



دانشگاه زنجان

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی برق

# پایان نامه کارشناسی

## پایان نامه کارشناسی

### طراحی و کاربرد موجبرهای دی الکتریک

سازار ولدخانی

استاد راهنما:

جناب دکتر زلفخانی

مهر ۹۰

## فهرست مطالب

چکیده مطالب ..... ۳

مقدمه ..... ۴

### فصل اول: آشنایی با موجبرهای دی الکتریک

۱-۱) موجبرهای دی الکتریک ..... ۶

۱-۲) انواع موجبرهای دی الکتریک ..... ۶

۱-۳) کاربرد موجبرهای دی الکتریک ..... ۱۱

۱-۴) معادلات حاکم بر موجبرهای دی الکتریک ..... ۱۴

۱-۵) تعریف موجبرهای دی الکتریک لوحه ای ..... ۱۳

۱-۶) مکانیسم موجبر NRD ..... ۲۶

۱-۷) تلفات در موجبر NRD ..... ۲۷

۱-۸) موجبر نواری ..... ۲۹

۱-۹) معادلات حاکم در موجبرهای نواری ..... ۲۹

۱-۱۰) موجبرهای نواری ..... ۲۹

۱-۱۱) موجبرهای نواری ..... ۲۹

۱-۱۲) موجبرهای نواری ..... ۲۹

۱-۱۳) موجبرهای نواری ..... ۲۹

۱-۱۴) موجبرهای نواری ..... ۲۹

۳-۴) توزیع توان در موجبر دی الکتریک نواری..... ۳۶

فصل پنجم: شبیه سازی موجبر دی الکتریک نواری توسط CST

۵-۱) مختصری از نرم افزار CST..... ۴۳

۵-۲) شماتیک موجبر نواری در نرم افزار CST..... ۴۸

نتیجه گیری..... ۵۸

مراجع و مآخذ..... ۵۹



## چکیده مطالب

موجبرهای دی الکتریک ساختارهایی هستند که به منظور هدایت نور در مدارات

مجتمع به کار می‌روند. در فرکانس‌های بالا تلفات مربوط به دیواره‌ها بسیار بالاست و

لوحه‌ها و میله‌های دی الکتریک بدون دیواره‌های فلزی نیز می‌توانند مدهای امواج

هدایت شده را حمل نمایند.

متن حاضر، ابتدا به تعریف انواع موجبرهای دی الکتریک می‌پردازد و معادلات حاکم

در آن‌ها را برای سه نوع موجبر دی الکتریک تحت عناوین لوحه‌ای، نواری و NRD

مطرح می‌نماید. سپس یک موجبر نواری در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده و آنالیز

میدان‌ها و پارامتر S و توان در آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.



## مقدمه

### فلسفه و تاریخچه‌ی موجبر

دومین نقطه‌ی عطف در تاریخ مهندسی مایکروویو شناخت و توسعه موجبر می‌باشد. هرگز هیچ گزارشی

در مورد امکان انتشار امواج الکترومغناطیس در یک لوله فلزی تو خالی منتشر نکرد. اگرچه هوی سایید در

سال ۱۸۹۳ این امکان را در نظر گرفت ولی بعدها آن را رد کرد چرا که احساس کرد برای انتشار امواج

الکترومغناطیس وجود دو عدد هادی لازم است.

در سال ۱۸۹۷ لردریلی (جان ویلیام استروت) به طور ریاضی ثابت کرد که در موجبرها امکان انتشار امواج

امواج الکترومغناطیس وجود دارد چه سطح مقطع آن کروی و چه مکعبی باشد. او همچنین امکان وجود

مجموعه‌های بی‌نهایت از مدهای TE و TM را نشان داد و همچنین وجود فرکانس قطع نیز مشاهده گردید.

لردریلی عملکرد بسیار درخشانی در زمینه ریاضی فیزیک داشته و در زمینه‌هایی همچون آکوستیک،

سیالات و نور مطالعات فراوانی انجام داده است.

