

مفاهیم و تحلیل مدارهای الکتریکی

محمد جوادیان صراف

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

نشر علمی و دانشگاهی دانشگاه آزاد اسلامی

انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۱۴۰۰

سخن ناشر

دیرگاهی است که ایرانیان، به‌درستی و روا، به پیشینه علمی، فرهنگی و تمدنی خویش می‌بالند؛ سابقه‌ای درخشان که در میان مردمان جهان کمتر مشابه و همتایی دارد. تاریخ پرفرازونشیب ایران روایتگر رویدادهایی است که تندباد مصائب بی‌وقفه بر پیکر خاک مقدس این کهن‌بوم تازیانه می‌زد، اما دلیرمردان و شیرزنان این خاک از پایمردی و پایداری در مسیر تحقق آرمان‌های تمدنی و فرهنگی اسلام و ایران دست نکشیدند و با نیروی فکر و اندیشه در راه تکامل و ترقی ایران اسلامی گام برداشتند. گاه شداید روزگار از پایشان می‌انداخت، اما دگر بار یا خود به همت و ثبات رأی برمی‌خاستند یا بیرق فرهنگ و تمدن اسلام و ایران را به تالی خویش می‌سپردند.

تلاش‌ها و جان‌فشانی‌ها سرانجام در تحقق آرمان بلند ایرانیان، یعنی استقلال و آزادی، در برقراری نظام مقدس جمهوری اسلامی ایران به‌بار نشست و آغازی شد بر راهی که ایرانیان به پیشوایی ائمه معصوم^(علیهم‌السلام) و هدایت عالمانه بنیان‌گذار نظام مقدس جمهوری اسلامی، حضرت امام خمینی^(ره)، و رهبر معظم انقلاب اسلامی، حضرت آیت‌الله خامنه‌ای^(دامت‌طوله)، در احیای تمدن بزرگ اسلامی ایران در پیش گرفتند.

از همان آغازین سال‌های برقراری نظام جمهوری اسلامی در ایران، تدبیر و تلاش به‌منظور تحقق بخشی از اهداف علمی و فرهنگی انقلاب برعهده دانشگاه نوپای آزاد اسلامی قرار گرفت و اکنون پس از گذشت بیش از چهار دهه، جامعه علمی کشور هم‌چنان از برکات خدمات این دانشگاه، به عنوان بزرگترین دانشگاه حضوری جهان، بهره‌مند است.

بخشی از خدمات علمی دانشگاه آزاد اسلامی در حوزه نشر علمی و دانشگاهی بوده است و به جرت می‌توان گفت سابقه ثبت‌شده دانشگاه آزاد اسلامی در نشر علمی و دانشگاهی، در منظر جهانی هم، کم‌نظیر و حیرت‌آور است. چاپ و نشر کتاب در دانشگاه آزاد اسلامی از همان بدو تأسیس این دانشگاه با مشارکت فعال و پویای واحدهای دانشگاهی و با هدف پاسخگویی به نیاز علمی استادان و دانشجویان دانشگاه آغاز شد و در سال ۱۳۶۸، چاپخانه‌ای نیز به منظور چاپ آثار گسترده دانشگاه افتتاح گردید.

هم‌اکنون، نشر علمی و دانشگاهی دانشگاه آزاد اسلامی با چاپ و انتشار بیش از ۱۰ هزار عنوان کتاب علمی و دانشگاهی و تنوع موضوعی بسیار گسترده و بی‌نظیر و دارا بودن بیش از ۵۰ ناشر فعال دارای پروانه نشر از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی یکی از بزرگ‌ترین و فعال‌ترین ناشران دانشگاهی کشور است و انتشار بیش از ۵۰۰ عنوان کتاب جدید در سال گواه این مطلب است.

امید است آنچه به قلم نویسندگان و اندیشه‌ورزان دانشگاه آزاد اسلامی فراهم آمده و به کوشش نشر علمی و دانشگاهی این دانشگاه به پیشگاه و منظر فخیم و فرهیخته ایرانیان تقدیم می‌شود گامی مؤثر باشد در توسعه علمی، فناوریانه و فرهنگی کشور، و سببی باشد برای تقویت هویت ملی، اعتمادبه‌نفس علمی، و همت بیشتر برای ادامه راه پیشینیان در پیشرفت دانش و فرهنگ، و احیای تمدن بزرگ شایسته ایرانیان، و نیز آشنایی مردمان دیگر نقاط جهان با ذخایر عظیم دانش که در ایران اسلامی تولید و عرضه می‌گردد.

