

الکترومغناطیس مهندسی

مؤلفین:

دکتر علیرضا بیات

عضو هیأت علمی دانشگاه

مهندس وحید صوفی نیارکی

کارشناس ارشد مخابرات

سرشناسه
عنوان و نام پدیدآور
مشخصات نشر
مشخصات ظاهری
شابک
وضعیت فهرست نویسی
یادداشت
موضوع
موضوع
شناسه افزوده
شناسه افزوده
رده بندی کنگره
رده بندی دیویی
شماره کتاب شناسی ملی

: بیات، علیرضا، ۱۳۳۷ -
الکترومغناطیس مهندسی / مولفین علیرضا بیات، وحید صوفی نیارکی.
تهران: جهاد دانشگاهی، واحد خوارزمی، ۱۳۹۴.
۳۴۸ ص.: مصور، نمودار.
۲۵۰۰۰۰ ریال ۱۱-0-7605-600-978 :
فیبا
کتابنامه: ص. ۳۴۷.
الکترومغناطیس -- راهنمای آموزشی (عالی)
الکترومغناطیس -- آزمون‌ها و تمرین‌ها (عالی)
صوفی نیارکی، وحید، ۱۳۴۷ -
جهاد دانشگاهی، واحد خوارزمی
QC ۱۳۹۳۷۶۰ الف ۷/ب
۰۷۶/۵۳۷
۴۰۴۶۶۴ : ملی

انتشارات جهاد دانشگاهی واحد استان البرز (خوارزمی)

شابک : ۰ - ۱۱ - ۷۶۰۵ - ۶۰ - ۹۱

ISBN 11-0-7605-600-978



نام کتاب : الکترومغناطیس مهندسی

تألیف : دکتر علیرضا بیات (عضو هیات علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره))

: مهندس و امید صوفی نیارکی

نوبت چاپ اول : پاییز ۱۳۹۴

لینوگرافی : پویش

چاپ : تربیت معلم

شمارگان : ۵۰۰

قیمت : ۲۵۰۰۰۰ ریال

آدرس ناشر : تهران - خیابان انقلاب اسلامی - خیابان شهید مفتح - پلاک ۴۳ - دانشگاه خوارزمی - جهاد دانشگاهی واحد استان البرز (خوارزمی) تلفن و دورنگار : ۸۸۳۰ ۲۵۲۴ - ۸۸۳۰۹۲۹۲ مرکز پخش : ۷۷۵۰۳۸۲۴

این اثر مشمول قانون حمایت مؤلفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است. هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه مؤلف (ناشر) نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل (۱)	۲۱
۱-۱. معرفی دستگاه‌های مختصات	۲۳
۲-۱. جمع و تفریق بردارها	۲۸
۳-۱. ضرب بردارها	۳۱
۴-۱. انتگرال شامل توابع برداری	۳۴
۵-۱. تبدیل دستگاه‌های مختصات	۳۸
۶-۱. اپراتور گرادینز: $\bar{\nabla} (del)$	۴۶
۷-۱. دیورژانس بردار $\bar{F}$: $\bar{\nabla} \cdot \bar{F}$ و قضیه دیورژانس	۴۸
۸-۱. کرل بردار $\bar{F}$: $\bar{\nabla} \times \bar{F}$	۵۱
۹-۱. قضیه استوکس، لاپلاس، قضیه هلم هولتز	۵۶
۱۰-۱. اتحادها و روابط مهم در آنالیز برداری	۶۰
۱۱-۱. قانون کولمب	۶۷
۱۲-۱. توزیع بارهای پیوسته	۶۹
۱۳-۱. شدت میدان حاصل از بارهای الکتریکی	۷۱
۱۴-۱. خطوط میدان الکتریکی	۸۰
۱۵-۱. قانون گاوس	۸۴
۱۶-۱. پوست شماره ۱	۹۲
۱۷-۱. مسائل فصل (۱)	۹۶
فصل (۲)	۱۰۳
۱-۲. پتانسیل الکتریکی	۱۰۵
۲-۲. دی‌الکتریکها در میدان الکتریکی ساکن	۱۱۳
۳-۲. تقسیم‌بندی دی‌الکتریکها	۱۱۶
۴-۲. شرایط مرزی	۱۱۹
۵-۲. انرژی حاصل از بارهای الکتریکی	۱۲۳

