

میدان‌ها و امواج الکترومغناطیس

دکتر محمد حسن نشاطی

دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد



نیاز دانش

سرشناسه	: نشاطی، محمدحسن، ۱۳۳۸
عنوان و نام پدیدآور	: میدان‌ها و امواج الکترومغناطیس / محمدحسن نشاطی
مشخصات نشر	: تهران، نیاز دانش، ۱۳۹۴
مشخصات ظاهری	: ۴۹۶ ص. مصور، جدول
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۲۱-۷
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیپا
یادداشت	: واژه‌نامه
یادداشت	: کتابنامه
موضوع	: میدان‌های الکترومغناطیس
موضوع	: امواج الکترومغناطیسی
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۴ ن ۹ م / ۶۶۵ QC
رده‌بندی دیویی	: ۵۳۰ / ۱۴۱
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۹-۳۲۸۵

نام کتاب

میدان‌ها و امواج الکترومغناطیس

مؤلف

دکتر محمد حسن نشاطی (دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد)

آماده سازی تشریح مسائل و

محمد علیجانی قادیکلانی / الیاس رحیمی / سید جواد صالحی سید موسوی

CD همراه کتاب

(دانشجویان دوره تحصیلات تکمیلی دانشگاه فردوسی مشهد)

مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ

حمیدرضا محمد شیرازی - محمد شمس

ناشر

نیاز دانش

صفحه‌آرا

واحد تولید انتشارات نیاز دانش

نوبت چاپ

اول - ۱۳۹۴

شمارگان

: ۱۰۰۰ نسخه

قیمت

: ۲۵۰۰۰۰ ریال همراه با CD

ISBN:978-600-7724-21-7

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۲۱-۷

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیه‌ی CD) از محتویات این اثر بدون اجازه کتبی ناشر ممنوع است، متخلفان به موجب بند ۵ از ماده ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۸-۶۶۴۷۸۱۰۶-۶۶۴۷۸۱۰۶-۲۱

www.Niaze-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲-۲۱۰۶۷۰۹

پیشگفتار مولف

درس میدان‌ها و امواج از دروس تخصصی رشته مهندسی برق و پیشنیاز آن درس الکترومغناطیس است. علاوه بر آن، این درس خود نیز پیشنیاز دروس مهم دیگری مانند آنتن و مایکروویو گرایش مخابرات است. آشنایی با مبانی نظریه الکترومغناطیس مبتنی بر معادلات ماکسول و شناخت نحوه انتشار امواج در محیط‌های مختلف از یک‌طرف، بررسی و تحلیل میدانی بسیاری از ادوات عملی فرکانس بالا مانند خطوط انتقال و موجبرها از طرف دیگر، اهمیت پایه‌ای ویژه‌ای را به درس میدان‌ها و امواج در برنامه درسی این رشته مهندسی برق داده است، بطوریکه امروزه بسیاری از صاحب‌نظران و اساتید این درس را برای کلیه دانشجویان مهندسی برق الزامی می‌دانند.

کتاب حاضر بر اساس سرفصل‌های تنظیم یافته شورای عالی برنامه‌ریزی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و با هدف آشنایی با نظریه الکترومغناطیس و کاربرد آن در بررسی و طراحی ادوات موجبری مایکروویو تدوین یافته است. جهت تأکید بر مبانی این نظریه و شناخت بهتر روش‌ها، هر فصل کتاب حاوی مسائل حل شده زیادی است. هم‌چنین برای سنجش یادگیری و درک بهتر، تعداد زیادی مسئله در انتهای فصل طرح شده است. با توجه به حجم زیاد روابط و فرمول‌ها، این مسائل برای تقویت درک مطالب و توسعه توانایی شخص در کاربرد آن‌ها و بررسی نکات عملی در نظر گرفته شده‌اند. بسیاری از این مسائل نکات آموزنده‌ای را مطرح می‌کنند که فرصت تمرین و درک مطالب مطرح شده در متن را فراهم آورده و صرفاً جایگزینی اعداد در روابط نیستند.