مجموعه نشر علمی و دانشگاهی دانشگاه آزاد اسلامی صمیمانه چشم دارد که این کار سترگ مورد پذیرش جامعه علمی ایران و جهان قرار گیرد و خوانندگان خادمان خود در این مجموعه را از نقد عالمانه و نیز دعای خیر بی‌نصیب نگذارند.

فهرست مطالب

۱	فهرست مطالب
۹	پیشگفتار مؤلف
۱۳	فصل ۱ مقدمه‌ای بر فیزیک الکتریسته
۱۵	۱.۱ مقدمه
۱۵	۲.۱ بار الکتریکی
۱۶	۳.۱ میدان الکتریکی
۱۸	۴.۱ پتانسیل الکتریکی
۲۴	۵.۱ جریان الکتریکی
۲۵	۱.۵.۱ انواع جریان الکتریکی
۲۷	۶.۱ انرژی و توان الکتریکی
۲۸	۷.۱ خلاصه
۲۹	فصل ۲ تحلیل مدارهای الکتریکی
۳۱	۱.۲ مقدمه
۳۱	۲.۲ عنصر الکتریکی
۳۲	۱.۲.۲ عنصر الکتریکی دوسر
۳۴	۳.۲ مشخصات مدار الکتریکی

۳۵.....	۱.۳.۲ رابطه بین مشخصات مدار.....
۳۷.....	۲.۳.۲ مش خارجی.....
۳۸.....	۴.۲ روش تحلیل کلی مدارهای الکتریکی.....
۵۱.....	۵.۲ خلاصه.....
۵۲.....	۶.۲ مسائل.....
۵۵.....	فصل ۳ عناصر الکتریکی قسمت اول.....
۵۷.....	۱.۳ مقدمه.....
۵۷.....	۲.۳ مقاومت الکتریکی.....
۵۸.....	۱.۲.۳ تعریف مقاومت الکتریکی دو سر.....
۵۹.....	۲.۲.۳ مقاومت خطی و غیرخطی.....
۶۹.....	۳.۲.۳ مقاومت های دوطرفه و غیردوطرفه.....
۷۰.....	۴.۲.۳ مقاومت های تغییرناپذیر و تغییرپذیر با زمان.....
۷۰.....	۵.۲.۳ مقاومت کنترل شده با ولتاژ یا جریان یا هردو.....
۷۱.....	۶.۲.۳ مقاومت پسیو و اکتیو.....
۷۲.....	۳.۳ انواع مقاومت های فیزیکی.....
۷۲.....	۱.۳.۳ مقاومت سیمی.....
۷۳.....	۲.۳.۳ مقاومت فیوژی.....
۷۳.....	۳.۳.۳ مقاومت ترکیب کربنی.....
۷۳.....	۴.۳.۳ مقاومت لایه کربنی.....
۷۴.....	۵.۳.۳ مقاومت لایه فلزی.....
۷۵.....	۶.۳.۳ پتانسیومترها.....
۷۶.....	۴.۳ منابع.....
۷۷.....	۱.۴.۳ تقسیم بندی منابع الکتریکی از دید نحوه تحویل انرژی به مدار.....
۸۳.....	۲.۴.۳ تقسیم بندی منابع براساس متغیرهای مدار.....
۹۱.....	۳.۴.۳ تقسیم بندی منابع از نظر شکل موج مقدار آنها.....
۱۱۱.....	۵.۳ خلاصه.....

