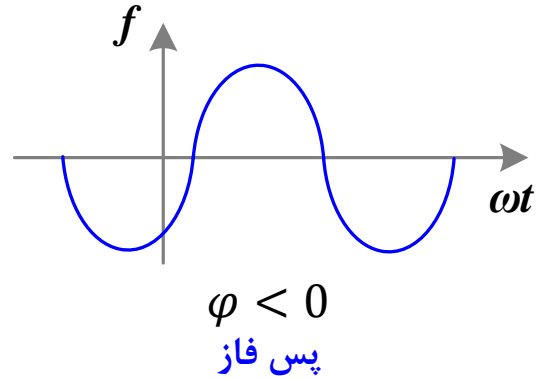
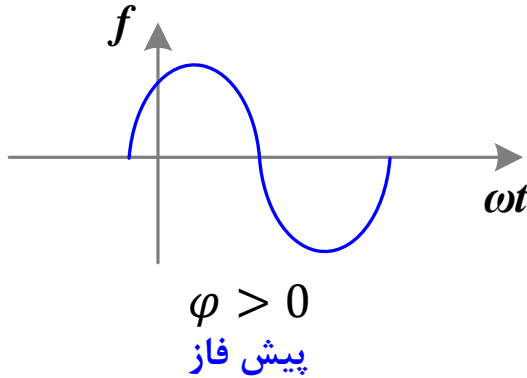
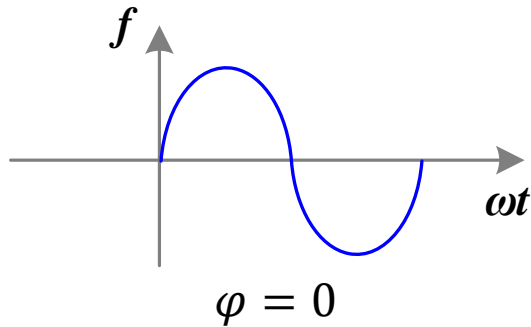
$$\omega = 2\pi f$$

□ سینوسی:

↓ دامنه

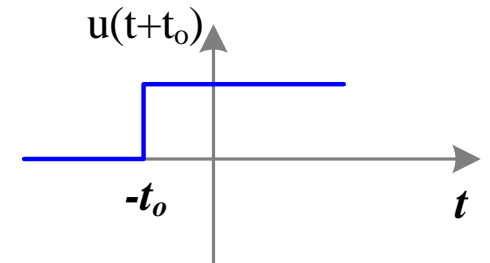
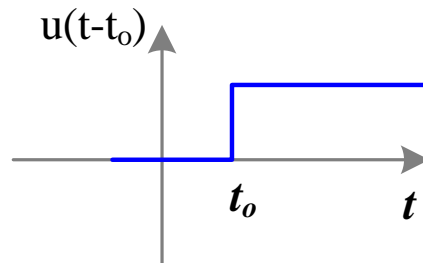
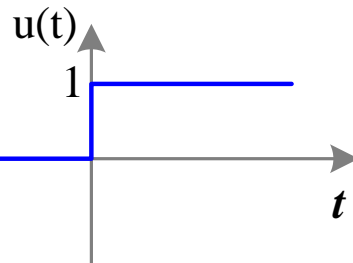
↓ فاز

↓ فرکانس

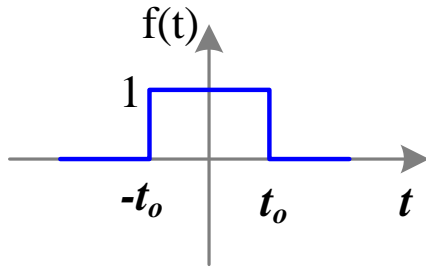


□ پله واحد (step):

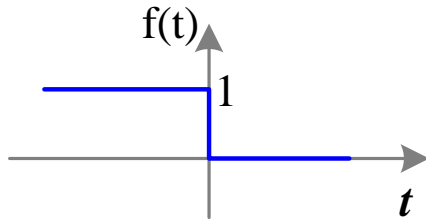
$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$



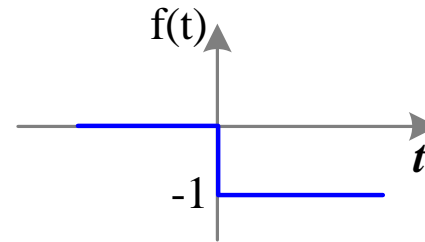
□ مثال) شکل موج های زیر را بر حسب توابع پله واحد بنویسید:



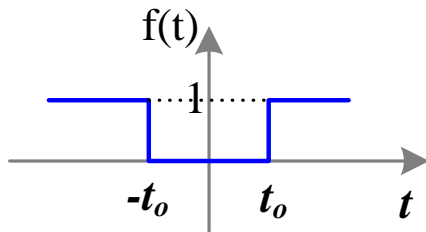
$$f(t) = u(t + t_0) - u(t - t_0) = u(t_0^2 - t^2)$$



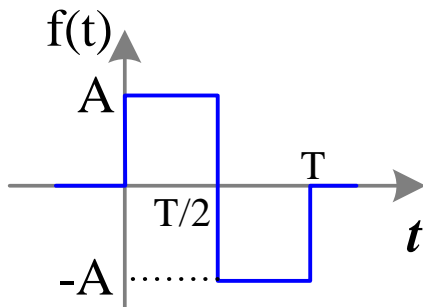
$$f(t) = u(-t)$$



$$f(t) = -u(t)$$

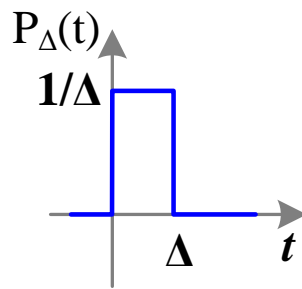


$$f(t) = u(-t - t_0) + u(t - t_0) = u(t^2 - t_0^2)$$



$$f(t) = Au(t) - 2Au(t - \frac{T}{2}) + Au(t - T)$$

$$P_{\Delta}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1/\Delta & 0 < t < \Delta \\ 0 & \Delta < t \end{cases}$$



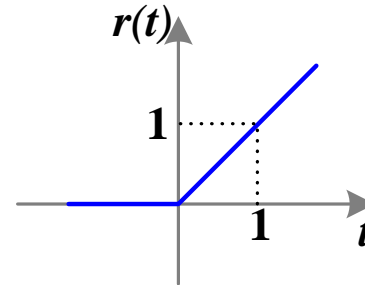
□ پالس واحد (unit pulse):

✓ مساحت زیر نمودار، یک واحد می باشد.

✓ تابع پالس واحد را میتوان بر حسب تابع پله بازنویسی نمود:

$$P_{\Delta}(t) = \frac{u(t) - u(t - \Delta)}{\Delta}$$

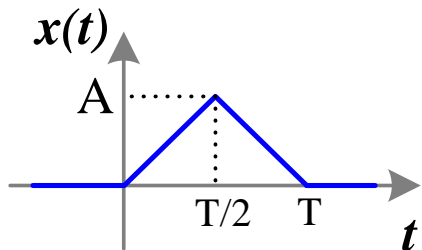
$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & 0 \leq t \end{cases}$$



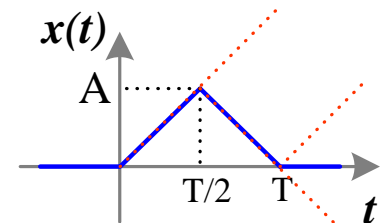
□ شیب واحد (unit ramp):

یا $r(t) = \int_{-\infty}^t u(t') dt'$ تذکر ۱: $u(t) = \frac{dr}{dt}$

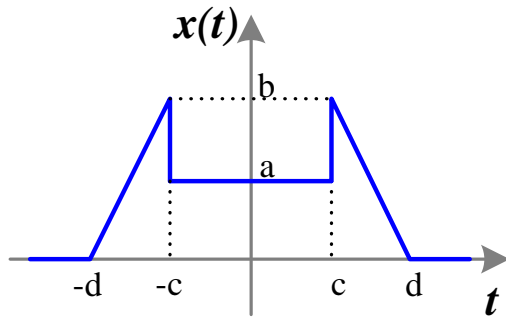
□ مثال شکل موج زیر را بر حسب توابع شیب واحد بنویسید.



$$x(t) = \frac{2A}{T} r(t) - \frac{4A}{T} r(t - \frac{T}{2}) + \frac{2A}{T} r(t - T)$$



□ مثال) شکل موج روبرو را بر حسب توابع پله و شیب واحد بنویسید.

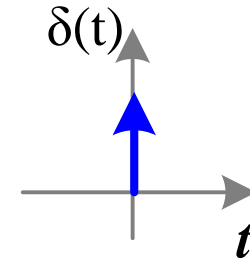


$$x(t) = \frac{b}{d-c}r(t+d) - \frac{b}{d-c}r(t+c) - (b-a)u(t+c) + (b-a)u(t-c) - \frac{b}{d-c}r(t-c) + \frac{b}{d-c}r(t-d)$$

□ ضربه واحد (unit impulse):

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \text{ویژه} & t = 0 \end{cases}$$

$$\int_{0^-}^{0^+} \delta(t) dt = 1 \quad \text{ویژگی}$$



تذکره ۱: $\int_{-\infty}^t \delta(t) dt = \int_{0^-}^{0^+} \delta(t) dt \quad 0 < t$

تذکره ۲: $\lim_{\Delta \rightarrow 0} P_{\Delta}(t) = \delta(t)$

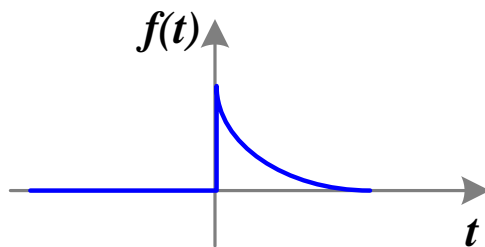
✓ خاصیت غربالی تابع ضربه:

$$f(t)\delta(t-t_0) = f(t_0)\delta(t-t_0) \Rightarrow f(t)\delta(t) = f(0)\delta(t)$$

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \text{ویژه} & t = 0 \end{cases} \quad \text{ویژگی} = \int_{-\infty}^t \delta'(t) dt = \delta(t)$$

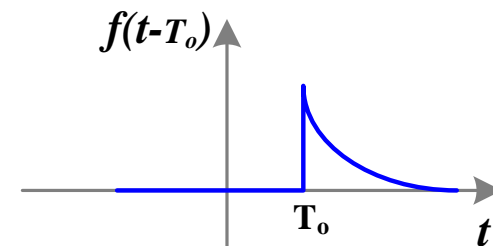
$$\text{تذکره ۱: } \delta'(t) = \frac{d\delta}{dt}$$

❖ نکته: خاصیت انتقال: در توابع تغییر ناپذیر با زمان برقرار است.



$$f(t) = e^{-at}u(t)$$

انتقال به میزان T_0

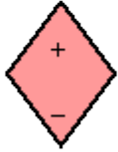


$$f(t - T_0) = e^{-a(t - T_0)}u(t - T_0)$$

– منبع وابسته (Dependent Source)



Dependent Current Source

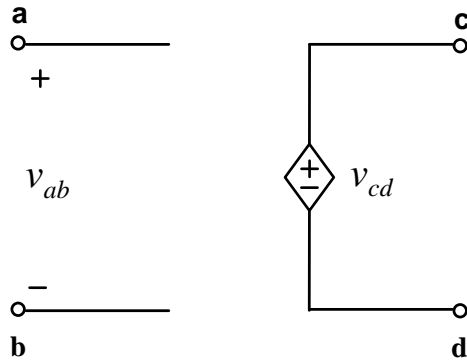


Dependent Voltage Source

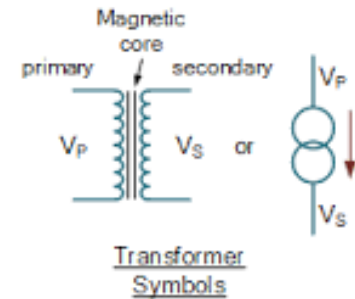
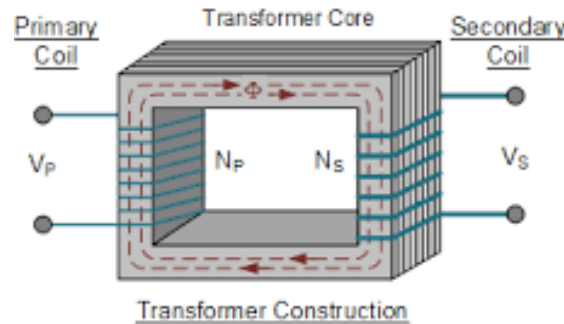
منبع وابسته: المانی است که در آن ولتاژ/جریان دو سر آن، به ولتاژ/جریان در بخش دیگری از مدار وابسته است و هویت مستقلی از خود به تنهایی ندارد. این منابع، در حالت واقعی المان هایی هستند که بیشتر از دو سر دارند (سه سر مانند ترانزیستورها و چهار سر مانند ترانسفورمر). طبعاً در این شرایط، مشخصه های دو سر، به مشخصه های دو سر دیگر وابسته می باشد. براین اساس چهارنوع منبع وابسته می توان تعریف کرد:

۱- منبع ولتاژ کنترل شده با ولتاژ (VCVS)

α بهره ولتاژ می باشد.

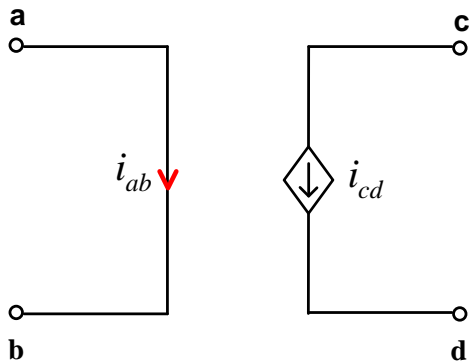


$$v_{cd} = \alpha v_{ab}$$

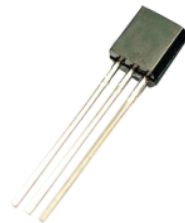


۲- منبع جریان کنترل شده با جریان (CCCS)

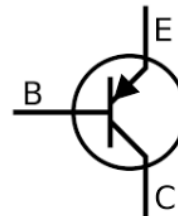
β بهره جریان می باشد.



