

الحمد لله  
الرحمن الرحيم





انتشارات دانشگاه تبریز

# تحلیل مدارهای مغناطیسی و مبدل‌های الکترومکانیکی

تألیف

**دکتر محمدرضا فیضی**

استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

انتشارات دانشگاه تبریز

تبریز - ۱۴۰۲

سرشناسه	: فیضی، محمدرضا، ۱۳۳۱ -
عنوان و نام پدیدآور	: تحلیل مدارهای مغناطیسی و مبدل‌های الکترومکانیکی / تألیف محمدرضا فیضی؛ ویراستار علمی: سجاد توحیدی
وضعیت ویراست	: [ویراست ۱].
مشخصات نشر	: تبریز: دانشگاه تبریز، انتشارات، ۱۴۰۲.
مشخصات ظاهری	: ۴۳۴ص: مصور، جدول، نمودار.
فروست	: انتشارات دانشگاه تبریز؛ ۸۳۱.
شابک	: ۰۰-۳۷-۷۷۱۱-۶۲۲-۹۷۸: ۲۰۵۰۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: کتاب حاضر با عنوان "ماشین‌های الکتریکی: بخش اول تحلیل مدارهای مغناطیسی و مبدل‌های الکترومکانیکی" توسط انتشارات نیاز دانش در سال ۱۳۹۹ منتشر شده است.
یادداشت	: واژه‌نامه.
یادداشت	: کتابنامه: ص. [۴۲۹].
یادداشت	: نمایه.
عنوان دیگر	: ماشین‌های الکتریکی: بخش اول تحلیل مدارهای مغناطیسی و مبدل‌های الکترومکانیکی.
موضوع	: مدارهای مغناطیسی Magnetic circuits مدارهای مغناطیسی - مسائل، تمرین‌ها و غیره (عالی) Magnetic circuits – Problems exercises, etc. (Higher)
شناسه افزوده	: دانشگاه تبریز. انتشارات
رده‌بندی کنگره	: TK۴۵۴
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۱۹۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۹۱۵۶۵۰۸
اطلاعات رکورد کتابشناسی: فیپا	



### تحلیل مدارهای مغناطیسی و مبدل‌های الکترومکانیکی

تألیف	: دکتر محمدرضا فیضی
ویراستار علمی	: دکتر سجاد توحیدی
ناشر و فروست	: انتشارات دانشگاه تبریز، ۸۳۱
تاریخ و نوبت چاپ	: ۱۴۰۲-اول
شمارگان	: ۵۰۰ نسخه
شابک	: ۰۰-۳۷-۷۷۱۱-۶۲۲-۹۷۸
قیمت	: ۲۰۵۰۰۰۰ ریال
طراح جلد	: سروین آقازاده، محمدرضا فیضی
سایت	: <a href="http://pprs.tabrizu.ac.ir">http://pprs.tabrizu.ac.ir</a>
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	: اداره چاپ دانشگاه تبریز

این اثر مشمول قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است. هر شخص حقیقی یا حقوقی که تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر منتشر، پخش، عرضه، تکثیر یا تجدید چاپ نماید مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

نشانی: تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز- تلفن: ۰۴۱۳۳۹۲۶۵۵ و ۰۴۱۳۳۳۹۵۰۰۱  
 شماره: ۰۴۱۳۳۳۹۴۱۱۹ آدرس پست الکترونیکی: [publication@tabrizu.ac.ir](mailto:publication@tabrizu.ac.ir)

## تقدیر و تشکر

کلیه کارهای تدوین، ترسیم شکل ها و ویرایش این کتاب، و در نهایت صفحه آرایی آن توسط این جانب و در خارج از اوقات اشتغال رسمی انجام شد و علّامش از سه سال به طول انجامید. در نتیجه، طی این مدت قسمت زیادی از اوقات فراغت خود را، که متعلق به خانواده ام بود، در پشت میز کار یا کامپیوتر گذراندم. لذا، ضمن تشکر از همسر عزیزم مهنا، بابت صبر و حوصله‌ای که به خرج دادند، این کتاب را صمیمانه به ایشان تقدیم می‌دارم.

