

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## میدانها و امواج

تالیف:

دکتر همایون عریضی

استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

|                    |                                          |
|--------------------|------------------------------------------|
| سرشناسه            | : عریضی، همایون، ۱۳۲۱-                   |
| عنوان و پدیدآور    | : میدانها و امواج / مولف همایون عریضی.   |
| مشخصات نشر         | : تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۶. |
| مشخصات ظاهری       | : ی، ۷۱۰ ص: نمودار، مصور.                |
| شابک               | : ۹۶۴-۹۵۴-۱۶۴-۲                          |
| فهرست نویسی        | : فیبا                                   |
| یادداشت            | : کتابنامه: ص. [۷۰۹] - ۷۱۰               |
| یادداشت            | : واژه نامه                              |
| موضوع              | : میدانهای الکترومغناطیسی.               |
| موضوع              | : امواج الکترومغناطیس.                   |
| شناسه افزوده       | : دانشگاه علم و صنعت ایران               |
| رده بندی کنگره     | : ۴۴ ع ۹ م / ۶۶۵ QC                      |
| رده بندی دیویی     | : ۵۳۰/۱۴۱                                |
| شماره کتابخانه ملی | : ۱۰۵۷۷۵۴                                |

• مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - نارمک صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵

تلفن: ۷۷۲۴۰۴۲۵ - دورنویس: ۷۷۲۴۰۴۲۵

• فروشگاه شماره ۱: میدان انقلاب - خیابان شهید منیری جاوید (اردیبهشت) - پلاک ۱۸۲

تلفن: ۶۶۴۶۶۹۰۰

• پست الکترونیک: [Publication@sun.iust.ac.ir](mailto:Publication@sun.iust.ac.ir)



دانشگاه علم و صنعت ایران

نام کتاب: میدانها و امواج

تألیف: دکتر همایون عریضی

چاپ اول: ۱۳۸۶

شمارگان: ۱۰۰۰ جلد

قیمت: ۶۰۰۰۰ ریال

شماره انتشارات: ۴۷۴

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران

\* حق چاپ برای دانشگاه علم و صنعت ایران محفوظ است.

ISBN: ۹۶۴-۴۵۴-۱۶۴-۲

شابک: ۹۶۴-۴۵۴-۱۶۴-۲

## مقدمه چاپ اول

درس میدان‌ها و امواج یکی از دروس اختصاصی رشته مخابرات بوده که به عنوان پیشنیاز دروس دیگر مهندسی الکترومغناطیس تلقی می‌شود و زمینه تخصص‌های مختلفی را مانند نظریه و تکنیک میکروویو، آنتن، انتشار امواج رادیویی، نظریه امواج الکترومغناطیس و غیره فراهم می‌سازد.

بنابراین، درک مفاهیم و تسلط بر مباحثی که در این درس بیان می‌شود، برای دانشجویان مهندسی برق و مخابرات ضرورت دارد. میدان‌ها و امواج در واقع شامل مبحث الکترومغناطیس متغیر با زمان بوده و موضوع اصلی آن استنتاج و حل معادله موج تحت شرایط مختلف انتشار می‌باشد. معادله موج به صورت مختلف در رشته‌های مختلف مهندسی (مانند ارتعاش و صوت) ظاهر می‌شود، ولی حل آن در شرایط کلی پیچیده است.

در نظریه امواج الکترومغناطیس، معادله موج را برای حالات خاص ساده کرده و مبادرت به حل آن می‌نمایند. حل معادله موج در محیط‌های غیر خطی، ناهمگن و نایکسانگرد و در محورهای مختصات (و یا مستقل از محورهای مختصات) موضوع دروس نظریه امواج الکترومغناطیس پیشرفته است.