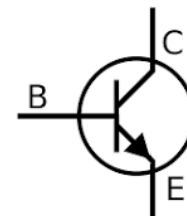
$$i_{cd} = \beta i_{ab}$$



Typical Bipolar Junction Transistor



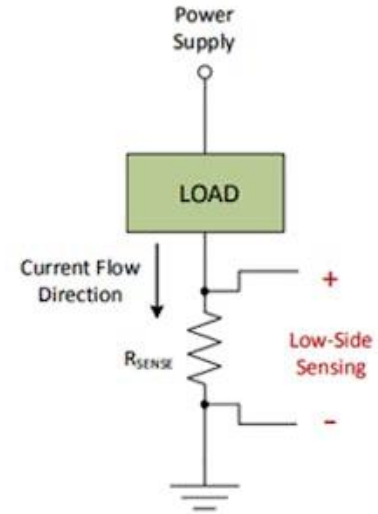
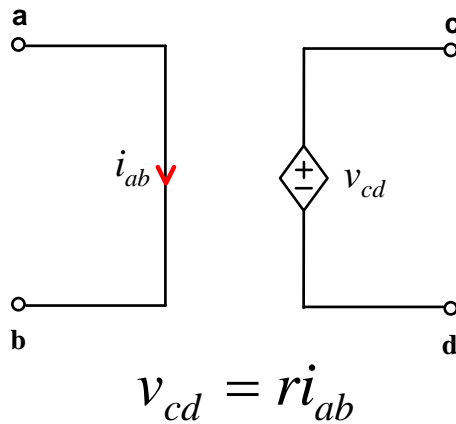
PNP BJT



NPN BJT

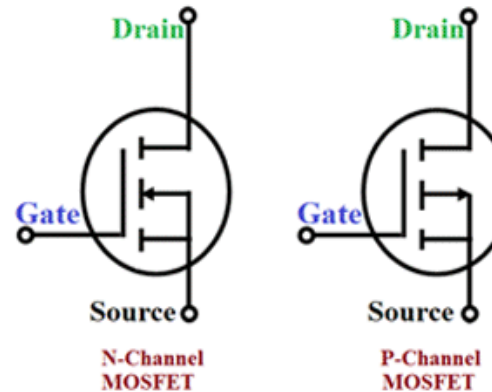
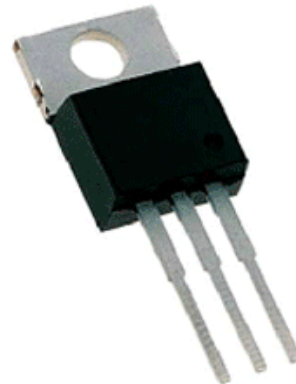
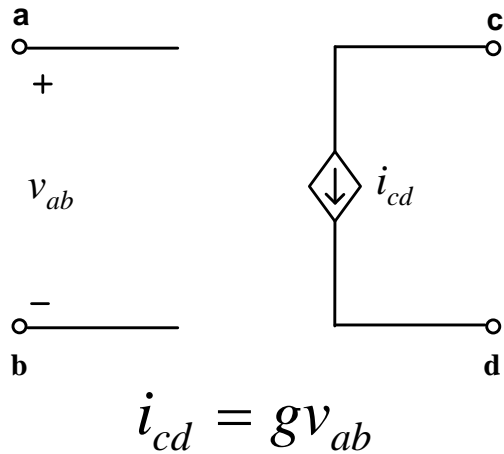
۳- منبع ولتاژ کنترل شده با جریان (CCVS)

مقاومت متقابل نامیده شده و بعد آن ولت بر آمپر (یا اهم) می باشد.



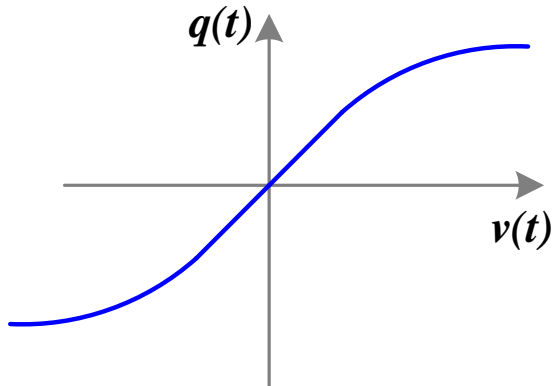
۴- منبع جریان کنترل شده با ولتاژ (VCCS)

گرسانایی متقابل نامیده شده و بعد آن آمپر بر ولت (یا زیمنس) می باشد.



خازن (Capacitor) -

خازن: المانی است که در هر لحظه از زمان میان بار الکتریکی آن $q(t)$ و ولتاژ دو سر آن $v(t)$ یک رابطه وجود داشته باشد. این رابطه به عنوان مشخصه خازن شناخته میشود و در صفحه QV بیان می شود.

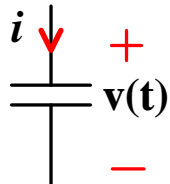


مشخصه یک نمونه خازن نوعی

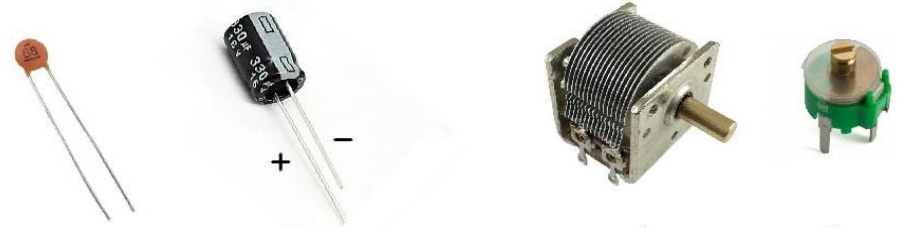
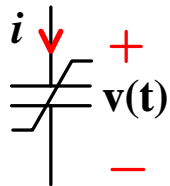
جریان، شدت تغییر بار الکتریکی است.

$$i = \frac{dq}{dt}$$

خازن خطی



خازن غیر خطی



Non-polarized



Polarized



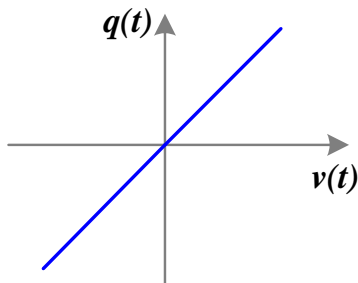
Tuning Capacitor



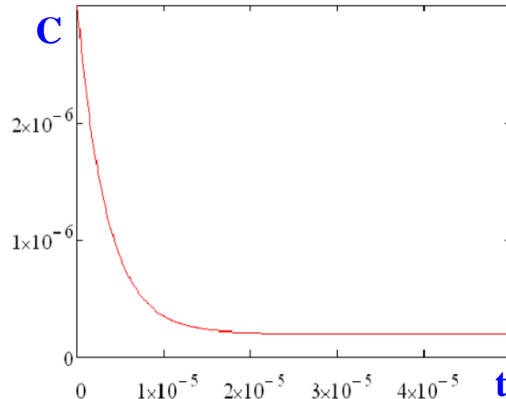
Trimmer Capacitor

Fixed

Variable



خازن خطی



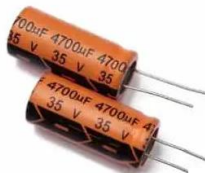
خازن متغیر با زمان

تقسیم بندی خازن ها:

- خطی: مشخصه QV آن خط مستقیمی است که از مبدأ می گذرد. ✓
- غیر خطی: رابطه خطی بین $q(t)$ و $v(t)$ وجود ندارد. ✓
- تغییرناپذیر با زمان: مشخصه آن با زمان تغییر نمی کند. ✓
- تغییرپذیر با زمان: مشخصه آن با زمان تغییر می کند. ✓



Ceramic Capacitor



Electrolytic Capacitor



Tantalum Capacitor



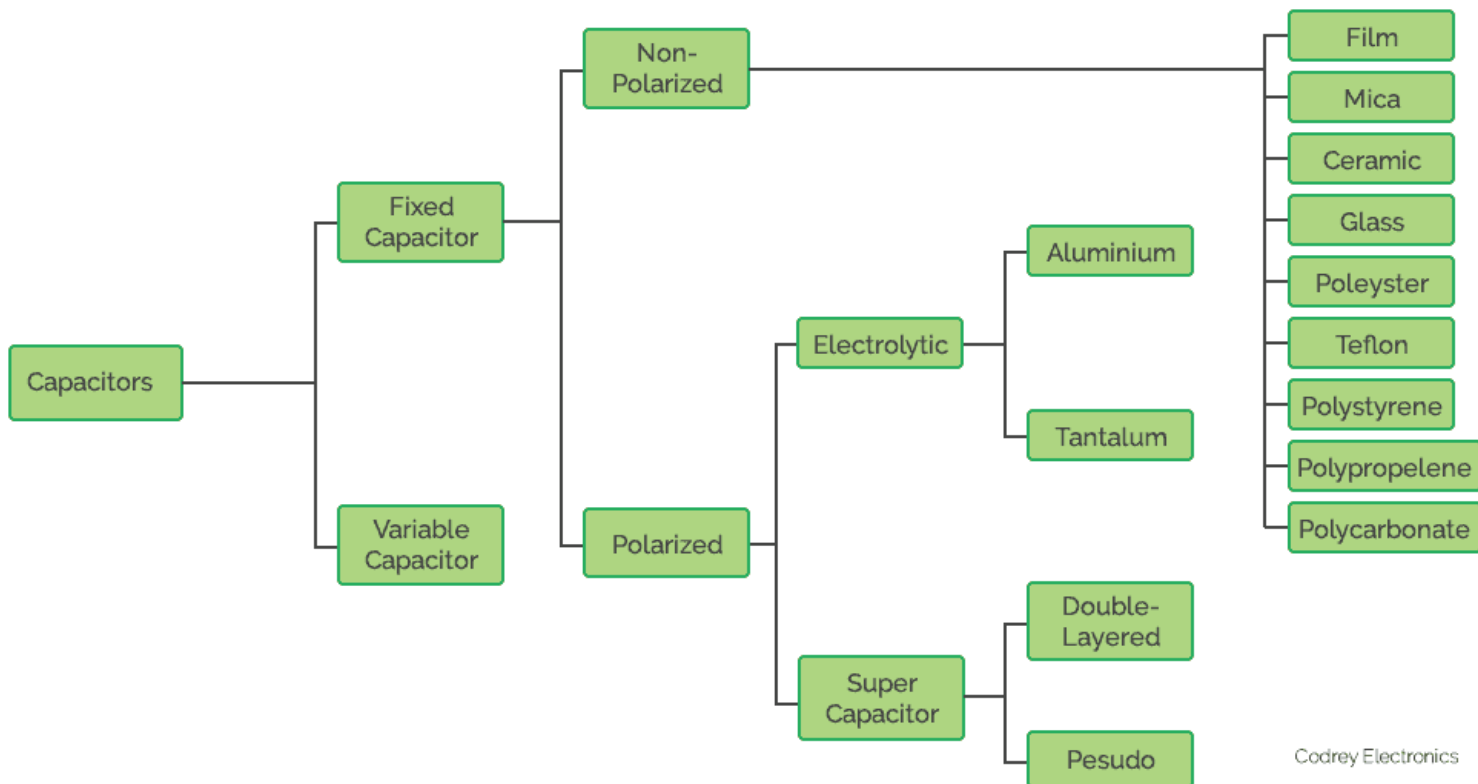
Supercapacitor

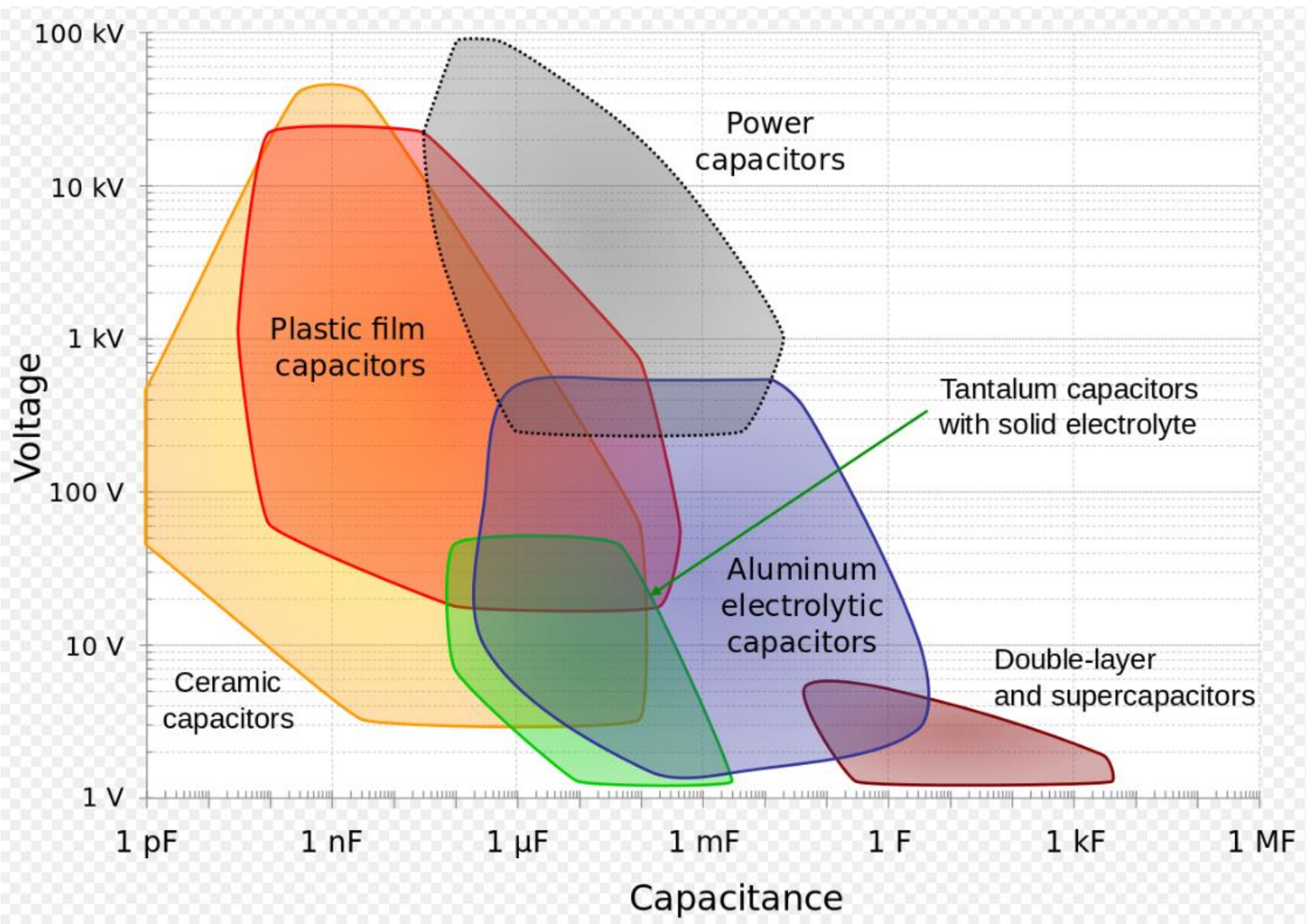


Film Capacitor

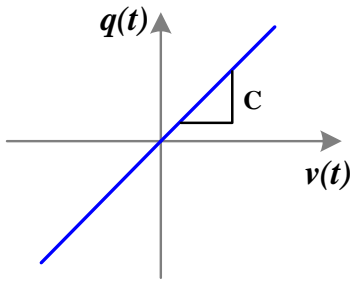


Variable Capacitor





۱- خازن خطی تغییر ناپذیر با زمان: مشخصه آن خطی است و با زمان تغییر نمی کند.



