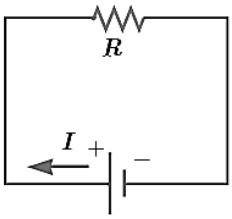
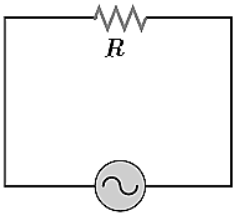
☑ بخش پنجم: جریان متناوب



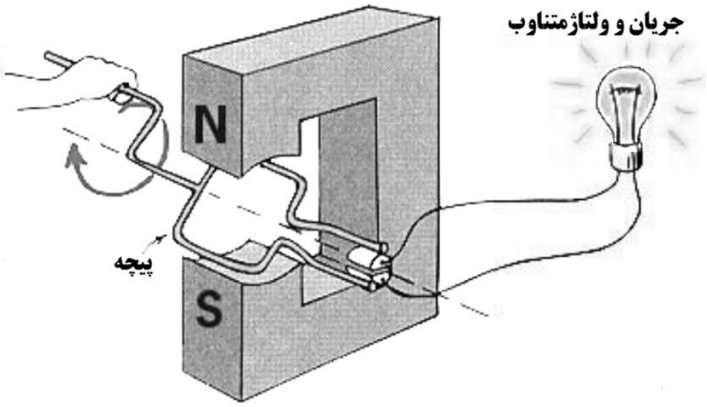
جریان الکتریکی که تاکنون با آن سروکار داشتیم، **جریان مستقیم** یا **dc** بود. این جریان از قطب مثبت باتری به سمت قطب منفی می‌رود، لذا جهت آن ثابت و معیّن بوده و با گذشت زمان تغییر نمی‌کند.



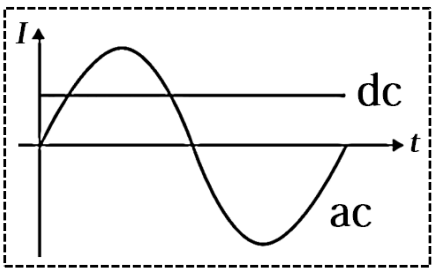
اما نوع دیگری از جریان وجود دارد که **جریان متناوب** یا **ac** نامیده می‌شود. جهت و اندازهٔ این جریان مدام تغییر می‌کند، لذا نمی‌توان جهت معینی را برای آن در نظر گرفت. همچنین ولتاژ و جریان در آن، تابعی سینوسی از زمان است؛ یعنی این‌دو با گذشت زمان، به طور سینوسی تغییر می‌کنند. بر این اساس، این جریان را **جریان متناوب سینوسی** نیز می‌نامند و همانند شکل مقابل، مولد آن را با نماد منحنی سینوسی نشان می‌دهند.

نحوهٔ تولید جریان متناوب:

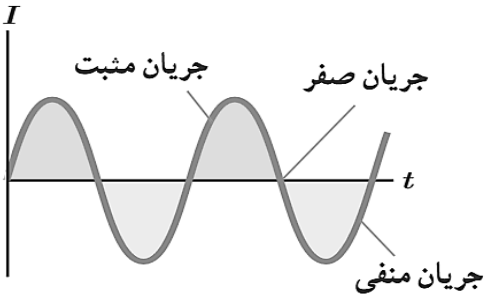
دانستیم که تغییر شار مغناطیسی در یک پیچه، باعث تولید جریان القایی می‌شود. از میان ۳ روشی که برای این منظور بیان شد، رایج‌ترین روش، تغییر زاویهٔ میان پیچه و میدان مغناطیسی است که این زاویه را با θ نشان می‌دادیم.



شکل مقابل، تصویری نمادین و ساده از یک مولد دستیِ تولید جریان متناوب را نشان می‌دهد. در این مولد، یک پیچه در میدان مغناطیسیِ ناشی از دو قطب مغناطیسیِ آهنربا چرخانده می‌شود. خطوط میدان مغناطیسی که از قطب N به سمت قطب S آهنربا برقرار هستند از پیچه عبور می‌کنند و چرخشِ پیچه باعث می‌شود که شار مغناطیسی گذرنده از آن دائماً تغییر کند و جریانی در آن القا شود که لامپ متصل به دو سرپیچه را روشن می‌کند.