۱۲۸.....	۶-۲. مسائل فصل (۲).....
۱۳۵.....	فصل (۳).....
۱۳۷.....	۳-۱. یادآوری قانون کولمب.....
۱۳۸.....	۳-۲. محاسبه ظرفیت خازنی در دستگاه کارتزین.....
۱۴۳.....	۳-۳. محاسبه ظرفیت خازنی (استوانه‌ای).....
۱۵۰.....	۳-۴. محاسبه ظرفیت خازنی در دستگاه کروی.....
۱۵۵.....	۳-۵. محاسبه مقاومت الکتریکی.....
۱۶۰.....	۳-۶. حل مسائل الکترواستاتیک (الکتریسته ساکن) به کمک روش تصویر.....
۱۶۶.....	۳-۷. حل مسائل الکتریسته ساکن با معادلات لاپلاس و پواسن.....
۱۷۶.....	۳-۸. جریان الکتریکی، مسئله‌ی پیوستگی.....
۱۸۰.....	۳-۹. شرایط مرزی، پتانسیل، پتانسیل الکتریکی.....
۱۸۲.....	۳-۱۰. جریان در هادیپ و رابطه‌ی تبادل الکترواستاتیکی در هادیپها.....
۱۸۵.....	۳-۱۱. حل چند مسأله از مقادیر الکتریکی.....
۱۹۱.....	۳-۱۲. مسائل فصل (۳).....
۱۹۹.....	فصل (۴).....
۲۰۱.....	۴-۱. قانون بیوساوار.....
۲۰۸.....	۴-۲. قانون مداری آمپر.....
۲۱۲.....	۴-۳. خطوط میدان مغناطیسی.....
۲۱۳.....	۴-۴. اندوکتانس.....
۲۱۹.....	۴-۵. مسائل فصل (۴).....
۲۲۷.....	فصل (۵).....
۲۲۹.....	۵-۱. نیروی لورنتز.....
۲۴۳.....	۵-۲. گشتاور مغناطیسی.....
۲۴۸.....	۵-۳. بردار پلاریزاسیون مغناطیسی.....
۲۵۳.....	۵-۴. مواد مغناطیسی.....
۲۵۷.....	۵-۵. شرایط مرزی.....
۲۶۰.....	۵-۶. القاء متقابل.....

۲۶۸	۷-۵. قانون نقطه گذاری
۲۷۹	۸-۵ مسائل فصل (۵)
۲۸۷	فصل (۶)
۲۸۹	۱-۶. تحریک مدار با توابع ثابت (DC)
۲۹۵	۲-۶. تحریک مدار با توابع هارمونیک (AC)
۳۰۶	۳-۶. توان مختلط
۳۰۸	۴-۶. رزونانس (تشدید - همنوایی)
۳۰۹	۵-۶. ضریب کیفیت مدار (Q)
۳۱۴	۶-۶. ریس تلفات و جریانهای خانه‌ای
۳۱۷	۷-۶. مدارهای مغناطیسی
۳۱۸	۸-۶. مقاومت مغناطیسی
۳۲۵	۹-۶. معادلات ماکسول
۳۲۷	۱۰-۶. نیروی محرکه (E)
۳۴۰	۱۱-۶. انرژی میدان مغناطیسی
۳۴۱	۱۲-۶. قضیه پوینتینگ
۳۴۴	۱۳-۶. مسائل فصل (۶)
۳۴۷	مراجع

سخن آغازین

حمد و ثنا و شکر بی انتها پروردگاری را که دلالت کرد ما را بر شاهراه نجات ، و هدایت نمود ما را به سوی آن چیزی که موجب علو درجات است و درود نامحدود بر اشرف مخلوقات ، و افضل اهل ارض و سماوات ، محمد و اهل بیت بزرگوارش.