طیف مطالب و موضوعات این درس بسیار گسترده است و می‌تواند شامل انتشار امواج رادیویی در محورهای مختصات مختلف (قائم، استوانه‌ای، کروی و غیره)، انتشار در محیط‌های نایکسانگرد (پلازما، بلورها، فریت‌ها و غیره)، موجبرهای مختلف (سطوح مقطع مختلف، فیبر نوری، میکرو استریپ، خطوط نواری و غیره)، پراش، پراکندگی، حرکت ذرات باردار در میدان‌های الکترومغناطیس، نسبیت و غیره باشد. در هر حال، برای آن که حجم این متن محدود بماند و برای تدریس درس میدان‌ها و امواج مناسب داشته باشد، الزاماً موضوعات و مباحث اساسی از مراجع مختلف انتخاب و سعی شده است ارتباط مطالبی که از کتب مختلف اتخاذ شده حفظ شود.

در فصل ۱ معادلات ماکسول و شرایط مرزی که در الکتریسیته ساکن و مغناطیس ساکن به دست آمده، برای میدان‌های متغیر با زمان تعمیم داده شده و صور متغیر با زمان و فازوری آنها بیان می‌شود. در فصل ۲ معادلات موج برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و همچنین برای پتانسیل‌های برداری و عددی به دست آمده و جواب آنها مورد بحث قرار می‌گیرد. پتانسیل معوق که در مبحث تشعشع امواج از آنتن‌ها به کار می‌رود، ارائه می‌شود.

در فصل ۳ امواج صفحه‌ای تعریف شده و به عنوان جواب ساده معادله موج شرح داده می‌شود. انتشار امواج صفحه‌ای در محیط‌های مختلف، عمق نفوذ، انواع مختلف پلاریزاسیون امواج صفحه‌ای، سرعت فاز و سرعت گروه نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.

در فصل ۴ توان الکترومغناطیس، بردار پوئین تینگ و قضیه پوئین تینگ ارائه می شود.

در فصل ۵ انعکاس و انکسار امواج الکترومغناطیس صفحه‌ای از سطح فاصل بین محیط‌های مختلف (مانند دی الکتریک و هادی) شرح داده می شود. قضایای «سنل» به چند روش اثبات می شود و روابطی برای ضرایب انعکاس و انکسار، زوایای بحرانی و «بروستر» برای پلاریزاسیون‌های مختلف به دست می‌آید. انتشار امواج در محیط نامحدود (مانند فضای آزاد) موضوع فصول قبل می باشد، گرچه أحياناً گسستگی در خواص ماده محیط نیز منظور شده باشد.

انتشار امواج در محیط‌های محدود خصوصاً در موجبرها موضوع فصول بعد می باشد.

در فصل ۶ معادله موج و معادلات ماکسول در موجبرهای استوانه‌ای به عنوان یک مسئله شرائط مرزی حل شده و امواج الکترومغناطیس به مدهای  $TE$ ،  $TM$  و  $TEM$  تفکیک می شود. مشخصات انتشار امواج در موجبرها مانند ثابت انتشار، فرکانس قطع، امپدانس موج، سرعت فاز، سرعت گروه، طول موج موجبر و غیره تعریف می شود.

در فصل ۷ انتشار امواج در موجبر صفحات موازی شرح داده شده و مشخصات آن به دست می‌آید. تضعیف امواج بحث شده و ضریب تضعیف هدایتی و عایقی محاسبه می شود.

در فصل ۸ موجبر مستطیلی و موجبر مثلثی شرح داده شده و مختصری از انتشار در موجبرهای دی‌الکتریک توضیح داده می شود.

در فصل ۹ توابع بسل به اختصار شرح داده شده است و انتشار امواج در موجبرهای استوانه‌ای دایروی و موجبرهای هم محور بحث می شود.

در فصل ۱۰ حفره‌های تشدید شامل تشدید کننده‌های مستطیلی، دایروی و هم محور توضیح داده شده و ضریب کیفیت آنها محاسبه می شود. مدار معادل حفره تشدید هم محور نیز به دست می آید.

در فصل ۱۱ مختصری در مورد اپتیک هندسی، اپتیک فیزیکی و انتشار امواج در پلازما بیان می شود.