اگرچه هیچ آزمایشی در مورد مطالعات ریلی بر روی موجبرها انجام نشد ولی اولیور لوج در سال ۱۸۹۴

نشان داد که هنگامی که یک نوسان‌ساز سوزنی با یک لوله فلزی احاطه گردد امکان انتشار و تابش

مستقیم وجود خواهد داشت. پس از آن موجبرها به فراموشی سپرده شدند تا آن که مجدد در سال ۱۹۳۶

، دو دانشمند آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. جورج ساوت ورت که در شرکت AT&T در نیویورک کار

می‌کرد نشان داد که امکان انتشار امواج در یک لوله مسی که با آب پر شده است وجود دارد (سال

۱۹۳۲). پس از این آزمایش مقدماتی بود که شرکت AT&T به بحث موجبرها علاقه‌مند شده و کارهای

جدی را در این زمینه آغاز نمود چرا که توسط موجبرها می‌توانست خطوط انتقال با پهنای باند وسیع

بسازد. به زودی تحقیقات در مورد موجبر که توسط شلکونوف و همکارانش در AT&T انجام شده بود به

دست ساوت ورت رسید و وی نشان داد که وجود یک دی‌الکتریک مثل آب برای عملکرد موجبر الزامی

نمی‌باشد. در این تحقیقات همچنین مساله تلفات مورد بررسی قرار گرفت و ثابت شد که مد  $TE_{01}$  از

موجبر دایروی دارای فاکتور تلفاتی است که با افزایش فرکانس کاهش می یابد که برای ارتباطات با پهنای باند وسیع و تلفات کم ایده آل خواهد بود. (البته این بحث هیچ گاه در عمل پیاده نشد).

به علت مشکلات مالی و تجاری ساوت ورث نتوانست تحقیقات خود را منشر نماید تا آن که در ماه می سال ۱۹۳۶ یک سمینار علمی برگزار گردید. در همین سمینار بارو مقاله ای با موضوع مشابه مطرح نمود. بارو در دانشگاه MIT مشغول تحقیقات در زمینه آنتن ها و انتشار امواج الکترومغناطیس با طول موج کوتاه بود و منعکس کننده هایی با اشکال مختلف را بررسی نموده بود. این موضوع باعث گردید که ایده گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان و انعکاس کننده های با اشکال مختلف را بررسی نموده بود. این موضوع باعث گردید که ایده گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان و انعکاس کننده های با اشکال مختلف را بررسی نموده بود.

لوله تو خالی برای هدایت امواج الکترومغناطیس در ذهنش تداعی گردید. البته اولین آزمایش وی در سال

۱۹۳۵ در مورد انتشار امواج توسط موجبرها موفقیت آمیز نبود. از آن جا که بارو در آن زمان هیچ پیش زمینه تحقیقاتی در مورد موجبر نداشت لذا اطلاعی هم از فرکانس قطع نداشت. در آزمایشی که وی انجام داد طول موج فضای آزاد ۵۰ سانتی متر و قطر موجبر دایروی ۴.۵ سانتی متر بود در نتیجه موجبر کاملا پایین تر از فرکانس قطع بود و هیچ انتشار امواجی مشاهده نگردید. به زودی بارو مبنای تئوریک این

مطلب را بدست آورده و مجددا آزمایش خود را با یک لوله تو خالی با قطر ۱۸ اینچ انجام داد که نتیجه -

اش موفقیت آمیز بود. این آزمایش موفقیت آمیز در ماه مارس سال ۱۹۳۶ انجام گردید و گزارشات آن در

سمینار URSI\ IRE در واشنگتن در اول ماه می ۱۹۳۶ بیان شد. تا چندین سال، امواج سانتی متری

توسط پهنای باند مایکروویو، پوشش داده می شدند، که به منظور ارتباطات دور نظیر، تلفن، رادار

وسیستم های حساس مناسب بودند. با افزایش رو به رشد تقاضا، پهنای مایکروویو نیز به شدت دچار ازدحام

شدند. بدین ترتیب نیاز به یک پهنای موج میلی متری ایجاد گردید. تحقیقات انجام شده در این زمینه از

سال ۱۹۷۰ شروع شد. نتایج این تحقیقات در چندین کتاب در زمینه های موجبر میلی متری و ارتباط

اجزای مدارات امواج میلی متری مطرح گردید. علل افزایش تقاضا برای ساختارهای موجبر میلی متری؛ توان

کم آن ها، اندازه ی معقول، سادگی ساخت و مناسب بودن آن ها برای مدارات مجتمع می بود و به این

ترتیب چندین موجبر از جمله موجبرهای لوحه ای، نواری و NRD در این زمینه بوجود آمدند.

## فصل اول

### آشنایی با موجبرهای دی الکتریک

#### (۱-۱) موجبرهای دی الکتریک

موجبرهای دی الکتریکی ساختارهایی هستند که به منظور هدایت نور در مدارات مجتمع به کار می‌روند.