$$q(t) = C v(t)$$

C ظرفیت نامیده میشود و واحد آن فاراد (F) است

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt}$$

$$v(t) = v(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i dt$$

خازن خطی تغییر ناپذیر با زمان

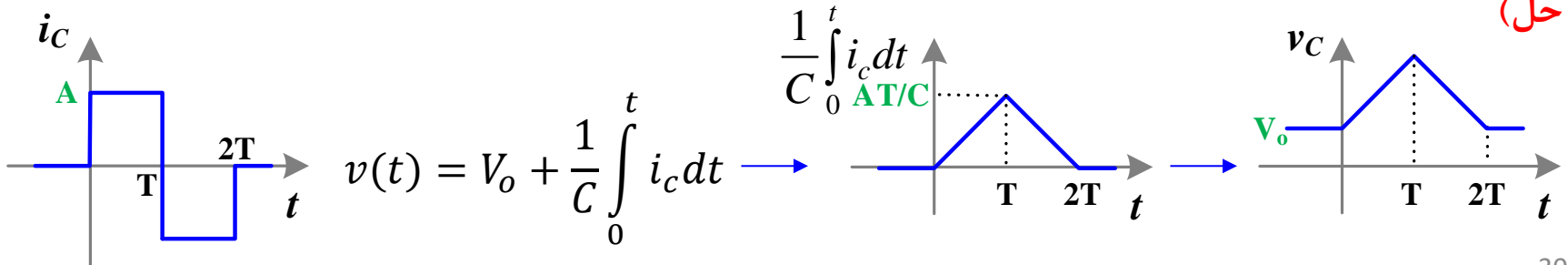
$v(t_0)$ مقدار اولیه ولتاژ خازن در t_0 بوده و معمولاً با V_0 نشان داده می شود.

✓ از رابطه ولتاژ خازن مشخص است که رابطه میان ولتاژ و جریان خازن، لحظه ای نمی باشد. بلکه ولتاژ در لحظه t به تمام مقادیر جریان از لحظه t_0 تا t بستگی دارد. به همین دلیل گفته میشود که خازن یک **المان حافظه دار** است.

❖ **نکته:** در خازن خطی تغییرناپذیر با زمان، جریان i_c تابع خطی از ولتاژ خازن v می باشد. تابع خطی، یک تابع همگن و جمع پذیر است.

$$f(kx) = kf(x) , \quad f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$$

□ **مثال** مشخصه ولتاژ خازن را در صفحه $v-t$ رسم کنید. در این مثال خازن خطی تغییر ناپذیر با زمان با ظرفیت C و ولتاژ اولیه V_0 است.



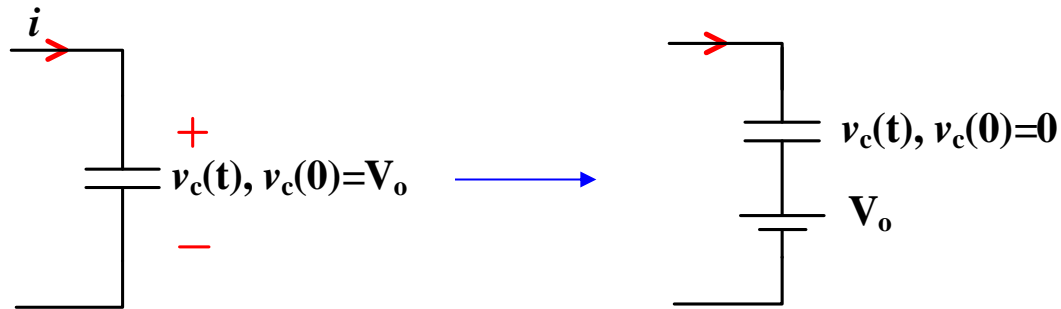
□ نکات مهم در مورد خازن LTI:

الف- رابطه تابعی میان $v(t)$ و $i(t)$:

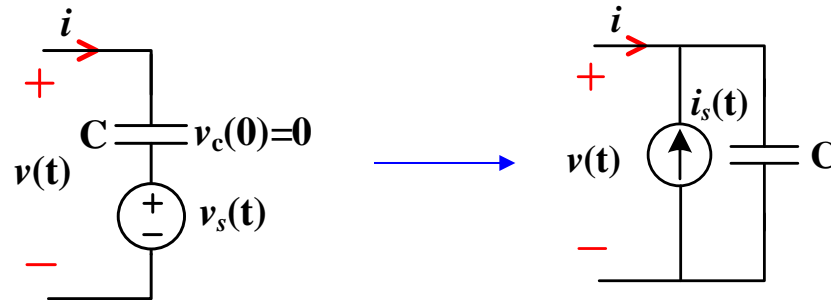
✓ جریان خازن i تابع خطی از ولتاژ خازن v میباشد.

✓ ولتاژ خازن تابع خطی از جریان خازن نمی باشد مگر اینکه ولتاژ اولیه خازن V_0 ، صفر باشد.

ب- خازن با ولتاژ اولیه را می توان به صورت اتصال سری یک خازن بدون ولتاژ اولیه و یک منبع ولتاژ V_0 در نظر گرفت.



ج- منبع ولتاژ $v_s(t)$ سری با خازن C با ولتاژ اولیه صفر را می توان به صورت اتصال موازی منبع جریان Cdv_s/dt و خازن C در نظر گرفت.



$$i_s(t) = C \frac{dv_s}{dt}$$

مدار سمت چپ:
$$i(t) = i_c(t) = C \frac{dv_c}{dt} = C \frac{d(v - v_s)}{dt} = C \frac{dv}{dt} - C \frac{dv_s}{dt}$$

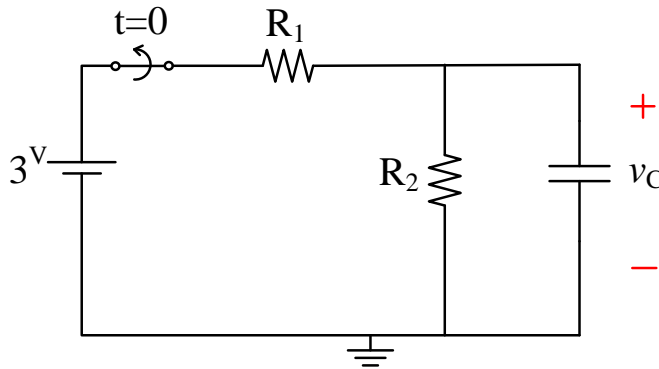
مدار سمت راست:
$$i + i_s(t) = i_c = C \frac{dv}{dt} \rightarrow i = C \frac{dv}{dt} - C \frac{dv_s}{dt}$$

د- پیوستگی ولتاژ دو سر خازن

- ✓ اگر جریان عبوری از خازن تابع ضربه باشد، ولتاژ خازن دچار تغییر پله ای می شود.
- ✓ مادامی که جریان گذرنده از خازن کراندار باشد، ولتاژ دو سر آن پیوسته است.

$$v(t + dt) = v(t) + \frac{1}{C} \int_t^{t+dt} i(t') dt' \longrightarrow v(t + dt) - v(t) = \frac{1}{C} \int_t^{t+dt} i(t') dt' \leq \frac{1}{C} \int_t^{t+dt} M dt' = \frac{M}{C} dt$$

حد تابع فوق وقتی $dt \rightarrow 0$ میل می کند، برابر صفر است که بیانگر پیوستگی ولتاژ خازن $v(t)$ می باشد.



□ **مثال** در شکل مقابل خازن C در مقدار $2V$ شارژ شده است. مطلوب است محاسبه ولتاژ مقاومت R_1 و R_2 قبل و بعد از باز شدن کلید در لحظه $t=0$.

■ **حل**

قبل از باز شدن کلید:

$$\begin{cases} v_{R1}(0^-) = 3 - 2 = 1V \\ v_{R2}(0^-) = v_C(0^-) = 2V \end{cases}$$

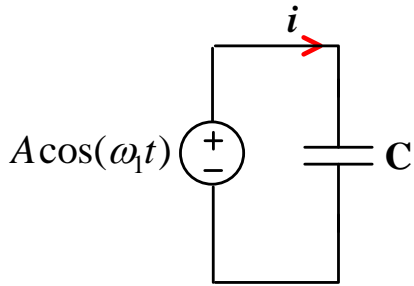
بعد از باز شدن کلید:

$$\begin{cases} v_{R1}(0^+) = R_1 \times i_{R1}(0^+) = 0 \\ v_{R2}(0^+) = v_C(0^+) = 2V \end{cases}$$

۲- خازن خطی تغییرپذیر با زمان: ظرفیت خازن (مشخصه qv) خطی ثابت نبوده و در طول زمان تغییر می کند.

$$q(t) = C(t)v(t) \rightarrow i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt} + v \frac{dC}{dt}$$

مثال □ جریان $i(t)$ را در شکل مقابل بدست آورید. فرض کنید که $C(t) = C_0 + C_1 \cos(3\omega_1 t)$

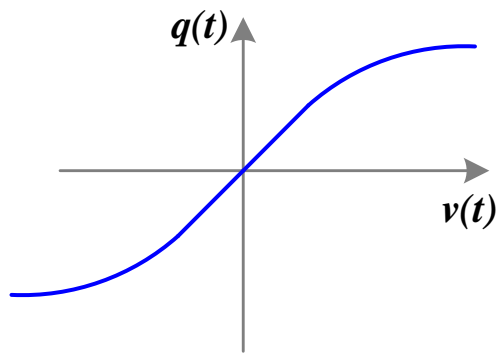


$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d(C(t)v(t))}{dt} = C \frac{dv}{dt} + v \frac{dC}{dt} \rightarrow$$

$$i(t) = (C_0 + C_1 \cos(3\omega_1 t)) \frac{dv}{dt} + A \cos(\omega_1 t) \frac{dC}{dt}$$

$$\rightarrow i(t) = -AC_0 \omega_1 \sin(\omega_1 t) - AC_1 \omega_1 \sin(\omega_1 t) \cos(3\omega_1 t) - 3AC_1 \omega_1 \sin(3\omega_1 t) \cos(\omega_1 t)$$

ملاحظه می شود که $i(t)$ شامل مؤلفه های هارمونیک اول، دوم و چهارم است.

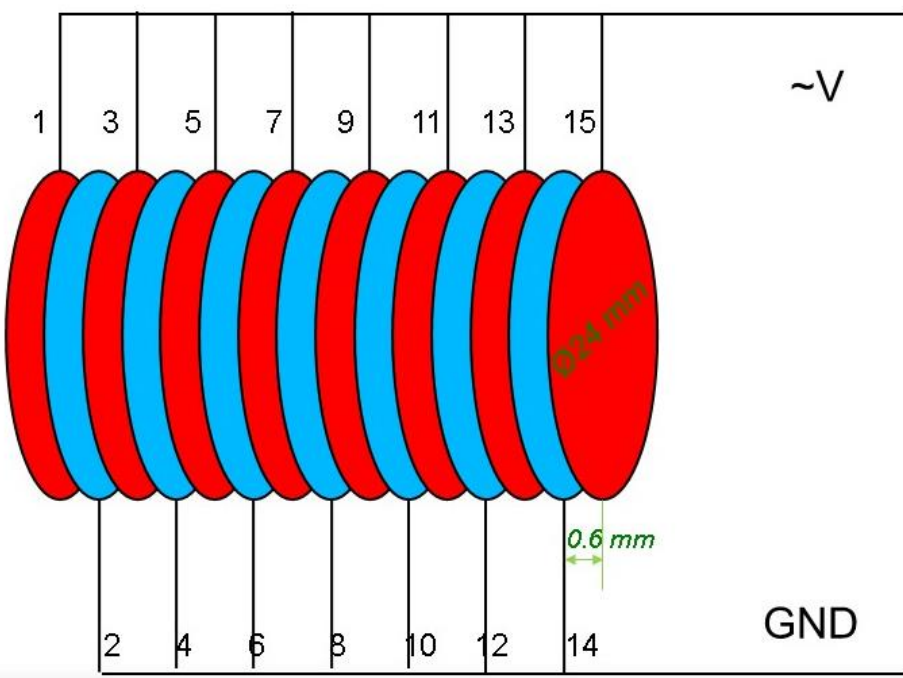


۳- **خازن غیر خطی:** در این نوع خازن، رابطه خطی میان Q و V وجود ندارد و یا به عبارتی، مشخصه QV غیر خطی است. این خازن ها می توانند تغییرپذیر یا تغییرناپذیر با زمان باشند.

$$q = f(v)$$

مشخصه نمونه خازن غیر خطی

- ✓ از آنجا که تحلیل مدارات غیرخطی دشوار است، از روشهای تقریبی استفاده می شود.
- ✓ در مدل سازی مشخصه دیود، از روش تقریب خطی تکه ای استفاده شد.
- ✓ روش دوم استفاده از تقریب سیگنال کوچک می باشد.