کتاب مختلفی برای تدوین این کتاب مورد استفاده قرار گرفته و فهرست مراجع در آخر کتاب درج شده است. یک واژه‌نامه انگلیسی به فارسی برای اصطلاحات و لغات مصطلح در زبان فارسی نیز درج شده است. تعدادی مثال برای توضیح مفاهیم مطروحه در متن گنجانیده شده و مسائل و تمرین‌های متعددی برای هر فصل درج شده است. هدف از این مسائل اولاً تمرین مطالب و موضوعات درس و ثانیاً بسط و تعمیم عناوین مختلف آن می باشد. بنابراین، حل این مسائل مستلزم درک صحیح مطالب و نکات درس می باشد. به خوانندگان محترم جداً توصیه می‌شود که به حل آنها مبادرت ورزند. بسیاری از مسائل در مقاطع مختلف به عنوان مسائل امتحانی به کار رفته است. مطالب مندرج در این متن بیشتر از آن است که بتوان در یک نیمسال تحصیلی مطالعه کرد. در دانشگاه علم و صنعت ایران معمولاً ۹ فصل اول را در درس میدان‌ها و امواج مطالعه می کنیم و فصول بعدی شامل تشدید کننده‌ها در درس میکروویو مطالعه می شود. کتاب حاضر به کرات به عنوان متن درسی به کار رفته و در کلاس درس آرموده شده است.

در اینجا از همکاران گرامی و دانشجویان محترمی که نظرات اصلاحی برای بهبود متن کتاب ارائه داده‌اند سپاسگزاری می‌شود. همچنین از دانشجویان گروه مخابرات آقای سیدعلیرضا محمدزاده برای بازنویسی متن و آقای محمد یوسف شیدفر برای رسم بعضی از اشکال و نیز از زحمات آقای مهندس موسی‌ئی مدیر محترم انتشارات دانشگاه که امکانات چاپ این کتاب را فراهم نموده، و همچنین کارکنان حروفچینی پویان و همه کسانی که در این راه مرا یاری نموده‌اند کمال تشکر را دارم.

مؤلف

## مقدمه چاپ دوم

هنگامی که کتاب میدانها و امواج به عنوان یک متن برای درس میدانها و امواج تالیف و چاپ شد، مبحث خطوط انتقال جزء سرفصل این درس قرار نداشت. از این رو، موضوع خطوط انتقال در متن کتاب میدانها و امواج منظور نشد. در هر حال، چند سالی است که مطالب مربوط به خطوط انتقال در درس میدانها و امواج تدریس می شود.

بنابر این، لازم است که یک فصل در زمینه خطوط انتقال به متن این کتاب برای استفاده دانشجویان محترم اضافه شود. ولی برای آنکه حجم چاپ دوم کتاب میدانها و امواج بیش از حد معقولی افزایش نیابد، فصل مربوط به " اپتیک هندسی ، اپتیک فیزیکی و انتشار امواج در پلازما " از آن حذف شده است.

در اینجا لازم است که از زحمات آقای مهندس علی رضا شریفی برای ویرایش متن چاپ دوم کتاب میدانها و امواج تشکر و قدردانی کنم.

چاپ دوم کتاب میدانها و امواج را به یاد پدر بزرگم مرحوم سید محمد علی عریضی معلم قرآن کریم و پدرم مرحوم سید حسین عریضی دبیر فرهنگ، به خوانندگان محترم تقدیم می کنم.

