٤٥٣٩

به نام ایزد مهربان

۹۳۲۴۳

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی- مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق

گرایش مخابرات - میدان

عنوان:

طراحی و تحلیل آنتن‌های بازتاب کننده دی‌الکتریک با ساختار چند لایه

۱۳۸۷ /۲/ ۵

دانشجو:

امید زندی

استاد راهنما:

دکتر زهرا اطلس باف

استاد مشاور:

دکتر کیوان فرورقی

شهریورماه ۱۳۸۶

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان

آقای امید زندی پایان نامه ۹ واحدی خود را **با عنوان طراحی و تحلیل آنتن های بازتاب کننده دی الکتریك** در تاریخ ۱۳۸٦/٦/۱۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر زهرا اطلس باف	استادیار	
استاد مشاور	دکتر کیوان فرورقی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد حکاک	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمدصادق ابریشمیان	~~استادیار~~ دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمد حکاک	استاد	

این نسخه به عنوان [illegible] مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

۹۳۲۴۳

دستور العمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت وکرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی ومعنوی دانشگاه و پژوهشگران لازم است اعضای هیات علمی دانشجویان دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح درمورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه وساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است موارد ذیل را رعایت نمایید:

ماده۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هر گونه بهره‌برداری ازآن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می‌باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشند.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه‌ای و بین المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسید ه و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هر گونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

این پروژه تحت قرارداد پژوهشی شماره ۱۹۱۹/۵۰۰/ ت مورخ ۸۶/۳/۱۱

از پشتیبانی مرکز تحقیقات مخابرات ایران بهره‌مند شده است.

تقدیم به خانواده عزیزم

پدر، مادر، بهاره، آرمیتا، حامد و نیلوفر

از استادان محترم
خانم دکتر زهرا اطلس باف
و آقای دکتر کیوان فرورقی
که در به انجام رساندن این پایان نامه،
بسیار مرا یاری دادند نهایت تشکر را دارم

چکیده

در این پایان نامه برای اولین بار، بازتاب کننده‌هایی که از لایه‌های دی‌الکتریک تشکیل شده‌اند، به عنوان جایگزینی برای بازتاب کننده‌های فلزی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با آرایش خاصی از این لایه‌ها می‌توان به تابعی خوش رفتار[1] برای ضریب بازتاب موج از سطح بازتاب کننده دست یافت که به معنای کنترل کردن میدان بازتابی است.

نشان داده خواهد شد که این بازتاب کننده‌ها بسیار شبیه به آنتن‌های آرایه‌ای عمل می‌کنند. لذا برای ایجاد پترن‌های دلخواه می‌توان از روش‌های مشابهی در هر دو استفاده کرد. به عنوان مثال، استفاده از الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه سازی است که به منظور طراحی آنتن‌های آرایه-ای و متعاقبا بازتاب کننده‌های پیشنهادی، در این پایان نامه به کار گرفته شده است.

تعمیم قضیه تصویر برای سطوح مسطح غیر فلزی نامحدود، محاسبه تابع حساسیت ضریب بازتاب به ضرایب دی‌الکتریک و ضخامت لایه‌ها، سنتز تحلیلی صفر یا ماکزیمم در زوایای دلخواه و بهینه کردن پهنای باند و پهنای بیم آن‌ها، تعریف سطح موثر بازتابی، امپدانس برآیند و محاسبه جریان‌های معادل سطحی و خواص اسکترینگ این بازتاب کننده‌ها، مباحث مطرح شده در این پایان نامه را تشکیل می‌دهند.