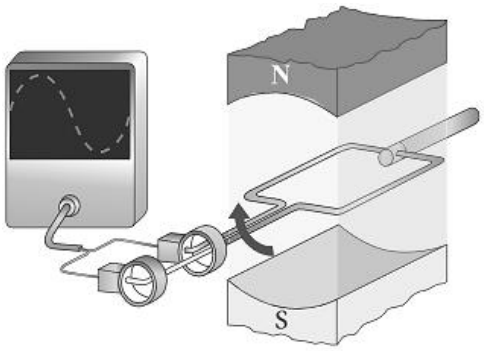
اما جریانی که به این روش تولید می‌شود، ویژگی خاصی دارد که آن را از جریان مستقیم (dc) متمایز می‌سازد. برای درک این ویژگی و تمایز، کافی است که نموداری از تغییرات جریان القایی را بر حسب زمان رسم کنیم و آن را با نمودار جریان dc مقایسه کنیم (شکل مقابل). چنانکه مشاهده می‌کنید، اندازهٔ جریان dc که از یک باتری با نیروی محرکهٔ ثابت تولید شده، در طول زمان ثابت است، اما جریان القایی، که حاصل چرخش پیچه در میدان مغناطیسی است، هم از حیث **اندازه** و هم از حیث **جهت**، دائماً در حال تغییر است و شکلی سینوسی به خود گرفته است. از اینرو، به آن جریان متناوب (ac) یا جریان سینوسی گفته می‌شود.



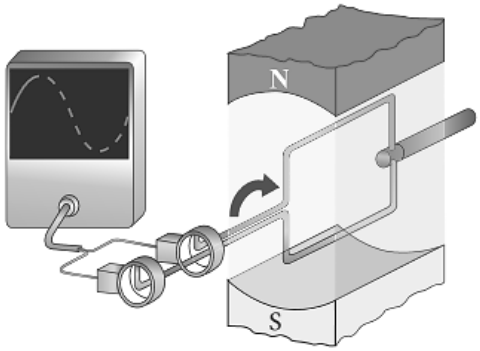
اگر به طور دقیق‌تر به نمودار جریان متناوب نگاه کنیم، میبینیم که اندازهٔ جریان در ابتدا از صفر آغاز می‌شود و به تدریج افزایش می‌یابد تا به حد بیشینهٔ خود برسد(قلهٔ نمودار)؛ سپس به تدریج کاهش می‌یابد تا دوباره **صفر** شود. تا این‌جا، جریان در بخش مثبت محور جریان(I) حرکت می‌کرد؛ اما از این پس، **جهت آن تغییر می‌کند** و به زیر محور I می‌رود و دارای اندازه‌ای منفی می‌شود (جریان منفی).

نکته: معنای جریان منفی: در واقع، جریان منفی تعبیری از تغییر جهت جریان و همچنین تغییر علامت نیروی محرکهٔ القایی است. می‌توان گفت که جریان متناوب در مَثَل مانند یک مدار ساده است که قطب‌های + و - باتریِ آن، مدام با هم عوض می‌شوند و در اثر آن، جهت جریان در مدار نیز مدام معکوس می‌شود.

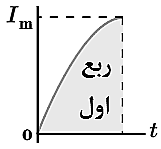
اما این اتفاق در مولد جریان متناوب چگونه رخ می‌دهد؟