مؤلف

## فهرست مطالب

| صفحه | عنوان                                                                                                      |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| الف  | مقدمه چاپ اول                                                                                              |
| د    | مقدمه چاپ دوم                                                                                              |
| ۱    | فصل ۱ معادلات ماکسول و شرایط مرزی                                                                          |
| ۱    | ۱-۱ معادلات ماکسول در میدانهای ساکن                                                                        |
| ۱۶   | ۲-۱ معادلات ماکسول در میدانهای تابع زمان                                                                   |
| ۱۸   | ۳-۱ معادلات ماکسول در میدانهای الکترومغناطیس تابع هارمونیک (سینوسی) از زمان                                |
| ۱۸   | ۴-۱ شرایط مرزی در میدانهای تابع زمان                                                                       |
| ۲۱   | ۱-۴-۱ شرایط مرزی برای بردارهای عمود بر مرز                                                                 |
| ۲۵   | ۲-۴-۱ شرایط مرزی برای بردارهای مماس بر مرز                                                                 |
| ۲۶   | ۳-۴-۱ شرایط مرزی در سطح مشترک بین دو محیط خطی بدون تلفات (عایق کامل $\sigma = 0$ )                         |
| ۳۱   | ۴-۴-۱ شرایط مرزی برای فصل مشترک بین هادی کامل ( $\sigma \rightarrow \infty$ ) و عایق کامل ( $\sigma = 0$ ) |
| ۳۵   | ۵-۱ مرور کاربرد فازور                                                                                      |
| ۳۹   | ۶-۱ مسائل                                                                                                  |
| ۳۹   | فصل ۲ معادله موج                                                                                           |
| ۵۱   | ۱-۲ معادله موج برای میدانهای الکتریکی و مغناطیسی                                                           |
| ۶۲   | ۲-۲ توابع پتانسیل                                                                                          |
| ۶۳   | ۳-۲ دوگانگی                                                                                                |
|      | ۴-۲ قضیه "لورنتز"                                                                                          |

|    |                                                                                     |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|
| ۶۹ | ۵-۲ پلاریزاسیون مواد دی الکتریک در میدان‌های الکتریکی با تغییرات سینوسی بر حسب زمان |
| ۷۹ | ۶-۲ مسائل                                                                           |

|     |                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------|
| ۸۳  | فصل ۳ امواج الکترومغناطیس صفحه‌ای                     |
| ۸۴  | ۱-۳ امواج صفحه‌ای در محیط بی تلفات                    |
| ۹۲  | ۲-۳ امواج الکترومغناطیس عرضی                          |
| ۹۶  | ۳-۳ پلاریزاسیون                                       |
| ۱۰۸ | ۴-۳ دوران محورهای مختصات                              |
| ۱۱۱ | ۵-۳ انتشار موج در محیط عمومی                          |
| ۱۱۷ | ۶-۳ انتشار موج در عایق کامل                           |
| ۱۱۸ | ۷-۳ انتشار موج در عایق خوب                            |
| ۱۲۰ | ۸-۳ انتشار موج در عایق با تلفات کم                    |
| ۱۲۲ | ۹-۳ انتشار موج در هادی خوب                            |
| ۱۲۴ | ۱۰-۳ انتشار موج در یک هادی کامل                       |
| ۱۳۱ | ۱۱-۳ انتشار موج صفحه‌ای یکنواخت در جهت اختیاری در فضا |
| ۱۳۷ | ۱۲-۳ سرعت گروه یا سرعت انتشار موج (سرعت موج)          |
| ۱۴۶ | ۱۳-۳ منابع امواج صفحه‌ای                              |
| ۱۴۸ | ۱۴-۳ مسائل                                            |

|     |                                             |
|-----|---------------------------------------------|
| ۱۵۵ | فصل ۴ توان الکترومغناطیس و بردار پوئین تینگ |
| ۱۵۶ | ۱-۴ تعمیم مفهوم جریان                       |
| ۱۵۹ | ۲-۴ انرژی (قضیه پوئین تینگ)                 |
| ۱۶۳ | ۳-۴ توان مختلط                              |
| ۱۷۹ | ۴-۴ مسائل                                   |