ابتدا در رابطه با اهمیت درس الکترومغناطیس می توان گفت که مطالب این درس پایه اصلی بسیاری از رشته های مهندسی برق از جمله مخابرات، قدرت، الکترومکانیک و غیره می باشد .

مطالب این کتاب حاصل سالها تدریس اینجانب در حوزه مخابرات میدان و آنتن می باشد ، دشواری مطالب این درس بسبب وجود روابط پیچیده ریاضی و مفاهیم فیزیکی آن بر کسی پوشیده نیست به همین دلیل این جانب بر آن شدم تا با تالیف کتابی که در آن بیشتر مطالب و مثالها از روشهای مناسب ، حل و با عناوین متعدد نمایش داده شده است و درک آن را برای دانشجویان تا حدودی راحتتر کنم و همچنین در این اثر سعی شده است علاوه بر حل عددی مثالها در برخی موارد برای درک شهودی ، بر مسائل از شبیه سازی کامپیوتری توسط نرم افزار `matlab` و `est` استفاده گردد . دروس پیش نیاز برای مطالعه این کتاب آشنایی کامل با معادلات دیفرانسیل، ریاضیات مهندسی و فیزیک الکترواسته میباشد. با آگاهی از این واقعیت که کتاب حاضر دارای اشکالات ناخواسته ای باشد بود، تذکر در مورد اشکالات باعث خوشحالی مآلف خواهد شد .

در پایان لازم می دانم از زحمات بی دریغ خانم مهندس مریم رستگارمن که در این اثر را بر عهده داشتند و همچنین آقای حسین فروزانی که تلاش فراوانی در جهت بهبود هرچه بیشتر این کتاب داشته اند ، نهایت قدردانی و تشکر را از ایشان داشته باشم .

و من الله التوفیق

علیرضا بیات

عضو هیأت علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

پیشگفتار

الکترومغناطیس به عنوان یک درس مبنایی برای رشته هایی چون مهندسی برق و فیزیک شناخته می شود و یادگیری عمیق این درس در یادگیری بهتر سایر دروس تأثیر به سزایی دارد. در الکترومغناطیس به کمک آنالیز برداری به عنوان ابزار ریاضی مناسب، به صورت دقیق با مفاهیمی اساسی چون میدان الکتریکی، ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی و نیروی مغناطیسی آشنا می شویم. این واقعیت که اثبات قوانین ولتاژ و جریان کیرشهف که اساس تحلیل های مدارهای الکتریکی باشد کاری الکترومغناطیسی است، اهمیت این درس را بهتر روشن می کند. از دیدگاه یک مهندس برق ولتاژ و جریان الکتریکی جزء کمیت هایی بسیار مهم در تحلیل یک مدار الکتریکی یا الکترونیکی می باشند و قوانین ولتاژ و جریان کیرشهف بارها مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین در مباحث مربوط به ماشین های الکتریکی داشتن اطلاعات کافی در مورد میدان و شار مغناطیسی و چگونگی ارتباط آن با میدان، شار و جریان الکتریکی اساس موضوع می باشد. از سون دیگر از آنجا که الکترومغناطیس پایه و مبنای اصلی دروسی چون مایکروویو و آنتن است پس یک مهندس مخابرات تسلط بالا بر آن، امری اجتناب ناپذیر می باشد.

این درس در رشته ی فیزیک نیز از دروس بسیار مبنایی و مهم می باشد؛ چنانچه اپتیک، لیزر، ابررسانایی، فیزیک پلاسما و... بر پایه ی مفاهیم اساسی الکترومغناطیسی بنا شده اند و در دروس پیشرفته تر رشته ی فیزیک مکرراً به الکترومغناطیس رجوع می گردد. در یک

کلام چنین می توان گفت که تحصیل در رشته ی فیزیک بدون داشتن اطلاع از الکترومغناطیس امری غیر ممکن است .