محمدرضا فیضی



## پیشگفتار

مبدل‌های الکترومکانیکی، مانند انواع عملگرها و ماشین‌های الکتریکی، نیروی محرکه صنعت امروز و نیز اساس کار اتوماسیون صنعتی هستند و استفاده بهینه از این مبدل‌ها مستلزم درک اصول کار آنها است. باوجوداین، اکثر قریب به اتفاق کتاب‌های متعددی که امروزه در زمینه ماشین‌های الکتریکی به زبان‌های مختلف منتشر شده‌است، بخش محدودی از کتاب را به این موضوع اختصاص داده‌اند؛ و یا اصلاً بحثی از آن به میان نیاورده‌اند. این در حالی است که در مورد انواع ماشین‌های الکتریکی مرسوم، از جمله ماشین‌های DC، ماشین‌های القایی و ماشین‌های سنکرون، کتاب‌های متعدد چاپ و منتشر شده است که ویژگی‌های هر کدام از آنها، از مرحله ساختمان تا طراحی، و نیز تحلیل آنها در شرایط ماندگار و گذرا، بسیار موشکافانه مورد بحث قرار گرفته‌است.

مسئله فوق، این جانب را بر آن داشت که پس از چهل سال تجربه تدریس و تحقیق در زمینه انواع مبدل‌های الکترومکانیکی و ماشین‌های الکتریکی، یک جلد کتاب مجزا را، که به‌طور اختصاصی در مورد تحلیل مدارهای مغناطیسی و تبدیل الکترومکانیکی بحث می‌کند، تألیف نمایم. در این کتاب، فرض بر این نهاده شده است که خوانندگان آن، در کنار برخورداری از اطلاعات پایه ریاضی، با چند اصل و قانون فیزیک، از جمله اصل بقای انرژی، قوانین ولتاژ<sup>۱</sup> و جریان<sup>۲</sup> کیرشهوف و نیز قوانین فارادی و آمپر، آشنایی کافی دارند.

کتاب حاضر شامل شش فصل است. در فصل اول مقدمات مربوط به پارامترهای میدان مغناطیسی بحث شده و آمادگی لازم برای ورود به مباحث مدارهای مغناطیسی با تحریک DC، که در فصل دوم آورده شده‌است، را فراهم می‌سازد. فصل سوم ادامه فصل قبلی است و در آن، مدارهای مغناطیسی با تحریک AC به همراه مدارهای تزویج‌شده مغناطیسی و نیز تلفات هسته مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت، فصل‌های چهارم تا ششم از مقدمات محاسبه انرژی در میدان مغناطیسی تا محاسبات مربوط به نیرو و گشتاور در مبدل‌های الکترومکانیکی را به‌طور مشروح پوشش می‌دهد. در فصل‌های اشاره‌شده، بالغ‌بر هفتاد مثال کلیدی حل‌شده مرتبط با هر مبحث گنجانده شده‌است و علاوه بر آن، تعدادی تمرین در متن هر فصل و به تعداد کافی مسئله تشریحی در انتهای آن قرار داده شده‌است. به‌دنبال فصول اشاره شده، تعداد شصت تست چهارگزینه‌ای به‌صورت جداگانه به همراه کلید آنها آورده شده‌است که می‌تواند تمرین خوبی جهت افزایش آمادگی دانشجویان برای آزمون‌های سراسری کارشناسی ارشد باشد. یادآوری می‌شود که بیش از ۹۵٪ مثال‌ها، مسائل تشریحی و تست‌های چهارگزینه‌ای داده‌شده در

---

1. KVL

2. KCL

این کتاب توسط شخص مؤلف طراحی شده و تعدادی از آن‌ها، بالأخص تست‌های چهارگزینه‌ای، در آزمون‌های مختلف ورودی دانشگاه‌ها، از جمله آزمون‌های سراسری کارشناسی ارشد در بیست‌وپنج سال اخیر، مورد استفاده قرار گرفته‌است.

مباحث مطرح‌شده در این کتاب از نظر سرفصل، تقریباً نیمی از سرفصل‌های فعلی درس ماشین‌های الکتریکی یک دوره کارشناسی را شامل می‌شود، ولی حجم مطالب به مراتب بیش از آن است که در نصف یک نیمسال تحصیلی به‌طور کامل قابل تدریس باشد و در نتیجه، استاد درس به سلیقه خود ممکن است قسمت‌هایی از مطالب را به‌صورت خلاصه‌تر از آنچه در این کتاب بیان شده‌است، تدریس نماید. به‌علاوه، با توجه به عمق مطالب، این کتاب درصد بالایی از فصل مرتبط با تبدیل انرژی در تئوری جامع ماشین‌های الکتریکی دوره کارشناسی ارشد را نیز پوشش می‌دهد.