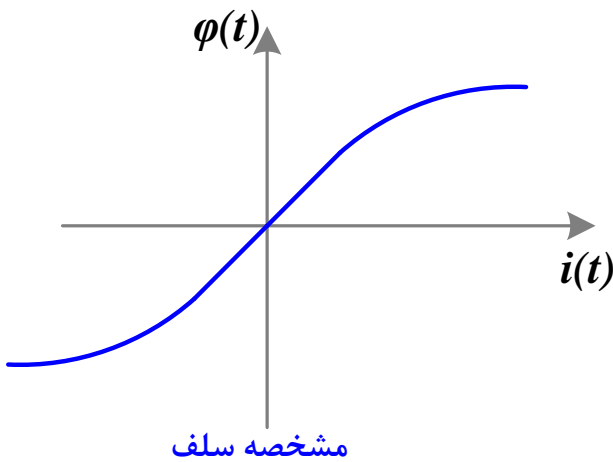


Problem specification:
 Voltage 240 V, frequency $f=50 \text{ Hz}$
 Relative permittivity ϵ of dielectric material:

A graph showing the relative permittivity ϵ as a function of the electric field E in kV/mm . The y-axis ranges from 0 to 100, and the x-axis ranges from 0.0 to 5.0. The curve starts at $\epsilon=0$ for $E=0$, rises to a peak of $\epsilon=100$ at $E \approx 0.5 \text{ kV/mm}$, and then decays towards zero as E increases further.

Task:
 Calculate current as a function of time.

القار / سلف (Inductor)

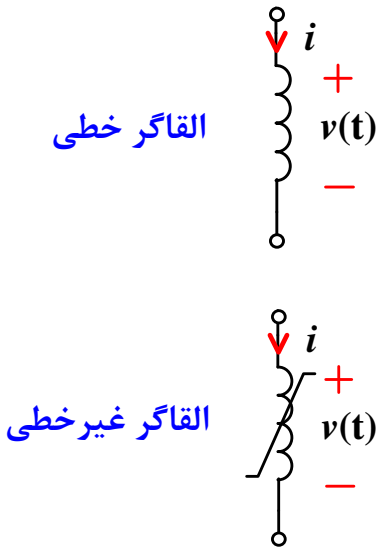


القار / سلف: المانی است که در هر لحظه از زمان، میان شار آن $\phi(t)$ و جریان عبوری از آن $i(t)$ یک رابطه وجود داشته باشد. این رابطه به عنوان مشخصه سلف شناخته می شود و در صفحه ϕi بیان می شود.

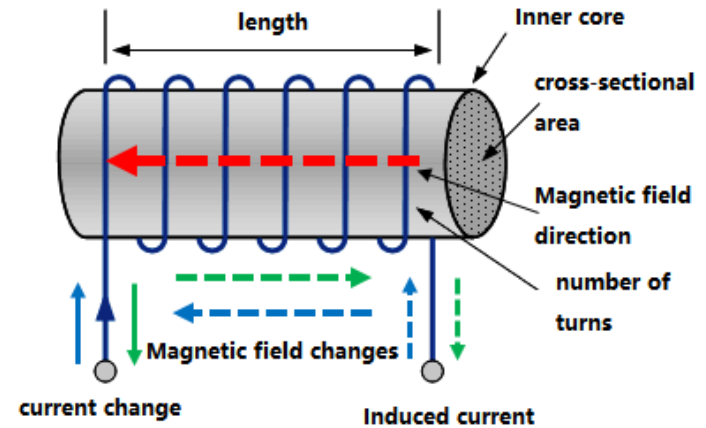
مطابق قانون القای فاراده:

$$v = \frac{d\phi}{dt}$$

تذکره: در صورت رعایت جهت قراردادی متناظر، قانون لنز رعایت می شود. ✓



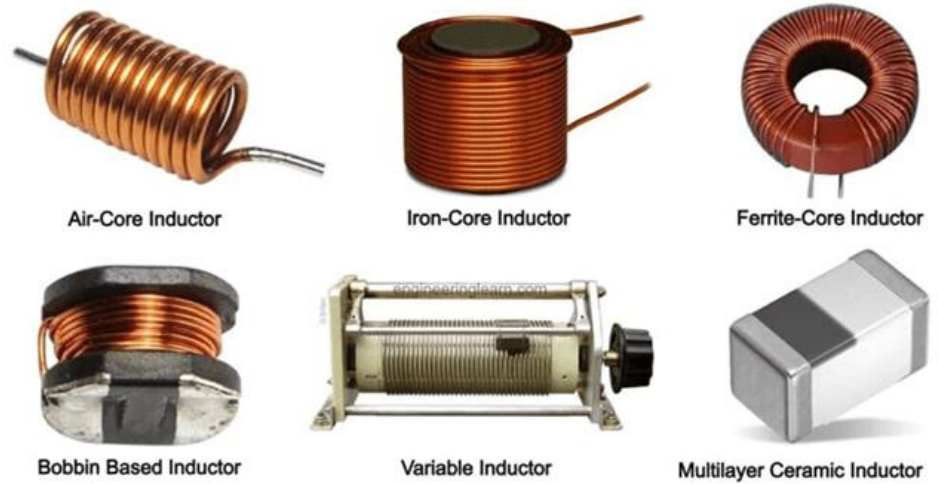
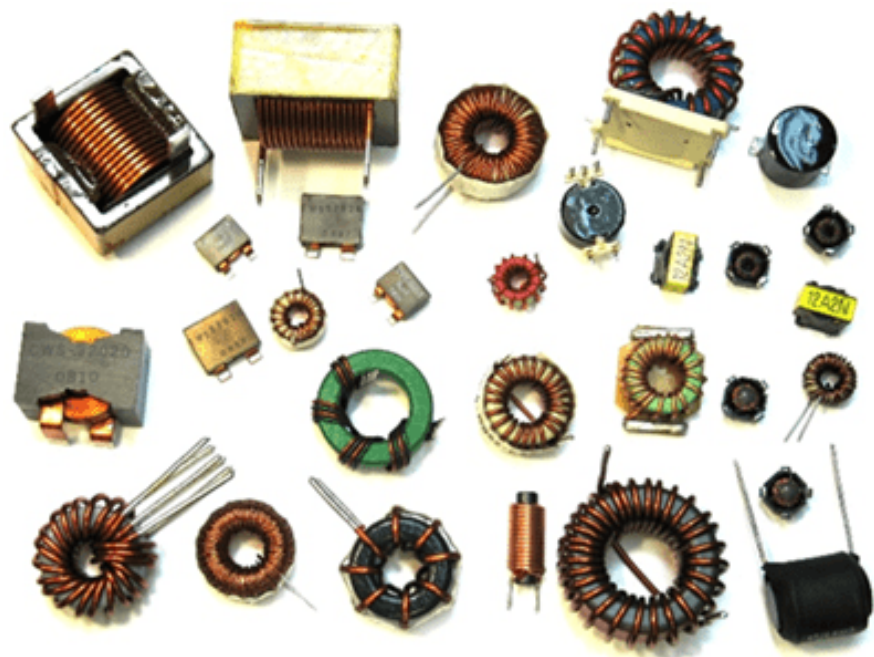
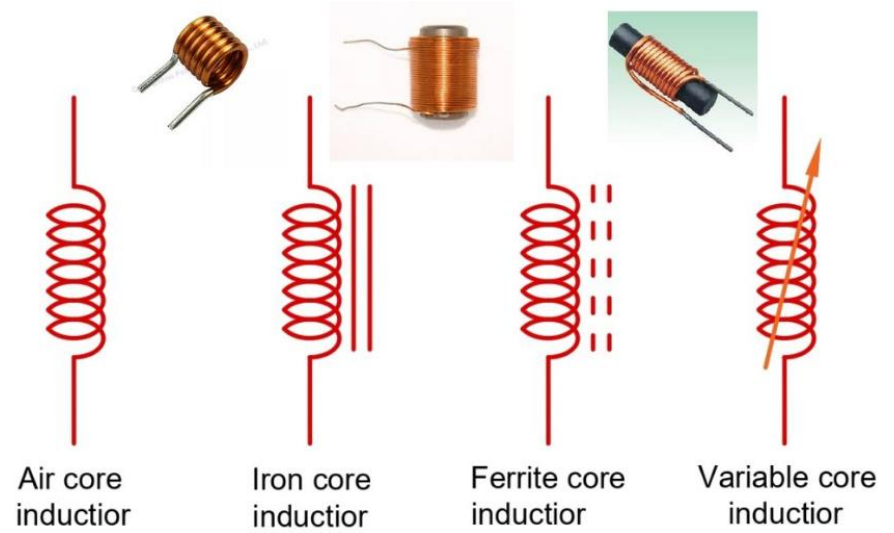
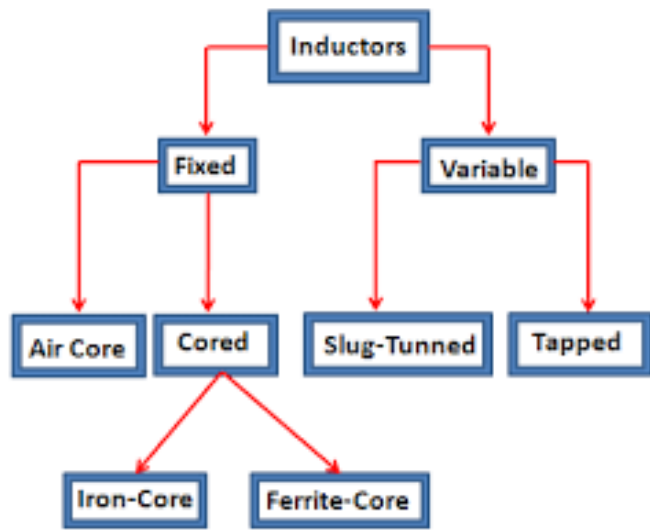
Inductor	Fixed	Variable	Pre-set	Shape
Air Core				
Iron Core				
Ferrite Core				



تقسیم بندی القارها:

- ✓ خطی: مشخصه ϕi آن خط مستقیمی است که از مبدأ می گذرد.
- ✓ غیر خطی: رابطه خطی بین $\phi(t)$ و $i(t)$ وجود ندارد.
- ✓ تغییرناپذیر با زمان: مشخصه آن با زمان تغییر نمی کند.
- ✓ تغییرپذیر با زمان: مشخصه آن با زمان تغییر می کند.

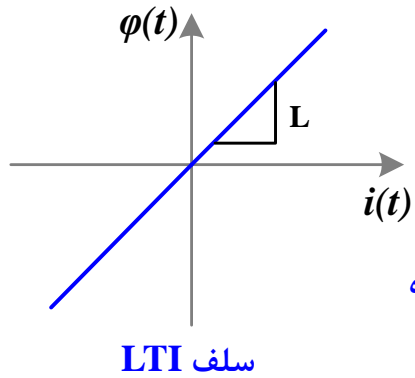




Type	Inductance Range	Frequency Range	Q Factor	Size	Cost
Air Core	Low	Very High	Very High	Large	Low
Iron Core	High	Low	Low	Small	Medium
Ferrite Core	Medium-High	Medium-High	Medium-High	Medium	Medium
Powdered Iron	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium
Ceramic Core	Low-Medium	High	High	Small	High
Multilayer Chip	Low	High	Medium	Very Small	Medium
Film	Low	High	High	Small	High
Variable	Adjustable	Varies	Varies	Medium-Large	High



۱- سلف خطی تغییر ناپذیر با زمان: مشخصه آن خطی است و با زمان تغییر نمی کند.



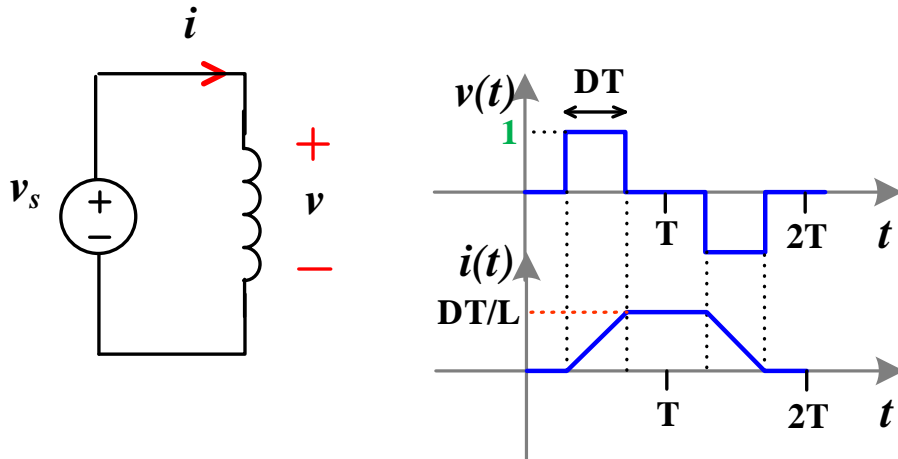
$$\varphi(t) = Li(t) \quad \text{و} \quad v = \frac{d\varphi}{dt} = L \frac{di}{dt} \longrightarrow i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(t') dt'$$

L ظرفیت سلف (یا اندوکتانس) نامیده میشود و واحد آن هانری (H) است.

$i(t_0)$ مقدار اولیه جریان سلف در t_0 میباشد و معمولا با I_0 نشان داده می شود.

✓ از رابطه جریان سلف مشخص است که رابطه میان جریان و ولتاژ سلف لحظه ای نمی باشد. بلکه جریان در لحظه t به تمام مقادیر ولتاژ از لحظه t_0 تا t بستگی دارد. به همین دلیل گفته می شود که سلف یک **المان حافظه دار** است.

□ **مثال** شکل جریان سلف را در صفحه $i-t$ رسم کنید. در این مثال سلف خطی تغییر ناپذیر با زمان با ظرفیت L و جریان اولیه صفر است.