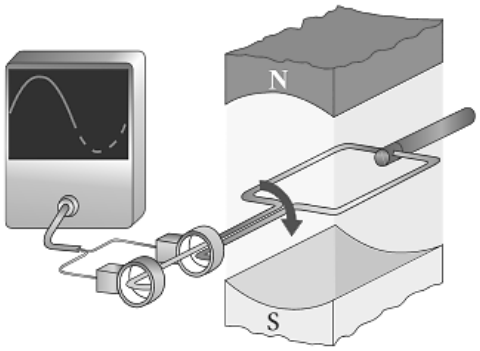
شکل مقابل، ابتدای روند تولید جریان در یک مولد را نشان می‌دهد. در این حالت، سطح پیچه عمود بر میدان مغناطیسی است (نیم‌خطِ عمود بر سطح، در راستای میدان مغناطیسی است، لذا $\theta=0^\circ$). این یعنی بیشترین شارِ ممکن از پیچه می‌گذرد(Φ_{max}). این موضوع، هم در شکل قابل مشاهده است، و هم از رابطهٔ شار مغناطیسی ($\Phi = BA\cos\theta$) می‌فهمیم که چون $\theta=0^\circ$ ، پس تابع کسینوس و در نتیجه، شار مغناطیسی نیز بیشینه می‌گردد. اما جریان(I) یک تابع سینوسی است و $\sin\theta$ زمانی که $\theta=0^\circ$ باشد، صفر می‌شود. لذا در این حالت که شار بیشینه است، جریان در مدار صفر می‌باشد (جریانی وجود ندارد).



❶ در ادامه، چرخش پیچه آغاز می‌گردد و به صورت ساعتگرد تا $\theta=90^\circ$ پیش می‌رود($\frac{1}{4}$ دور). در طی این مدت، شار مغناطیسیِ گذرنده از پیچه در حال کاهش است و هنگامی که θ به 90° می‌رسد، اندازهٔ شار که یک تابع کسینوسی است، صفر می‌شود. اما در همان بازه، اندازهٔ جریان که تابعی سینوسی است، در حال افزایش است و هنگام رسیدن θ به 90°، بیشینه می‌گردد(I_m) و نمودار سینوسیِ I به اولین قلهٔ خود می‌رسد.

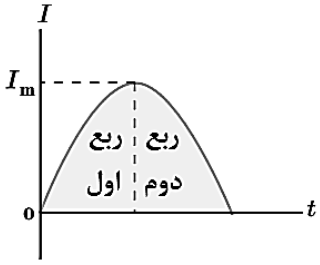


نکته: جهت جریان در این بازه (ربع اول چرخش): چون شار عبوری از پیچه در حال کاهش است، طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی القایی در پیچه، هم‌جهت با خطوط میدان آهنربا (از N به S) می‌شود تا مانع از کاهش شار شود. حال با استفاده از قاعدهٔ دست راست می‌توان جهت جریان در پیچه را مشخص کرد.

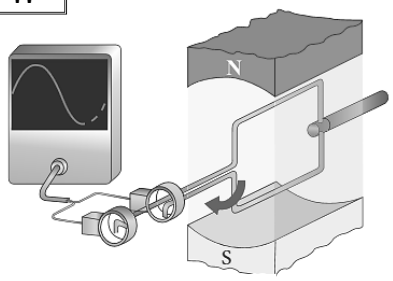


❷ در ادامه، پیچه به حرکت خود ادامه می‌دهد تا ربع دوم چرخش خود را انجام دهد. و به صورت ساعتگرد تا $\theta=180^\circ$ پیش می‌رود. در طی این مدت، شار مغناطیسیِ گذرنده از پیچه که در ابتدای این بازه، صفر بود، شروع به افزایش می‌کند و هنگامی که θ به 180° می‌رسد(شکل مقابل)، اندازهٔ شار که یک تابع کسینوسی است، بیشینه می‌شود. اما در همان بازه، اندازهٔ جریان که یک تابع سینوسی است، در حال کاهش است و هنگام رسیدن θ به 180°، صفر می‌گردد و نمودار سینوسیِ جریان به محور t (زمان) برخورد می‌کند.

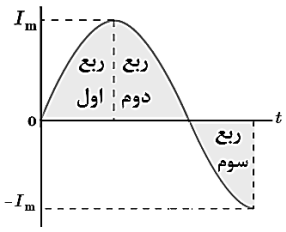
نکته: جهت جریان در این بازه (ربع دوم چرخش): چون شار عبوری از پیچه در حال افزایش است، طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی القایی در پیچه، خلاف جهت خطوط میدان آهنربا (که از N به S است) می‌شود تا مانع از افزایش شار شود. حال با استفاده از قاعدهٔ دست راست می‌توان جهت جریان در پیچه را مشخص کرد. در این صورت می‌بینیم که جهت جریان پیچه در این بازه، همانند جهت جریان در ربع اول حرکت است و تغییری نکرده است.