مبانی تئوری نظریه الکترومغناطیس در فصل اول کتاب با معرفی معادلات ماکسول و با تأکید بر فعالیت تجربی و آزمایشگاهی دانشمندانی مانند آمپر و فاراده آغاز می‌شود. این معادلات نقطه شروع حل مسائل الکترومغناطیس هستند که منجر به معادله موج می‌شود. ماکسول با تکیه بر ابتکار ریاضی خود، این مجموعه معادلات را هماهنگ نمود و برای حل مسائل الکترومغناطیس معرفی کرد. او نشان داد میدان‌های الکترومغناطیس به صورت موج انتشار می‌یابند و انرژی حمل می‌کنند. وی اولین شخصی بود که پیش‌بینی کرد که نور نیز حرکت موجی دارد.

فصل دوم در مورد حل معادله موج در فضای نامحدود در محیط‌های متفاوت مانند عایق و رسانا است. اگرچه فرض فضای بدون مرز و امواج صفحه‌ای یکنواخت عملاً کاربرد مهمی ندارد، اما این مطالعات اصول کلی انتشار امواج و خصوصیات موج مانند سرعت انتشار، طول موج و ثابت‌های فاز و تضعیف را معرفی می‌کند. همچنین آشنایی با قطبش امواج از سایر مطالب مهم این فصل است. فصل سوم در مورد توان قابل حمل امواج و قضیه پویتینگ است، بردار چگالی توان با واحد وات بر مترمربع که حاصل ضرب خارجی دو بردار میدان الکتریکی و مغناطیسی است معرفی می‌شود. این بردار علاوه بر اندازه توان، جهت انتشار موج را نیز مشخص می‌کند. قضیه پویتینگ برای امواج سینوسی زمانی نیز بررسی و مطالعه می‌شود.

بازتاب و انتقال امواج الکترومغناطیس بین محیط‌هایی از جنس متفاوت در مطالعه بسیاری از پدیده‌های فیزیکی اهمیت زیادی دارد. بازتاب امواج از سطح اجسام فلزی و سطح آب دریا، همچنین انتقال با تغییر جهت و یا شکست امواج، نظیر آنچه در مشورها و عدسی‌های نوری اتفاق می‌افتد، از جمله این پدیده‌ها هستند. ساده‌ترین حالت این مسائل، بازتاب و انتقال امواج صفحه‌ای یکنواخت از مرزهای صفحه‌ای است. این مطالب مباحث فصل چهارم کتاب است که با معرفی قانون اسنل برای موج بازتاب و انتقال شروع شده و همچنین پدیده‌های جالب و مهم انتقال کامل و بازتاب کامل بررسی می‌شوند.

علاوه بر اصول میدان‌های الکترومغناطیس، در این کتاب سیستم‌هایی معرفی می‌شوند که به شکلی انرژی موج را در یک ناحیه از فضا و در جهت خاص و مورد نظر کاربر متمرکز می‌کنند. این سیستم‌ها که موجبر (waveguide) نامیده می‌شوند، امواجی را بنام امواج هدایت شده (guided waves) انتشار می‌دهند که در عمل کاربرد زیادی دارند. برای ورود به این مباحث و در فصل پنجم کتاب، ابتدا معادلات اساسی موج در سیستم‌های یکنواخت معرفی و دسته‌بندی امواج به انواع TE ، TM و TEM ارائه می‌شود. در این فصل ساده‌ترین نوع موجبر، موجبر صفحه‌ای بینهایت معرفی و مشخصات انتشار امواج مختلف بررسی و روابط هر یک استخراج می‌شود. نشان داده می‌شود که محدود ساختن فضا با صفحات رسانا و انتشار موج در این نوع محیط‌ها باعث ایجاد فرکانس قطع و انتشار مدهای مختلف خواهد شد.

فصل ششم در مورد نظریه و کاربرد خطوط انتقال است. این سیستم‌های هدایت موج از دو رسانا تشکیل شده و امواج TEM را هدایت می‌کنند که مهم‌ترین نوع آن خط هم‌محور است. با بررسی روش میدانی خطوط انتقال، مدار معادل یک جزء کوچک از خطوط انتقال نیز استخراج می‌شود. آشنایی با خط انتقال به عنوان عنصر مداری و کاربرد خطوط انتقال در مدارهای تطبیق سایر مطالب این فصل است. همچنین آشنایی با مفاهیم مهمی مانند تلفات بازگشتی، تلفات تعبیه و تلفات انتقالی که در اندازه‌گیری مشخصات عناصر میکروویو اهمیت زیادی دارند، معرفی می‌شوند. با توجه به محاسبات وقت‌گیر خطوط انتقال روش تریسمی به کمک نمودار اسمیت نیز از سایر بخش‌های مهم این فصل است.