در ارتباط با علم الکترومغناطیس باید گفت الکترومغناطیس شاخه ای از علم فیزیک است که به مطالعه ی پدیده های الکتریکی و مغناطیسی و ارتباط این دو باهم می پردازد . این موضوع را می توان به طور خلاصه در قالب قوانین چهارگانه ی ماکسول بیان کرد . در واقع هر یک از این قوانین پیش از ماکسول بر اساس آزمایش های انجام گرفته و به صورت تجربی پیدا شده بودند ، اما ماکسول با اصلاح و یک پارچه سازی این قوانین که پیش از آن مجزا پنداشته می شدند ؛ هم به تصحیح نقص های موجود در این قوانین پرداخت و هم موفق به تکمیل اصول موضوعه ی الکترومغناطیس شد ؛ چنانچه پس از آن امکان توجه به تمام پدیده های الکترومغناطیسی بر اساس همین قوانین ممکن گردید . همچنین پس از مدتی به کمک همین قوانین ، پدیده ی انتشار امواج الکترومغناطیس که اساس مباحث مهندسی مخابرات می باشد ، مورد بررسی قرار گرفت . اکنون قوانین ماکسول را بیان کرده و کمی در مورد آنها توضیح خواهیم داد .

$$(1) \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2) \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$(3) \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4) \nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$$

در این جا منظور از $\vec{E}$ شدت میدان الکتریکی ، $\vec{B}$ چگالی شار میدان الکتریکی ، $\vec{H}$ شدت میدان مغناطیسی ، $\vec{B}$ چگالی شار میدان مغناطیسی ، $\vec{J}$ چگالی جریان الکتریکی و ρ_v چگالی حجمی بار الکتریکی می باشد .

قانون شماره ی ۱ ، در واقع اصلاح شده و تعمیم یافته ی قانون آمپر می باشد . در قانون موسوم به قانون آمپر داریم $\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$. همان طور که مشاهده می کنیم قانون آمپر توجیهی برای میدان الکتریکی متغیر با زمان در اختیار قرار نمی گذارد و تنها برای میدان های الکتریکی ثابت کارایی دارد .

قانون شماره ی ۲ فرم دیفرانسیلی قانون القای فارادی می باشد . باید این موضوع را در نظر داشت که این معادله تعمیم معادله ی $\nabla \times \vec{E} = 0$ است که مربوط به میدان مغناطیسی ثابت می باشد .

قانون شماره ی ۳ را قانون پیوستگی شار مغناطیسی می نامند و بیان کننده ی این واقعیت است که هر گر قطب تنهای مغناطیسی مشاهده نشده است.

قانون شماره ی ۴ هم تعمیمی از قانون گاوس می باشد.

واقعیت انکار ناپذیر در مورد قوانین ماکسول این است که این قوانین بیان ریاضی نتایج تجربی خاصی می باشند و اثباتی برای آنها وجود ندارد؛ با این حال در نتیجه ی کارهای تجربی گسترده ای که انجام شده است اکنون معلوم گردیده که می توان این قوانین را تقریباً در کلیه ی وضعیت های ماکروسکوپی به کار برد.

همان طور که از معادلات چهار گانه ی فوق می توان نتیجه گرفت، بر اساس متغیر بودن یا نبودن میدان های الکتریکی و مغناطیسی بر حسب زمان، الکترومغناطیس به سه بخش زیر تقسیم می شود:

الکترواستاتیک ($\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$) در آن بار الکتریکی ثابت می باشد. در این حالت بر اساس معادله ی شماره ۴ چگالی شار میدان الکتریکی و در نتیجه شدت میدان الکتریکی ثابت است؛ بر این اساس و با توجه به معادله ی شماره ۱ و با در نظر داشتن این که چگالی جریان الکتریکی با ثابت بودن بار الکتریکی صفر می باشد، می توان چنین نتیجه گرفت که در الکترواستاتیک، میدان مغناطیسی وجود ندارد.

مگنواستاتیک ($\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0$) که در آن بار در حرکت یکواخت می باشد. به بیان دیگر در این حالت جریان الکتریکی DC داریم.

الکترودینامیک که در آن حرکت بار با زمان تغییر می کند. به بیان الکتریکی در این حالت جریان الکتریکی DC نمی باشد.