[1] - Well-behaved

key words واژه نامه

Array factor	ضریب آرایه
Brewster angle	زاویه بروستر
Dielectric Reflectors	بازتاب کننده‌های دی‌الکتریک
Effective Reflective Area	سطح موثر بازتابی
Flat multilayer dielectric reflector antenna	آنتن‌های بازتاب کننده ی دی‌الکتریک چندلایه مسطح
Fresnel coefficients	ضرایب فرنل
Geometrical Opticss approximation	تقریب نور هندسی
Maximum Synthesis	ترکیب ماکزیمم
Meta materials	فرامواد
Multilayer Dielectric Array	آرایه دی‌الکتریک چند لایه
Net impedance	امپدانس برآیند (شبکه)
Parallel Polarization	پلاریزاسیون موازی
Permeability	ضریب نفوذپذیری
Permittivity	ضریب گذردهی (دی‌الکتریک)
Perpendicular Polarization	پلاریزاسیون عمودی
Physical Optics approximation	تقریب نور فیزیکی
Sensitivity	حساسیت
Snell's law	قانون اسنل
Zero Synthesis	ترکیب صفر

فهرست مطالب

مقدمه ۱

فصل۱

انعکاس امواج الکترومغناطیسی از سطوح دی‌الکتریکی ۴

۱-۱ مقدمه ۴

۱-۲ ضرایب بازتاب از سطوح دی‌الکتریک ۵

۱-۳ بازتاب کننده‌های دی‌الکتریک با ابعاد نامحدود ۱۰

۱-۳-۱ سیم هادی الکتریکی با طول نامحدود و جریان ثابت ۱۰

۱-۳-۲ سیم هادی مغناطیسی با طول نامحدود و جریان ثابت ۱۳

۱-۴ بررسی قضیه تصویر برای سطوح غیر فلزی ۱۶

فصل۲

بازتاب کننده‌های دی‌الکتریک مسطح با ساختار چند لایه ۲۲

۲-۱ مقدمه ۲۲

۲-۲ آرایه‌های دی‌الکتریک چند لایه ۲۳

۲-۳ محاسبه پارامتری حساسیت برای آرایه‌های دی‌الکتریک چند لایه ۲۸

۲-۳-۱ محاسبه حساسیت نسبت به ضرایب دی‌الکتریک ۲۹

۲-۳-۲ محاسبه حساسیت نسبت به ضخامت لایه‌ها ۳۰

۲-۴ ترکیب صفر در زوایای دلخواه ۳۰

۲-۵ بازتاب کننده‌های تک لایه ۳۲

۲-۶ سنتز ماکزیمم در زاویه‌ای دلخواه ۳۶
۲-۷ پهنای باند و پهنای بیم صفر ۳۸
۲-۷-۱ پهنای باند ۳۸
۲-۷-۲ پهنای بیم ۴۰
۲-۸ مثالی عملی از بازتاب کننده‌های MDA ۴۱

فصل ۳

سطح موثر بازتابی و ضریب بازتاب معادل ۴۶
۳-۱ مقدمه ۴۶
۳-۲ سطح موثر بازتابی ۴۸
۳-۳ ضریب بازتاب معادل ۵۳
۳-۴ امپدانس برآیند و جریان‌های معادل سطحی ۵۷
۳-۴-۱ امپدانس برآیند ۵۸
۳-۴-۲ توزیع جریان‌های معادل بر سطح بازتاب کننده‌های مسطح غیر فلزی ۶۰
۳-۵ مقایسه نتایج با روش‌های عددی ۶۶

فصل ۴

نتیجه گیری و بررسی سایر طرح‌ها و ساختارهای پیشنهادی ۶۹
۴-۱ مقدمه ۶۹
۴-۲ بازتاب کننده‌های MDA با ساختار غیر مسطح ۷۱
۴-۲-۱ بازتاب کننده گوشه‌ای MDA ۷۲
۴-۲-۲ بازتاب کننده سهموی MDA ۷۳

۴-۳ استفاده از مواد دیگر در ساخت بازتاب کننده‌ها ۷۴
۴-۳-۱ بازتاب کننده‌های مغناطیسی مولد پلاریزاسیون دایروی ۷۵
۴-۳-۲ فیلتر کردن فضایی با استفاده از مواد متا ۸۱