فصل هفتم و هشتم در مورد موجرهای مستطیلی و دایره‌ای است. این موجرها به‌عنوان هدایت‌کننده امواج TE و TM هستند که در سامانه‌های مایکروویو کاربرد زیادی دارند. با حل معادله موج در این ساختارها، مدهای مختلف انتشار و مشخصات هر یک از آنتن‌ها و ترتیب مدهای انتشار موجر تعیین می‌شود. هم‌چنین خصوصیات مد اصلی و توان حمل شده موجر به‌تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. فصل نهم در مورد انتشار امواج الکترومغناطیس و آشنایی با آنتن و مشخصات آن است. آشنایی با آرایه‌های ساده جهت شکل‌دهی الگوی تشعشع، معرفی خصوصیات آنتن در حالت گیرندگی و معرفی معادلات فریس در انتقال امواج الکترومغناطیس بین آنتن فرستنده و گیرنده از سایر مطالب مهم این فصل است.

اگرچه تلاش فراوانی شده است که مطلب کامل و بدون اشکال تاپی باشد، اما بدون شک دارای نواقص و کاستی‌هایی نیز هست. نگارنده از پیشنهادت اساتید، صاحب‌نظران، دانشجویان عزیز و خوانندگان محترم استقبال می‌نماید. علاقه‌مندان می‌توانند نظرات اصلاحی خود را با پست الکترونیکی به این‌جانب ارسال کنند. امیدوارم این تلاش ناچیز موجب رضای حق‌تعالی و مورد استفاده دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز قرار بگیرد.

در پایان لازم است مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشجویان گرایش مخابرات دانشگاه فردوسی مشهد که با طرح دیدگاه‌ها، ارائه نقطه نظرات و طرح سؤال در شکل‌گیری و غنای علمی این اثر نقش مؤثری داشته‌اند، ابراز نمایم. از آقای مهندس رجب محمد بگنجی فارغ‌التحصیل دوره کارشناسی ارشد که در حل مسائل و از آقای مهندس محمد علیجانی فادیکلانی دانشجوی دوره دکتری مخابرات دانشگاه فردوسی مشهد که در نمونه‌خوانی و ویراستاری ادبی همکاری داشته‌اند تشکر می‌کنم. هم‌چنین از فرزندم مهندس محمد محسن نشاطی که در تدوین کتاب همکاری مؤثری داشته، از مسئولین محترم انتشارات نیاز دانش آقایان شمس و شیرازی که مقدمات چاپ کتاب را فراهم نموده و از سرکار خانم رفیعی به جهت صفحه‌آرایی کتاب تشکر و قدردانی می‌کنم. از همسر و فرزندم الهه به جهت صبر و شکیبایی در طول تهیه این اثر سپاسگزارم.

محمد حسن نشاطی

دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد مقدس - تابستان ۹۴

neshat@ieee.org

فهرست مطالب

۳۷	۲-۱-۲ معادله موج همگن
۳۷	۳-۱-۲ معادله موج در محیط عایق
۳۸	۲-۲ امواج صفحه‌ای یکنواخت
۳۸	۱-۲-۲ موج صفحه‌ای یکنواخت در محیط عایق
۳۸	کامل
۴۰	۲-۲-۲ مؤلفه‌های میدان‌های الکترومغناطیس امواج صفحه‌ای
۴۵	۳-۲ امواج صفحه‌ای یکنواخت با تغییرات زمانی سینوسی
۴۵	۱-۳-۲ بسط روابط گول ماکسول برای میدان‌های سینوسی
۴۵	۲-۳-۲ موج صفحه‌ای یکنواخت با تغییرات زمانی سینوسی
۴۶	۳-۳-۲ انتشار موج صفحه‌ای یکنواخت در محیط‌های بدون اتلاف
۴۹	۴-۳-۲ انتشار موج صفحه‌ای یکنواخت در محیط‌های با اتلاف
۵۲	۵-۳-۲ اثر پوستی و عمق پوستی
۶۱	۴-۲ انتشار موج صفحه‌ای یکنواخت در جهت دلخواه
۶۷	۵-۲ قطبش امواج صفحه‌ای
۶۷	۱-۵-۲ قطبش خطی
۶۸	۲-۵-۲ قطبش دایره‌ای