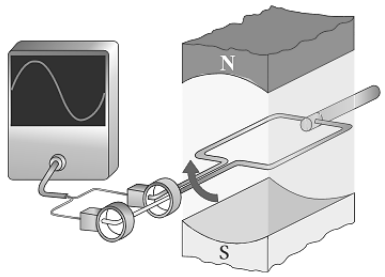
○ با نگاه به مسیری که نمودار تا این لحظه طی کرده است نیز می‌توانیم ببینیم که منحنی نمودار همچنان در بخش مثبت محور I (و بالای محور t) قرار دارد و وارد بخش منفی نشده است. پس در دو ربع اول چرخش، که نصف یک دورِ کامل طی شده است، جهت جریان در پیچه تغییر نکرده است.



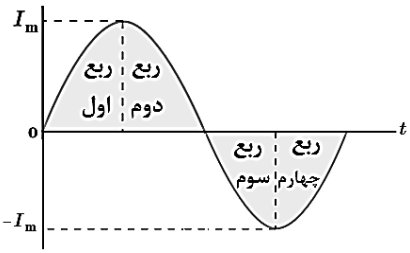
❸← در ادامه، پیچه وارد ربع سوم چرخش خود می‌شود. طبق روشی که در مراحل قبل به‌کار بستیم، در این بازه، شار در حال کاهش و جریان در حال افزایش است تا θ به ۲۷۰° می‌رسد(شکل مقابل). اما باید توجه داشت که چون تابع جریان، سینوسی است و $\sin\theta$ از ۱۸۰° تا ۲۷۰° مقداری منفی دارد، منحنیِ نمودار نیز به بخش منفی محور I (زیر محور t) می‌رود. یعنی اندازهٔ جریان در حال افزایش است اما در جهت منفی. پس جریان در این بازه تغییر جهت می‌دهد و تا مقدار بیشینهٔ منفی ($-I_m$) پیش می‌رود.



← **نکته: جهت جریان در این بازه (ربع سوم چرخش)**: همانند مراحل قبل، اگر از قاعدهٔ دست راست استفاده کنیم می‌بینیم که این بار جهت جریان در پیچه معکوس شده است. این نتیجهٔ عملی با تحلیل نظری که در بالا داشتیم همخوانی دارد.



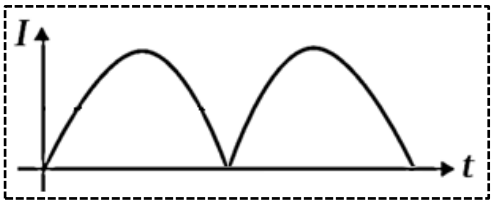
❹← در ادامه، پیچه وارد ربع چهارم چرخش خود می‌شود. در این بازه، شار در حال افزایش و جریان در حال کاهش است تا θ به ۳۶۰° برسد(شکل مقابل) و یک دور کامل شود. اما چون تابع جریان، سینوسی است و $\sin\theta$ از ۲۷۰° تا ۳۶۰° مقداری منفی دارد، منحنیِ نمودار همچنان در بخش منفی محور I (زیر محور t) حرکت می‌کند. لذا هرچند اندازهٔ جریان در حال کاهش است اما جهت آن منفی است. پس جریان در این بازه، از مقدار بیشینهٔ منفی که داشت به سمت صفر حرکت می‌کند و باز هم به محور t برخورد می‌کند.



← **نکته: جهت جریان در این بازه (ربع چهارم چرخش)**: با استفاده از قاعدهٔ دست راست می‌بینیم که جهت جریان در پیچه همانند بازهٔ قبل است و تغییر نکرده است. این نتیجهٔ عملی با تحلیل نظری که در بالا داشتیم همخوانی دارد. چنانکه در نمودار مقابل دیده می‌شود، جریان در پایان یک دور کامل، صفر شده و اگر چرخش پیچه ادامه یابد، نمودار دوباره تغییر جهت می‌دهد و جریان مثبت می‌گردد و این مراحل چهارگانه دوباره تکرار می‌شوند.