مراجع ۸۳

فهرست شکل‌ها

شکل۱-۱ برخورد امواج مسطح به سطح دی‌الکتریک ... ۶
شکل۱-۲ نمودار ضرائب بازتاب در مواد مختلف نسبت به زاویه برخورد موج تابشی ... ۸
شکل۱-۳ سیم با طول نامحدود و جریان ثابت در برابر دیواره دی‌الکتریک ۱۰
شکل۱-۴ پترن میدان دور برآیند به ازای $x_0 = 0.5\lambda$ ۱۲
شکل۱-۵ پترن میدان برآیند به ازای $x_0 = 0.5\lambda$ ... ۱۳
شکل۱-۶ پترن میدان بازتابی به ازای $\varepsilon_r = 10$ و $x_0 = 0.5\lambda$ ۱۴
شکل۱-۷ پترن میدان برآیند ... ۱۵
شکل۱-۸ تصویر منبع پشت سطح دی‌الکتریک ۱۷
شکل۱-۹ آنتن عنصر جریان در مجاورت سطح دی‌الکتریک ۱۸
شکل۱-۱۰ شکل۱-۱۰ پترن اندازه میدان الکتریکی کل در صفحه ... ۲۱
شکل ۲-۱ بازتاب کننده ساخته شده از چندین لایه دی‌الکتریک ۲۴
شکل ۲-۲ ضریب بازتاب به دست آمده با استفاده از الگوریتم ژنتیک ۲۸
شکل ۲-۳ ضخامت هر لایه نسبت به طول موج در فضای آزاد برای ... ۳۲
شکل۲-۴ بازتاب کننده تک لایه ۳۳

شکل۲-۵ ضریب بازتاب لایه دی‌الکتریک به ازای ضخامت‌های ... ۳۵

شکل ۲-۶ ضریب بازتاب برای MDA طراحی شده در بخش ۲-۸ ۴۳

شکل۲-۷ خط طویل حامل جریان ثابت در برابر بازتاب کننده MDA ۴۴

شکل۲-۸ پترن بازتابی از بازتاب کننده و منبع نشان داده شده در شکل ۲-۷ ۴۵

شکل۳-۱ بازتاب کننده دی‌الکتریک تک لایه مسطح با مساحت نامحدود ۴۸

شکل۳-۲ بازتاب کننده چند لایه ۵۰

شکل۳-۳ مقادیر ξ به ازای h/R_p برای $n=4$ و ضرایب دی‌الکتریک مختلف ۵۲

شکل۳-۴ الف) تقریب نور هندسی از رفتار موج درون بازتاب کننده تک لایه مسطح ... ۵۴

شکل۳-۵ مقادیر η_x/η_0 در پلاریزاسیون عمودی به ازای ضریب بازتاب و ... ۵۹

شکل۳-۶ الف) بازتاب کننده واقعی و معادل ب) بازتاب کننده MDA با ... ۶۱

شکل۳-۷ بازتاب کننده MDA دایروی مسطح ۶۳

شکل۳-۸ دامنه میدان بازتابی در زاویه اسنل به ازای زوایای مختاف برخورد ۶۷

شکل۴-۱ بازتاب کننده گوشه‌ای ساخته شده از MDA ۷۲

شکل۴-۲ ضریب بازتاب برای سطوح نامحدود مغناطیسی بدون اتلاف و ایزوتروپیک ... ۷۶

شکل۴-۳ بازتاب کننده مغناطیسی غیر ایزوتروپیک به همراه دیواره فلزی ... ۸۰

مقدمه

از آنجا که تکنولوژی سیستم‌های انتقال بی‌سیم همه گـاه در حـال پیـشرفت - چـه از جهـت افزایش حجم اطلاعات و چه از جهت پوشش منطقه‌ای و دستیابی به برد بیش‌تـر - اسـت، همـواره نیاز به طراحی آنتن‌های رادیویی که به خواسته‌های جدید جامه عمل بپوشانند، احـساس مـی‌شـود. مسلما برای هر مقصود مخابراتی، آنتن‌های استفاده شده باید ویژگی‌های مشخـصی از لحـاظ شـکل پترن، پهنای باند، توان ارسالی، ملاحظات تطبیقی و ... داشته باشند که رنج وسیعی از آنـتن‌هـا - از ساده‌ترین آن‌ها مانند دوقطبی‌ها[1] تا پیچیده‌ترین آن‌ها مانند آنتن‌های پنجره ای[2]، مایکرواستریپ[3] ، اسلات[4]ها و یا آرایه‌هایی از آن‌ها- را شامل می‌شود. علاوه بر آنچه گفته شد، گاهی مسائل جـانبی نیز از اهمیت به سزایی برخوردار می‌شوند که شامل قیمت آنتن طراحی شده و یا قابلیت ساخت بـه