■ **حل**

$$i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(t') dt' = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(t') dt'$$

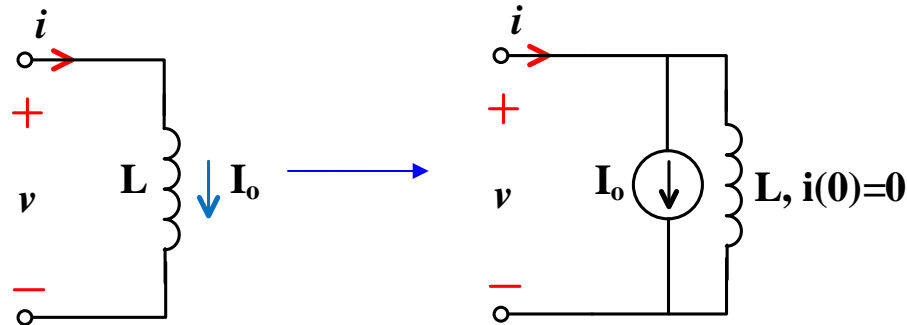
□ نکات مهم در مورد سلف LTI:

الف- رابطه تابعی میان $v(t)$ و $i(t)$:

✓ ولتاژ سلف v تابع خطی از جریان سلف i می باشد.

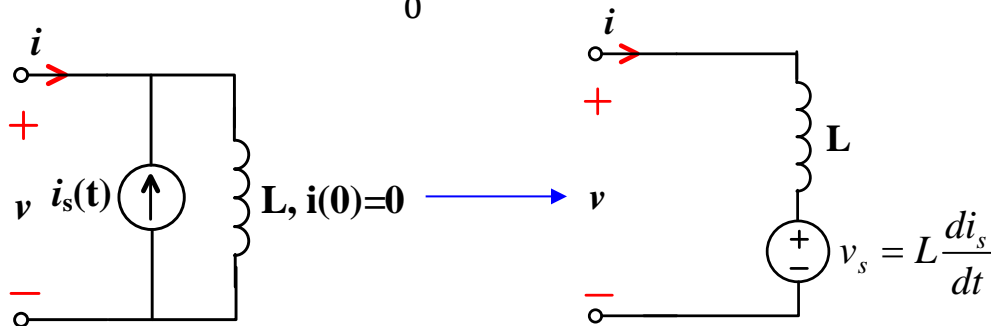
✓ جریان سلف تابع خطی از ولتاژ سلفنمی باشد مگر اینکه جریان اولیه سلف I_0 ، صفر باشد.

ب- سلف با جریان اولیه را می توان به صورت اتصال موازی یک سلف بدون جریان اولیه و یک منبع جریان I_0 در نظر گرفت.



ج- منبع جریان $i_s(t)$ موازی با سلف L با جریان اولیه صفر را می توان به صورت اتصال سری منبع جریان $L di_s/dt$ و سلف L در نظر گرفت. در ضمن منبع جریان i_s بر حسب ولتاژ v_s چنین است:

$$i_s(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v_s(t') dt'$$



د- پیوستگی جریان گذرنده از سلف

✓ اگر ولتاژ دو سر سلف تابع ضربه باشد، جریان عبوری از سلف دچار تغییر پله ای می شود.

✓ مادامی که ولتاژ دو سر سلف کراندار باشد، جریان عبوری از آن پیوسته می ماند.

$$i(t + dt) = i(t) + \frac{1}{L} \int_t^{t+dt} v(t') dt' \longrightarrow i(t + dt) - i(t) = \frac{1}{L} \int_t^{t+dt} v(t') dt' \leq \frac{1}{L} \int_t^{t+dt} M dt' = \frac{M}{L} dt$$

حد تابع فوق وقتی $dt \rightarrow 0$ میل می کند، برابر صفر است که بیانگر پیوستگی جریان سلف $i(t)$ می باشد.

جدول دوگانی سلف و خازن

سلف	خازن
ϕ	q
i	v
v	i
L	C
I(0)	V(0)
اتصال موازی	اتصال سری
اتصال سری	اتصال موازی

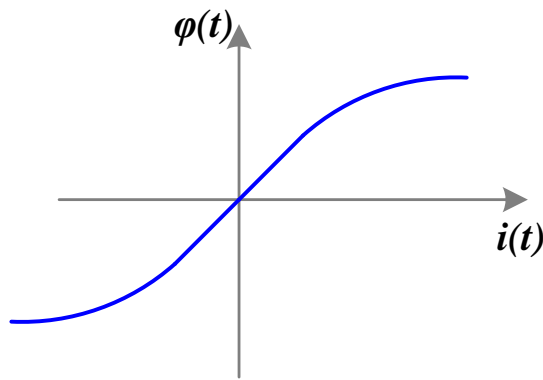
❖ **نکته:** روابط دوگانی سلف و خازن LTI: از روابط سلف و خازن LTI می توان

متوجه یک رابطه دوطرفه دوگانی (Duality) شد که در فصل های آتی بیشتر در خصوص آن صحبت خواهد شد. این رابطه دوگانی دلالت بر این شاخصه دارد که با جایگزینی مشخصه های سلف و خازن مطابق با جدول روبرو، روابط یکسانی به دست خواهد آمد.

۲- سلف خطی تغییرپذیر با زمان: اندوکتانس (مشخصه φi) خطی ثابت نبوده و در طول زمان تغییر می کند.

$$\varphi(t) = L(t)i(t) \longrightarrow v(t) = \frac{d\varphi}{dt} = L(t) \frac{di}{dt} + i(t) \frac{dL}{dt}$$

✓ با استدلالی مشابه با مقاومت و خازن های خطی تغییرپذیر با زمان، این خانواده از سلف ها نیز با اعمال ورودی با یک فرکانس مشخص، امکان ارائه خروجی با فرکانس های متفاوت را دارند.



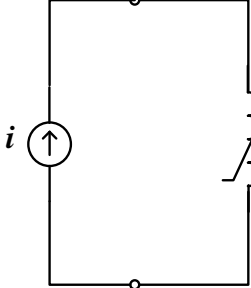
مشخصه نمونه سلف غیر خطی

۳- سلف غیر خطی: در این نوع سلف، رابطه خطی میان φ و i وجود ندارد و یا به عبارتی، مشخصه φi غیر خطی است. این سلف ها می توانند تغییرپذیر یا تغییرناپذیر با زمان باشند. غالب سلف های فیزیکی غیر خطی می باشند و تنها برای دامنه تغییرات خاصی از جریان میتوان آنها را خطی فرض نمود. شکل مقابل منحنی مشخصه غالب سلف های فیزیکی را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود در جریان های زیاد، شار سلف به حالت اشباع در می آید (متناظر با کاهش قابل توجه اندوکتانس است). البته این حالت نیز، دقیقاً نمایش یک سلف واقعی را نداشته و در ادامه، رفتار یک سلف واقعی ارائه خواهد شد (اسلاید بعد). این مفهوم، تحت عنوان پسماند (هیستریزیس) خود را نشان می دهد.

□ هیستریزیس مغناطیسی (Magnetic Hysteresis) به تأخیر ایجاد شده در یک ماده مغناطیسی گفته می شود که به خواص مغناطیسی کنندگی ماده مربوط است. در این پدیده ابتدا ماده، مغناطیس شده و سپس مغناطیس زدایی می شود. شار مغناطیسی در یک سیم پیچ الکترومغناطیسی، مقدار میدان مغناطیسی یا خطوطی از نیرو است که در یک ناحیه مشخص تولید و اغلب به نام «چگالی شار» شناخته می شود. چگالی شار با نماد B نشان داده می شود و واحد آن تسلا (T) است.



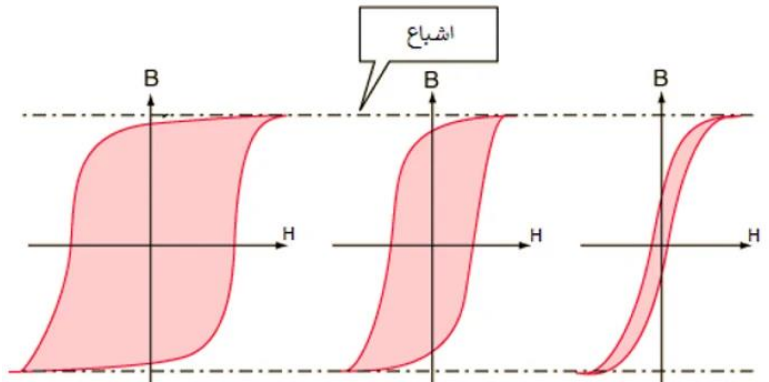
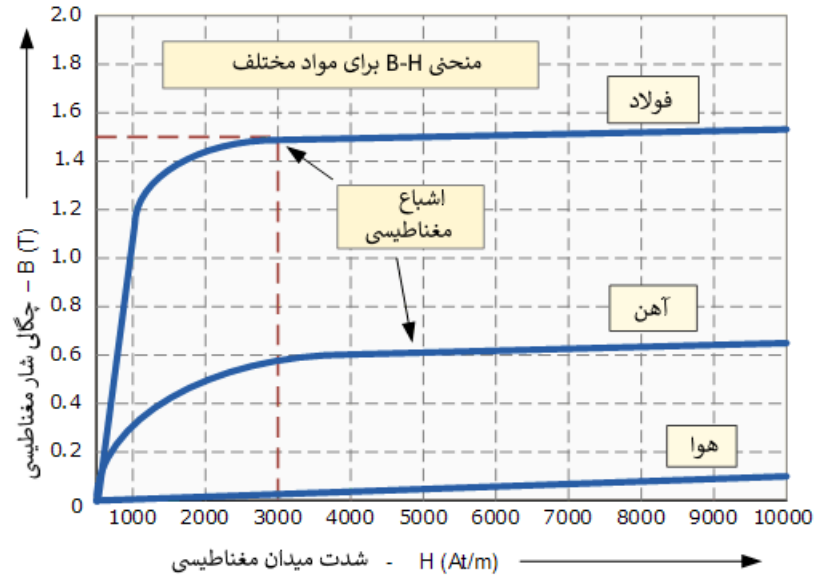
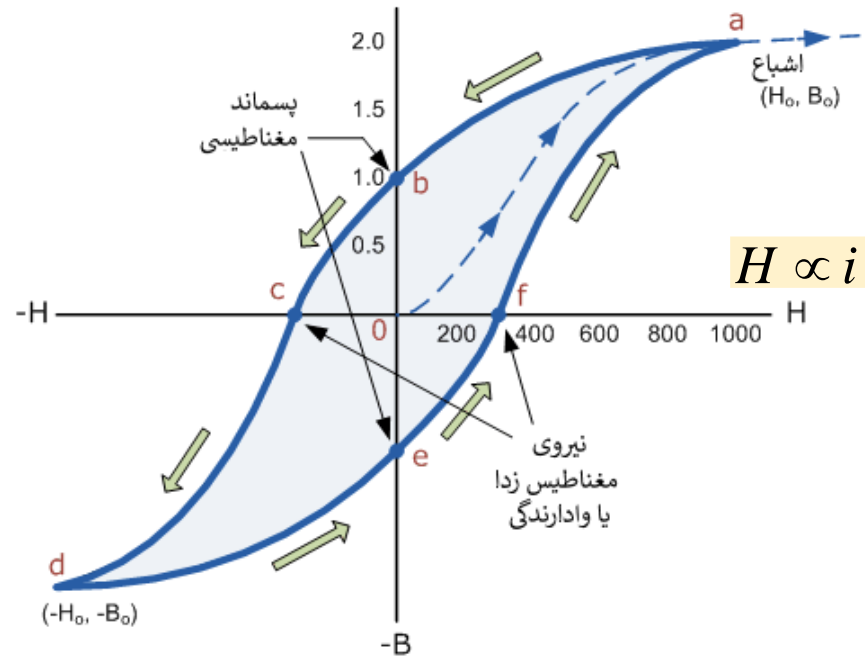
خاصیت پسماند (یا هیستریزیس) در سلف واقعی: مدار مقابل را در نظر بگیرید که جریان در ابتدا صفر بوده و بعد به شکل تابع سینوسی تغییر می کند. ابتدا نیم سیکل مثبت و بعد نیم سیکل منفی را طی می کند.



$$\varphi = \int v dt$$

$$B \propto \varphi$$

$$H \propto i$$

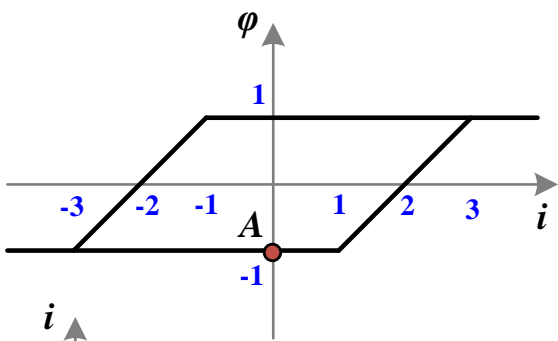


مناسب برای مواد مغناطیسی دائم و ضبط مغناطیسی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز اطلاعات

انرژی تلف‌شده در اثر معکوس شدن میدان، متناسب با مساحت حلقه هیستریزس است.