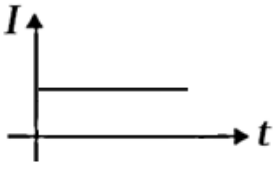
❖ **نتیجه:** با بررسی مراحل یک دور چرخش کامل پیچه، علاوه بر اینکه با چگونگی تغییر شار و جریان در مولد برق آشنا شدیم، دیدیم که با هر نصف دور چرخشِ پیچه در مولد، جهت جریان نیز معکوس می‌شود. باید توجه داشت که همین اتفاق است که سبب ایجاد جریان متناوب در مولدهای اینچنینی می‌گردد و جریان ac را از جریان dc متمایز می‌سازد. در واقع، قانون لنز و مخالفتی که میدان مغناطیسیِ القا شده در پیچه با تغییر شار دارد، زمینهٔ تغییر جهت جریان در پیچه را فراهم می‌آورد.

← **نکته: به نظر شما، نموداری که در شکل زیر رسم شده است، مربوط به جریان ac است یا dc ؟**



پاسخ صحیح به این پرسش، در گرو فهم صحیح از دو مفهوم اندازه و جهت در نمودار جریان است:

در این نمودار، اندازهٔ جریان در طول زمان تغییر کرده است و مدام کم و زیاد شده است اما جهت جریان، تغییر نکرده است. توجه کنید که تغییر جهتِ جریان، به معنی تغییر زاویهٔ انحنای نمودار نیست؛ بلکه این تغییر، با عبور نمودار از محور t و ورود آن در بخش منفی محور I اتفاق می‌افتد. اما این نمودار، فقط در بخش مثبت محور I حرکت کرده است؛ پس نمی‌تواند مربوط به جریان متناوب (ac) باشد.



اما شاید گمان کنید که این نمودار مربوط به جریان مستقیم (dc) نیز نیست چون همانند نمودار مقابل، یک خط مستقیم نمی‌باشد. اما باید بدانید که مستقیم بودن نمودار مقابل، فقط نشان دهندهٔ این است که مولد، همانند باتری، یک ولتاژ و جریان ثابت را تولید کرده که اندازهٔ آن در طول زمان تغیر نکرده است. اما اگر جریان همین باتری، توسط یک مقاومت متغیر در مدار تغییر یابد، اندازهٔ جریان مستقیم نیز متغیر می‌شود، بدون اینکه جهت جریان تغییر یافته باشد. پس علت اصلی تمایز جریان متناوب و مستقیم، تغییر جهت در جریان متناوب است، نه تغییر در اندازهٔ جریان. لذا نمودار بالا مربوط به جریان مستقیم (dc) است.

کتاب درسی ○ **فعالیت ۴–۱** (حل شود)

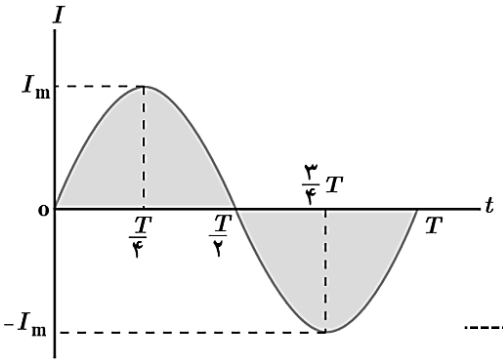
نمودارها و معادلات جریان متناوب:

تا اینجا با نحوهٔ تولید جریان متناوب و ویژگی‌های آن آشنا شدیم، و در ادامه می‌خواهیم معادلاتی را برای محاسبهٔ کمیت‌های مربوط به این جریان معرفی نماییم. اما در ابتدا نیاز است که با کمیت **دوره** آشنا شویم.

دوره: مدت زمانی که طول می‌کشد تا پیچه یک دور کامل بچرخد را **دوره** یا **زمان تناوب** می‌گویند و آن را با T نشان می‌دهند.

← به عنوان مثال، اگر گفته شود دورهٔ حرکت یک پیچه برابر $T=۲s$ است، می‌توان نتیجه گرفت که پیچه در مدت ۲ ثانیه، یک دور می‌چرخد.