1- Dipoles
2- Aperture Antennas
3- Microstrip
4- Slots

صورت مقرون به صرفه، می‌شود. به عنوان مثال ممکن است برای طراحی یک فرستنده توان بالا با پترن خاص که ماکزیمم‌ها و مینیمم‌هایی در جهات مطلوب دارد، از سیستم آرایه‌ای استفاده شود که شامل چندین آنتن بازتاب کنندهی باشد ولی فضای مناسب جهت پیاده سازی در اختیار نباشد و یا به دلایل امنیتی بیشینه‌ای برای حجم فیزیکی سیستم توسط کارفرما معین شده باشد. جمیع این مسائل، طراحی هر گونه آنتن جدید را خالی از لطف نمی‌گذارد.

آن چه که در این پایان نامه مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است، استفاده از بازتاب کننده-های غیر فلزی به خصوص بازتاب کننده‌های دی‌الکتریک[1] در سیستم‌های تشعشعی می‌باشد. استفاده از انواع فلزات برای ساخت بازتاب کننده‌های الکترومغناطیسی مانند آنتن‌های بازتاب کنندهی عملی شایع است. فلزات با ضریب هدایت بسیار بالا بازتاب کننده کامل امواج الکترومغناطیسی هستند. بدین معنا که موج برخورد کننده با هر پلاریزاسیون و تحت هر زاویه‌ای به صورت کامل بازتاب می‌شود. این ویژگی باعث هم‌گونی در شکل پترن آنتن‌های بازتاب کنندهی هم نوع می‌شود. به عبارتی شکل هندسی بازتاب کننده، فرکانس کار و شکل پترن منبع اصلی، پترن میدان بازتاب شده را به صورت منحصر به فرد مشخص می‌کند. حال اگر در بازتاب کننده دی‌الکتریک‌ها جایگزین فلز شوند، ضریب دی‌الکتریک[2] - که می‌تواند در کل ماده ثابت و یا متغیر باشد- پارامتر دیگری در تعیین شکل پترن خواهد بود. زیرا در دی‌الکتریک‌ها، دامنه موج بازتابی تابعی از ضریب دی‌الکتریک و زاویه برخورد موج تابشی و پلاریزاسیون آن خواهد بود. با استفاده از چند لایه دی‌الکتریک می‌توان سطوح بازتاب کننده‌ای به دست آورد که در بعضی زوایا مانند سطح هادی موج تابشی را به صورت کامل بازتاب کند و در زوایای دلخواه دارای صفر باشد. این رفتار دقیقا مشابه رفتار فیلترهای میان نگذر است و می‌توان مدل خط انتقالی برای آن به دست آورد. دی‌الکتریک‌های چند لایه[3] از این نوع را می‌توان در ساخت موج برها و آنتن‌های بازتاب کنندهی به

1- Dielectric Reflectors
2- Permittivity
3- Multilayer dielectric

کار برد. مجموعه این ایده‌ها به طرح آرایه‌های آنتنی منجر می‌شود که عناصر آرایه را لایه‌های دی-الکتریک بازتاب کننده یک فید تشکیل می‌دهند.