|     |                                                                |
|-----|----------------------------------------------------------------|
| ۱۸۳ | فصل ۵ انعکاس و انکسار امواج الکترومغناطیس صفحه‌ای              |
| ۱۸۳ | ۱-۵ قوانین «سنل»                                               |
| ۱۸۸ | ۲-۵ تابش عمودی بر یک مرز هادی مسطح                             |
| ۱۹۷ | ۳-۵ تابش عمودی بر یک مرز دی‌الکتریک مسطح                       |
| ۲۰۹ | ۴-۵ تابش مایل بر یک مرز هادی مسطح                              |
| ۲۰۹ | ۵-۴-۱ پلاریزاسیون عمودی (یا پلاریزاسیون افقی یا پلاریزاسیون E) |



|     |                                                                         |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|
| ۲۱۵ | ۴-۵-۲ پلاریزاسیون موازی ( یا پلاریزاسیون قائم یا پلاریزاسیون H )        |
| ۲۱۹ | ۵-۵-۵ تابش عمودی بر چند لایه دی الکتریک                                 |
| ۲۲۸ | ۵-۶-۶ امپدانس موج میدان کل                                              |
| ۲۳۱ | ۵-۷-۷ تبدیل امپدانس توسط دی الکتریک های چند گانه                        |
| ۲۳۴ | ۵-۸-۸ تابش مایل بر مرز دی الکتریک مسطح                                  |
| ۲۳۴ | ۵-۸-۱۱ قوانین «سنل»                                                     |
| ۲۳۶ | ۵-۸-۲ انعکاس کامل                                                       |
| ۲۴۰ | ۵-۸-۳ پلاریزاسیون عمودی                                                 |
| ۲۴۴ | ۵-۸-۴ پلاریزاسیون موازی                                                 |
| ۲۵۱ | ۵-۹-۹ انعکاس در سطح یک محیط هادی خوب                                    |
| ۲۵۵ | ۵-۱۰-۱۰ انعکاس و انکسار از سطح مسطح یک هادی غیر کامل ( $\sigma$ محدود ) |
| ۲۶۲ | ۵-۱۱ مسائل                                                              |
| ۲۷۹ | فصل ۶ موجبرهای امواج الکترومغناطیسی                                     |
| ۲۸۱ | ۶-۱ رفتار کلی موج در امتداد ابزارهای هدایت کننده یکتاواخت               |
| ۲۸۶ | ۶-۲ امواج الکترومغناطیسی عرضی TEM                                       |
| ۲۸۸ | ۶-۳ امواج مغناطیسی عرضی (موج $\bar{E}$ )                                |
| ۲۹۴ | ۶-۴ امواج الکتریکی عرضی ( موج H )                                       |
| ۳۰۳ | ۶-۵ مسائل                                                               |
| ۳۰۵ | فصل ۷ موجبر صفحات موازی                                                 |
| ۳۰۵ | ۷-۱ امواج مغناطیسی عرضی ( TM ) بین صفحات موازی                          |
| ۳۱۴ | ۷-۲ امواج الکتریکی عرضی ( TE ) بین صفحات موازی                          |
| ۳۲۱ | ۷-۳ موج الکترومغناطیسی عرضی ( TEM ) در موجبر صفحات موازی                |
| ۳۲۳ | ۷-۴ تضعیف در موجبرهای صفحات موازی                                       |
| ۳۳۲ | ۷-۵ ضریب تضعیف عایقی برای موجبر با صفحات موازی                          |
| ۳۳۴ | ۷-۶ قوانین نظری مدارات الکتریکی                                         |
| ۳۳۸ | ۷-۷ امواج الکترومغناطیسی عرضی در یک خط انتقال صفحات موازی               |
| ۳۴۳ | ۷-۸ خطوط انتقال صفحات موازی پرتلفات                                     |
| ۳۴۹ | ۷-۹ امواج الکترومغناطیسی عرضی ( TEM ) در خط انتقالی هم محور             |
| ۳۵۸ | ۷-۱۰ مسائل                                                              |