روش بیان مطالب و مثال‌های حل‌شده متعدد به نحوی تنظیم شده‌است که یک فرد علاقه‌مند با اطلاعات اولیه لازم می‌تواند به‌صورت خودآموز مطالب کتاب را فراگیرد. به‌علاوه، چند مثال نمونه با استفاده از برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB آورده شده است و خوانندگان علاقه‌مند و آشنا به این نرم‌افزار یا هر نرم‌افزار مشابه می‌توانند اغلب مثال‌ها و مسائل تشریحی انتهای فصل‌ها را با استفاده از آن‌ها حل نمایند. یادآوری می‌شود که کدهای پیشنهادی الزاماً بهترین نیستند و برحسب سلیقه و مهارت افراد ممکن است تغییر کنند.

این کتاب، علاوه بر یک کتاب درسی، می‌تواند به‌عنوان یک مرجع مناسب برای آمادگی آزمون ورودی کارشناسی ارشد و بالأخص المپیاد دانشجویی مورد استفاده قرار گیرد.

از همکار محترم جناب آقای دکتر سجاد توحیدی، که نقش به‌سزایی در ویرایش علمی و نگارشی این کتاب داشتند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

علیرغم آنکه این‌جانب نهایت سعی خود را در بیان هرچه روشن‌تر مطالب به‌کاربرده‌ام، طبعاً کار حاضر را بدون نقص نمی‌دانم و از خوانندگان این کتاب تقاضا دارم هرگونه اشتباه تایپی، نارسایی مطالب بیان‌شده و یا هرگونه پیشنهاد را که می‌تواند در جهت بهبود این کتاب باشد، به نحو مقتضی، از جمله ایمیل [feyzi@tabrizu.ac.ir](mailto:feyzi@tabrizu.ac.ir)، به این‌جانب اطلاع دهند تا در ویرایش‌های بعدی اعمال شود.

دکتر محمدرضا فیضی

استاد دانشگاه تبریز

دی‌ماه ۱۳۹۸



## مقدمه ویرایش اول

به فاصله کمی بعد از اولین چاپ این کتاب کلاس‌های درس به دلیل فراگیرشدن کرونا به حالت مجازی درآمد. در همین راستا، درس ماشین‌های الکتریکی ۱ توسط اینجانب به صورت مجازی تدریس شد و فایل‌های ویدیویی ضبط شده آنها، همراه با پیشرفت کلاس‌ها، در یک گروه عمومی تلگرام تحت عنوان ”ماشین‌های الکتریکی ۱ دکتر فیضی“ و با لینک [t.me/Elec\\_machine1](https://t.me/Elec_machine1) قرار داده شد و اگر مشکل غیر منتظره‌ای پیش نیاید، این گروه حفظ خواهد شد. در طول نزدیک به دو سال، که از چاپ اول آن سپری شده است، از طرف استفاده کنندگان کتاب درخواست‌های متعدد برای قرار دادن حل تشریحی تست‌های ارایه شده دریافت کردم. لذا، در این ویرایش از کتاب، یک فصل جدید به آن اختصاص داده شد و حل تشریحی تمام ۶۰ تست داده شده در آن گنجانده شد. به علاوه، چند اشتباه تایپی مشاهده شده برطرف گردید.

از بازخوردها و راهنمایی‌های کلیه همکاران محترم و دانشجویان عزیزم، که در بهبود این ویرایش نقش داشت، قدردانی می‌کنم و امیدوارم در آینده نیز از این لطف آنان بهره‌مند شوم. بدیهی است این ویرایش هم نمی‌تواند خالی از نقص باشد. لذا، از خوانندگان کتاب درخواست می‌کنم نقطه نظرهای انتقادی و پیشنهادات سازنده خود را از طریق یکی از ایمیل‌های [feyzi@tabrizu.ac.ir](mailto:feyzi@tabrizu.ac.ir) یا [m.reza.feyzi@gmail.com](mailto:m.reza.feyzi@gmail.com) و یا از طریق ارسال پیام به خودم یا گروه تلگرام گفته شده اعلام فرمایند تا در چاپ‌های بعد مورد استفاده قرار گیرد.