در فصل اول پایان نامه به بررسی ایده کلی بازتاب کننده‌های غیر فلزی می‌پردازیم. این کار با بررسی ضریب بازتاب از سطوح دی‌الکتریک با ابعاد بی نهایت و نحوه اثر گذاری بر پترن بازتابی یک آنتن شروع شده و با تعمیم قضیه تصویر برای سطوح غیر فلزی و چگونگی استفاده از آن پایان می-پذیرد. فصل دوم به بررسی ساختارهای چند لایه و چگونگی آرایش آن‌ها می‌پردازد که به رابطه‌ای تحلیلی برای ضریب بازتاب منجر می‌شود. با داشتن این رابطه مباحثی مانند میزان حساسیت، ترکیب[1] صفر و ماکزیمم، پهنای باند و پهنای بیم به صورت تحلیلی پی‌گیری می‌شوند. در فصل سوم از دیدگاه جدیدی به این ساختارها نگاه خواهیم کرد. خواص اسکترینگ از این سطوح، سطح موثر بازتابی و ضریب بازتاب معادل، مباحث این فصل را تشکیل می‌دهند. مجموعه ایده‌هایی که می‌توان در ادامه این پایان نامه تعریف و پی‌گیری کرد در فصل چهارم آورده شده‌اند.

[1] - Synthesize

فصل۱

انعکاس امواج الکترومغناطیسی از سطوح دی‌الکتریکی

۱-۱ مقدمه

امواج الکترومغناطیسی در تمامی ناپیوستگی‌های محیطی که در آن پارامترهای ماکروسکوپی تغییر مقدار می‌دهند، خواص بازتابی و اسکترینگ[1] نشان می‌دهند. لذا هر سطحی از این نوع- به شرط قابل کنترل بودن- می‌تواند به عنوان یک بازتاب کننده امواج در نظر گرفته شود. این فصل از پایان نامه، مهم‌ترین فصل در بررسی بازتاب کننده‌های دی‌الکتریک است. اگرچه مباحث مطرح شده در آن از ساده‌ترین مباحث تئوری الکترومغناطیس است ولی پایه‌ای‌ترین ایده برای یک بازتاب کننده دی‌الکتریک را ارائه می‌دهد.

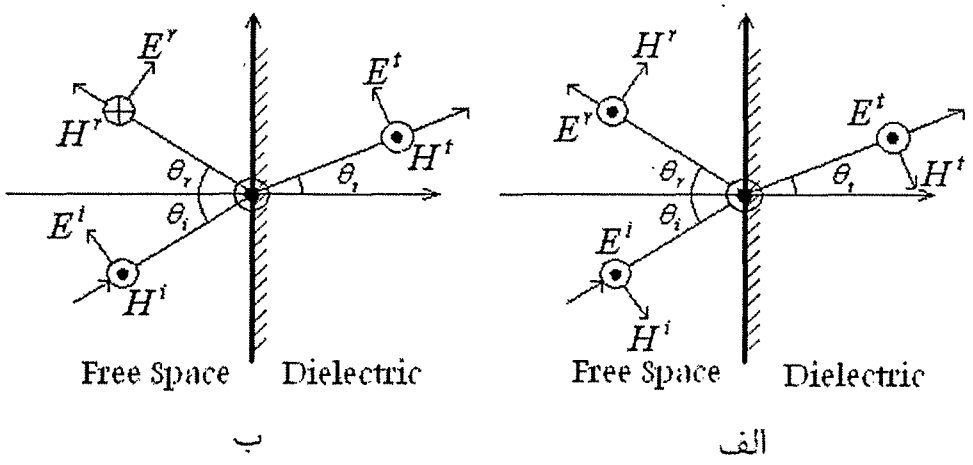
[1] - Scattering

بازتاب از سطوح غیر فلزی پدیده آشنایی است که در زندگی روزمره با آن بسیار مواجه می‌شویم. بازتاب از سطح صیقلی سنگ فرش‌های کف یک سالن و یا از سطح انحنا دار یک عینک آفتابی نمونه‌هایی از این دست‌اند. مشاهده تاثیر زاویه نگاه بر حجم انرژی‌ای که به چشم وارد می‌شود می‌تواند بیانگر حساسیت ضریب بازتاب به زاویه تابش برای سطوح غیر فلزی باشد که ایده‌ای برای کنترل پذیری آن است. در این فصل ابتدا مروری می‌کنیم بر برخورد موج با پلاریزاسیون‌های مختلف با سطوح دی‌الکتریک با ابعاد بی نهایت و سپس قضیه تصویر را برای این سطوح بسط می‌دهیم.