۱۱۲.....	۶.۳ مسائل.....
۱۱۷.....	فصل ۴ روش تحلیل گره و مش.....
۱۱۹.....	۱.۴ مقدمه.....
۱۲۰.....	۲.۴ روش تحلیل گره.....
۱۲۰.....	۱.۲.۴ استنتاج روش تحلیل گره از روش تحلیل کلی.....
۱۲۴.....	۲.۲.۴ نوشتن معادله‌های تحلیل گره به روش مستقیم.....
۱۲۷.....	۳.۲.۴ آبرگره.....
۱۳۶.....	۳.۴ روش تحلیل مش.....
۱۳۹.....	۱.۳.۴ استنتاج روش تحلیل مش از روش تحلیل کلی.....
۱۴۴.....	۲.۳.۴ نوشتن معادله‌های تحلیل مش بطور مستقیم.....
۱۴۷.....	۳.۳.۴ اثر مش.....
۱۵۷.....	۴.۴ خلاصه.....
۱۵۸.....	۵.۴ مسائل.....
۱۶۵.....	فصل ۵ قضایای شبکه.....
۱۶۷.....	۱.۵ مقدمه.....
۱۶۷.....	۲.۵ قضیه جمع آثار.....
۱۶۷.....	۱.۲.۵ تعریف شبکه خطی.....
۱۶۹.....	۲.۲.۵ روش جمع آثار در مدارهای خطی.....
۱۷۱.....	۳.۵ معادل‌سازی.....
۱۷۵.....	۱.۳.۵ معادل‌سازی مدار مقاومتی.....
۱۷۸.....	۲.۳.۵ معادل‌سازی مدارهای شامل منبع ناپسته و مقاومت‌های خطی.....
۱۸۰.....	۴.۵ روش‌های محاسبه مدار معادل تونن و نرتن.....
۱۸۰.....	۱.۴.۵ روش اول : رسم منحنی مشخصه.....
۱۸۱.....	۲.۴.۵ روش دوم: بدست آوردن معادله i برحسب i (روش منبع آزمون).....
۱۸۵.....	۳.۴.۵ روش سوم : محاسبه V_{OC} و I_{SC}
۱۹۱.....	۴.۴.۵ روش چهارم : استفاده از تبدیل‌های تونن - نرتن جزئی.....

۱۹۴	۵.۴.۵ روش محاسبه مقاومت معادل یک شبکه خطی
۲۰۱	۵.۵ خلاصه
۲۰۲	۶.۵ مسائل
۲۰۹	فصل ۶ عناصر الکتریکی قسمت دوم
۲۱۱	۱.۶ مقدمه
۲۱۱	۲.۶ تقویت کننده عملیاتی (Operational Amplifier)
۲۱۴	۱.۲.۶ خصوصیات الکتریکی آپ امپ ایده آل
۲۱۵	۲.۲.۶ خصوصیات الکتریکی آپ امپ غیرایده آل
۲۱۶	۳.۲.۶ تحلیل مدارهای آپ امپی
۲۲۱	۳.۶ خازن الکتریکی
۲۲۱	۱.۳.۶ روابط ولتاژ و جریان خازن
۲۲۳	۲.۳.۶ توان و انرژی در خازن
۲۲۴	۳.۳.۶ معادل سازی ترکیب های خازنی
۲۲۷	۴.۶ خازن های فیزیکی
۲۳۱	۵.۶ القاگر الکتریکی
۲۳۱	۱.۵.۶ روابط ولتاژ و جریان القاگر
۲۳۳	۲.۵.۶ توان و انرژی در القاگر
۲۳۴	۳.۵.۶ معادل سازی ترکیب ها القاگری
۲۳۵	۶.۶ دوگانگی
۲۳۶	۱.۶.۶ عناصر دوگان
۲۳۶	۲.۶.۶ مدارهای دوگان
۲۴۰	۷.۶ خلاصه
۲۴۱	۸.۶ مسائل
۲۴۹	فصل ۷ نرم افزار PSPICE
۲۵۱	۱.۷ مقدمه
۲۵۲	۲.۷ نرم افزار PSPICE

۲۵۳	۱.۲.۷ پرونده <i>CIR</i>
۲۵۷	۲.۲.۷ اجرای برنامه <i>CIR</i>
۲۵۹	۳.۷ دستورهای <i>PSPICE</i>
۲۵۹	۱.۳.۷ دستورهای تعیین نوع و محل قرار گرفتن عناصر.....
۲۶۸	۲.۳.۷ دستورهای تعیین نوع تحلیل.....
۲۷۸	۴.۷ خلاصه.....
۲۷۹	۵.۷ مسائل.....
۲۸۱	فصل ۸ مدارهای خازنی و القایی.....
۲۸۳	۱.۸ مقدمه.....
۲۸۳	۲.۸ تحلیل مدارهای جریان ثابت.....
۲۸۶	۳.۸ تحلیل مدارهای جریان متغیر.....
۲۸۸	۱.۳.۸ بدست آوردن حالت اولیه مدار.....
۲۸۸	۲.۳.۸ بدست آوردن شرط اولیه مدار.....
۲۹۵	۳.۳.۸ نوشتن معادله دیفرانسیل بر حسب متغیر مجهول.....
۲۹۸	۴.۳.۸ حل معادله دیفرانسیل.....
۳۰۰	۴.۸ خلاصه.....
۳۰۱	۵.۸ مسائل.....
۳۰۹	فصل ۹ مدارهای مرتبه اول.....
۳۱۱	۱.۹ مقدمه.....
۳۱۱	۲.۹ انواع پاسخ.....
۳۱۴	۳.۹ محاسبه پاسخ کامل مدار مرتبه اول خازنی.....
۳۲۰	۱.۳.۹ محاسبه جریان خازن.....
۳۳۰	۴.۹ محاسبه پاسخ کامل مدار مرتبه اول القایی.....
۳۳۴	۵.۹ محاسبه پاسخ ورودی صفر مدار مرتبه اول.....
۳۳۸	۶.۹ محاسبه پاسخ حالت صفر مدار مرتبه اول.....
۳۳۹	۱.۶.۹ محاسبه پاسخ پله.....