دکتر محمدرضا فیضی

شهریور ۱۴۰۲



## فهرست

عنوان	شماره صفحه
فصل ۱: مواد و مدارهای مغناطیسی	۱
مقدمه	۱
۱-۱ چند نمونه ساده از مبدل‌های الکترومکانیکی	۲
۱-۱-۱ تبدیل الکترومکانیکی در میدان الکتریکی	۲
۱-۱-۲ تبدیل الکترومکانیکی در میدان مغناطیسی	۴
۲-۱ مروری بر پارامترهای یک میدان مغناطیسی	۵
۳-۱ یادآوری چند تعریف و پارامتر میدان‌های مغناطیسی	۶
۱-۳-۱ شدت میدان مغناطیسی	۶
۲-۳-۱ اندوکسیون مغناطیسی	۸
۳-۳-۱ شار مغناطیسی	۹
۴-۳-۱ میدان مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت	۱۰
۵-۳-۱ مقدار متوسط چگالی شار	۱۳
۴-۱ خواص مغناطیسی مواد	۱۴
مسائل فصل ۱	۲۰
فصل ۲: مدارهای مغناطیسی با تحریک DC	۲۳
مقدمه	۲۳
۱-۲ مدار مغناطیسی	۲۳
۱-۱-۲ مدار مغناطیسی ساده	۲۶
۲-۱-۲ مدار مغناطیسی واقعی	۲۸
۳-۱-۲ مدار الکتریکی معادل یک مدار مغناطیسی	۳۶
۴-۱-۲ مدار مغناطیسی با فاصله هوایی	۳۹
۵-۱-۲ پدیده نشت شار در مدارهای مغناطیسی	۴۴
۶-۱-۲ پدیده پراکندگی یا شکستگی شار در فواصل هوایی	۴۷
۲-۲ مشخصه مغناطیسی مواد فرومغناطیسی	۴۹
۱-۲-۲ مشخصه خطی	۵۲
۲-۲-۲ مشخصه غیرخطی	۵۳

۶۵.....	۳-۲-۲ پدیده هیستریزیس.....
۶۹.....	۴-۲-۲ فولاد الکتریکی.....
۷۱.....	مسائل فصل ۲.....
۸۱.....	فصل ۳: مدارهای مغناطیسی با تحریک AC.....
۸۱.....	مقدمه.....
۸۱.....	۱-۳ سیم‌پیچ تغذیه‌شده از منبع ولتاژ سینوسی.....
۸۷.....	۱-۱-۳ بررسی شکل موج جریان در مدار مغناطیسی غیرخطی.....
۹۸.....	۲-۳ شار پیوندی یک سیم‌پیچ.....
۱۰۱.....	۳-۳ اندوکتانس یا ضریب خودالقایی یک سیم‌پیچ.....
۱۰۴.....	۱-۳-۳ استخراج مشخصه $\lambda(i)$ یک سیم‌پیچ.....
۱۰۷.....	۲-۳-۳ استخراج اندوکتانس با استفاده از مشخصه‌های $\lambda(i)$ .....
۱۱۰.....	۳-۳-۳ اندوکتانس تفاضلی.....
۱۱۴.....	۴-۳ سیم‌پیچ‌های کوپله شده مغناطیسی.....
۱۱۶.....	۱-۴-۳ تعریف اندوکتانس خودی و متقابل.....
۱۲۳.....	۵-۳ مقدمه‌ای بر ترانسفورماتور.....
۱۲۳.....	۱-۵-۳ اصول کار.....
۱۲۵.....	۲-۵-۳ ترانسفورماتور در حالت بی‌باری.....
۱۲۶.....	۳-۵-۳ چگونگی انتقال توان توسط عمل ترانسفورماتور.....
۱۲۸.....	۶-۳ تلفات هسته آهنی در میدان متغیر با زمان.....
۱۲۸.....	۱-۶-۳ تلفات فوکو.....
۱۳۰.....	۲-۶-۳ محاسبه تلفات فوکو در یک ورقه هادی.....
۱۳۷.....	۳-۶-۳ تلفات هیستریزیس.....
۱۴۰.....	۴-۶-۳ تلفات آهن.....
۱۴۸.....	مسائل فصل ۳.....
۱۶۱.....	فصل ۴: اصول تبدیل الکترومکانیکی.....
۱۶۱.....	مقدمه.....
۱۶۱.....	۱-۴ نیرو و گشتاور در میدان مغناطیسی.....
۱۶۱.....	۱-۱-۴ نیروی وارد بر محیط حامل جریان.....
۱۶۴.....	۲-۱-۴ نیروی وارد بر بدنه ماده مغناطیسی غیرحامل جریان.....