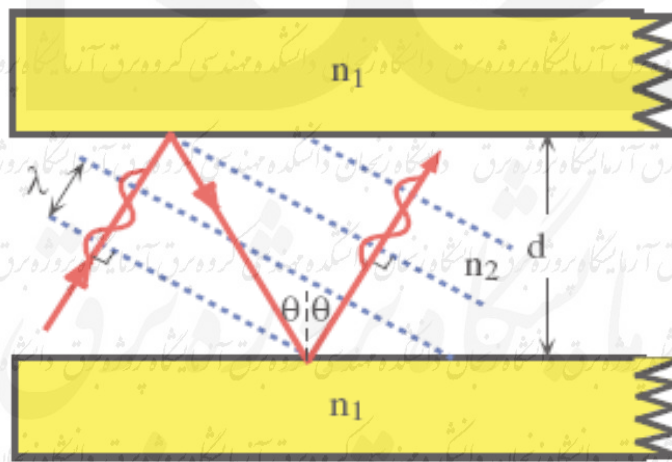
لوحه‌ها و میله‌های دی الکتریک بدون دیواره‌های هادی نیز می‌توانند مدهای امواج هدایت شده‌ای را که، اساساً در داخل محیط دی الکتریک محدود شده‌اند.

لوحه‌ی دی الکتریک شکل (۱-۱) را در نظر بگیرید. می دانیم که اگر در یک لوحه با گذردهی  $\epsilon_d > \epsilon_0$

موج مسطحی با زاویه‌ی برخورد  $\theta_i$  که بزرگتر از زاویه‌ی بحرانی است، به طور

$$\theta_c = \sin^{-1} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_d}}$$

(۱-۱)



شکل (۱-۱) پدیده بازتاب در موجبر



مایل به مرز بالایی آن برخورد نماید، کاملاً به سوی مرز پایینی منعکس می شود. همچنین موجی میرا در طول فصل مشترک (در جهت Z) وجود دارد که به طور نمائی در جهت عرضی خارج مرز تضعیف می شود.

موج منعکس شده از مرز بالایی با همان زاویه ی برخورد  $\theta_i > \theta_c$  به مرز پایینی برخورد خواهد کرد و به صورت مشابه بازتاب کلی خواهد یافت. این فرآیند هم چنان ادامه خواهد یافت و در نتیجه دو مجموعه

از امواج منعکس شده به صورت مکرر، وجود خواهند داشت. یک مجموعه مرز بالائی به سوی مرز پایینی، و دیگری از مرز پایینی به سوی مرز بالائی امتداد خواهد داشت. تحت این شرط که نقاط روی جبهه ی

موج یکسان هم فاز هستند، هر کدام از امواج منعکس شده، تشکیل یک موج مسطح یکنواخت تنها را می دهند. به این ترتیب دو موج مسطح یکنواخت متداخل داریم که یک نقشه ی تداخلی به وجود می آورند که همان نقشه ی مد موج انتشار یافته است. روشن است که ملزومات فازی در هر دو مرز منعکس کننده

به زاویه ی برخورد  $\theta_i$  بستگی دارد، زیرا  $\theta_i$  اختلاف فاز ناشی از بازتاب های کلی داخلی را تعیین می کند. تحلیل نشان می دهد که شرایط مورد نیاز فاز دقیقاً به روابط پراکندگی و مشخصاتی که در قسمت های

بعدی بدست می آوریم، ارتباط دارند. از این رو نتایج متکی بر معادلات ماکسول و شرایط مرزی، با امواج جهنده ناشی از بازتاب های کلی داخلی قابل تغییر است.

## ۲-۱) انواع موجبرهای دی الکتریک

موجبرهای دی الکتریک می توانند به چندین نوع طبقه بندی شوند.

یکی از ساده ترین موجبرهای دی الکتریک موجبر لوحه ای است. که به علت ساختار دو بعدی خود زیاد

کاربرد ندارند. در شکل (۲-۱) انواع مختلف از موجبرهای دی الکتریکی نشان داده شده است. در قسمت

(a) تصویر هدایتگری که با قرار گرفتن یک باریکه ی دی الکتریکی به روی یک پوشش فلزی ساختمان

شده است را می بینیم این باریکه (میله) دی الکتریک بر روی یک پوشش فلزی قرار دارد. این باریکه از موادی که دارای ثابت دی الکتریک بالایی مانند آلومینیوم هستند، ساخته شده است. و پوشش فلزی که در زیر آن قرار دارد در واقع یک آینه ی الکترومغناطیسی است.