مناسب برای هسته ترانسفورماتور و موتور برای به حداقل رساندن تلفات انرژی با تناوب جریان مربوط به کاربردهای AC

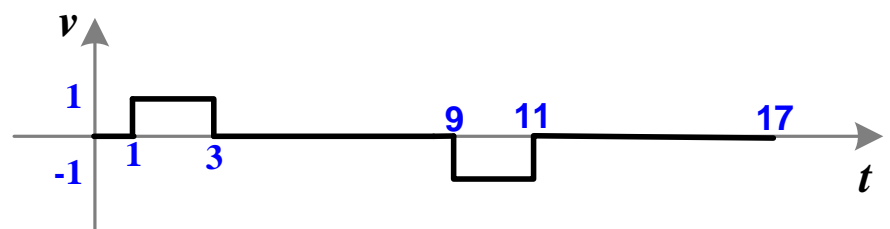
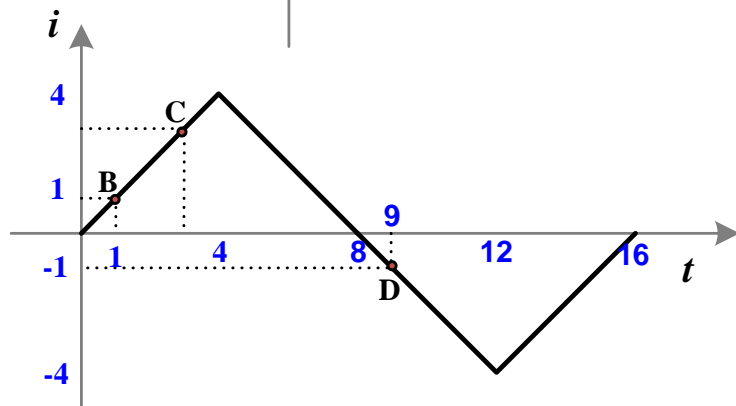
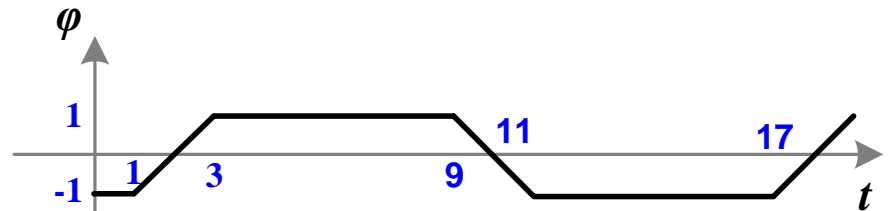
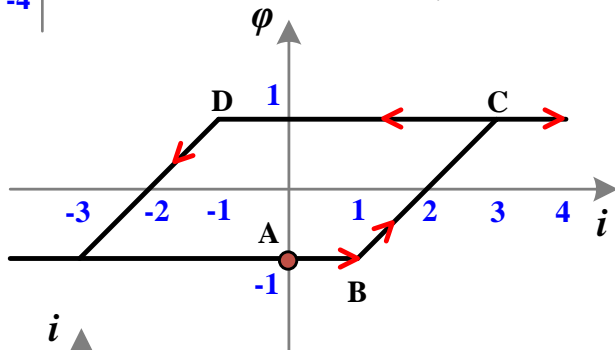
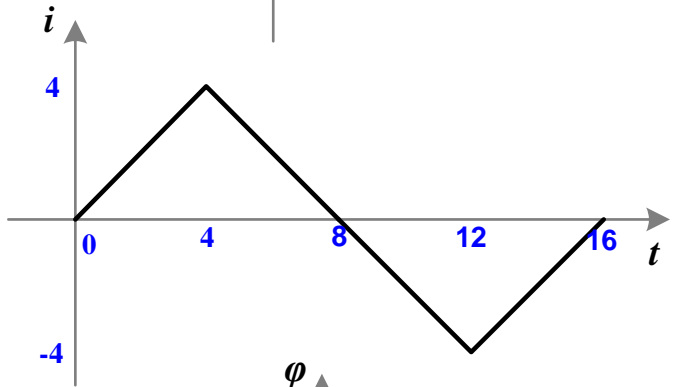
□ **مثال** با توجه به منحنی مشخصه شار - جریان و شکل موج جریان بر حسب زمان نشان داده شده برای سلف با خاصیت پس ماند، نمودار زمانی ولتاژ سلف را بدست آورید. نقطه کار سلف در لحظه صفر، نقطه A می باشد.

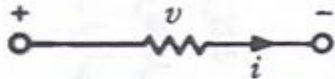
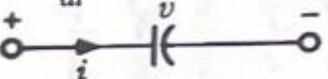
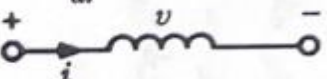


■ **حل**

با توجه به منحنی شار - سلف و نمودار زمانی جریان، ابتدا شکل موج زمانی شار سلف محاسبه می شود. برای محاسبه منحنی زمانی شار سلف، نقاط مهم مشخصه مانند B، C و D مشخص می شوند. در نهایت قانون فاراده اعمال می شود:

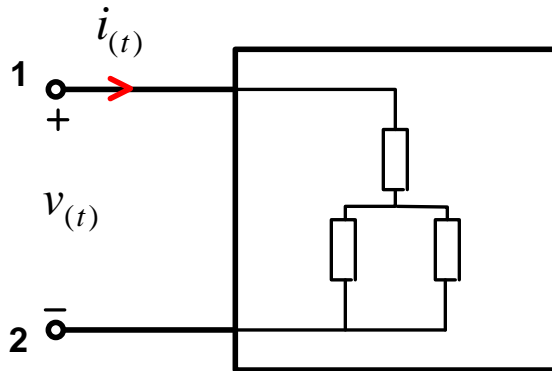
$$v(t) = \frac{d\phi}{dt}$$



	خطی		غیر خطی	
	تغییرناپذیر با زمان	تغییرپذیر با زمان	تغییرناپذیر با زمان	تغییرپذیر با زمان
<p>مقاومتها</p> 	$v(t) = Ri(t)$ $i(t) = Gv(t)$ $R = 1/G$	$v(t) = R(t)i(t)$ $i(t) = G(t)v(t)$ $R(t) = 1/G(t)$	$v(t) = f(i(t))$ کنترل شده با جریان $i(t) = g(v(t))$ کنترل شده با ولتاژ	$v(t) = f(i(t), t)$ کنترل شده با جریان $i(t) = g(v(t), t)$ کنترل شده با ولتاژ
<p>خازنها</p> $i = \frac{dq}{dt}$ 	$q(t) = Cv(t)$ $i(t) = C \frac{dv}{dt}$ $v(t) = v(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t') dt'$	$q(t) = C(t)v(t)$ $i(t) = \frac{dC}{dt} v(t) + C(t) \frac{dv}{dt}$	$q(t) = f(v(t))$ $i(t) = \left. \frac{df}{dv} \right _{v(t)} \frac{dv}{dt}$	$q(t) = f(v(t), t)$ $i(t) = \frac{\partial f}{\partial t} + \left. \frac{\partial f}{\partial v} \right _{v(t)} \frac{dv}{dt}$
<p>سلفها</p> $v = \frac{d\phi}{dt}$ 	$\phi(t) = Li(t)$ $v(t) = L \frac{di}{dt}$ $i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v(t') dt'$	$\phi(t) = L(t)i(t)$ $v(t) = \frac{dL}{dt} i(t) + L(t) \frac{di}{dt}$	$\phi(t) = f(i(t))$ $v(t) = \left. \frac{df}{di} \right _{i(t)} \frac{di}{dt}$	$\phi(t) = f(i(t), t)$ $v(t) = \frac{\partial f}{\partial t} + \left. \frac{\partial f}{\partial i} \right _{i(t)} \frac{di}{dt}$

خلاصه روابط المان های دوسر (مقاومت، خازن، و سلف) در حالت های مختلف خطی/غیر خطی و تغییرپذیر/تغییرناپذیر با زمان

۱-۵- مفهوم توان و انرژی در المان های فشرده



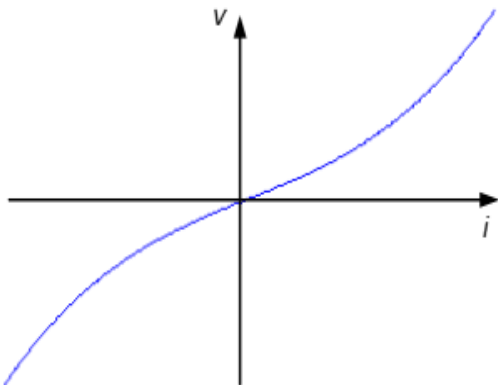
❑ **تک قطبی:** مدار یا المان دو سری است که فقط بر حسب ولتاژ و جریان دو سر قطب توصیف می شود. شرط یک قطبی آن است که در هر لحظه از زمان، جریان وارد شده به سر اول با جریان خارج شده از سر دوم مساوی باشد. تک قطبی می تواند یک مدار پیچیده و یا یک المان دو سر ساده مانند مقاومت باشد و شاخص اصلی آن، بیان روابط ولتاژ و جریان از دو سر مذکور، فارغ از محتوی داخل آن می باشد.

✓ **توان لحظه ای** داده شده به یک قطبی (مستقل از نوع المان/مدار فشرده و نیز نوع ولتاژ و جریان آن) از رابطه مقابل به دست می آید:

$$p(t) = v(t) \times i(t)$$

✓ **انرژی** تحویل داده شده به یک قطبی در بازه زمانی t_0 تا t از رابطه زیر بدست می آید:

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(t') d(t') = \int_{t_0}^t v(t') i(t') d(t')$$



❑ **مقاومت پسیو:** اگر برای هر لحظه از زمان، توان $p(t)$ بزرگتر یا مساوی صفر باشد، مقاومت پسیو است. مقاومتی که منحنی مشخصه آن همواره در ربع اول و سوم است، یک مقاومت پسیو است. بنابراین، مقاومت خطی با $R \geq 0$ ، دیود، مدار باز یا اتصال کوتاه پسیو می باشند.

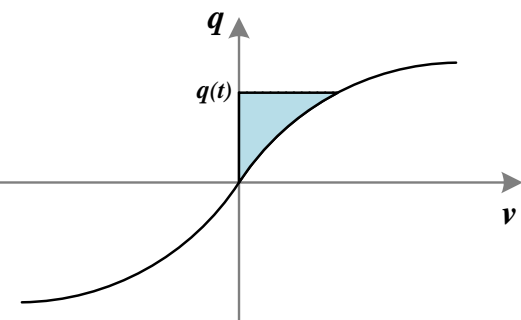
✓ اگر مقاومت پسیو نباشد، اکتیو یا فعال نامیده می شود (مانند منابع مستقل ولتاژ و جریان). اگر برای یک مقاومت خطی فقط برای بعضی از لحظات رابطه $R < 0$ برقرار باشد، مقاومت فعال است.

□ انرژی داده شده به یک خازن از لحظه t_0 تا t عبارت است از:

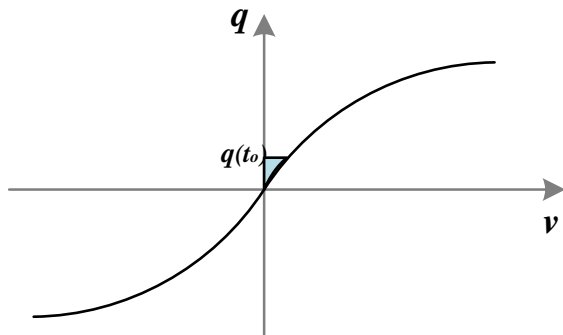
$$\omega(t_0, t) = \int_{t_0}^t v(t') i(t') dt', \quad i(t') = \frac{dq'}{dt'}$$

$$\longrightarrow \omega(t_0, t) = \int_{q(t_0)}^{q(t)} v(q') dq'$$

با فرض اینکه بار اولیه خازن صفر باشد، انرژی خازن در بازه زمانی t_0 تا t به شکل زیر خواهد بود:



$$\varepsilon_E(t) = \int_0^{q(t)} v(q') dq'$$



$$\varepsilon_E(t_0) = \int_0^{q(t_0)} v(q') dq'$$

$$\Rightarrow \omega(t_0, t) = \varepsilon_E(t) - \varepsilon_E(t_0) = \Delta\varepsilon_E$$

اگر خازن از نوع LTI بوده و انرژی اولیه آن صفر باشد، مقدار انرژی آن در لحظه t از رابطه مقابل به دست می آید:

$$q = cv \Rightarrow \varepsilon_E(t) = \frac{1}{2} cv^2(t)$$

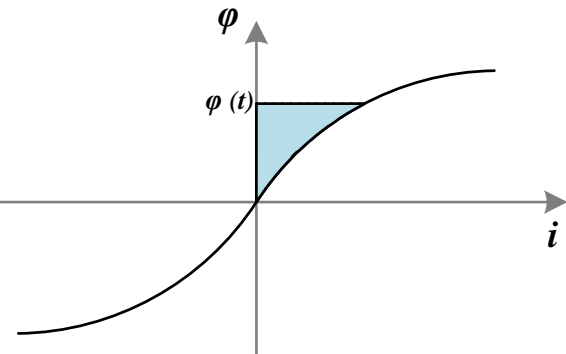
✓ **خازن پسیو:** خازنی پسیو است که انرژی ذخیره شده در خازن همواره نامنفی باشد. خازنی که منحنی مشخصه آن همواره در ربع اول و سوم است، یک خازن پسیو است. مانند خازن های خطی با $C \geq 0$.

□ انرژی داده شده به یک سلف از لحظه t_0 تا t عبارت است از:

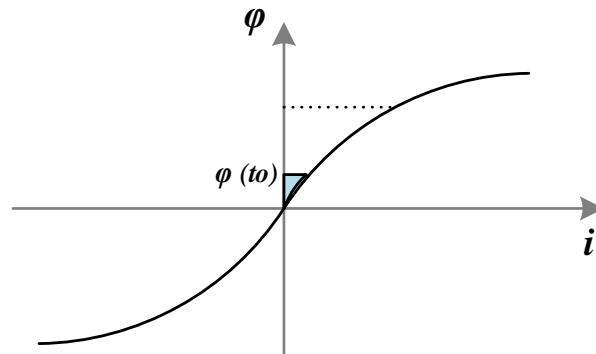
$$\omega(t_0, t) = \int_{t_0}^t v(t') i(t') dt', \quad v(t') = \frac{d\varphi'}{dt'}$$

$$\longrightarrow \omega(t_0, t) = \int_{\varphi(t_0)}^{\varphi(t)} i(\varphi') d(\varphi')$$

با فرض اینکه شار اولیه سلف صفر باشد، انرژی سلف در بازه زمانی t_0 تا t به شکل زیر خواهد بود:



$$\varepsilon_M(t) = \int_0^{\varphi(t)} i(\varphi') d(\varphi')$$



$$\varepsilon_M(t_0) = \int_0^{\varphi(t_0)} i(\varphi') d(\varphi')$$

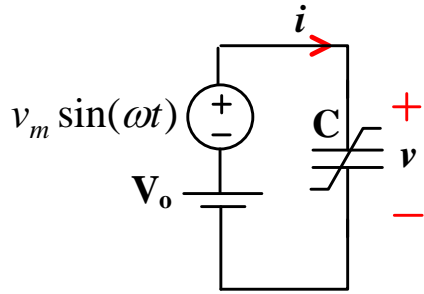
$$\Rightarrow \omega(t_0, t) = \varepsilon_M(t) - \varepsilon_M(t_0) = \Delta\varepsilon_M$$

اگر سلف از نوع LTI بوده و انرژی اولیه آن صفر باشد، مقدار انرژی آن در لحظه t از رابطه مقابل به دست می آید:

$$\varphi = Li \Rightarrow \varepsilon_M(t) = \frac{1}{2} Li^2(t)$$

✓ **سلف پسیو:** سلفی پسیو است که انرژی ذخیره شده در سلف همواره نامنفی باشد. سلفی که منحنی مشخصه آن همواره در ربع اول و سوم است، یک سلف پسیو است. مانند سلف های خطی با $L \geq 0$.