فصل ۱	معادلات ماکسول
۱-۱	میدان‌های ساکن
۱-۱-۱	میدان الکتریکی ساکن
۲-۱-۱	میدان مغناطیسی ساکن
۲-۱	میدان‌های الکترومغناطیس
۱-۲-۱	قانون القاء فاراده
۲-۲-۱	معادله پیوستگی
۳-۲-۱	معادلات ماکسول
۴-۲-۱	جریان جابجایی
۵-۲-۱	شرایط مرزی میدان‌های الکترومغناطیس
۳-۱	میدان‌های الکترومغناطیس سینوسی
۴-۱	میدان‌های نیمه ساکن
۱-۴-۱	تقریب نیمه ساکن میدان‌های الکترومغناطیس
۲-۴-۱	محاسبات میدان‌های نیمه ساکن
فصل ۲	امواج صفحه‌ای یکنواخت الکترومغناطیس
۱-۲	معادله موج
۱-۱-۲	معادله موج غیر همگن

۳-۴	بازتاب و انتقال امواج صفحه‌ای
۱۵۰	از مرز دو ناحیه با رسانایی محدود
۱۵۲	توان تلف شده رسانا

فصل ۵ امواج الکترومغناطیس هدایت‌شده ۱۶۵

۱-۵	هدایت‌کننده‌های موج
۲-۵	معادلات اساسی موج در سیستم‌های یکنواخت
۳-۵	بسط روابط کرل ماکسول در مختصات مستطیلی
۴-۵	دسته‌بندی امواج هدایت‌شده
۱-۴-۵	امواج الکتریکی عرضی
۲-۴-۵	امواج مغناطیسی عرضی
۳-۴-۵	امواج الکترومغناطیسی عرضی
۴-۵	امواج هدایت‌شده بین دو صفحه بینهایت
۱-۴-۵	امواج TM موجبر صفحه‌ای بینهایت
۲-۴-۵	امواج TE موجبر صفحه‌ای بینهایت
۳-۴-۵	امواج TEM موجبر صفحه‌ای بینهایت
۴-۴-۵	سرعت فاز، سرعت گروه و سرعت انتقال انرژی
۵-۵	تجزیه امواج TE و TM
۶-۵	تلفات هدایت‌کننده‌های موج
۱-۶-۵	تلفات عایق بین صفحات موجبر صفحه‌ای
۲-۶-۵	تلفات صفحات رسانا موجبر صفحه‌ای

فصل ۶ نظریه خطوط انتقال ۲۰۷

۱-۶	نظریه الکترومغناطیس خطوط انتقال
۱-۱-۶	معادلات ماکسول خطوط انتقال
۲-۱-۶	ولتاژ و جریان خطوط انتقال
۳-۱-۶	میدان‌های الکترومغناطیس امواج TEM
۴-۱-۶	معادلات خطوط انتقال
۵-۱-۶	مدار معادل گسترده خط انتقال
۶-۱-۶	محاسبه عناصر مدار معادل خط انتقال
۷-۱-۶	محاسبه عناصر مدار معادل با استفاده از انرژی ذخیره شده و تلف شده خط
۲-۶	حل معادلات خطوط انتقال
۱-۲-۶	امواج ولتاژ و جریان خط بدون اتلاف
۲-۲-۶	حل معادلات خط انتقال برای تغییرات زمانی سینوسی

۳-۵-۲	قطبش بیضوی
۴-۵-۲	بررسی قطبش موج صفحه‌ای با استفاده از فازور میدان‌ها
۶-۲	سرعت فاز و سرعت گروه امواج الکترومغناطیس
۱-۶-۲	سرعت فاز
۲-۶-۲	سرعت گروه
۳-۶-۲	رابطه کلی بین سرعت فاز و سرعت گروه