۱-۲ ضرایب بازتاب از سطوح دی‌الکتریک

در اینجا بررسی خود را با تحلیل برخورد مایل موج با سطح یک دی‌الکتریک در دو حالت پلاریزاسیون عمودی[1] و پلاریزاسیون موازی[2] آغاز خواهیم کرد. شکل۱-۱ را در نظر می‌گیریم. در این شکل موج تابشی با دو گونه پلاریزاسیون نشان داده شده است که به سطح یک دی‌الکتریک بی تلف[3] بر خورد کرده است.

1- Perpendicular Polarization
2- Parallel Polarization
3- Lossless



شکل۱-۱ برخورد امواج مسطح به سطح دی‌الکتریک. الف) پلاریزاسیون عمودی

ب) پلاریزاسیون موازی

شرایط مرزی در سطح دی‌الکتریک لازم می‌دارد تا مولفه‌های مماسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی پیوسته باشند و یا به عبارتی:

$$E^i{}_{\tan} + E^r{}_{\tan} = E^t{}_{\tan}$$
$$H^i{}_{\tan} + H^r{}_{\tan} = H^t{}_{\tan}$$

همچنین در امواج مسطح رابطه زیر بین میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی بر قرار است:

$$H = \frac{1}{\eta} a_\beta \times E$$

که در آن η امپدانس ذاتی محیط و a_β بردار یکه در راستای حرکت موج است. لذا با استناد به این روابط، دامنه امواج بازتابی و گذر کرده و همچنین زوایای انتشار آن‌ها به دست می‌آید[۴]. در مورد هر دو پلاریزاسیون روابط زیر بین زوایای بازتاب و گذر برقرار است.

$$\theta_r = \theta_i \qquad (۱-۱)$$
$$k_0 \sin\theta_i = k_d \sin\theta_t$$

در مورد پلاریزاسیون عمودی داریم

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E^r}{E^i} = \frac{\eta_1 \cos\theta_i - \eta_0 \cos\theta_t}{\eta_1 \cos\theta_i + \eta_0 \cos\theta_t} = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \qquad (۱-۲ \text{ الف})$$

$$T_{\perp} = \frac{E^t}{E^i} = \frac{2\eta_1 \cos\theta_i}{\eta_1 \cos\theta_i + \eta_0 \cos\theta_t} = \frac{2\cos\theta_i}{\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \qquad (۱-۲ \text{ ب})$$

و در مورد پلاریزاسیون موازی

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E^r}{E^i} = \frac{\eta_1 \cos\theta_t - \eta_0 \cos\theta_i}{\eta_1 \cos\theta_t + \eta_0 \cos\theta_i} = \frac{-\varepsilon_r \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\varepsilon_r \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \qquad (۱-۳ \text{ الف})$$

$$T_{\parallel} = \frac{E^t}{E^i} = \frac{2\eta_1 \cos\theta_i}{\eta_0 \cos\theta_i + \eta_1 \cos\theta_t} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_r}\cos\theta_i}{\varepsilon_r \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \qquad (۱-۳ \text{ ب})$$

این ضرائب که با فرض ضریب گذردهی مغناطیسی[1] نسبی برابر با یک به دست آمده‌اند به ضرائب فرنل[2] معروف هستند. در این جا با تمرکز بیش‌تر بر روی ضرائب بازتاب، اطلاعات مفیدی راجع به عملکرد دی‌الکتریک‌ها در نقش بازتاب کننده به دست می‌آوریم. در حالت کلی موج تابشی می‌تواند تحت هر زاویه‌ای مابین صفر تا ۹۰ درجه با سطح دی‌الکتریک برخورد کند.

1- Permeability
2- Fresnel coefficients