۶-۱- تقریب سیگنال کوچک (Small Signal Approximation)

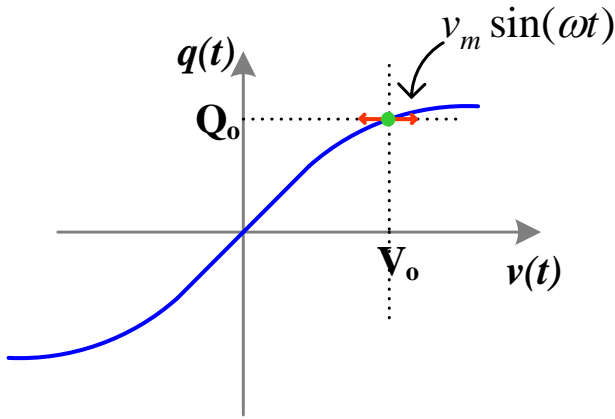


از آنجا که تحلیل مدارات غیرخطی دشوار است، از روش های تقریبی استفاده می شود. در مدل سازی مشخصه دیود، از روش تقریب خطی تکه ای استفاده شد. روش دوم استفاده از تقریب سیگنال کوچک می باشد که برای تمام المان های غیرخطی (مانند خازن و سلفها و ...) قابل استفاده است.

در تقریب سیگنال کوچک رفتار مدار حول نقطه کار (یا نقطه بایاس) بررسی می شود. ✓

نقطه کار یک نقطه ثابت بر روی مشخصه تابع غیرخطی است. ✓

هدف از تقریب سیگنال کوچک بررسی رفتار مدار در نقطه ای نزدیک به نقطه کار است. ✓

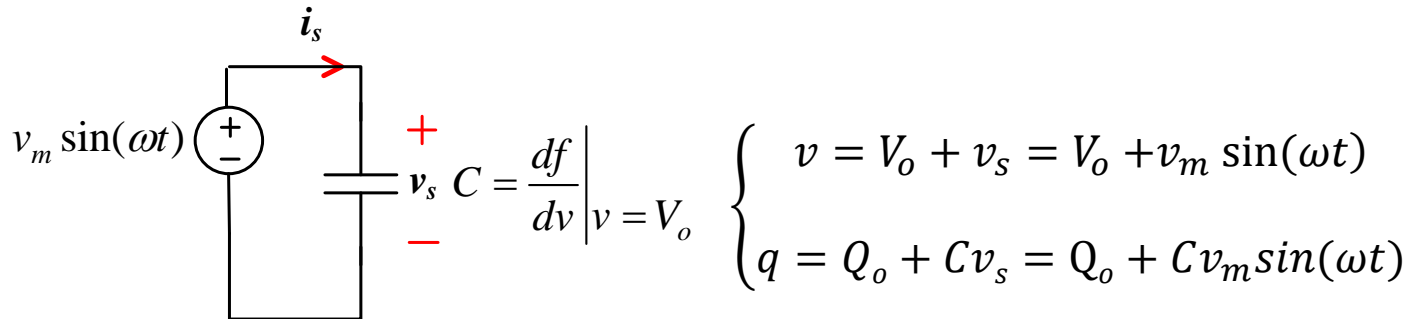


در مثال روبرو برای اینکه بتوان تقریب سیگنال کوچک را استفاده نمود باید داشته باشیم:

$$v_m \ll V_0$$

سپس در حول نقطه کار (یا بایاس یا همان تغذیه) می توان منحنی مشخصه خازن غیر خطی را با یک خازن خطی که ظرفیت آن برابر با مشتق منحنی مشخصه در نقطه کار است، مشخص نمود:

$$C(V_0) = \left. \frac{df}{dv} \right|_{v=V_0}$$

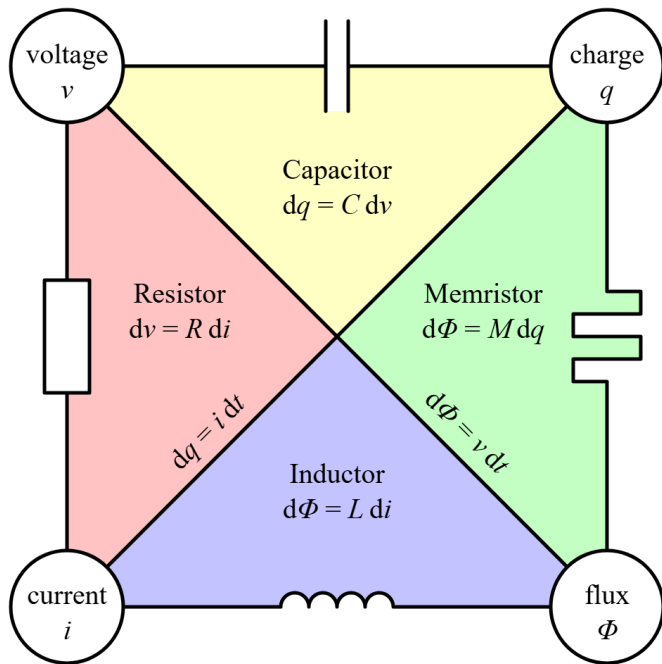


مدار معادل سیگنال کوچک

در فصل ۲ با کارکرد تقریب سیگنال کوچک در تحلیل مدارها بیشتر آشنا خواهیم شد. ■

۷-۱- نکات تکمیلی و پیوست ها

□ **تعریف ممریستور (Memristor):** یک المان غیرخطی الکتریکی است که جریان الکتریکی را در یک مدار، محدود یا تنظیم می کند و مقدار باری را که قبلاً از آن عبور کرده است را در حافظه دارد. ممریستورها مهم هستند زیرا غیرفرار هستند، به این معنی که حافظه را بدون برق حفظ می کنند و واحد ممریستور اهم است. ویژگی خاص ممریستور این است که مقاومت آن قابل برنامه ریزی است (عملکرد مقاومت) و متعاقباً ذخیره می شود (عملکرد حافظه). برخلاف دیگر حافظه هایی که امروزه در الکترونیک مدرن وجود دارد، ممریستورها پایدار هستند و حتی در صورت قطع برق دستگاه، وضعیت خود را به خاطر می آورند. ممریستورها قطعاتی نیمه هادی هستند که به خازن، مقاومت و سلف می پیوندند تا چهارمین نوع المان جدیدی را بسازند که مقاومت آن به عنوان ممریستانس (Memristance) نامیده شده و تابعی از جریان و شار است. برای درک بهتر، به شکل های زیر با دقت توجه کنید تا مفهوم ارتباطی بین مفاهیم جریان، ولتاژ، بار الکتریکی، و شار مغناطیسی را بهتر درک نمایید.



	charge q	current i	voltage v	magnetic flux Φ
charge q		$q = \int i dt$	capacitance $q = Cv$ ⎓	memristance $q = \frac{\Phi}{M}$ ⎓
current i	$i = \frac{dq}{dt}$		resistance $i = \frac{v}{R}$ ⎓	inductance $i = \frac{\Phi}{L}$ ⎓
voltage v	capacitance $v = \frac{q}{C}$ ⎓	resistance $v = Ri$ ⎓		$v = \frac{d\Phi}{dt}$
magnetic flux Φ	memristance $\Phi = Mq$ ⎓	inductance $\Phi = Li$ ⎓	$\Phi = \int v dt$	

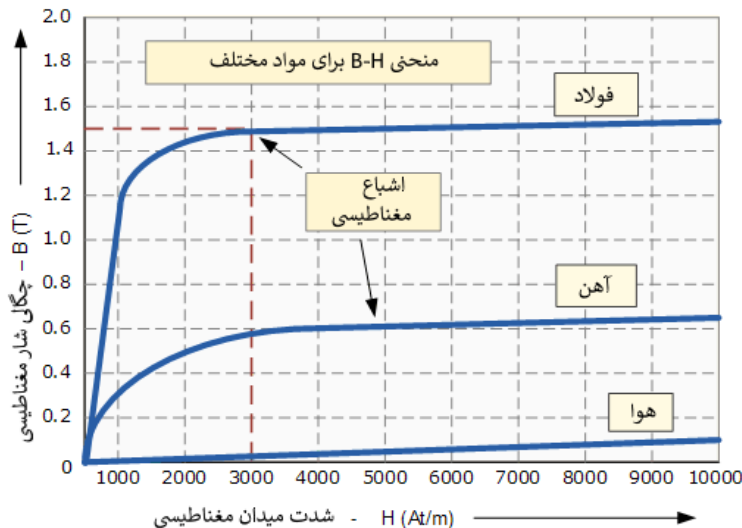
□ **تعریف مفهوم هیترزیس و پسماند مغناطیسی:** در یک آهنربای الکتریکی؛ شدت میدان مغناطیسی به تعداد دورهای سیم پیچ و جریان موجود در سیم پیچ و نوع ماده مورد استفاده برای هسته، وابسته است. اگر مقدار جریان یا تعداد دورها افزایش یابد، شدت میدان مغناطیسی (H) زیاد می شود. نفوذپذیری مغناطیسی که با نماد μ_r نشان داده می شود به صورت نسبت مقدار مطلق نفوذپذیری مغناطیسی (μ) به ثابت نفوذپذیری مغناطیسی خلاء (μ_0) تعریف می شود. از آنجایی که نفوذپذیری نسبی یک عدد ثابت نیست و تابعی از شدت میدان مغناطیسی است، رابطه بین چگالی شار مغناطیسی B و شدت میدان مغناطیسی H به صورت زیر است:

$$B = \mu H$$

بنابراین، چگالی شار مغناطیسی داخل ماده نسبت به خلاء (μ_0) بیشتر است (به دلیل بزرگتر بودن ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آن). برای یک سیم پیچ با هسته هوایی، این رابطه به صورت زیر داده می شود:

$$B/H = \mu_0 \quad , \quad B = \Phi / A$$

که Φ شار مغناطیسی است و واحد آن وبر (Wb) و A مساحت سطح مقطع بر مبنای متر مربع (m^2) است. پس ضریب نفوذپذیری مواد فرومغناطیس (B/H) ثابت نیست و با چگالی شار تغییر می کند. هرچند، برای سیم پیچ با هسته هوایی یا هسته با ماده غیر مغناطیسی مانند چوب یا پلاستیک، این نسبت را می توان ثابت در نظر گرفت و این ثابت همان μ_0 یا نفوذپذیری فضای آزاد است.



$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

با رسم مقادیر چگالی شار B بر حسب شدت میدان H می توان یک مجموعه منحنی تولید کرد که به عنوان «منحنی مغناطیس شوندگی» (Magnetization Curves) یا پسماند مغناطیسی یا به طور عمومی برای هر نوع جنس هسته، منحنی های B-H شناخته می شوند که در شکل زیر نشان داده شده است.

مجموعه منحنی‌های مغناطیس شوندگی که در شکل نشان داده شده است، یک مثال از رابطه B و H را برای هسته از جنس آهن نرم و فولاد نشان می‌دهد. هر نوع ماده تشکیل دهنده هسته، مجموعه منحنی‌های مغناطیسی شوندگی خاص خود را دارد. ذکر این نکته ضروری است که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، چگالی شار نسبت به شدت میدان تا رسیدن به یک نقطه خاص زیاد می‌شود و بعد از آن به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد.

این پدیده، به این دلیل اتفاق می‌افتد که محدودیتی برای مقدار چگالی شار تولید شده به وسیله هسته وجود دارد، چرا که همه حوزه‌های مغناطیسی در آهن همسو شده‌اند. روی منحنی مغناطیس شوندگی نقطه‌ای وجود دارد که از آن نقطه به بعد، با افزایش شدت میدان مغناطیسی، چگالی شار مغناطیسی تغییری نمی‌کند. این پدیده که در آن چگالی شار به حد بالای خود می‌رسد، «اشباع مغناطیسی» (Magnetic Saturation) نام دارد و به نام «اشباع هسته» (Saturation of the Core) شناخته می‌شود. در مثال ساده بیان شده در شکل قبل، نقطه اشباع منحنی مربوط به هسته فولادی در شدت میدان مغناطیسی ۳۰۰۰ آمپر - دور بر متر روی می‌دهد.

اشباع به این دلیل رخ می‌دهد که به دلیل اعمال میدان مغناطیسی، آرایش ساختار مولکولی در ماده هسته که تا پیش از این تصادفی بوده، اکنون در جهت میدان مغناطیسی، همسو شده است. هرچه شدت میدان مغناطیسی H زیاد شود، این آهنرباهای مولکولی بیشتر و بیشتر همسو می‌شوند تا جایی که به اشباع می‌رسند و حداکثر چگالی شار را ایجاد می‌کنند و هر افزایشی در شدت میدان مغناطیسی به دلیل افزایش در جریان الکتریکی سیم‌پیچ، تأثیر ناچیزی در چگالی شار مغناطیسی خواهد داشت.

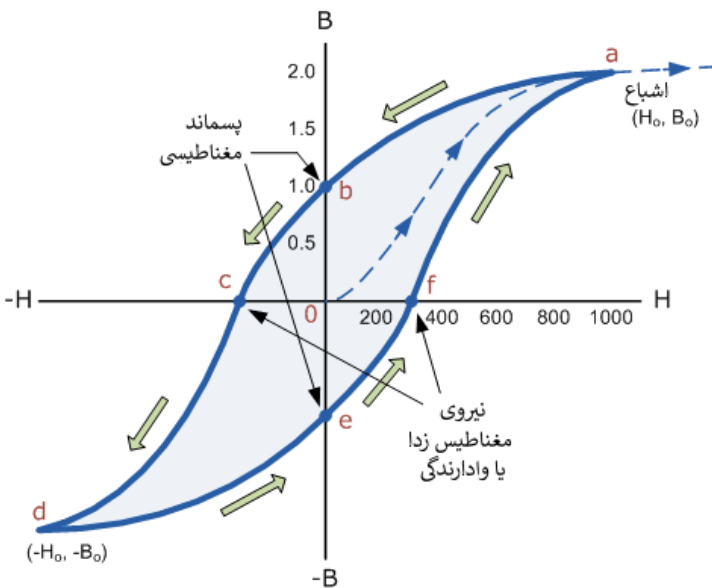
حال فرض می‌کنیم یک سیم‌پیچ الکترومغناطیسی داریم و به دلیل وجود جریان زیاد در آن، شدت میدان مغناطیسی زیادی خواهیم داشت و ماده هسته فرومغناطیس به حداکثر چگالی شار خود یا نقطه اشباع می‌رسد. حال اگر جریان گذرنده از سیم‌پیچ را حذف کنیم، از آنجایی که شار مغناطیسی مربوط به سیم‌پیچ صفر می‌شود، میدان مغناطیسی اطراف سیم‌پیچ ناپدید خواهد شد. اما شار مغناطیسی کاملاً ناپدید نمی‌شود و هسته با وجود صفر شدن جریان در سیم‌پیچ، همچنان خاصیت مغناطیسی خود را حفظ می‌کند. این پدیده که بعد از قطع فرآیند مغناطیس‌کنندگی هسته و با وجود صفر شدن جریان سیم‌پیچ، هسته همچنان خاصیت مغناطیسی خود را حفظ می‌کند، «پایداری مغناطیسی» (Retentivity) نامیده می‌شود. مقدار چگالی شار باقیمانده در هسته را «پسماند مغناطیسی» (Residual Magnetism) یا همان B_R می‌گویند.