فصل ۳ توان و انرژی امواج الکترومغناطیس ۸۷

۱-۳	توان بار الکتریکی در میدان‌های الکترومغناطیس
۲-۳	قضیه پوینتینگ
۱-۲-۳	منبع جریان به عنوان مصرف کننده توان
۲-۲-۳	منبع جریان به عنوان مولد میدان‌های الکترومغناطیس
۳-۲-۳	قضیه پوینتینگ برای میدان‌های ساکن
۳-۳	توان لحظه‌ای و متوسط توان امواج متناوب
۱-۳-۳	متوسط توان امواج متناوب
۲-۳-۳	قضیه پوینتینگ برای امواج سینوسی
۳-۳-۳	بردار پوینتینگ برحسب فازور میدان‌های سینوسی
۴-۳	قضیه پوینتینگ برحسب فازور میدان‌ها
۵-۳	سرعت انتقال انرژی امواج الکترومغناطیس

فصل ۴ بازتاب و انتقال امواج الکترومغناطیس ۱۱۱

۱-۴	بازتاب امواج صفحه‌ای یکنواخت از مرز دو ناحیه عایق و رسانای کامل
۱-۱-۴	تابش عمودی
۲-۱-۴	تابش مایل
۲-۴	بازتاب و انتقال امواج صفحه‌ای در مرز دو ناحیه عایق کامل
۱-۲-۴	تابش عمودی
۲-۲-۴	امپدانس موج میدان کل
۳-۲-۴	تابش عمودی بر محیط‌هایی شامل چند عایق
۴-۲-۴	تابش مایل بر مرز دو عایق کامل
۵-۲-۴	بازتاب کامل
۶-۲-۴	انتقال کامل

۳۱۷	۴-۳-۷	جریان صفحات در مُد اصلی
۳۱۸	۵-۳-۷	توان موجر مستطیلی در سایر مُدها
۳۲۲	۴-۷	تلفات موجرهای مستطیلی
۳۲۲	۱-۴-۷	تلفات عایق موجر
۳۲۲	۲-۴-۷	تلفات صفحات رسانا
۳۲۹	۵-۷	محفظه‌های تشدید مستطیلی
۳۳۰	۱-۵-۷	امواج TM محفظه تشدید مستطیلی
۳۳۱	۲-۵-۷	امواج TE محفظه تشدید مستطیلی
۳۳۲	۳-۵-۷	مُد اصلی تشدید کننده مستطیلی
۳۳۳	۶-۷	ضریب کیفیت محفظه تشدید مستطیلی
۳۳۳	۱-۶-۷	ضریب کیفیت محفظه تشدید در
۳۳۳		مُدهای TE_{10p}
۳۴۰	۶-۷	تحریک موجرها
۳۴۰	۱-۶-۷	تحریک موجر با خط هم‌محور
۳۴۳	۲-۶-۷	تحریک موجر با حلقه جریان
۳۴۴	۷-۷	تشابه موجرها و خطوط انتقال
۳۴۴	۱-۷-۷	مدار معادل خط انتقال موجر برای
۳۴۴		امواج TM
۳۴۶	۲-۷-۷	مدار معادل خط انتقال موجر برای
۳۴۶		امواج TE
۳۴۸	۸-۷	ناپوستگی در موجرها
۳۴۸	۱-۸-۷	دیافراگم‌های القایی
۳۵۰	۲-۸-۷	دیافراگم‌های خازنی
۳۵۱	۲-۸-۷	دیافراگم‌های تشدید

فصل ۸ موجرهای دایره‌ای

۳۶۱	۱-۸	معادلات اساسی موج در مختصات استوانه‌ای
۳۶۱	۱-۱-۸	بسط روابط کرل ماکسول
۳۶۳	۲-۱-۸	امواج الکتریکی و مغناطیسی عرضی
۳۶۳		در مختصات استوانه‌ای
۳۶۴	۳-۱-۸	حل معادله عددی موج در مختصات
۳۶۴		استوانه‌ای
۳۶۵	۲-۸	امواج مغناطیسی عرضی موجر استوانه‌ای
۳۶۵	۱-۲-۸	انتشار امواج TM
۳۶۸	۲-۲-۸	مؤلفه‌های میدان امواج TMmn
۳۶۸	۳-۸	امواج الکتریکی عرضی در موجر استوانه‌ای
۳۶۸	۱-۳-۸	انتشار امواج TE
۳۷۰	۲-۳-۸	مؤلفه‌های میدان امواج TEMn
۳۷۱	۳-۳-۸	ترتیب مُدهای انتشار موجر دایره‌ای