پیشگفتار مؤلف

درس مدار الکتریکی علاوه بر گرایش‌های مختلف رشته برق، چه در سطح کارشناسی و چه در سطح کاردانی، در بسیاری از رشته‌های وابسته به رشته برق مانند مهندسی پزشکی و کامپیوتر، به عنوان یک درس اصلی فراگرفته می‌شود. این درس از نظر آنکه تنها درسی است که ابزار تحلیل مدارها را در اختیار قرار می‌دهد، جایگاه خاصی در بین دروس مهندسی دارد. لذا فراگیری درست و کامل آن حایز اهمیت است. آنچه اهمیت این درس را دوچندان می‌کند این است که این درس، اولین درس مهندسی است که دانشجویان پس از گذراندن دروس پایه با آن مواجه می‌شوند. از این رو برای دانشجویان جایگاه ویژه‌ای دارد.

در این کتاب سعی شده دانشجویان علاوه بر روش‌های تحلیل، با مفاهیمی که دانستن آنها در فرآیند تحلیل مدار کمک می‌کند، آشنا شوند. به همین منظور در فصل اول مروری بر مفاهیم فیزیکی مورد استفاده در مدار انجام شده است. مفاهیمی مانند بار الکتریکی، میدان الکتریکی، پتانسیل الکتریکی، جریان الکتریک، و توان الکتریکی در این فصل یادآوری و معرفی شده‌اند. علاوه بر این مرور، با یک مفهوم اساسی بنام جهت مشاهده، که نقش اساسی در تحلیل مدار دارد، آشنا می‌شوید.

فصل دوم به معرفی عنصر الکتریکی، مشخصات مدار و یک روش تحلیل کلی اختصاص دارد. روش تحلیل کلی که در فصل دوم ارائه شده است، از این جهت حایز اهمیت است که دانشجو را با

منابع تحلیل آشنا می‌کند. منظور از منابع تحلیل، اطلاعاتی است که برای تحلیل مدار الکتریکی لازم است.

فصل سوم کتاب به معرفی مقاومت الکتریکی و منبع الکتریکی می‌پردازد. انواع مقاومت در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین منابع الکتریکی از دید ماهیت فیزیکی، متغیرهای مدار، و شکل موج مقدار منبع تقسیم‌بندی و معرفی می‌شوند.

فصل چهارم دو روش تحلیل مدار به نام‌های روش تحلیل گره و مش معرفی می‌شود. این روش‌ها که از روش تحلیل کلی استخراج می‌شوند، نسبت به روش تحلیل کلی ساده‌تر و برای محاسبه‌های دستی کارآمدتر هستند. در این فصل مثال‌های مختلفی مطرح شده که نحوه بکارگیری دو روش فوق را برای تحلیل انواع مدار الکتریکی تشریح می‌کند. مفاهیمی مانند ابر گره و ابر مش در این فصل معرفی می‌شوند.

فصل پنجم تحت عنوان قضایای شبکه، سه قضیه جمع‌آثار و تونن و نرتن را معرفی می‌کند. دانشجو در این فصل با مفهوم بسیار مهمی بنام معادل‌سازی آشنا می‌شود. از طریق معادل‌سازی می‌توان یک مدار پیچیده را با مدار ساده‌تری جایگزین نمود و به این ترتیب تحلیل مدار را ساده‌تر نمود.

فصل ششم مجموعه دیگری از عناصر الکتریکی شامل اسپایس، خازن و القاگر را معرفی کرده و خواص آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. تا قبل از آشنایی با خازن و القاگر، تحلیل مدارها منجر به حل دستگاه‌های معادله‌های جبری خطی داشت. اما بخاطر آنکه روابط ماهیت فیزیکی خازن و القاگر دیفرانسیلی یا انتگرالی هستند، تحلیل مدارهای شامل خازن و القاگر، نیازمند داشتن اطلاعاتی در زمینه معادله‌های دیفرانسیل است.