جمع بندی

میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی هر یک دارای یک منشأ فیزیکی می باشند. منشأ ایجاد میدان الکتریکی ابتداً بار الکتریکی و در صورت وجود، میدان مغناطیسی متغیر با زمان می باشد. منشأ ایجاد میدان مغناطیسی نیز در ابتدا جریان الکتریکی DC و در صورت وجود، میدان الکتریکی متغیر با زمان می باشد. این موضوع که تغییر هر یک از میدان های

الکتریکی و مغناطیسی باعث ایجاد دیگری می شود را اثر القای الکترومغناطیسی می نامند که اساس کار ژنراتورهای الکتریکی، آنتن ها، موتورهای الکتریکی و ترانسفورماتورها و می باشد.

در مورد نیروی الکترومغناطیسی باید به این موضوع اشاره کرد که این نیرو شامل نیروی الکتریکی و نیروی مغناطیسی می باشد. اثر میدان های الکتریکی و مغناطیسی بر ذرات بار دار به کمک معادله ای موسوم به معادله ی لورنتس $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ توصیف می شود

در الکترومغناطیس سه ثابت بسیار مهم و پر استفاده نیز وجود دارد.

$$c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

سرعت نور

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \frac{F}{m}$$

ضریب گذردهی الکتریکی در فضای آزاد

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

ضریب نفوذپذیری الکتریکی در فضای آزاد

این سه ثابت طبق رابطه ی $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ یکدیگر مربوط می شوند.

نگاه اجمالی به محتوای کتاب

این کتاب در شش فصل تنظیم شده است.

فصل اول مربوط به آنالیز برداری است که ابزار ریاضیاتی مناسبی برای سایر فصول می باشد.

در پایان فصل هم مطالب اولیه ی مربوط به میدان های الکتریکی ثابت مطرح شده است.

فهم کامل قضایای استوکس، دیورژانس و هلم هولتز و اتحادهای ریاضیاتی مهم، همچنین

فراگیری دقیق اپراتورهای گرادینان، دیورژانس و کرل برای یادگیری الکترومغناطیس

الزامی است، لذا مطالب این فصل باید به شکل مناسب فراگرفته شود.

فصل دوم شامل مباحث پتانسیل و انرژی الکتریکی و شرایط مرزی میدان الکتریکی می

باشد. به علاوه دی الکتریک ها در میدان الکتریکی ثابت و حالت تعمیم یافته ی قانون

گاوس که در اصل قانون چهارم ماکسول می باشد، در این فصل مطرح می شود.

فصل سوم شامل پنج موضوع می باشد که همگی در ارتباط با میدان الکتریکی ثابت می باشند. محاسبه ی ظرفیت الکتریکی و مقاومت الکتریکی در ابتدای فصل و دو روش مهم در حل مسائل الکترومغناطیس یعنی روش تصاویر و حل معادلات لاپلاس در بخش های بعدی فصل مطرح شده است. در آخر نیز جریان الکتریکی و شرایط مرزی جریان الکتریکی و مطالب مرتبط بیان شده است.

فصل چهارم در ارتباط با میدان مغناطیسی ثابت می باشد. در این فصل قوانین بیوساوار و آمپر بیان می شوند. توجه کنید که قانون بیوساوار برای میدان های مغناطیسی مانند قانون کولمب برای میدان های الکتریکی و قانون آمپر برای میدان های مغناطیسی نیز مانند قانون گاوس برای میدان های الکتریکی می باشد.

فصل پنجم سایر مباحث مرتبط با میدان مغناطیسی مطرح می گردد. مفاهیمی مانند گشتاور مغناطیسی، بردار پلاریزاسیون مغناطیسی، القای متقابل و شرایط مرزی در میدان های مغناطیسی.

فصل ششم عمدتاً به ارائه ی مباحث مداری از مدارهای الکتریکی و مغناطیسی می پردازد. در این فصل همچنین معادلات ماسو مطرح می گردد.

در هر فصل متناسب با محتوای آن، تعداد متناسبی تمرین حل شده وجود دارد که در خلال همین تمرین ها مفاهیم زیادی تبیین گردیده است. افزون بر آن، در پایان هر فصل تعدادی مسأله برای تمرین بیشتر گنجانده شده است.