|     |                                            |
|-----|--------------------------------------------|
| ۳۶۳ | فصل ۸ موجبرهای مستطیلی                     |
| ۳۶۴ | ۸-۱ امواج TM در موجبر مستطیلی              |
| ۳۷۰ | ۸-۲ امواج TE در موجبر مستطیلی              |
| ۳۷۹ | ۸-۳ تضعیف در موجبر مستطیلی                 |
| ۳۸۱ | ۸-۳-۱ ضریب تضعیف برای مود TM               |
| ۳۸۴ | ۸-۳-۲ ضریب تضعیف برای مود TE               |
| ۳۹۱ | ۸-۴ موجبر مثلثی                            |
| ۳۹۵ | ۸-۵ موجبر دی‌الکتریک                       |
| ۳۹۵ | ۸-۵-۱ امواج TM در امتداد یک ورق دی‌الکتریک |
| ۴۰۲ | ۸-۵-۲ امواج TE در امتداد یک ورق دی‌الکتریک |
| ۴۰۸ | ۸-۶ مسائل                                  |

|     |                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------|
| ۴۱۵ | فصل ۹ موجبرهای استوانه‌ای                                |
| ۴۱۵ | ۹-۱ توابع بسل                                            |
| ۴۱۹ | ۹-۲ حل معادلات میدان در مختصات استوانه‌ای                |
| ۴۲۳ | ۹-۳ امواج TM و TE در موجبرهای دایروی                     |
| ۴۳۰ | ۹-۴ موجبر گوه‌ای دایروی                                  |
| ۴۳۳ | ۹-۵ موجبر هم‌محور                                        |
| ۴۳۹ | ۹-۶ ضرایب تضعیف برای امواج در موجبرهای استوانه‌ای دایروی |
| ۴۴۴ | ۹-۷ ضریب کیفیت Q برای موجبرهای دایروی و مستطیلی          |
| ۴۴۵ | ۹-۸ مسائل                                                |

|     |                                                                            |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|
| ۴۴۷ | فصل ۱۰ محفظه‌های تشدید                                                     |
| ۴۴۷ | ۱۰-۱ مقدمه                                                                 |
| ۴۵۱ | ۱۰-۲ تشدید کننده‌های حفره‌ای                                               |
| ۴۵۲ | ۱۰-۳ میدان الکترومغناطیسی در تشدید کننده حفره‌ای مستطیلی                   |
| ۴۵۲ | ۱۰-۳-۱ مدهای تشدید $TE_{mnl}$ در تشدید کننده حفره‌ای مستطیلی               |
| ۴۵۷ | ۱۰-۳-۲ مدهای تشدید $TM_{mnl}$ در تشدید کننده حفره‌ای مستطیلی               |
| ۴۶۳ | ۱۰-۴ ضریب کیفیت Q برای تشدید کننده‌های حفره‌ای مستطیلی                     |
| ۴۶۴ | ۱۰-۴-۱ ضریب تضعیف برای مدهای $TE_{mnl}$ در تشدید کننده‌های حفره‌ای مستطیلی |
| ۴۷۰ | ۱۰-۴-۲ ضریب کیفیت برای مدهای $TM_{mnl}$ در تشدید کننده‌های حفره‌ای مستطیلی |

|     |                                                                         |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|
| ۴۷۷ | ۵-۱۰ میدانهای الکترومغناطیس در تشدیدکننده‌های حفره‌ای استوانه‌ای دایروی |
| ۴۷۷ | ۱-۵-۱۰ مودهای تشدید $TE_{mnl}$ در تشدیدکننده حفره‌ای استوانه‌ای دایروی  |
| ۴۸۰ | ۲-۵-۱۰ مودهای تشدید $TM_{mnl}$ در تشدیدکننده حفره‌ای دایروی             |
| ۴۸۶ | ۶-۱۰ ضریب کیفیت $Q_R$ برای تشدیدکننده‌های حفره‌ای دایروی                |
| ۴۸۶ | ۱-۶-۱۰ مودهای $TM_{on}$                                                 |
| ۴۹۲ | ۲-۶-۱۰ مودهای $TE_{onl}$                                                |
| ۴۹۹ | ۷-۱۰ حفره هم محور تشدید                                                 |
| ۵۱۰ | ۸-۱۰ هارمونیکهای کروی                                                   |
| ۵۱۳ | ۹-۱۰ موج در مختصات کروی                                                 |
| ۵۱۹ | ۱۰-۱۰ تشدید کننده های کروی                                              |
| ۵۲۲ | ۱۱-۱۰ مسائل                                                             |