دلیل این موضوع که بعضی از آهنرباهای مولکولی به رفتار تصادفی خود برنمی‌گردند و در جهت میدان مغناطیس‌کنندگی اصلی باقی می‌مانند و به نوعی، «حافظه» پیدا می‌کنند، آن است که برخی مواد فرومغناطیس، پایداری مغناطیسی بالایی دارند و به اصطلاح از نظر مغناطیسی «سخت» هستند. به همین دلیل است که این مواد به عنوان گزینه مناسبی برای مغناطیس دائم در نظر گرفته می‌شوند.

از سوی دیگر، سایر مواد فرومغناطیسی، پایداری مغناطیسی پایینی دارند و به اصطلاح از نظر مغناطیسی نرم هستند که این مواد را به گزینه مناسبی برای آهنربای الکتریکی، سلونوئید و یا رله تبدیل می‌کند. **یک راه برای کاهش چگالی شار مغناطیسی باقیمانده به صفر این است که جریان عبوری از سیم‌پیچ را معکوس کنیم و به این صورت، جهت شدت میدان مغناطیسی H را معکوس کنیم.** این اثر، **«نیروی مغناطیس زدا»** یا **وادارندگی مغناطیسی (Coercive Force)** یا همان H_C نامیده می‌شود. اگر این جریان معکوس همچنان زیاد شود، چگالی شار نیز در جهت معکوس زیاد می‌شود تا جایی که هسته فرومغناطیسی دوباره به نقطه اشباع خود، اما عکس جهت قبلی، می‌رسد. با کم کردن جریان مغناطیس‌کنندگی I و رسیدن این جریان به صفر، دوباره به همان مقدار پسماند مغناطیسی، اما در جهت معکوس، می‌رسیم.

به همین ترتیب با تغییر دائم جهت جریان مغناطیس‌کنندگی سیم‌پیچ، از جهت مثبت به منفی (مانند آنچه در تغذیه AC اتفاق می‌افتد)، یک منحنی حلقه‌مانند برای پسماند مغناطیسی در هسته فرومغناطیس ایجاد می‌شود. حلقه هیستریزس مغناطیسی شکل بالا، رفتار یک هسته فرومغناطیسی را به صورت رابطه B و H نشان می‌دهد و همانطور که در تصویر مشخص است، این رفتار غیرخطی است. اگر یک هسته مغناطیس‌نشده را در نظر بگیریم، مقادیر B و H مربوط به آن، صفر خواهند بود که متناظر با نقطه صفر روی منحنی شکل روبرو است.

با افزایش جریان مغناطیس‌شوندگی I در جهت مثبت، شدت میدان مغناطیسی H تا مقدار مشخصی به صورت خطی با I زیاد می‌شود و چگالی شار مغناطیسی B نیز از نقطه صفر تا نقطه a افزایش یافته و به سمت اشباع می‌رود.



حال اگر جریان مغناطیس‌شوندگی در هسته تا صفر کاهش پیدا کند، میدان مغناطیسی اطراف هسته نیز به صفر می‌رسد. هرچند، شار مغناطیسی سیم‌پیچ، به دلیل وجود پسماند مغناطیسی موجود در هسته به صفر نمی‌رسد. این مورد، در منحنی از نقطه a به نقطه b نشان داده شده است.

برای کم کردن چگالی شار مغناطیسی در نقطه b و رساندن آن به صفر، باید جریان عبوری از سیم‌پیچ را معکوس کنیم. نیروی مغناطیس‌کننده که برای صفر کردن چگالی شار باقیمانده به کار می‌رود، «نیروی مغناطیس زدا» یا وادارندگی نامیده می‌شود. این نیروی مغناطیس زدا، میدان مغناطیسی را معکوس می‌کند. این موضوع باعث می‌شود جهت‌گیری آهنرباهای مولکولی در هسته، مجدداً تصادفی شوند تا جایی که هسته غیرمغناطیسی شود. این مسئله در نقطه c نشان داده شده است.

با افزایش جریان معکوس، هسته در خلاف جهت، مغناطیده می‌شود و افزایش بیشتر این جریان مغناطیس‌شوندگی باعث می‌شود هسته به نقطه اشباع خود در خلاف جهت برسد که این مسئله در نقطه d روی منحنی رخ می‌دهد.

این نقطه نسبت به نقطه a روی منحنی متقارن است. اگر جریان مغناطیس‌کننده دوباره به صفر کاهش یابد، پسماند مغناطیسی موجود در هسته مقداری مانند قبل اما معکوس دارد که نقطه e در منحنی است.

دوباره با معکوس کردن جریان مغناطیس‌کننده در سیم‌پیچ این بار در جهت مثبت، شار مغناطیسی به صفر می‌رسد که نقطه f روی منحنی است و مانند قبل، با افزایش بیشتر جریان مغناطیس‌کننده در جهت مثبت، هسته به نقطه اشباع خود می‌رسد که روی منحنی با a نمایش داده شده است.

بنابراین، همچنان که جریان در سیم‌پیچ بین مقادیر مثبت و منفی در تناوب است (مانند دوره تناوب ولتاژ AC)، منحنی‌های $B-H$ مسیر $a-b-c-d-e-f-a$ را طی می‌کنند. این مسیر به نام «حلقه هیستریزیس» (**Magnetic Hysteresis Loop**) شناخته می‌شود.

اثر پسماند مغناطیسی نشان می‌دهد که فرآیند مغناطیسی کردن یک هسته فرومغناطیس و چگالی شار مغناطیسی، بستگی به این دارد که هسته فرومغناطیسی در کدام نقطه منحنی مغناطیده شده است. بنابراین، مواد فرومغناطیس «حافظه‌دار» می‌شوند، زیرا حتی پس از حذف میدان مغناطیسی خارجی، هسته مغناطیده باقی می‌ماند. نیروی مغناطیس زدا برای غلبه بر این پسماند مغناطیسی (برای بستن حلقه هیستریزیس) به انرژی نیاز دارد. این انرژی، به صورت گرما در ماده مغناطیسی تلف می‌شود که «تلفات هیستریزیس» نام دارد و مقدار تلفات به مقدار نیروی مغناطیس‌زدای لازم برای ماده وابسته است.

با افزودن ماده‌ای مانند سیلیکون به آهن، فلزی با نیروی مغناطیس‌زدای کم ساخته می‌شود که حلقه هیستریزیس آن، باریک‌تر از آهن خالص است. مواد دارای حلقه هیستریزیس باریک، به آسانی مغناطیسی و غیر مغناطیسی شده و با نام «مواد مغناطیسی نرم» شناخته می‌شوند. از این ترکیب در ساخت ترانسفورماتور، رله و سلونوئید استفاده می‌شود زیرا حلقه باریک به این مورد اشاره دارد که در هر تناوب جریان، تلفات کمی در فرآیند مغناطش رخ می‌دهد. طی ایجاد پسماند مغناطیسی، گرما تلف می‌شود که با مساحت حلقه هیستریزیس مغناطیسی متناسب است. از آنجایی که در ترانسفورماتورهای AC جهت جریان دائماً تغییر می‌کند، تلفات هیستریزیس همواره وجود دارد. این موضوع یکی از چالش‌های این تجهیزات است.

با افزودن ماده‌ای مانند سیلیکون به آهن، فلزی با نیروی مغناطیس‌زدای کم ساخته می‌شود که حلقه هیستریزیس آن، باریک‌تر از آهن خالص است. مواد دارای حلقه هیستریزیس باریک، به آسانی مغناطیسی و غیر مغناطیسی شده و با نام «مواد مغناطیسی نرم» شناخته می‌شوند. از این ترکیب در ساخت ترانسفورماتور، رله و سلونوئید استفاده می‌شود زیرا حلقه باریک به این مورد اشاره دارد که در هر تناوب جریان، تلفات کمی در فرآیند مغناطش رخ می‌دهد. طی ایجاد پسماند مغناطیسی، گرما تلف می‌شود که با مساحت حلقه هیستریزیس مغناطیسی متناسب است. از آنجایی که در ترانسفورماتورهای AC جهت جریان دائماً تغییر می‌کند، تلفات هیستریزیس همواره وجود دارد. این موضوع یکی از چالش‌های این تجهیزات است.

با افزودن ماده‌ای مانند سیلیکون به آهن، فلزی با نیروی مغناطیس‌زدای کم ساخته می‌شود که حلقه هیستریزیس آن، باریک‌تر از آهن خالص است. مواد دارای حلقه هیستریزیس باریک، به آسانی مغناطیسی و غیر مغناطیسی شده و با نام «مواد مغناطیسی نرم» شناخته می‌شوند. از این ترکیب در ساخت ترانسفورماتور، رله و سلونوئید استفاده می‌شود زیرا حلقه باریک به این مورد اشاره دارد که در هر تناوب جریان، تلفات کمی در فرآیند مغناطش رخ می‌دهد. طی ایجاد پسماند مغناطیسی، گرما تلف می‌شود که با مساحت حلقه هیستریزیس مغناطیسی متناسب است. از آنجایی که در ترانسفورماتورهای AC جهت جریان دائماً تغییر می‌کند، تلفات هیستریزیس همواره وجود دارد. این موضوع یکی از چالش‌های این تجهیزات است.

با افزودن ماده‌ای مانند سیلیکون به آهن، فلزی با نیروی مغناطیس‌زدای کم ساخته می‌شود که حلقه هیستریزیس آن، باریک‌تر از آهن خالص است. مواد دارای حلقه هیستریزیس باریک، به آسانی مغناطیسی و غیر مغناطیسی شده و با نام «مواد مغناطیسی نرم» شناخته می‌شوند. از این ترکیب در ساخت ترانسفورماتور، رله و سلونوئید استفاده می‌شود زیرا حلقه باریک به این مورد اشاره دارد که در هر تناوب جریان، تلفات کمی در فرآیند مغناطش رخ می‌دهد. طی ایجاد پسماند مغناطیسی، گرما تلف می‌شود که با مساحت حلقه هیستریزیس مغناطیسی متناسب است. از آنجایی که در ترانسفورماتورهای AC جهت جریان دائماً تغییر می‌کند، تلفات هیستریزیس همواره وجود دارد. این موضوع یکی از چالش‌های این تجهیزات است.

با افزودن ماده‌ای مانند سیلیکون به آهن، فلزی با نیروی مغناطیس‌زدای کم ساخته می‌شود که حلقه هیستریزیس آن، باریک‌تر از آهن خالص است. مواد دارای حلقه هیستریزیس باریک، به آسانی مغناطیسی و غیر مغناطیسی شده و با نام «مواد مغناطیسی نرم» شناخته می‌شوند. از این ترکیب در ساخت ترانسفورماتور، رله و سلونوئید استفاده می‌شود زیرا حلقه باریک به این مورد اشاره دارد که در هر تناوب جریان، تلفات کمی در فرآیند مغناطش رخ می‌دهد. طی ایجاد پسماند مغناطیسی، گرما تلف می‌شود که با مساحت حلقه هیستریزیس مغناطیسی متناسب است. از آنجایی که در ترانسفورماتورهای AC جهت جریان دائماً تغییر می‌کند، تلفات هیستریزیس همواره وجود دارد. این موضوع یکی از چالش‌های این تجهیزات است.

با افزودن ماده‌ای مانند سیلیکون به آهن، فلزی با نیروی مغناطیس‌زدای کم ساخته می‌شود که حلقه هیستریزیس آن، باریک‌تر از آهن خالص است. مواد دارای حلقه هیستریزیس باریک، به آسانی مغناطیسی و غیر مغناطیسی شده و با نام «مواد مغناطیسی نرم» شناخته می‌شوند. از این ترکیب در ساخت ترانسفورماتور، رله و سلونوئید استفاده می‌شود زیرا حلقه باریک به این مورد اشاره دارد که در هر تناوب جریان، تلفات کمی در فرآیند مغناطش رخ می‌دهد. طی ایجاد پسماند مغناطیسی، گرما تلف می‌شود که با مساحت حلقه هیستریزیس مغناطیسی متناسب است. از آنجایی که در ترانسفورماتورهای AC جهت جریان دائماً تغییر می‌کند، تلفات هیستریزیس همواره وجود دارد. این موضوع یکی از چالش‌های این تجهیزات است.

با افزودن ماده‌ای مانند سیلیکون به آهن، فلزی با نیروی مغناطیس‌زدای کم ساخته می‌شود که حلقه هیستریزیس آن، باریک‌تر از آهن خالص است. مواد دارای حلقه هیستریزیس باریک، به آسانی مغناطیسی و غیر مغناطیسی شده و با نام «مواد مغناطیسی نرم» شناخته می‌شوند. از این ترکیب در ساخت ترانسفورماتور، رله و سلونوئید استفاده می‌شود زیرا حلقه باریک به این مورد اشاره دارد که در هر تناوب جریان، تلفات کمی در فرآیند مغناطش رخ می‌دهد. طی ایجاد پسماند مغناطیسی، گرما تلف می‌شود که با مساحت حلقه هیستریزیس مغناطیسی متناسب است. از آنجایی که در ترانسفورماتورهای AC جهت جریان دائماً تغییر می‌کند، تلفات هیستریزیس همواره وجود دارد. این موضوع یکی از چالش‌های این تجهیزات است.