نکته: شکل مقابل، نمودار جریان بر حسب زمان را در یک دور کامل پیچه (یک دوره) نشان می‌دهد. با توجه به اینکه پیچه با سرعت یکنواخت چرخیده می‌شود، می‌توان گفت که در هر مرحله از مراحل چهارگانهٔ چرخش خود، زمانی برابر $T/۴$ ، یعنی یک‌چهارم از دورهٔ خود را طی می‌کند. آشنایی با این نکته می‌تواند در حل برخی از مسائل، به کار آید.



* محاسبهٔ زاویه بر حسب زمان:

دانستیم که رایج‌ترین روش تولید جریان متناوب، چرخش پیچه در میدان مغناطیسی است که این چرخش، با اندازهٔ زاویهٔ پیچه یعنی θ نشان داده می‌شود. با توجه به اینکه شار عبوری از پیچه، از رابطهٔ $\Phi = BA\cos\theta$ به دست می‌آید، ما با دانستن θ در هر لحظه، می‌توانیم به میزان شار عبوری از پیچه در آن لحظه پی ببریم. اما این رابطه بر حسب θ نوشته شده و امکان محاسبهٔ لحظه (یعنی زمان) را ندارد. برای رفع این نقص، راهی وجود دارد که در ادامه به آن می‌پردازیم:

❶ پیش از این، در ریاضیات دانسته‌ایم که هر دور کامل ۳۶۰ درجه، برابر با ۲π رادیان است.

❷ از طرفی در این بخش آموختیم که هر دور کامل، به اندازهٔ T ثانیه(یک دوره) طول می‌کشد.

← **از دو مقدمهٔ بالا نتیجه می‌گیریم:** ۲π رادیان **متناسب است با** T ثانیه ← به این صورت توانستیم میان درجه و زمان تناسب برقرار کنیم.

حال اگر بخواهیم بدانیم که پیچه پس از مدت زمان دلخواه t ثانیه چند درجه چرخیده است، کافی است که تناسب زیر را بنویسیم:

میزان چرخش پیچه	مدت زمان
۲π	T
$\theta = ?$	t

$$\Rightarrow \theta = \frac{۲\pi}{T}t$$

بدین ترتیب توانستیم، زاویه را بر حسب زمان بنویسیم.

← **روش کتاب درسی:** **این رابطه در کتاب درسی بدین صورت به دست آمده است:**

با توجه به اینکه هر دور متناسب با T ثانیه است، می‌توانیم بگوییم که: یک پیچه در مدت t ثانیه، به اندازهٔ $\frac{t}{T}$ دور می‌چرخد؛ و چون هر دور برابر ۲π رادیان است، پس زاویهٔ چرخش پیچه در مدت t ثانیه به اندازهٔ $\theta = \frac{۲\pi}{T}t$ خواهد بود.

← رابطهٔ $\theta = \frac{۲\pi}{T}t$ ما را قادر می‌سازد که بین زمان و زاویهٔ چرخش پیچه ارتباط برقرار کنیم. حالا می‌توانیم معادلات مربوط به جریان متناوب را بر حسب زمان بنویسیم و نمودار آن‌ها را رسم نماییم.

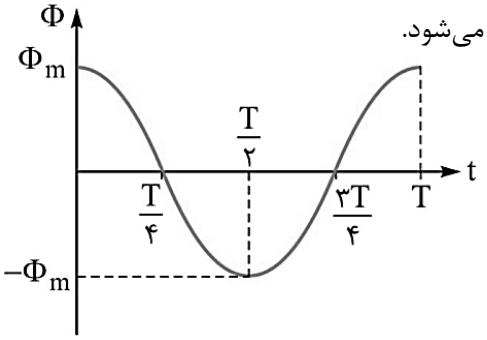
رابطهٔ شار مغناطیسی بر حسب زمان:

$$\Phi = BA\cos\frac{2\pi}{T}t$$

کافی است که در رابطهٔ $\Phi = BA\cos\theta$ به جای θ قرار دهیم: $\frac{2\pi}{T}t$

حالا هر زمانی را که در t قرار دهیم، مقدار شار عبوری از پیچه در آن لحظه به‌دست می‌آید.