۱۶۸	۲-۴ مبدل‌های الکترومکانیکی.....
۱۷۱	۳-۴ معادله تعادل انرژی در یک مبدل الکترومکانیکی در حالت کلی.....
۱۷۴	۱-۳-۴ معادله حالت یک سیستم.....
۱۷۵	۲-۳-۴ مکانیزم تبدیل انرژی در میدان مغناطیسی.....
۱۷۷	۴-۴ محاسبه انرژی میدان مغناطیسی.....
۱۸۰	۱-۴-۴ انرژی ذخیره‌شده در میدان با مدار مغناطیسی خطی.....
۱۸۴	۲-۴-۴ انرژی در میدان با مدار مغناطیسی غیرخطی.....
۱۹۰	۵-۴ چگالی حجمی انرژی ذخیره‌شده در یک میدان.....
۱۹۹	مسائل فصل ۴.....
۲۰۵	فصل ۵: نیرو و گشتاور در مبدل‌های الکترومکانیکی یک تحریکه.....
۲۰۵	مقدمه.....
۲۰۵	۱-۵ محاسبه نیرو در مبدل‌های یک تحریکه.....
۲۱۰	۲-۵ محاسبه گشتاور.....
۲۱۳	۳-۵ استفاده از تابع کوانرژی برای محاسبه نیرو یا گشتاور.....
۲۱۵	۱-۳-۵ محاسبه کوانرژی.....
۲۱۹	۴-۵ محاسبه چگالی حجمی کوانرژی در یک میدان مغناطیسی.....
۲۲۲	۵-۵ محاسبه نیرو در مبدل با مدار مغناطیسی غیرخطی.....
۲۲۴	۶-۵ روش کار مجازی.....
۲۳۲	۷-۵ مقدار متوسط نیرو.....
۲۳۳	۱-۷-۵ مقدار متوسط مکانی نیرو.....
۲۳۸	۲-۷-۵ مقدار متوسط زمانی نیرو.....
۲۴۴	۸-۵ بررسی رفتار یک مبدل الکترومکانیکی با تغذیه AC.....
۲۴۹	۹-۵ نیروی محرکه القاشده در سیم‌پیچ یک مبدل الکترومکانیکی.....
۲۵۲	۱۰-۵ معادله دینامیکی یک مبدل الکترومکانیکی.....
۲۵۶	۱-۱۰-۵ تعادل پایدار و ناپایدار در یک مبدل الکترومکانیکی.....
۲۵۹	۱۱-۵ چند مثال حل‌شده تکمیلی.....
۲۷۱	مسائل فصل ۵.....
۲۷۹	فصل ۶: مبدل‌های الکترومکانیکی چندتحریکه.....
۲۷۹	مقدمه.....

۲۸۰	۱-۶ تحلیل مبدل‌های چندتحریکه
۲۸۰	۱-۱-۶ تعادل انرژی در سیستم‌های چندتحریکه
۲۸۱	۲-۱-۶ محاسبه نیرو و گشتاور
۲۸۲	۳-۱-۶ محاسبه انرژی در یک سیستم چندتحریکه
۲۸۶	۴-۱-۶ معادله انرژی در یک سیستم دوتحریکه با مدار مغناطیسی خطی
۲۸۶	۵-۱-۶ معادله نیرو و گشتاور در یک مبدل دوتحریکه با مدار مغناطیسی خطی
۲۸۸	۲-۶ استفاده از تابع کوانرژی برای محاسبه نیرو و گشتاور
۲۸۹	۱-۲-۶ محاسبه تابع کوانرژی
۲۹۱	۲-۲-۶ بررسی یک سیستم چندتحریکه با مدار مغناطیسی خطی با استفاده از تابع کوانرژی
۲۹۳	۳-۶ تحلیل مبدل الکترومکانیکی با تغییر مکان زاویه‌ای
۲۹۷	۱-۳-۶ مفاهیم گشتاور رلوکتانسی و تقابلی
۳۰۰	۲-۳-۶ بررسی رفتار مبدل دوتحریکه با تغییر مکان زاویه‌ای با تحریک DC
۳۰۹	۳-۳-۶ بررسی اثر ساختار هندسی مبدل بر روی مؤلفه‌های گشتاور
۳۱۲	۴-۳-۶ بررسی رفتار مبدل با تحریک متغیر با زمان
۳۱۴	مسائل فصل ۶
۳۱۸	فصل ۷: نمونه سؤالات تستی چهارگزینه‌ای
۳۴۵	کلید سؤالات تستی چهارگزینه‌ای
۳۴۷	فصل ۸: حل تشریحی تست‌های کلیدی فصل ۷
۴۱۵	ضمیمه الف: پاسخ دینامیکی سیستم جرم-فنر-دمپر به یک ورودی متغیر با زمان
۴۱۵	مقدمه
۴۱۵	الف-۱ سیستم مکانیکی جرم-فنر-دمپر با یک درجه آزادی
۴۱۸	الف-۱-۱ پاسخ عمومی سیستم
۴۲۰	الف-۱-۲ پاسخ خصوصی سیستم
۴۲۶	الف-۲ تعریف تکانه یا اندازه حرکت
۴۲۹	مراجع
۴۳۱	واژه‌نامه
۴۳۳	فهرست الفبایی