هدایتگر در تله افتاده ی شکل (C) به منظور کاهش تلفات انتشار بوجود آمده است. [Itō-۱۹۸۰]

این موجبر با قرار گرفتن باریکه‌ی دی‌الکتریک در داخل محوطه‌ی فلزی ساخته شده است.

با این وجود مشکلاتی نظیر تولید و سایز بزرگ در آن‌ها وجود دارد. اما تلفات انتشار در مناطق خمیدگی

در آن‌ها به طور مناسبی کاهش می‌یابد.

در موجبرهای نشان داده شده در شکل‌های (d) و (f)، باریکه‌ی دی‌الکتریک بوسیله‌ی یک لایه‌ی دی

الکتریک پشتیبانی می‌شود.

هدایتگر شکل (d) هدایتگر شیاردار نامیده می‌شود. که دارای ساختار یکپارچه‌ای شامل یک لایه و شیار

ساخته شده از سرامیک سخت با ثابت دی‌الکتریک بالا است.

میدان‌های الکترومغناطیس در باریکه محبوس می‌شوند. این‌ها به ماشین‌های دقیق به عنوان هدایتگر نیاز

دارند زیرا که موادی با ثابت دی‌الکتریکی بالا در آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

موجبر نواری شکل (e) شامل لایه‌ی سرامیکی سخت و نوار پلاستیکی با ثابت دی‌الکتریک پایین است.

به این دلیل میدان‌های الکترومغناطیسی در لایه‌ی زیرین موجبر نواری متمرکز می‌شوند. به این ترتیب

براده برداری کردن دقیق برای موجبر نواری نیاز نیست.

تلفات انتقال در صورت استفاده از یک ماده‌ی سرامیکی با کیفیت بالا برای لایه، کاهش پیدا می‌کند. در

شکل (f) یک موجبر نواری وارون نشان داده شده است. [Itoh-۱۹۷۶] که در واقع وارون شده‌ی موجبر

نواری در شکل (e) می‌باشد. میدان الکترومغناطیسی در لایه‌ی با ثابت دی‌الکتریک بالا متمرکز می‌شود.

تلفات انتقال در موجبر نواری وارون کوچکتر از موجبر نواری است زیرا که از طریق صفحه‌ی فلزی جدا

می‌شود. موجبر نواری وارون یک ساختار کم دوام می‌باشد. از این رو تلفات انتشار در آن به بیش‌تر شدن

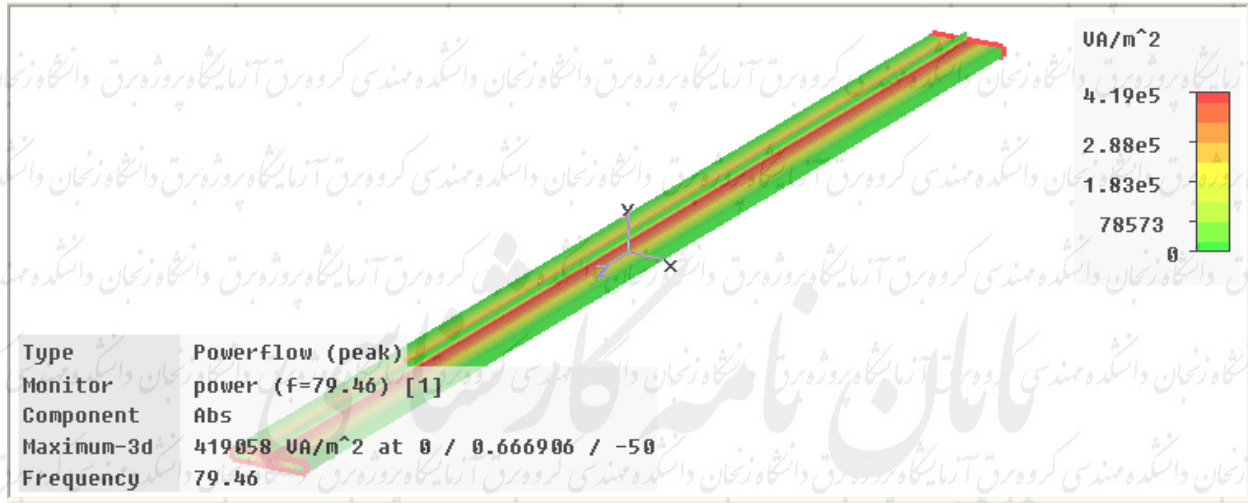
گرایش دارد. باریکه‌ی دی‌الکتریک این هدایتگرهای دی‌الکتریک بوسیله‌ی یک صفحه‌ی فلزی یا لایه‌ی

قرار گرفته در زیر آن پشتیبانی می‌شود.