فصل هفتم به آشنایی با نرم‌افزار اسپایس اختصاص دارد. خوشبختانه همزمان با توسعه علم مهندسی برق و حجیم شدن مدارها، نرم‌افزارهایی نیز برای تحلیل آن‌ها توسعه یافته است که نرم‌افزار اسپایس یکی از بهترین نرم‌افزارها در این زمینه است. این نرم‌افزار می‌تواند علاوه بر مدارهای خطی، که بحث اصلی کتاب است، مدارهای غیرخطی را هم با سهولت تحلیل نماید.

فصل هشتم به معرفی مدارهای الکتریکی حاوی خازن و القاگر می‌پردازد. تحلیل این مدارها بخاطر روابط انتگرال-دیفرانسیلی که در ماهیت فیزیکی خازن و القاگر وجود دارد، با تحلیل مدارهای مقاومتی اندکی متفاوت است. در این فصل یک روش چهار مرحله‌ای برای تحلیل

مدارهای خازنی و القایی توسعه می‌یابد که می‌توان از آن برای محاسبه کلیه پاسخ‌های مدارهای خازنی و القایی استفاده کرد. در این فصل با مفاهیمی مانند حالت اولیه و شرط اولیه آشنا می‌شوید. همچنین روش حل معادله دیفرانسیل خطی نیز یادآوری می‌شود.

فصل نهم اختصاص به مدارهای مرتبه اول دارد. در این فصل دانشجویان با مفهوم انواع پاسخ مدارهای خطی آشنا می‌شود و با مثال‌های متنوع، روش محاسبه این پاسخ‌ها برای مدارهای مرتبه اول مطرح می‌شود. عمده این پاسخ‌ها از روش تحلیل چهار مرحله‌ای توسعه یافته در فصل هشتم بدست می‌آیند. در این فصل روش محاسبه پاسخ مدار به حالت اولیه و انواع ورودی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بویژه روش فازوری به عنوان یک روش ریاضی برای محاسبه پاسخ مدار به ورودی سینوسی معرفی می‌شود.

فصل دهم اختصاص به معرفی مفاهیم مطرح در روش تحلیل فازوری دارد. علاوه بر این، برکاربردهای این روش در مهندسی برق تأکید می‌شود. روش تحلیل فازوری یک روش تحلیل اساسی در حوزه فرکانس است که به عنوان ابزار اصلی در این حوزه در اختیار مهندسان برق است. در این فصل مفاهیم اساسی مانند تابع شبکه و پاسخ فرکانسی مطرح می‌شود. همچنین انواع توان مصرفی و نحوه محاسبه آن‌ها در این حوزه مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل یازدهم مدارهای مرتبه دوم را مورد بررسی قرار می‌دهد. هرچند روش تحلیل این مدارها مانند مدارهای مرتبه اول است، اما بخاطر وجود مفاهیمی مانند میرایی، پایداری، تشدید، و ضریب کیفیت، لازم است مدارهای مرتبه دوم بطور جداگانه مورد بررسی قرارگیرند. در این فصل روش محاسبه انواع پاسخ مدارهای مرتبه دوم مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل دوازدهم به معرفی عناصر دیگری از مدار با نام القاگرهای متقابل و ترانس ایده‌آل می‌پردازد. این عناصر که بر اساس خاصیت القای مغناطیسی عمل می‌کنند، کاربردهای بسیاری در مدارهای مخابراتی و سیستم‌های انتقال توان الکتریکی دارند.

این کتاب برای تدریس در مقطع کارشناسی و کاردانی مهندسی برق و رشته‌های وابسته مانند مهندسی پزشکی و کامپیوتر تدوین شده است. تدوین کتاب بر اساس سرفصل وزارت علوم، تحقیقات و فناوری برای درس مدارهای الکتریکی انجام شده تا امکان تدریس آن در یک ترم ۲۴ جلسه‌ای میسر باشد. علی‌رغم تلاش بسیاری که در تدوین بدون خطای آن صرف شده است، وجود

کاستی‌ها در آن نامحتمل نیست و نگارنده از دریافت تقدما و تذکرهاى متخصصین و دانشجویانی گرامی که از این کتاب استفاده می‌کنند، بسیار متشکر خواهد بود.

در پایان لازم می‌دانم از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد مشهد که در چاپ کتاب مساعدت تام نموده‌اند کمال تشکر را ابراز کنم. همچنین از زحمات مهندس مهناز خاتمی‌راد که در ویرایش و تهیه شکل‌های کتاب زحمات زیادی را متحمل شده‌است، تشکر نمایم.

محمد جوادیان صراف