نکته: تابع شار مغناطیسی، یک تابع کسینوسی است، لذا نمودار Φ-t به شکل زیر رسم می‌شود.



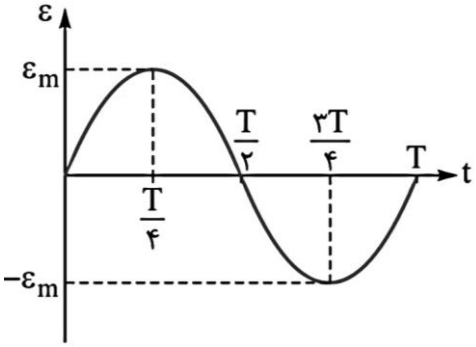
نکته: مقدار بیشینهٔ Φ که آن را با Φ_m نشان می‌دهیم، در $\theta=0^\circ$ ایجاد می‌شود که $\cos\theta$ برابر ۱ می‌گردد. در این حالت $\Phi=BA$ زیرا: $\Phi_m = BA\cos 0^\circ = BA$

پس می‌توانیم رابطهٔ شار بر حسب زمان را این‌گونه بنویسیم: $\Phi = \Phi_m \cos\frac{2\pi}{T}t$

رابطهٔ نیروی محرکهٔ القایی بر حسب زمان:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin\frac{2\pi}{T}t$$

با توجه به این‌که شار مغناطیسی با گذشت زمان تغییر می‌کند (چنانکه در نمودار مربوط به شار در بالا مشاهده می‌کنید)؛ پس طبق قانون فاراده، باید نیروی محرکه‌ای در پیچه القا شود. اندازهٔ این نیروی محرکه بر حسب زمان از رابطهٔ مقابل به دست می‌آید:



- ε_m در رابطهٔ بالا، بیشینهٔ مقدار نیروی محرکهٔ القایی در پیچه است.

نکته: اثبات این رابطه، خارج از سطح کتاب درسی است و فقط آن را به خاطر بسپارید.

نکته: چنانکه در رابطه نیز مشاهده می‌کنید، نیروی محرکهٔ القایی، تابعی سینوسی نسبت به زمان است. لذا نمودار آن به صورت مقابل ترسیم می‌شود.

رابطهٔ جـــریان القایی بر حسب زمان:

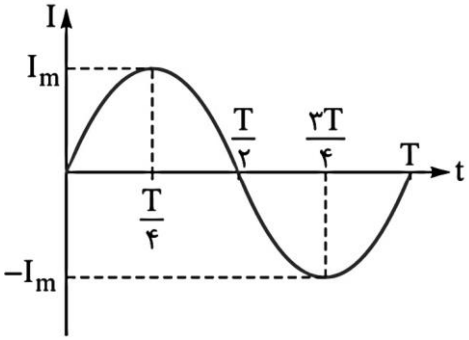
از فصل ۲ می‌دانیم که جریان مدار از رابطهٔ $I = \frac{\varepsilon}{R}$ به‌دست می‌آید. در اینجا نیز کافی است که رابطهٔ نیروی محرکهٔ القایی(ε) بر حسب زمان را که در بالا به دست آوردیم، بر مقاومت کل مدار پیچه (R) تقسیم کنیم تا رابطهٔ جریان القایی بر حسب زمان تولید شود.

- در رابطهٔ مقابل، کسر $\frac{\varepsilon_m}{R}$ بیانگر جریان القایی بیشینه است که آن را با I_m نشان می‌دهند.

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_m \sin\frac{2\pi}{T}t}{R}$$

$$I = I_m \sin\frac{2\pi}{T}t$$

پس رابطهٔ جریان القا شده در پیچه بر حسب زمان، به صورت مقابل در می‌آید:



نکته: چنانکه در رابطه نیز مشاهده می‌کنید، جریان القایی، تابعی سینوسی نسبت به زمان است. لذا نمودار آن به صورت مقابل ترسیم می‌شود.

کتاب درسی ○ **مثال ۴–۷** (بررسی شود) ○ **تمرین ۴–۵** (حل شود)