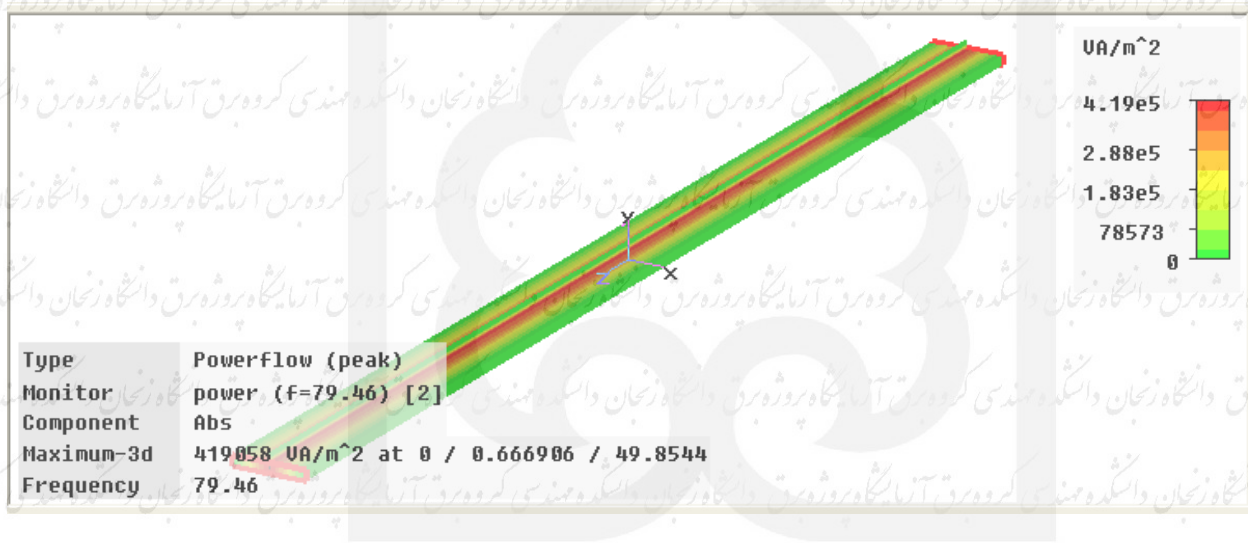
موجبر نشان داده شده در شکل (g) هدایتگر H نام دارد. لوحه‌ی دی‌الکتریک بین دیواره‌های کناری

شکل گرفته با پوشش‌های فلزی، نگاهداشته می‌شود. علت این نامگذاری این است که منطقه‌ی عبوری به

دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان



شکل (۲۸-۵) توزیع توان در موجبر مجزا شده با عایق باتوجه به پورت ۱) گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان



شکل (۲۹-۵) توزیع توان در موجبر مجزا شده با عایق با توجه به پورت ۲) گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان

همان طور که در مورد توان نیز مشاهده می کنید در نواحی نزدیک به نوار، تراکم بیش تری را داریم.

گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان

## نتیجه گیری

اندازه‌ی کوچک و سادگی ساخت ، موجبرهای دی‌الکتریکی را برای امواج میلی‌متری تا فرکانس‌های نوری مناسب می‌سازد. اگرچه این موجبرها در نواحی اتصال دیواره‌ها به دیگر ادوات دارای تلفات بسیاری می‌باشند. اما تغییرات بسیاری را در این ساختارهای ساده می‌توان انجام داد. بنابراین اگر بخواهیم





## مراجع و مأخذ:

[۱] Millimeter wave engineering and application, Bhartia and Bahl, ۱۹۸۴.

[۲] Flexible dielectric waveguides with power cores, Bruno, W.M, and Bridges, W.B, ۱۹۸۸. IEEE Trans, MTT-۳۶ pp ۸۸۲-۸۹۰

[۳] Inverted strip dielectric waveguide for millimeter-wave integrate IEEE Trans. MTT-۲۴, pp. ۸۲۱-۸۲۷.

[۴] New waveguide structures for millimeter-wave optical integrate circuits. IEEE Trans, MTT-۲۳ pp ۷۸۸-۷۹۶