۲۲۶	۲-۲-۶	امپدانس مشخصه و ویژگی‌های آن
۲۲۷	۳-۲-۶	خط انتقال منتهی به بار ZL
۲۳۲	۴-۲-۶	نسبت موج ساکن
۲۳۳	۵-۲-۶	نمودار توزیع ولتاژ و جریان
۲۳۷	۶-۲-۶	اندازه‌گیری امپدانس بار مجهول
۲۳۹	۷-۲-۶	توان جاری خطوط انتقال
۲۴۲	۸-۲-۶	توان قابل دسترس
۲۴۵	۹-۲-۶	تلفات شبکه‌های خط انتقال
۲۴۷	۳-۶	خط انتقال به عنوان عنصر مداری
۲۴۸	۱-۳-۶	خط اتصال کوتاه
۲۴۹	۲-۳-۶	خط اتصال باز
۲۵۱	۳-۳-۶	خط ربع طول موج
۲۵۱	۴-۳-۶	خط نصف طول موج
۲۵۴	۴-۶	نمودار اسمیت
۲۵۴	۱-۴-۶	ساختار نمودار اسمیت
۲۶۵	۳-۴-۶	اندازه‌گیری بار مجهول با نمودار اسمیت
۲۶۶	۴-۴-۶	محاسبات خطوط انتقال با اتلاف
۲۶۷		نمودار اسمیت
۲۷۰	۵-۶	مدارهای تطبیق امپدانس
۲۷۱	۱-۵-۶	مدار تطبیق با قطعه فرعی سری
۲۷۵	۲-۵-۶	مدار تطبیق با قطعه فرعی موازی
۲۸۰	۳-۵-۶	مدار تطبیق با دو قطعه فرعی
۲۸۶	۴-۵-۶	مدار تطبیق با خط ربع طول موج
۲۸۶	۶-۶	تشابه انتشار موج صفحه‌ای یکتوانخت
۲۸۹		و انتشار موج خطوط انتقال

فصل ۹ موجرهای مستطیلی

۳۰۱	۱-۷	امواج مغناطیسی عرضی در موجر مستطیلی
۳۰۴	۱-۱-۷	مؤلفه‌های امواج TM موجر مستطیلی
۳۰۵	۲-۱-۷	فرکانس قطع مُدهای TM
۳۰۶	۳-۱-۷	ترتیب انتشار مُدهای TMmn
۳۰۸	۲-۷	امواج الکتریکی عرضی TE
۳۰۹	۱-۲-۷	مؤلفه‌های میدان امواج عرضی الکتریکی
۳۱۰	۲-۲-۷	ترتیب انتشار مُدهای TEMn
۳۱۲	۳-۷	مُد اصلی کار موجرهای مستطیلی
۳۱۲	۱-۳-۷	مؤلفه‌های میدان مُد اصلی
۳۱۳	۲-۳-۷	توان مُد اصلی
۳۱۶	۳-۳-۷	خطوط میدان مُد اصلی