## فصل ۱۱ نظریه و کاربرد خطوط انتقال

|     |                                                                 |
|-----|-----------------------------------------------------------------|
| ۵۲۷ | ۱-۱۱ مقدمه                                                      |
| ۵۲۷ | ۲-۱۱ تحلیل میدانی خطوط انتقال                                   |
| ۵۲۹ | ۱-۲-۱۱ پارامترهای خط انتقال                                     |
| ۵۳۰ | ۲-۲-۱۱ استنتاج معادلات خط انتقال از تحلیل میدانی یک خط هم محور  |
| ۵۳۵ | ۳-۲-۱۱ ثابت انتشار، امپدانس و شار توان برای خط هم محور بی تلفات |
| ۵۳۷ | ۴-۲-۱۱ خطوط میکرو استریپ                                        |
| ۵۳۸ | ۳-۱۱ معادلات کلی خطوط انتقال                                    |
| ۵۳۹ | ۱-۳-۱۱ مشخصات امواج روی یک خط انتقال نامتناهی                   |
| ۵۴۲ | ۴-۱۱ پارامترهای خطوط انتقال                                     |
| ۵۴۷ | ۱-۴-۱۱ خط انتقال دو سیمی                                        |
| ۵۴۸ | ۲-۴-۱۱ خط انتقال هم محور                                        |
| ۵۴۹ | ۳-۴-۱۱ ثابت تضعیف حاصل از روابط توان                            |
| ۵۵۰ | ۵-۱۱ مشخصات امواج در خطوط انتقال محدود                          |
| ۵۵۲ | ۱-۵-۱۱ خطوط انتقال به عنوان عناصر مداری                         |
| ۵۵۸ | ۲-۵-۱۱ خطوط با پایاندھی مقاومتی                                 |
| ۵۶۷ | ۳-۵-۱۱ خطوط با پایاندھیهای اختیاری                              |
| ۵۷۳ | ۴-۵-۱۱ مدارهای خطوط انتقال                                      |
| ۵۷۶ | ۶-۱۱ حالت گذرا در خطوط انتقال                                   |
| ۶۸۱ | ۱-۶-۱۱ نمودار بازتابش                                           |
| ۶۸۴ |                                                                 |

|     |                                                           |
|-----|-----------------------------------------------------------|
| ۶۸۹ | ۱۱-۶-۲- تحریک پالس                                        |
| ۶۹۲ | ۱۱-۶-۳- خط با بار اولیه                                   |
| ۶۹۳ | ۱۱-۶-۴- خط دارای بار راکتیو                               |
| ۶۹۷ | ۱۱-۷- نمودار اسمیت                                        |
| ۶۰۸ | ۱۱-۷-۱- محاسبات نمودار اسمیت برای خطوط با تلفات           |
| ۶۱۰ | ۱۱-۸-۱- تطبیق امپدانس توسط خطوط انتقال                    |
| ۶۱۱ | ۱۱-۸-۱-۱- تطبیق امپدانس توسط مبدل ربع موج                 |
| ۶۱۵ | ۱۱-۸-۲- تطبیق تک شاخکی                                    |
| ۶۲۰ | ۱۱-۸-۳- تطبیق دو شاخکی                                    |
| ۶۲۵ | ۱۱-۹- کاربرد نمودار اسمیت برای انتشار موج صفحه ای یکنواخت |
| ۶۴۳ | ۱۱-۱۰- تمرینات                                            |
| ۶۵۸ | ۱۱-۱۱- مسائل                                              |
| ۶۷۱ | مسائل ضمیمه                                               |
| ۷۹۷ | واژه نامه                                                 |
| ۷۰۹ | مراجع                                                     |