۴-۳-۸	مُد اصلی موجبرهای دایره‌ای	۳۷۲
۴-۸	تلفات موجبرهای دایره‌ای	۳۷۶
۱-۴-۸	تلفات عایق موجبر	۳۷۶
۲-۴-۸	ضریب تلفات رسانا در مُد اصلی	۳۷۶
۳-۴-۸	ضریب تلفات رسانا در مُدهای TEMn	۳۷۷
۴-۴-۸	ضریب تلفات رسانا در مُدهای TMmn	۳۷۷
۵-۸	مُد های TE خط انتقال هم‌محور	۳۸۲
۶-۸	محفظه‌های تشدید استوانه‌ای	۳۸۴
۱-۶-۸	مُد های TMmn محفظه تشدید استوانه‌ای	۳۸۴
۲-۶-۸	مُد های TEMnp محفظه تشدید استوانه‌ای	۳۸۵
۳-۶-۸	نمودار مُدهای محفظه تشدید استوانه‌ای	۳۸۶
۷-۸	ضریب کیفیت محفظه تشدید استوانه‌ای	۳۸۸
۱-۷-۸	ضریب کیفیت مُدهای TE _{np}	۳۸۸
فصل ۹ تشعشع امواج الکترومغناطیسی		
۳۹۹		
۱-۹	معادله موج غیر همگن	۴۰۰
۱-۱-۹	توابع پتانسیل میدان‌های متغیر با زمان	۴۰۰
۲-۱-۹	حل معادله موج تابع پتانسیل برداری	۴۰۱
	مغناطیسی	۴۰۲
۲-۹	سیستم‌های ساده تشعشع	۴۰۵
۱-۲-۹	دو قطبی الکتریکی المان جریان	۴۰۵
۲-۲-۹	دو قطبی مغناطیسی کوتاه	۴۰۷
۳-۹	مشخصات آنتن‌ها	۴۰۹
۱-۳-۹	الگوی تشعشع راه دور	۴۰۹
۲-۳-۹	آنتن همه‌جهته	۴۱۲
۴-۹	بهره سمع گرایب آنتن	۴۱۲
۱-۴-۹	زاویه فضایی	۴۱۲
۲-۴-۹	چگالی توان و توان کل تشعشع یافته آنتن	۴۱۳
۳-۴-۹	شدت تشعشع	۴۱۳
۴-۴-۹	سمتگرایی آنتن	۴۱۵
۵-۴-۹	مقاومت تشعشع و مدار معادل آنتن	۴۱۷
۶-۴-۹	بهره توان و بازده تشعشع آنتن	۴۱۸
۷-۴-۹	مشخصات تشعشع دو قطبی مغناطیسی	۴۲۰
۵-۹	آنتن‌های سیمی	۴۲۳
۱-۵-۹	توزیع جریان دو قطبی خطی	۴۲۴
۲-۵-۹	اصل حاصلضرب الگوی تشعشع	۴۲۶
۳-۵-۹	میدان‌های تشعشع دو قطبی خطی	۴۲۷
۴-۵-۹	الگوی تشعشع دو قطبی خطی	۴۲۷
۵-۵-۹	دو قطبی کوتاه	۴۲۸
۶-۵-۹	دو قطبی نصف طول موج	۴۲۹
۷-۵-۹	تک قطبی ربع طول موج	۴۳۰
۸-۵-۹	طول مؤثر آنتن دو قطبی	۴۳۱
۹-۵-۹	خلاصه مشخصات آنتن‌های دو قطبی خطی	۴۳۳
۶-۹	آنتن‌های آرایه‌ای	۴۳۵
۱-۶-۹	آرایه آنتن با دو عنصر	۴۳۶
۲-۶-۹	آرایه با الگوی تشعشع عرضی	۴۴۰
۳-۶-۹	آرایه با الگوی تشعشع طولی	۴۴۱
۷-۹	آنتن‌های گیرنده	۴۴۴
۱-۷-۹	ولتاژ مدار باز آنتن گیرنده	۴۴۵
۲-۷-۹	ضریب عدم تطبیق قطبش	۴۴۵
۳-۷-۹	دهانه مؤثر آنتن گیرنده	۴۴۷
۴-۷-۹	دهانه مؤثر و سمع گرایب آنتن	۴۴۹
۵-۷-۹	دهانه مؤثر و زاویه فضایی پرتو اصلی	۴۵۱
۶-۷-۹	آنتن‌ها در لینک مخابراتی و رابطه انتقال فریس	۴۵۱
۷-۷-۹	توان مؤثر همه‌جهته یک آنتن	۴۵۲
۸-۷-۹	ولتاژ مؤثر در ورودی گیرنده و میدان	۴۵۲
	الکترونیکی آنتن	۴۵۳
۹-۷-۹	سیستم‌های مخابرات ماهواره‌ای	۴۵۴
	پیوست‌ها	۴۶۳
	واژه‌نامه انگلیسی به فارسی	۴۸۵
	واژه‌نامه فارسی به انگلیسی	۴۸۹
	نمایه	۴۹۳